พฤติกรรมการอบแห้งเมล็ดพริกไทยในหอฟลูอิดไดซ์เบดที่มีกรีบรูปตัววี

DRYING BEHAVIOR OF PEPPER CORN IN A V-RIBBED FLUIDIZED BED

อิทธิพล แก่งสันเทียะ

ITTIPOL KANGSANTHIA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-030-362

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

พฤติกรรมการอบแห้งเมล็ดพริกไทยในหอฟลูอิดไดซ์เบดที่มีครีบรูปตัววี

DRYING BEHAVIOR OF PEPPER CORN IN A V-RIBBED FLUIDIZED BED

อิทธิพล แก่งสันเทียะ

ITTIPOL KANGSANTHIA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 82684
วัน,เดือน,ปี 21 ก.ค. 2551

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-030-362

DRYING BEHAVIOR OF PEPPER CORN IN A V-RIBBED FLUIDIZED BED

ITTIPOL KANGSANTHIA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2008

KMITL-2008-EN-M-030-362

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมการอบแห้งเมล็ดพริกไทยในหอฟลูอิดไดซ์เบดที่มีครีบรูปตัววี

Drying Behavior of Pepper Corn in a V-Ribbed Fluidized Bed

นักศึกษา นายอิทธิพล แก่งสันเทียะ

รหัสประจำตัว 46060420

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จินดา	เจริญพรพาณิชย์	
ผศ.ธวัชชัย	นาคพิพัฒน์	
ดร.ณัฐวุฒิ	เดไปวา	
ผศ.ดร.วราคม	เนิดน้อย	
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 8 พฤษภาคม 2551 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 1 ชั้น 3 อาคาร A

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.รวีวรรณ ชินะตระกูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๓๐.....**เดือน**.....พฤษภาคม.....**พ.ศ.**.....๒๕๕๑.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการอบแห้งเมล็ดพริกไทยในหอฟลูอิดไดซ์เบดที่มีครีบรูปตัววี
นักศึกษา	นายอิทธิพล แก่งสันเทียะ
รหัสประจำตัว	46060420
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาพัฒนาเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและศึกษาหาเทคนิคการอบแห้งเทคนิคอื่นๆ ที่ให้อัตราการอบแห้งดีกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด โดยได้ทำการทดลองในหอทดลองรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และสูง 1 เมตร ในการทดลองใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 430 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานแห้ง) เริ่มทดลองใช้อากาศแห้งทางเข้าในช่วงที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 90 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วของอากาศภายในหอทดลองที่ 2, 2.5, 3 และ 3.5 เมตรต่อวินาที โดยทดลองให้เหลือความชื้นที่ 12% เปรียบเทียบเวลาที่ใช้อบในแต่ละกรณี โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วลมทางเข้าหอทดลองแต่ละแบบ และพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าอัตราการอบแห้ง

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของอากาศทางเข้าหออบมีอิทธิพลโดยตรงต่ออัตราการอบแห้งทุกเทคนิคและความเร็วมีอิทธิพลน้อยมากต่อเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด และพบว่าเมื่อติดตั้งผิวครีบรูปตัววีเข้าไปในเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดสามารถช่วยลดเวลาการอบแห้งได้ประมาณ 50 %

Thesis Title	Drying Behavior of Pepper Corn in a V-Ribbed Fluidized Bed
Student	Mr. Ittipol Kangsanthia
Student ID.	46060420
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvonge

ABSTRACT

The research is dealed with the study and development of a fluidized bed dryer. New techniques and features have been introduced to the dryer such as fluidized with conical bed and V-ribbed surface in the bed, to improve drying rate. The drying processes have been carried out in a rectangular bed. The bed is 80 mm x 200 mm in cross-section and 1000 mm high .In each experimental run, the pepper kernel with initial moisture content of about 430 % d.b. is employed for drying at inlet air temperature of 60 °C, 80°C or 90°C and the inlet air velocity is set to 2.0 m/s, 2.5 m/s ,3.0 m/s and 3.5 m/s. Drying time and weight of pepper kernels are measured in 5 minute interval until reaching 12% moisture content in each run . Effects of air velocity and temperature on drying rate are studied. Mathematical models for prediction of drying rate are developed.

The experimental results indicate that the air temperature has strong effect on drying rate which air velocity is found to be insignificant. Closer examination reveals that for a similar condition, the V-ribbed performs better and helps to decrease the drying time at about 50% less than the typical one.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องพฤติกรรมการอบแห้งเมล็ดพริกไทยในหอฟลูอิดไดซ์เบดที่มีครีบรูปตัววี สำเร็จลุล่วงไปได้โดยความอนุเคราะห์สนับสนุนจากหน่วยงาน และบุคคลต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในการสร้างเครื่องทดลองและอำนวยความสะดวกในการทดลองอย่างดีเสมอมา นอกจากนั้นงานวิจัยเรื่องนี้ยังได้รับคำแนะนำอย่างดียิ่งจากคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างสูงที่ทำให้งานวิจัยเรื่องนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ผู้ร่วมงานจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

ผู้ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและทำวิจัยของผู้วิจัยมาโดยตลอดได้แก่ คุณแม่ และคุณพ่อ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณในทุกประการที่ให้แก่งานวิจัยเรื่องนี้ไว้ ณ โอกาสนี้

อิทธิพล แก่งสันเทียะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....VIII

รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....XIV

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย.....2

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....3

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน 3

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....4

บทที่ 3 ทฤษฎี.....11

3.1 กระบวนการอบแห้ง.....11

3.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา.....11

3.1.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่.....12

3.1.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง.....12

3.2 นิยามความชื้นในวัสดุ.....13

3.3 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช.....14

3.4 ชนิดของเครื่องอบแห้ง.....14

3.5 การได้เปรียบ และเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน.....16

3.6 ความชื้นสมดุลของวัสดุ.....17

3.7 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังอบ.....17

3.8 ฟลูอิดไดเซชัน.....17

3.8.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน.....18

3.8.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด.....18

3.9 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน.....20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.9.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ_s) 20

3.9.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ε_m).....20

3.9.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน 21

3.9.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง.....23

3.10 ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน.....23

3.11 การหาความเร็วของก๊าซที่ทางเข้าฟลูอิดไดซ์เบด (u_0) 24

บทที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....25

4.1 สมการอบแห้งทางทฤษฎี.....25

4.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี.....27

บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....29

5.1 อุปกรณ์เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดชันหอทรงกระบอก.....29

5.2 อุปกรณ์เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยม.....29

5.3 แผ่นกระจายลม.....30

5.4 อุปกรณ์เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีครีบรูปตัววีแผ่นกระจายลม ขนาด 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอ.....30

5.5 อุปกรณ์เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีครีบรูปตัววีแผ่นกระจายลม ขนาด 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอ.....30

5.6 วิธีการทดลอง.....34

5.6.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน.....34

5.6.2 การทดลองการอบแห้งเมล็ดพืช.....34

5.7 พารามิเตอร์ในการทดลอง.....35

5.8 ขอบเขตการทดลอง.....36

5.9 ขั้นตอนการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์.....36

บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....37

6.1 ลักษณะและอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน.....37

6.2 เปรียบเทียบการอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกกับหอทรงสี่เหลี่ยม...38

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3 เปรียบเทียบการอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอแบบกรวย....46

6.4 อิทธิพลผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้า....54

6.5 อิทธิพลผลกระทบของความเร็วลมภายในหอทดลอง....61

6.6 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง....66

6.6.1 การเปรียบเทียบและวิจารณ์ผลการอบแห้งเม็ดพริกไทย....66

6.7 การหาค่าคงที่ของการอบแห้ง....69

6.7.1 แบบจำลองของ Newton....69

6.7.2 แบบจำลองของ Page....69

บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....76

7.1 สรุปผลการทดลอง....76

7.2 ข้อเสนอแนะ....76

บรรณานุกรม....77

ภาคผนวก....80

ภาคผนวก ก คุณสมบัติทางกายภาพของเบดที่เป็นเมล็ดพืช....81

ภาคผนวก ข การทดลองเปรียบเทียบแผ่นกระจายลมและการวิเคราะห์ด้านพลังงานไฟฟ้า....84

ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการวิจัยจากผู้วิจัยอื่น....87

ภาคผนวก ง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์....93

ประวัติผู้เขียน....100

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของมวลชีวภาพ....4

5.1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆในการทดลอง....32

6.1 ค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดพริกไทยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดจากรูปแบบจำลองของ Newton และ Page....73

ข.1 อัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแบบปกติ....86

ค.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอาหารบนพื้นฐานของ Fick's law....88

ค.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง....90

ค.3 สมการความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน....91

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง.....13
3.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน.....18
3.3 ความความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกับสัดส่วนช่องว่าง.....21
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วอากาศ 22
5.1 อุปกรณ์การทดลอง.....30
5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง.....31
5.3 ลักษณะของหอทดลองแบบต่างๆ.....32
5.4 ลักษณะของแผ่นกระจายลมและครีบรูปตัววีแบบต่างๆ.....34
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศ.....38
6.2 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 1.3 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C ,80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....39
6.3 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 1.8 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C ,80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....39
6.4 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C ,80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....40
6.5 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C.....40
6.6 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C.....41
6.7 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C.....41
6.8 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.3 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....42
6.9 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.8 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....42
6.10 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....43
6.11 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C.....43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.12 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C.....44

6.13 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C.....44

6.14 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดรูปทรงกระบอกและรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.8Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90^{o}C.....45

6.15 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดรูปทรงกระบอกและรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 2.0Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C.....45

6.16 เปรียบเทียบอัตราเร็วการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดรูปทรงกระบอกและรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C.....46

6.17 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 1.3 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....47

6.18 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 1.8 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....47

6.19 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 2.0 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....48

6.20 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 60 ^{o}C และที่ความเร็วลม 1.3 Umf, 1.8 Umf, 2.0 Umf.....48

6.21 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 80 ^{o}C และที่ความเร็วลม 1.3 Umf, 1.8 Umf, 2.0 Umf.....49

6.22 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 90 ^{o}C และที่ความเร็วลม 1.3 Umf, 1.8 Umf, 2.0 Umf.....49

6.23 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยความเร็ว 1.3 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....50

6.24 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยความเร็ว 1.8 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....50

6.25 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยความเร็ว 2.0 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.26 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C และที่ความเร็ว 1.3 Umf, 1.8 Umf, และ 2.0 Umf.....51

6.27 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C และที่ความเร็ว 1.3 Umf, 1.8 Umf, และ 2.0 Umf.....52

6.28 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C และที่ความเร็ว 1.3 Umf, 1.8 Umf, และ 2.0 Umf.....52

6.29 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดและเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่ความเร็ว 2.0 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C.....53

6.30 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดและเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่ความเร็ว 2.0 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C.....53

6.31 เปรียบเทียบอัตราเร็วการอบแห้งเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดและเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่ความเร็ว 2.0 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C.....54

6.32 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 2 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60^{o}C, 80^{o}C, 90^{o}C.....55

6.33 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 2.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C, 90^{o}C.....55

6.34 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 3 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C, 90^{o}C.....56

6.35 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 3.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80^{o}C, 90 ^{o}C.....56

6.36 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 2.0 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....57

6.37 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 2.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C 80^{o}C และ 90 ^{o}C.....57

6.38 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 3.0 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.39 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 3.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C 80^{o}C และ 90 ^{o}C.....58

6.40 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 2.0 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C 80^{o}C และ 90 ^{o}C.....59

6.41 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 2.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....59

6.42 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 3.0 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....60

6.43 แสดงอัตราการอบแห้งของเม็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 3.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C.....60

6.44 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วต่างๆและ อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C.....61

6.45 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วต่างๆและ อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C.....62

6.46 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วต่างๆและ อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C.....62

6.47 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C.....63

6.48 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C.....63

6.49 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C.....64

6.50 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C.....64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.51 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{O}C.....65

6.52 แสดงอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{O}C.....65

6.53 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{O}C.....66

6.54 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{O}C.....67

6.55 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3.5 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80^{O}C.....67

6.56 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3.5 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90^{O}C.....68

6.57 เปรียบเทียบอัตราเร็วการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3.5 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{O}C.....68

6.58 เปรียบเทียบอัตราเร็วการอบแห้งเม็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3.5 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{O}C.....69

6.59 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับ เวลาในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 60 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s.....70

6.60 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับ เวลาในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s.....71

6.61 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับ เวลาในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 90 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s.....71

6.62 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(t) กับ ln(-ln(MR))ในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 60 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s.....72

6.63 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(t) กับ ln(-ln(MR))ในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s.....72

6.64 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(t) กับ ln(-ln(MR))ในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 90 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s.....73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.65 การเปรียบเทียบการทำนายอัตราอบแห้งของเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ขนาดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอ ระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่ความเร็ว 3.5 m/s และอุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C.....74

6.66 การเปรียบเทียบการทำนายอัตราอบแห้งของเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ขนาดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอ ระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่ความเร็ว 3.5 m/s และอุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C.....74

6.67 การเปรียบเทียบการทำนายอัตราอบแห้งของเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ระหว่างแบบจำลองของ Newton และPage กับผลการทดลองที่ความเร็ว 3.5 m/s และ อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C.....75

ข.1 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่เปิดของแผ่นกระจายลมความเร็ว 1.1 Umf อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{O}C.....85

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์/คำย่อ	ชื่อ/ความหมาย
A	พื้นผิวทรงกลม, เมตร^2
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, เมตร^2/วินาที
d	มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg
d_p	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง, เมตร
d_p^*	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็งไร้มิติ
g	อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, เมตร/ซม.^{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
$\overline{M}_t$	ปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
MR	อัตราส่วนความชื้น
N_c	อัตราการระเหยน้ำต่อหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
n	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
p	ความดันย่อยของไอในอากาศ
p_{wb}	ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก
Δp	ความดันต่างของเบด, นิวตัน/เมตร^2
Re_{mf}	Reynolds number ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน
r	รัศมีทรงกลม, เมตร
SP	อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์/คำย่อ	ชื่อ/ความหมาย
T	อุณหภูมิอากาศ
T_{wb}	อุณหภูมิกระเปาะเปียก
t	ระยะเวลาในการอบแห้ง
u_0	ความเร็วของก๊าซในหอทดลอง
u_{mf}	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิไดเซชัน, เมตร/วินาที
u_t	ความเร็วตกอิสระของของแข็ง
u_t^*	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มิติ
V	ปริมาตรทรงกลม, เมตร^3
w	มวลของวัสดุ , kg
ε_m	สัดส่วนช่องว่าง
ε_{mf}	สัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบด
ϕ_s	ค่าความเป็นทรงกลม
λ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ
λ_n	รากของสมการเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์
μ	ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม-เมตร/วินาที
ρ_g	ความหนาแน่นของก๊าซ, กิโลกรัม/เมตร^3
ρ_p	ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัม/เมตร^3

บทที่ 1
บทนำ

ในปีหนึ่ง ๆ ประเทศไทยมีผลิตผลทางการเกษตรเพื่อจำหน่ายเป็นอาหารภายในประเทศและส่งออกไปยังต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ในกระบวนการผลิตที่สำคัญกระบวนการหนึ่งไม่ว่าจะเป็นการเก็บรักษาเมล็ดพืชเพื่อรอจำหน่ายหรือรอการแปรรูปคือ การอบแห้งเมล็ดพืชเพื่อลดความชื้น สิ่งที่สำคัญที่สุดในการอบแห้งคือ การที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นนี้ออกโดยการระเหยโดยอาศัยความร้อนที่ได้รับความร้อนแฝงของการระเหยความร้อนดังกล่าวจะต้องถูกถ่ายเทไปยังวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

เนื่องจากความชื้นมีผลทำให้เมล็ดพืชเสียหาย ซึ่งผู้ผลิตนั้นมักจะทำการลดความชื้นโดยการตากแดด ด้วยวิธีการนี้อาจเกิดปัญหาจากฝนตกขณะตากหรือไม่มีแสงแดดให้ทำการตาก อีกทั้งยังมีปัญหาจากแมลงและไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการอบได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการนำเครื่องอบแห้งมาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งขึ้นมาหลายชนิดด้วยกัน โดยเครื่องอบแห้งที่กำลังได้รับความนิยมคือเครื่องอบแห้งที่มีการทำงานแบบฟลูอิดไดเซชันซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ของแข็งที่มีรูปร่างเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้นสัมผัสกับของไหล โดยของแข็งจะเกิดการเคลื่อนที่มีลักษณะคล้ายของไหลซึ่งพบว่าสามารถอบแห้งได้ดี ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบต่างๆที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในรูปแบบของการกระจายและหมุนวนกล่าวคือเป็นการเปลี่ยนรูปแบบการไหลของอากาศ พบว่ามีข้อดีเหนือกว่าการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน คือสามารถใช้ได้ดีกับวัสดุที่มีความไวต่อความร้อนสูง เช่น เมล็ดพืช ดังนั้นการศึกษาการอบแห้งเมล็ดพืชโดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนรูปแบบการไหลของอากาศจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการค้นคว้าวิจัยและผลการทดลองที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชโดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนรูปแบบการไหลของอากาศในระดับอุตสาหกรรมต่อไป การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหารและมักจะเป็นปฏิบัติการหน่วยสุดท้ายเสมอ เนื่องจากวัสดุอบแห้งมีประเภทรูปร่างและสภาพมากมาย กรรมวิธีที่ประหยัดที่สุดจะต้องเข้าใจหลักการทำงาน ลักษณะพิเศษและโครงสร้างของเครื่องอบแห้งรวมทั้งมีการเลือกใช้อุปกรณ์และสภาวะเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมด้วย ในการศึกษาการอบแห้งมักจะมีการจำลองเครื่องมือการอบแห้ง ซึ่งมีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงและกำหนดสภาวะการทำงานให้ได้สภาวะเดียวกันกับการทำงานจริง ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ได้

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.1.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดชนิดหอทรงกระบอก, หอทรงสี่เหลี่ยมและหอแบบกรวย

1.1.2 ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่มีครีบรูปตัววี เทคนิคแผ่นกระจายลมมุม 45 องศาขนาด 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอ เทคนิคแผ่นกระจายลมมุม 45 องศาขนาด 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอ

1.1.3 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิความเร็วของกระแสลมร้อนและลักษณะของกระแสลมร้อนที่มีผลต่อการอบแห้ง

1.1.4 ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

1.1.5 ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นๆ

1.1.6 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทย

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชโดยเมล็ดพืชที่ใช้ทดลองได้แก่ เมล็ดพริกไทย

1.2.2 ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพริกไทยร้อยละประมาณ 80เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานเปียก (430 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

1.2.3 อบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิ 60, 80และ 90 องศาเซลเซียสความเร็วลมที่ใช้ในการ ทดลองได้แก่ 2 , 2.5 , 3 และ 3.5 m/s

1.2.4 เวลาในการอบแห้งของแต่ละหอทดลองขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นคือให้อบจนเหลือปริมาณความชื้นที่ 12 % และทุก ๆ 5 นาที จะนำมาชั่งโดยในการชั่งแต่ละครั้งไม่เกิน 10 วินาที

1.2.5 นำผลข้อมูลจากการทดลองของหอทดลองแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบเมล็ดพริกไทย

บทที่ 2
วรรณกรรมปริทรรศน์

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

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

Suksankraisorn, Patumsawad and Fungtammasan (2001) ทำการศึกษาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ในห้องเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-500องศาเซลเซียส อนุภาคที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายขนาด 500 μm และทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากการทดลองเทียบกับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากสมการการทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน ที่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา (ภาคผนวก ค) พบว่าผลที่ได้จากการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน มีค่าเกินกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการทดลอง อย่างไรก็ตามผู้วิจัยแนะนำว่าการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน จากสมการการทำนายนั้นจะใช้ได้ดีในช่วงที่แต่ละสมการกำหนด

Kozanoglu, Welti Chanes, Garcia Cuautle and Santos Jean (2002) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของไฮโดรไดนามิคของก๊าซฟลูอิดไดเซชัน ของอนุภาคขนาด 2250-7730 μm ในหอทดลองที่ควบคุมความดัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหอทดลองขนาด 100 มิลลิเมตร จากผลการทดลองแสดงเห็นว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในหอทดลองลดลง และช่องว่างในเบดที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน พบว่าไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลอง

การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ของเชื้อเพลิงมวลชีวภาพ ถูกศึกษาโดย Abdullah, Husain and Yin Pong (2003) โดยใช้อากาศเป็นของไหลในระบบ โดยพิจารณาความดันตกคร่อมเบดกับ Superficial air velocity และนำไปใช้หาค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของมวลชีวภาพ

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

จากผลการทดลองค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ของ ขี้เลื่อย เปลือกถั่วลิสง และ ถ่านหิน ซึ่งเป็น Geldart B มีค่าใกล้เคียงค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ที่ได้จากทฤษฎี และในงานวิจัยยังบอกว่าความหนาแน่นและช่องว่างของเบดเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของฟลูอิดไดซ์เบด

Mawatari, Tatemoto and Noda (2003) ได้หาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับชุดการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับการสั่น ซึ่งใช้กลุ่มของอนุภาค Geldart A และ C โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าทางทฤษฎีโดยใช้พื้นฐานสมการของ Ergun ซึ่งผลที่ได้คือ ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองสำหรับ Geldart A แต่ Geldart C มีค่าแตกต่างกันเพราะอนุภาครวมตัวกันเป็นก้อน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Lewis (1921) ตั้งสมมุติฐานการอบแห้งว่า กระบวนการอบแห้งของแข็งเกิดสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกน้ำระเหยจากผิวหน้าของของแข็ง ขั้นตอนที่สองเป็นการแพร่ของความชื้นมายังผิวหน้าก่อนแล้วระเหยออกไป จากสมมุติฐานนั้น Gilllialard และ Sherwood (1933) ทำการทดลองอบแห้งชิ้นไม้ พบว่า อัตราการอบแห้งขึ้นกับการแพร่ของความชื้นภายในชิ้นไม้ ซึ่งสนับสนุนสมมุติฐานของ Lewis (1929)

Luikov (1966) เป็นผู้เสนอความคิดที่ว่าการแพร่ของความชื้นเกิดจากผลต่างของอุณหภูมิ จากหลักการนี้ Luikov (1966) นำมาสร้างสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้น หรือสมการอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยเทอมการแพร่ของความชื้น การเคลื่อนที่ของความชื้นในหลอดแคปปิลารี และการแพร่ของความชื้นเนื่องจากความร้อน สมการของ Luikov (1966) นี้ มีผู้นำมาใช้กันแพร่หลายโดยเฉพาะกับการอบแห้งเมล็ดพืช และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

Thompson (1969) ได้ทำการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด (Shelled corn) ด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อนประเภทวัสดุกับลมร้อนเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน (concurrent flow layer) โดยทำการทดลองอบแห้ง 1 ช่วงความลึก (1 stage) อุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ 148 องศาเซลเซียส อบข้าวโพดที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้น 25% มาตรฐานเปียก ปรากฏว่าภายในระยะความลึก 5 เซนติเมตร ลมร้อนลดลงเหลือเพียง 82 องศาเซลเซียส และต่อมาได้ทำการศึกษาการอบแห้ง 3 แบบด้วยกัน คือ แบบลมร้อนไหลตัดกันกับการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืช, แบบลมร้อนไหลสวนทางกัน และแบบลมร้อนไหลในทิศทางเดียวกัน โดยทำการศึกษาจากแบบจำลองและการทดลอง ลมร้อนที่ใช้มีอุณหภูมิ 250 องศาฟาเรนไฮต์ อัตราการไหลของลมร้อน 60 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีต่อตารางฟุต ผลที่ได้พบว่าการอบแห้งแบบไหลในทิศทางเดียวกัน จะได้เมล็ดพืชที่มีคุณภาพดีที่สุด และในขณะทำการอบแห้งจะไม่มีการกลั่นตัวของไอน้ำ

อนุรักษ์ (2531)ศึกษาหาแนวทางการอบแห้งข้าวโพดแบบเป็นงวดที่เหมาะสมโดยศึกษาหาความสิ้นเปลืองของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด และคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้ง โดยการปรับอัตราการไหลของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งระหว่าง 5.50-45.0 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด และ 45-60 องศาเซลเซียส ตามลำดับโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 วิธีคือ 1. การอบแห้งแบบเป่าอากาศต่อเนื่อง และ 2. การอบแห้งแบบเป่าอากาศไม่ต่อเนื่อง และในแต่ละวิธียังแบ่งออกเป็น 1. การอบแห้งโดยใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำ อุณหภูมิสูง (LFHT) โดยที่อัตราการไหลของอากาศ 5.50-25.95 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด อุณหภูมิ 60-90 องศาเซลเซียส 2. การอบแห้งแบบใช้อัตราการไหลของอากาศสูง อุณหภูมิต่ำ (HFLT) โดยที่อัตราการไหลของอากาศ 30-45.0 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด อุณหภูมิ 45-55 องศาเซลเซียส 3. การอบแห้งแบบใช้อัตราการไหลอากาศต่ำอุณหภูมิต่ำ (LFLT) โดยที่อัตราการไหลของอากาศ 5.50-25.95 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด อุณหภูมิ 45-55 องศาเซลเซียส ความชื้นก่อนอบแห้งของเมล็ดข้าวโพด 15-26%มาตรฐานเปียก ความชื้นสุดท้าย 14% มาตรฐานเปียก จากผลการทดลองสรุปได้ว่า คุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลักการอบ และความสิ้นเปลืองพลังงาน วิธีที่ 1 จะพบว่าการอบแบบ LFLT ปริมาณแอลฟลาทอกซินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วน HFLT และ LFHT ปริมาณอัลฟลาทอกซินไม่เพิ่มขึ้น HFLT จะสิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุด และ LFLT สิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด วิธีที่ 2 พบว่า

ปริมาณแอลฟลาทอกซินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกกรณี และ HFLT สิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุด LFLT สิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด และจากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบใกล้สมดุลของ Soponronnarit (1988) พบว่าให้ผลไม่ต่างไปจากทดลองมากนัก

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

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

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

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

มาตรฐานแห้ง ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างเล็กน้อยกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศ และปริมาณการใช้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 15.2-27.8 และ 0.8-2.0 MJ/kg ในการระเหยน้ำตามลำดับ

Sharma (1999) ทำการอบแห้งมันฝรั่งและมะม่วงดิบที่ 4 รูปร่าง (แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก ทรงกระบอกผ่าครึ่ง และพีรามิด) และสามขนาด (10, 15 และ 20 mm) ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 $^{\circ}C$ โดยวิธีฟลูอิดไดเซชัน ต่อผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับแท่งสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก โดยใช้ผลเฉลยอนุกรมอนันต์ (Infinite series solution) บนพื้นฐานของกฎของ Fick (Crank, 1975) พบว่าสำหรับมะม่วงดิบมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรงกระบอกอยู่ในช่วง $1.08x10^{-9}$ และ $3.32x10^{-9}$ m^2/s และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง $4.09x10^{-10}$ และ $1.18x10^{-9}$ m^2/s และมันฝรั่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรงกระบอกอยู่ในช่วง $1.43x10^{-9}$ -$3.75x10^{-9}$ m^2/s และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง $7.55x10^{-10}$ -$1.40x10^{-9}$ m^2/s

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนความยาวไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะสูงเมื่ออัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นผิวต่ำ และทำการหาค่าคงที่ของการอบแห้งพบว่า ค่าคงที่ของการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น และจะสูงที่สุดที่อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นผิวต่ำๆ และความยาวไม่มีผลต่อค่าคงที่ของการอบแห้ง

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

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

อบด้วยอุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง แต่สีของพริกจะคล้ำมากขึ้นและไม่สามารถจำหน่ายได้ในราคาที่ดี

Syahrul, Hamdullahpur and Dincer (2002) งานวิจัยนี้ทำการจำลองทางความร้อนของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดของอนุภาคเปียกในการศึกษาถึงการขนถ่ายความร้อนและมวล และประสิทธิภาพทางความร้อนของเรื่องอบแห้ง โดยเทียบกับผลการทดลอง โดยศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ จากผลการทดลองประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดลดลงอย่างฉับพลัน เมื่อปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวโพดลดลง และลดลงต่ำสุดที่จุดสิ้นสุดกระบวนการการอบแห้ง จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการขนถ่ายความชื้นจากวัตถุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นของวัตถุ ผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง

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

ในงานวิจัยนี้สรุปว่าความชื้นจะระเหยเป็นไอได้ดี เมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น และช่องว่างในเบดมีผลกระทบต่ออุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งเล็กน้อย แต่ไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของเมล็ดพืช

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

Togrul and Pehlivan (2003) ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของผลเอพริคอท (apricot) โดยผ่านอากาศร้อนผ่านห้องอบแห้ง ในการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่ 0.2, 0.5, 1.0 และ 1.5 m/s และอุณหภูมิอากาศ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการอบแห้งกับเวลา และ

ปริมาณความชื้น ใช้ในการทดสอบกับแบบจำลองการอบแห้งทางคณิตศาสตร์ทั้ง 14 แบบ ซึ่งพบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ และได้ทำการพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใหม่ จากการทดลอง Logarithmic model ให้ความถูกต้องในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งผลเอพริคอทมากที่สุด การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วง Falling rate period ที่ได้จากผลการทดลองพบว่า การใช้เทคนิค Multiple regression analysis ให้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำ 97.3% ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล และอุณหภูมิภายในผลแอพริคอท

Senadeera, Bhandari, Young and Wijesinghe (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน ของอนุภาคทั้งสามรูปทรงคือ แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงกลม ที่ได้จากมันฝรั่ง 3 ขนาดในอัตราส่วนด้านต่อความยาว 1:1, 2:1 และ 3:1 สำหรับแท่งสี่เหลี่ยม และจากการตัดเมล็ดถั่วเขียวในอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 1:1, 2:1 และ 3:1 สำหรับทรงกระบอก และเมล็ดถั่วสำหรับทรงกลม 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) ทำการศึกษาสหสัมพันธ์ของ การหดเหี่ยว ความหนาแน่น และการแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวโพด และถั่วเขียว ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชัน งานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของวัสดุ ขนาด และการแพร่ของมวลซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น พบว่าอุณหภูมิของอากาศ และความเร็วของอากาศไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ การหดเหี่ยวและความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันเพียงสองอย่างของปริมาณความชื้น แต่สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและปริมาณความชื้น

Ertekin and Yaldiz (2004) ทำการอบแห้งมะเขือยาวโดยเทคนิคการอบแห้งของแผ่นบาง เพื่อหาคุณสมบัติของมะเขือยาว โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศตั้งแต่ 30-70 องศาเซลเซียส และความเร็วอากาศจาก 0.5-2.0 m/s และเปลี่ยนความหนาที่มะเขือยาวที่หั่นเป็นแผ่น โดยหาเวลาในการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองการอบแห้งกับแบบจำลองการอบแห้งของแผ่นบาง ผลกระทบของอุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการอบแห้งโดยใช้เทคนิค Multiple regression analysis จากผลการทดลองแสดงว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วอากาศจะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง และแผ่นของมะเขือยาวยิ่งบางทำให้อัตราการอบแห้งสั้นลง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศและเพิ่มความเร็วอากาศ จะเพิ่มความเข้มของสีของผลิตภัณฑ์ ความหนาของผลิตภัณฑ์ไม่มีผลต่อสีของ

ผลิตภัณฑ์ การเพิ่มความเร็วอากาศ จะเพิ่มอัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้น และมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิอากาศ 50 องศาเซลเซียส แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะ (2002) สามารถจำลองการอบแห้งของมะเขือยาวได้ดีที่สุด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งมากที่สุด และจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะแตกต่างกันไปตามตามชนิดของธัญพืช และสภาวะเงื่อนไขในการอบแห้ง อย่างไรก็ดีการพัฒนาแบบแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความสำคัญต่อการทำนายการอบแห้ง เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวธัญพืชได้ต่อไปในอนาคต โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาได้ออกเป็น 2 ส่วนคือ การพัฒนาเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและศึกษาหาเทคนิคการอบแห้งเทคนิคอื่นๆที่ให้อัตราการอบแห้งดีกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการอบแห้งเมล็ดพืช

บทที่ 3
ทฤษฎี

3.1 กระบวนการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้ง คือกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งมักขึ้นกับกลไกการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นการถ่ายเทความร้อนประเภทใด เช่น การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยทั่วไปมักจะใช้วิธีการพาความร้อน

3.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

ในกรณีที่อากาศไหลผ่านวัสดุชื้น ตัวอากาศร้อนจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุและพาไอน้ำออกไปด้วย ถ้าอากาศร้อนนั้นมีอุณหภูมิ และความชื้นคงที่จะพบว่ามีกระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก อัตราการอบแห้งจะคงที่ และเมื่ออบต่อไปจนกระทั่งถึงความชื้นค่าหนึ่ง จะพบว่าอัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลง เรียกความชื้นที่จุดนี้ว่าความชื้นวิกฤติ ถ้าความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤติ ในการอบแห้งจะมีเพียงช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ผิวของวัสดุจะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก การถ่ายเทความร้อน และมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งถ้าสภาวะสิ่งแวดล้อมมีค่าคงที่จะทำให้อัตราการอบแห้งคงที่ด้วย และในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อิทธิพลของอากาศภายนอกจะลดลงด้วย อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเนื้อวัสดุ ได้มีผู้นำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov (1966) ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุซึ่งเกิดขึ้นในแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องมาจากการไหลในรูเล็ก (Capillary flow) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงผิว (Surface Force)

2. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Liquid Diffusion)

3. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็กๆ (Surface Diffusion)

4. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion)

5. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปไอน้ำ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Diffusion)

6. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว และไอน้ำ เนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic Flow)

3.1.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate Drying Period)

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

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

เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุไม่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ แสดงว่าความร้อนทั้งหมดถูกถ่ายโอนจากอากาศไปยังวัสดุเพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอ จากสมการที่ 3.1 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

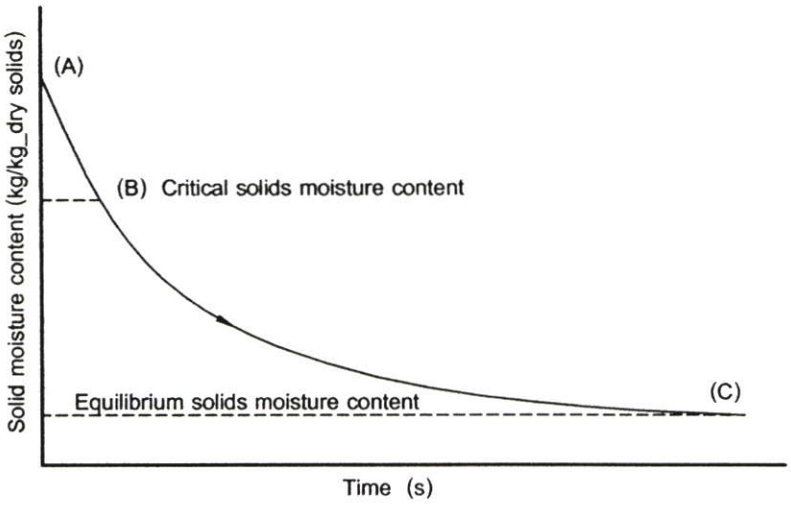
$$N_c = \frac{h_p}{\lambda}(T - T_{wb}) \tag{3.2}$$

เมื่อ h_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปสู่วัสดุ, λ คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและ T คือ อุณหภูมิอากาศ

3.1.3ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-Rate Drying Period)

ช่วง B ถึง C หลังจากที่ความชื้นบริเวณผิวหน้าของวัสดุถูกระเหยออกไปมากแล้ว อัตราการอบแห้งจะเริ่มเปลี่ยนแปลงจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่ตำแหน่ง B นี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content) ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนั้น การแพร่ของความชื้นมายังผิววัสดุช้ากว่าการระเหยของน้ำที่ผิวของวัสดุ ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะ

ถูกควบคุมด้วยการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุ โดยที่ผิวของวัสดุจะค่อยๆ แห้งและอุณหภูมิก็จะค่อยๆ สูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัสดุถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ



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

ให้กับวัสดุส่วนหนึ่งจึงมีความร้อนเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ใช้ในการระเหยน้ำ อัตราการอบแห้งจึงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความชื้นค่าหนึ่งแล้วความชื้นก็จะไม่ลดลงอีกเรียกว่า ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ดังรูปที่ 3.1 ที่จุด C โดยทั่วไปการอบแห้งเมล็ดพืชจะมีแต่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น มีสมการอบแห้งหลายรูปแบบทั้ง สมการทางทฤษฎี สมการกึ่งทฤษฎี และสมการเอมไพริคเดิลซึ่งได้จากการทดลอง ที่พยายามทำนายในช่วงความชื้นลดลง

3.2 นิยามความชื้นในวัสดุ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540)

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_w

$$M_w = \frac{w-d}{w} \tag{3.3}$$

ความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในวงการค้าโดยทั่วไปจะอ้างในรูปเปอร์เซ็นต์ $100M_w$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง, M_d

$$M_d = \frac{w-d}{d} \tag{3.4}$$

เมื่อ w คือ มวลของวัสดุ , kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

ความชื้นมาตรฐานแห้งนี้เป็นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ของกระบวนการอบแห้งทางทฤษฎีเพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่เกือบคงที่ผลผลิตทางเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย

3.3 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไปเรามักจะใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการ อุณหภูมิของอากาศจะสูงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปใช้งาน วิธี และเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้ง โดยมากเรามักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งเร็ว มีผลให้เครื่องอบแห้งที่ต้องใช้มีขนาดเล็กลง ทำให้การลงทุนต่ำ

3.4 ชนิดของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืช

เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชมีหลายแบบ สามารถแบ่งกว้างได้ 2 แบบ คือ เครื่องอบแห้งแบบ batch type และเครื่องอบแห้งแบบ continuous-flow type (วันชัย,2542)

3.4.1 batch type

เป็นเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดอยู่ในเครื่อง อาจบรรจุหรือไม่บรรจุถุงก็ได้ เมล็ดไม่มีการเคลื่อนที่จนกระทั่งเมล็ดแห้งจึงลำเลียงออกไป ตัวอย่างของเครื่องอบแห้งแบบนี้ได้แก่

bin drier เป็นเครื่องอบแห้งที่เมล็ดอยู่กับที่ เมล็ดจะถูกบรรจุอยู่ในถังขนาดใหญ่ที่มีพื้นเป็นตะแกรง โดยอากาศร้อนจะถูกเป่าผ่านเมล็ดจากทางด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน ความสูงของกองเมล็ดต้องไม่สูงเกินไป เพราะถ้ากองเมล็ดทางด้านบนจะยังคงชื้นอยู่

sack drier เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้อบเมล็ดที่บรรจุอยู่ในถุงหรือกระสอบโดยที่ถุงหรือกระสอบต้องทำจากวัสดุโปร่ง และไม่ควรบรรจุเมล็ดแน่นเกินไป ถุงจะถูกวางอยู่บนพื้นที่ยกสูงและมีช่องให้อากาศร้อนผ่านด้านล่างขึ้นมา

tray drier เป็นเครื่องอบแห้งที่มีวิธีคล้ายกับวิธี **sack drier** แต่เมล็ดจะบรรจุอยู่ในกระบะซึ่งกระบะจะมีด้านล่างเป็นตะแกรง อากาศร้อนจะเป่าจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเช่นกัน

circular drier หรือ **radial flow drier**เป็นเครื่องอบแห้งแบบถังสูงที่ปล่องตรงกลางทำด้วยตะแกรงเมล็ดจะถูกบรรจุในถังรอบปล่องตะแกรง อากาศร้อนจะเป่าผ่านรูตะแกรงเครื่องอบแห้งแบบนี้ได้แก่

3.4.2 continuous-flow type

เป็นเครื่องอบแห้งที่เมล็ดพันธุ์ถูกลำเลียงเข้าเครื่องอบและเครื่องที่อยู่ตลอดเวลา ไหลเวียนผ่านอากาศร้อนอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเมล็ดแห้ง ตัวอย่างของเครื่องอบแห้งแบบนี้ได้แก่

Column drier

เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้กับเมล็ดปริมาณมากโดยให้เมล็ดไหลผ่านช่องที่มีลมร้อนเป่าแบ่งได้ 3 แบบ

solid column

เครื่องอบแห้งแบบนี้ภายในถังบรรจุเมล็ดจะมีช่องทางลงเมล็ดอย่างน้อย 2 ช่อง ส่วนตรงกลางจะเป็นห้องลมร้อน ลมร้อนจะถูกเป่าออกทางด้านข้างสู่เมล็ด

baffle column

เครื่องอบแห้งแบบนี้เมล็ดจะมีการคลุกเคล้ากัน คือมีแผ่นทึบที่ทำเป็นแนวกลับทิศทางการไหลของเมล็ดให้สลับไปมา ลมร้อนจะถูกเป่าผ่านช่องระหว่างแผ่นสู่เมล็ด

belt drier

เป็นเครื่องอบแห้งที่มีสายพานลำเลียงให้เมล็ดเคลื่อนที่ผ่าน โดยผ่านในแนวระนาบ ลมร้อนจะถูกเป่าผ่านจากด้านล่างสู่ด้านบน

นอกจากตัวอย่างเครื่องอบแห้งที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเครื่องอบแห้งที่สามารถเป็นได้ทั้ง batch type และ continuous-flow type ได้แก่

rotating drum drier

เป็นเครื่องอบแห้งที่มีเมล็ดอยู่ในท่อหรือถังหมุน ทำให้เมล็ดที่อยู่ภายในถูกยกขึ้นและเทตกลงมา โดยลมร้อนจะเป่าผ่านไส้กลางตลอดเวลา

fluidized bed

เป็นเครื่องอบแห้งที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงมาก ลมร้อนจะถูกเป่าผ่านเมล็ดด้วยความเร็วสูงพอเพื่อที่จะเอาชนะแรงโน้มถ่วงของเมล็ดและให้เมล็ดลอยตัวอยู่ในอากาศได้

spouted bed

เป็นเครื่องอบแห้งที่ได้รับพัฒนามาจากเครื่องอบแห้งแบบ fluidized bed แต่จะแตกต่างกันที่การอบแห้งแบบ spouted bed มีการเคลื่อนที่ของเมล็ดในรูปแบบของการหมุนวน โดยใช้ลมร้อนเป่าจากด้านล่างเช่นกัน

3.5 การได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน

ข้อเปรียบเทียบการได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการอบแห้งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดกับเทคนิคอื่นๆ มีรายละเอียดดังนี้

ข้อได้เปรียบ

1. เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งซึ่งอุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด

2. มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก

3. จากคุณสมบัติที่คล้ายกันของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเติมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย

4. พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบดนิ่งที่จำพวกเม็ดของแข็งเท่ากันจึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร

ข้อเสียเปรียบ

1. เวลาของของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูง ๆ หรือเบดหลายชั้น เปลืองเงินลงทุนมาก

2. มักเกิดฟองก๊าซในเบดเมื่อทำงานกับก๊าซ ทำให้การสัมผัสไม่ดีเป็นการสูญเปล่า ถ้ายิ่งเป็นขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง

3. การทำงานมีข้อจำกัดเพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไปเม็ดของแข็งก็จะออกจากเบดไปพร้อมกับของไหล

4. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปียกหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

3.6 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย เราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุลค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

3.7 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังอบ

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

อุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้งมาก การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปมักทำให้คุณภาพของเมล็ดพืชลดลง อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้งจะแตกต่างจากอุณหภูมิของเมล็ดพืช เมื่อเริ่มการอบแห้ง อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะต่ำกว่าของอากาศ เมื่อเมล็ดพืชแห้งลงมากแล้ว อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะเพิ่มสูงขึ้น จนในที่สุดอาจมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศ การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เมล็ดพืชสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวแข็งตัว เมื่อโซนการอบแห้งเคลื่อนย้ายจากบริเวณผิวไปยังชั้นในๆ ของเมล็ด ทำให้ชั้นในสูญเสียความชื้นและหดตัวโดยแยกตัวออกจากผิวที่แข็ง ซึ่งอาจมีผลให้เกิดรอยร้าว แยกแตก ปริหรือหักในเมล็ด

3.8 ฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชัน เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็ง ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ด หรือชิ้นสัมผัสกับของไหลซึ่งไหลผ่านเม็ดของแข็งที่มีความเร็วสูงพอ ที่จะทำให้ของแข็งดังกล่าวเคลื่อนที่และประพฤติตัวคล้ายของไหล เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงที่รองรับ แล้วให้ของไหล ไหลผ่านเม็ดของแข็งกลุ่มนั้น หลังจากนั้นทำการเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นเรื่อยๆ เมื่อของไหลมีความเร็วค่าหนึ่ง จะเห็นเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวแล้วลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้ จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า

82684

ฟลูอิดไดซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไดเซชัน ซึ่งพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชันดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.8.1ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน

งานของฟลูอิดไดเซชันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ

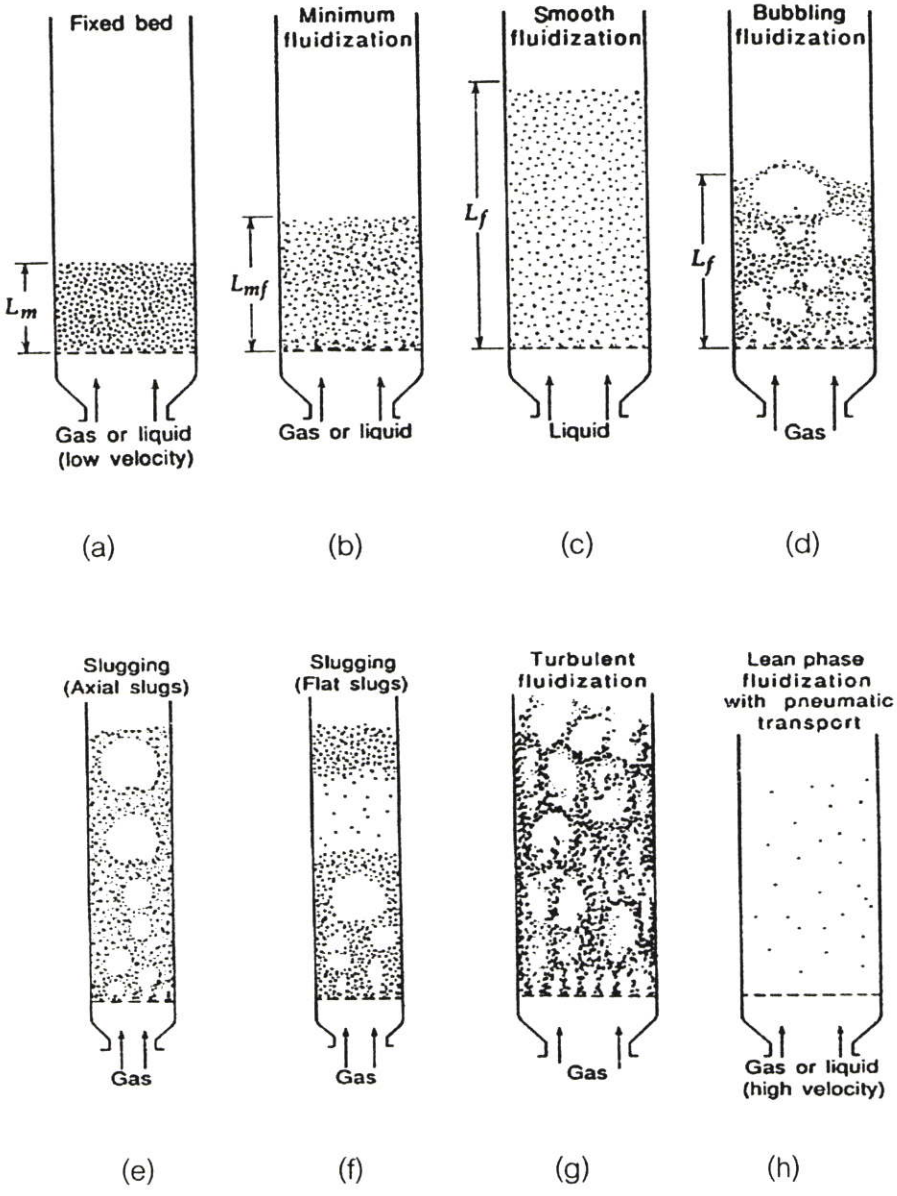
1. ฟลูอิดไดเซชันแบบสองสถานะ (Two-phase Fluidization) หมายความว่า ในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบไปด้วยสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือก๊าซฟลูอิดไดเซชัน (Gas Fluidization) และ ฟลูอิดไดเซชันเหลว (Liquid Fluidization)

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

3.8.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่ง หรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลองจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือ ผิวหน้าของเม็ดแข็งที่อยู่ในหอทดลอง

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอทดลองเรียบร้อยตามต้องการแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลองอย่างช้า ๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไดเซชัน หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิดไดซ์เบด แบบหนาแน่น (Dense – phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอทดลองอยู่แล้ว เบดลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิดไดซ์เบด เจือจาง (Diluted - phase fluidized bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งก็จะหลุดลอยออกจากหอทดลองไป



รูปที่3.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน [Daizo Kunii, 1991]

ฟลูอิดไดซ์เบด ที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอการลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เราเรียกเบดนี้ว่าเบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.2 (b) ฟลูอิดไดซ์เบด ที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด แล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิมแต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวเองขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมานี้จะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของ

ฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปตามภายในเบดจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างชุลมุนวุ่นวายเบดชนิดนี้เรียกว่าฟลูอิดไดซ์เบด วุ่นวาย ดังรูปที่ 3.2 (d)

3.9 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน

พฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดไดเซชันมักมีตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบอย่างมาก เพราะก่อนที่เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวหรือเกิดฟลูอิดไดซ์เบด เม็ดของแข็งจะพักอยู่บนตระแกรงรองรับ ปล่อยให้ของไหลไหลผ่านไปตามช่องว่างที่อยู่ในเบด ความเร็วของของไหลจึงมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเบด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

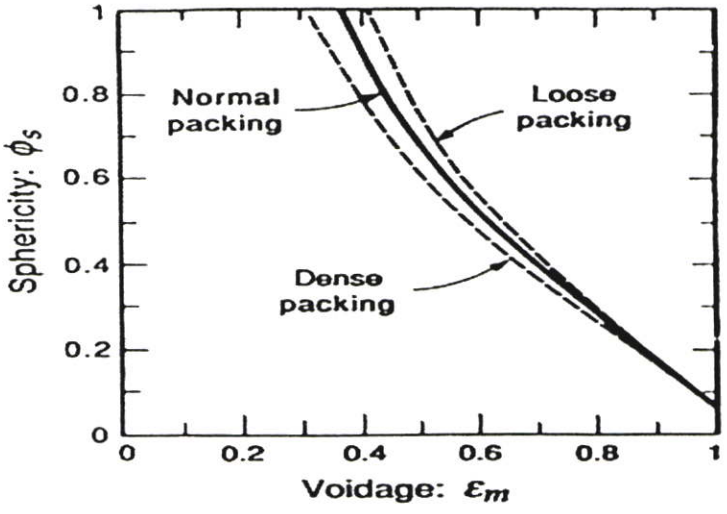
3.9.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ_s)

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

3.9.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ε_m)

กรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอตลอด เราสามารถคำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดทรงกลมในเบดทำให้เกิดขนาดของช่องว่างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป แต่ในกรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม Brown และ คณะ ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่างไว้ดังรูปที่ 3.3

ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน ช่องว่างในเบดจะมีการขยายตัว ช่องว่างในขณะนั้นเรียกว่าสัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบด (ε_{mf})



รูปที่ 3.3 ความความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกับสัดส่วนช่องว่าง

(Kunii, D. Levenspiel, O. 1991)

WEN และ YU, 1966 ได้เสนอผลคูณของช่องว่างต่ำสุดและความเป็นทรงกลม เป็นค่าคงที่และอาจสังเกตได้จากการทดลองของเขาโดยใช้วัตถุชนิดต่าง ๆ บรรจุลงในเบดแล้วสรุปว่าวัตถุอย่างหนึ่งก็จะมีสัดส่วนช่องว่างอันหนึ่ง ดังสมการ

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

3.9.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน, u_{mf}

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งเองกับแรงพยุงจากการไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหลซึ่งเขียนและจัดรูปใหม่ได้เป็น

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

โดยการประยุกต์สมการ (3.6) กับสมการความดันตกของ ERGUN จะได้

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

โดยที่

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

เมื่อ Re_{mf} คือ Reynolds number ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

d_p คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง, เมตร

g คือ อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, เมตร/ซม.^{2}

L_{mf} คือ ความสูงต่ำสุดของเบด, เมตร

Δp คือ ความดันต่างของเบด, นิวตัน/เมตร^2

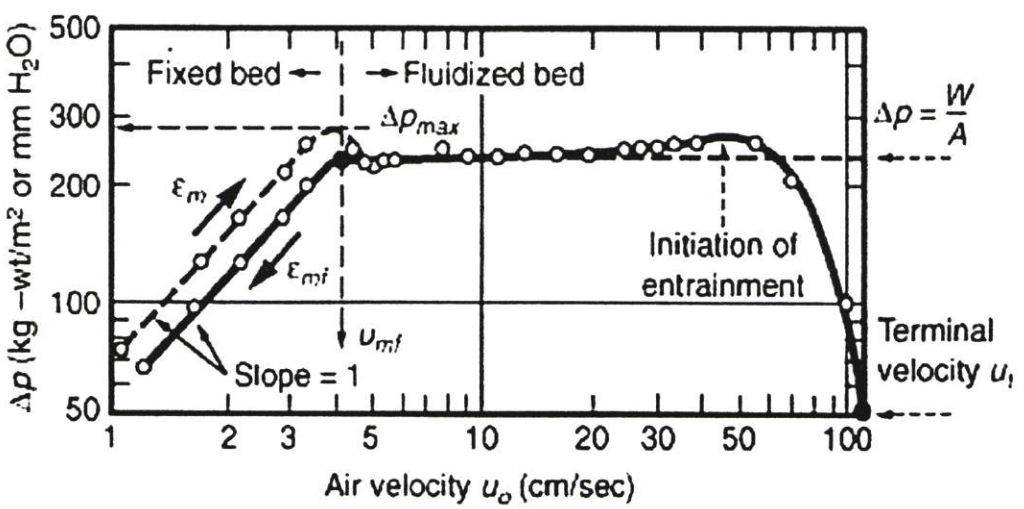
u_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน, เมตร/วินาที

μ คือ ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม-เมตร/วินาที

ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ, กิโลกรัม/เมตร^3

ρ_p คือ ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัม/เมตร^3

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันสามารถหาได้อีกวิธีหนึ่ง จากการทดลองโดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วอากาศ

3.9.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง, u_t

ในฟลูอิดไดเซชันนั้นมีขอบเขตความเร็วของของไหลอยู่สองอย่างคือ ขอบเขตแรก คือ ความความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน และขอบเขตที่สองคือ ความของของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งลอยตัวหลุดออกจากหอทดลอง ความเร็วนี้มีขนาดเท่ากับความเร็วตกอิสระของของแข็ง

Haider และ Levenspiel ได้เสนอการหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็ง ดังสมการ

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

เมื่อ d_p^* คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็งไร้มิติ

โดยที่ $0.5 < \varphi_s < 1$ และ

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

ดังนั้นความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ u_t^* คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มิติ

3.10 ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน

ปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดซ์เบด ที่เกิดจากก๊าซที่มีความซับซ้อนอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ผ่านเข้าเบด ขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็งที่ใช้เป็นเบด ในขณะที่เบดเริ่มมีลักษณะเป็นฟลูอิดไดเซชันใหม่ๆ จะมีส่วนคล้ายกับลักษณะของเบดที่เกิดในฟลูอิดไดซ์ของของเหลว แต่ถ้าความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จะมีก๊าซบางส่วนรวมตัวกัน ก่อตัวเหมือนถุงอากาศ ซึ่งเรียกว่า ฟองก๊าซ

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และแผ่นกระจายของไหล ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

3.10.1. Channeling

เกิดการผ่านไปของก๊าซเป็นช่องๆ โดยที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่เคลื่อนที่ แต่บริเวณข้างเคียงจะอยู่กับที่

3.10.2. Bubbling

อนุภาคของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบด จะเคลื่อนที่ตลอดเวลา และสม่ำเสมอในเบด แต่ถ้าบริเวณใดมีของแข็งอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น หรือไม่มีเลย เราเรียกบริเวณนั้นว่า Bubbling

3.10.3. Slugging

การเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซ จนได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหอทดลอง มีการแยกตัวของอนุภาคของแข็งเป็นชั้นๆ

3.10.4. Spouted Bed

คือ การที่ก๊าซไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของของแข็งเท่านั้น ด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของอนุภาคน้อย เมื่อเทียบกับบริเวณด้านข้าง

3.11 การหาความเร็วของก๊าซในหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบด (u_0)

การหาความเร็วของอากาศในหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบด ที่ทำให้อนุภาคภายในหอทดลองสามารถลอยตัวอย่างสม่ำเสมอในหอทดลอง ความเร็วที่แนะนำคือประมาณ 1.3 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันแต่ต้องน้อยกว่าความเร็วสูงสุดที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน (Soponronnarit และ คณะ, 1995)

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

บทที่ 4
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การอบแห้งเมล็ดธัญพืชโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงการอบแห้งลดลง จากลักษณะปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้มีการนำแบบจำลองในทางคณิตศาสตร์มาอธิบายการแพร่ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ

4.1 สมการอบแห้งทางทฤษฎี (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

ได้มีผู้นำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov (1966) ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ซึ่งเกิดขึ้นในแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องมาจากการไหลในรูเล็ก (Capillary flow) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงผิว (Surface Force)

2. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Liquid Diffusion)

3. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็กๆ (Surface Diffusion)

4. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion)

5. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปไอน้ำ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Diffusion)

6. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว และไอน้ำ เนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic Flow)

จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุดังกล่าว Luikov ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุ และความดันรวม แต่เนื่องจากแบบจำลองของ Luikov มีความยุ่งยากมาก เพราะมีตัวแปร และค่าพารามิเตอร์หลายตัว ดังนั้นจึงยังไม่มีการนำแบบจำลองนี้ไปใช้

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ในระบบแกนโพลาร์สำหรับหนึ่งมิติสำหรับการแพร่ความชื้นในวัสดุจะได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t}=D\left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2}+\frac{c}{r}\frac{\partial M}{\partial r}\right] \tag{4.1}$$

โดยที่ c=0 สำหรับการแพร่ความชื้นในวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก

c=1 สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก

c=2 สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม

เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

t คือ ระยะเวลา, วินาที

r คือ รัศมีทรงกลม, เมตร

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, เมตร^2/วินาที

โดยเงื่อนไขที่สภาวะเริ่มต้น และขอบเขตสามารถเขียนได้ว่า

$$M(r,0)=M_{in} \tag{4.2}$$

$$M(r_0,t)=M_{eq} \tag{4.3}$$

เมื่อ M_{in} คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ปริมาณความชื้นที่สภาวะสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

คำตอบของสมการ (4.1) ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขตตามสมการ (4.2) และ (4.3) สำหรับวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมากสามารถเขียนได้ว่า

$$MR=\frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left[-\frac{(2n+1)^2\pi^2}{4}X^2\right] \tag{4.4}$$

สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลมสามารถเขียนได้ว่า

$$MR=\frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\exp\left[-\frac{n^2\pi^2}{9}X^2\right] \tag{4.5}$$

และสำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมากสามารถเขียนได้ว่า

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left[-\frac{\lambda_n^2}{4} X^2 \right] \tag{4.6}$$

เมื่อ λ_n คือ รากของสมการเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์

โดยที่

$$MR = \frac{\overline{M}_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \tag{4.7}$$

และ

$$X = \frac{A}{V} \sqrt{Dt} \tag{4.8}$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

$\overline{M}_t$ คือ ปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

A คือ พื้นผิวทรงกลม, เมตร^2

V คือ ปริมาตรทรงกลม, เมตร^3

จากสมการที่ (4.4), (4.5) และ (4.6) จะเห็นได้ว่าสมการประกอบด้วยเทอมที่ไม่สิ้นสุด และในเทอมส่วนท้ายๆ จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นเราอาจตัดเทอมท้ายๆ ออกไปได้ โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรก หรือสองสามเทอมแรกเท่านั้น ซึ่งคำตอบสุดท้ายที่ได้อาจไม่ผิดไปมากนัก โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก และรัศมีทรงกลมมีค่าน้อยๆ

4.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

จากสมการ (4.5) ถ้าพิจารณาเฉพาะเทอมแรก (Brooker และ คณะ, 1981) จะได้

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D}{r^2} t \right] \tag{4.9}$$

หรือ

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp(-Kt) \tag{4.10}$$

สมการ (4.5) และ (4.9) จะให้ค่าใกล้กันมากเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก และค่าความแตกต่างจะน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ถ้าอัตราส่วนของ $\pi^2 Dt/r^2$ มีค่ามากกว่า 1.2

เราสามารถสร้างแบบจำลองการอบแห้งง่ายๆ โดยการตั้งสมมติฐานว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่ แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของปริมาณความชื้นเมล็ดพืช และ ปริมาณความชื้นสมดุล ข้อสมมติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน สมการดังกล่าวเขียนได้ว่า

$$\frac{d\overline{M}}{dt} = k\left(\overline{M} - M_{eq}\right) \tag{4.11}$$

ใช้เงื่อนไขสภาวะเริ่มต้น $M_0 = M_{in}$ คำตอบของสมการ (4.11) คือ

$$MR = \exp\left(-k_1 t\right) \tag{4.12}$$

สมการ (4.12) คือสมการ Simple logarithmic model หรือแบบจำลองของ Newton
เมื่อ K , k และ k_1 คือค่าคงที่ของการอบแห้ง, วินาที$^{-1}$
ในการปรับปรุงสมการ Simple logarithmic model สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$MR = \exp\left(-k_2 t^n\right) \tag{4.13}$$

สมการ (4.13) คือสมการ Modified logarithmic model หรือแบบจำลองของ Page
เมื่อ k_2 และ n คือค่าคงที่ของการอบแห้งของ Page

บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

5.1 อุปกรณ์เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดเซชันหอทรงกระบอก

เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยหอทดลองรูปทรงกระบอกดังรูปที่ 5.3 รายละเอียดดังนี้หอทดลองรูปทรงกระบอกทำจากอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.14 เมตร และความสูง 1 เมตร แผ่นกระจายอากาศเป็นแบบเจาะตรงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตรพัดลมอากาศขนาด 7.46 กิโลวัตต์ตามรูปที่ 5.2 จ. มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบขับอากาศผ่านท่อโดยที่ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วยออริฟิสมิเตอร์ดังรูปที่ 5.2 ง. แล้วอ่านค่าที่มานอมิเตอร์ดังรูปที่ 5.2 ช. อากาศในเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดจะถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยขดลวดความร้อนขนาด 12 กิโลวัตต์ พร้อมด้วยการปรับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิการอบแห้ง และห้องทำความร้อนถูกหุ้มด้วยฉนวนจนถึงทางเข้าหอทดลอง ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 15 นาที ในการควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนด อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าหอทดลองจะอยู่ที่ 90°C โดยจะทำการวัดอุณหภูมิภายในเบดด้วยเทอร์โมคับเปิลชนิด K ดังรูปที่ 5.2 ก.ในการทดลองเมล็ดพริกไทยจะถูกวัดความชื้นที่ลดลงจากค่าน้ำหนักเมล็ดพริกไทยที่เปลี่ยนไปซึ่งจะทำการวัดทุกๆ 5 นาทีโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลดังรูปที่ 5.2 ฉ. ที่มีค่าความละเอียด 0.01 กรัม

5.2 อุปกรณ์เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอรูปทรงสี่เหลี่ยม

เครื่องอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอทดลองหน้าตัดสี่เหลี่ยมตามรูปที่ 5.3 ทำจากอะคริลิกใสขนาดกว้าง 0.08 เมตร ยาว 0.20 เมตรและความสูง 1 เมตร แผ่นกระจายอากาศสี่เหลี่ยมขนาดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดหอเป็นแบบเจาะตรงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร ใช้อุปกรณ์พื้นฐานร่วมกับเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

5.3 แผ่นกระจายลม

แผ่นกระจายลมทำจากอะคริลิกใสเจาะรูตรงกลางเพื่อให้ลมผ่านที่ใช้ในการทดลองมี3แบบ

1. แผ่นกระจายลมแบบเต็มมีขนาด กว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ตามรูปที่ 5.4 ก.

2. แผ่นกระจายลมขนาด 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลอง ขนาดกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 6.7 เซนติเมตร ตามรูปที่ 5.4 ข.

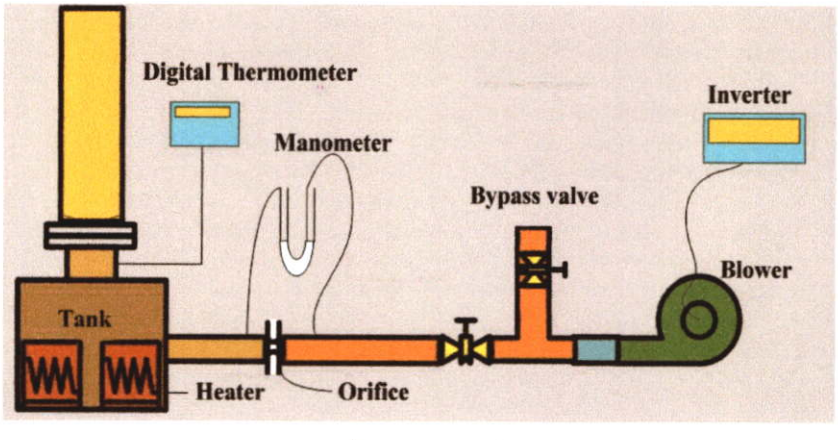
3. แผ่นกระจายลมขนาด 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลอง ขนาดกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ตามรูปที่ 5.4 ค.

5.4 อุปกรณ์เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีครีบรูปตัววี แผ่นกระจายลม ขนาด 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอ

หอทดลองหน้าตัดสี่เหลี่ยมทำจากอะคริลิกใสขนาดกว้าง 0.08 เมตร ยาว 0.20 เมตรและความสูง 1 เมตร แผ่นกระจายอากาศเป็นแบบกรวยเอียงทำมุม 45 องศา ขนาดกว้าง 8 เซนติเมตรยาว 6.7 เซนติเมตร เจาะรูตรงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร ด้านข้างหอติดครีบรูปตัววีดังรูปที่ 5.4 ง. ใช้อุปกรณ์พื้นฐานร่วมกับเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบ แต่จะต่างกันที่บริเวณฐานหอทดลองซึ่งมีแผ่นกระจายลมแบบกรวยได้ถูกแสดงในรูปที่ 5.4 ข.

5.5 อุปกรณ์เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีครีบรูปตัววี แผ่นกระจายลม ขนาด 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอ

หอทดลองหน้าตัดสี่เหลี่ยมทำจากอะคริลิกใสขนาดกว้าง 0.08 เมตร ยาว 0.20 เมตรและความสูง 1 เมตร แผ่นกระจายอากาศเป็นแบบกรวยเอียงทำมุม 45 องศาขนาดกว้าง 8 เซนติเมตรยาว 10 เซนติเมตร เจาะรูตรงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร และด้านข้างหอติดครีบรูปตัววีดังรูปที่ 5.4 ง. ใช้อุปกรณ์พื้นฐานร่วมกับเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด แต่จะต่างกันที่บริเวณฐานหอทดลองซึ่งมีแผ่นกระจายลมแบบกรวยได้ถูกแสดงในรูปที่ 5.4 ค.

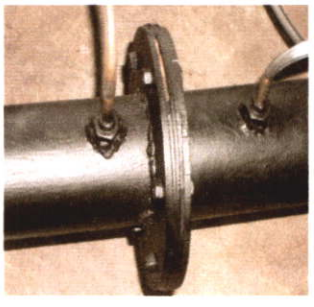


รูปที่ 5.1 อุปกรณ์การทดลอง

5.2 ก.

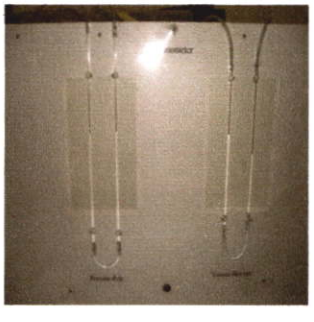
5.2 ข.

5.2 ค.



5.2 ง.

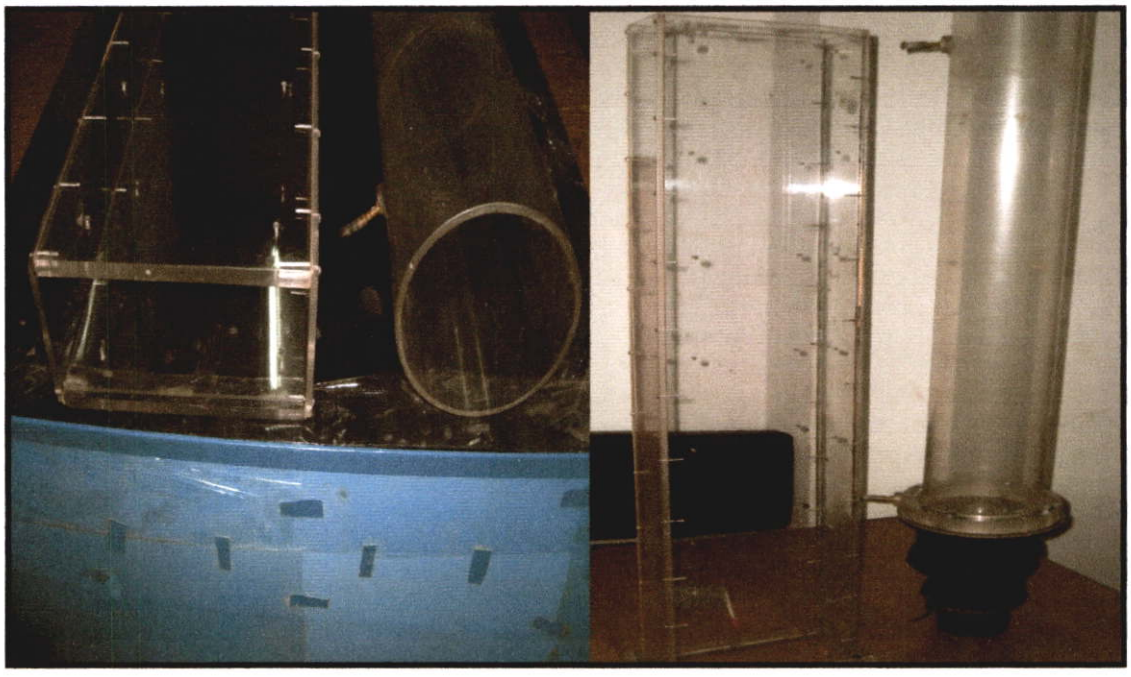
5.2 จ.



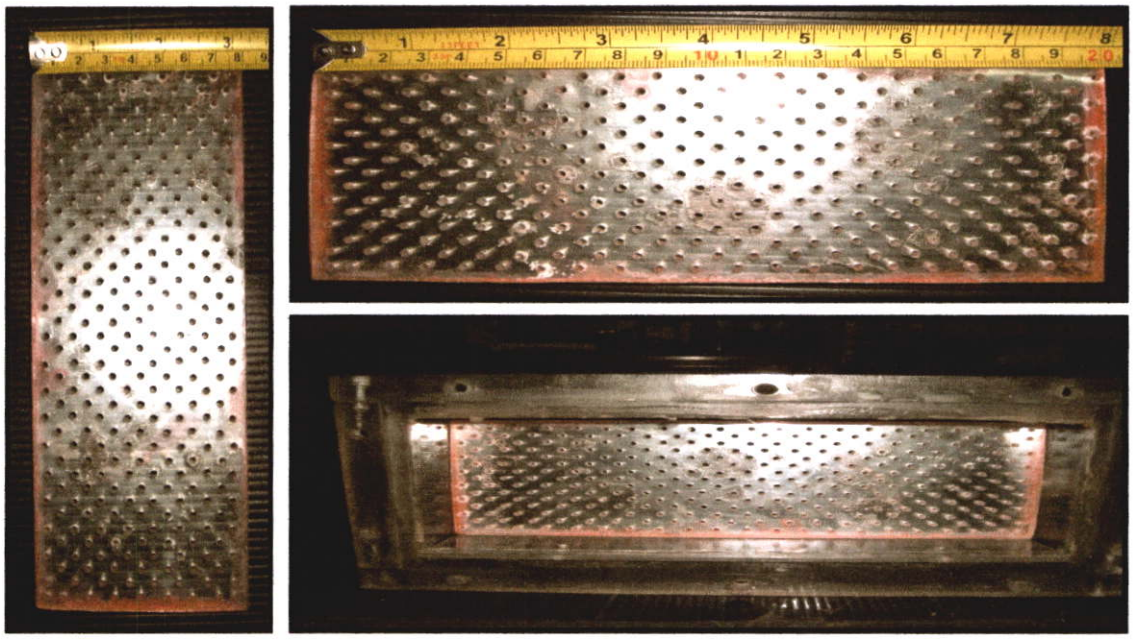
5.2 ฉ.

5.2 ช.

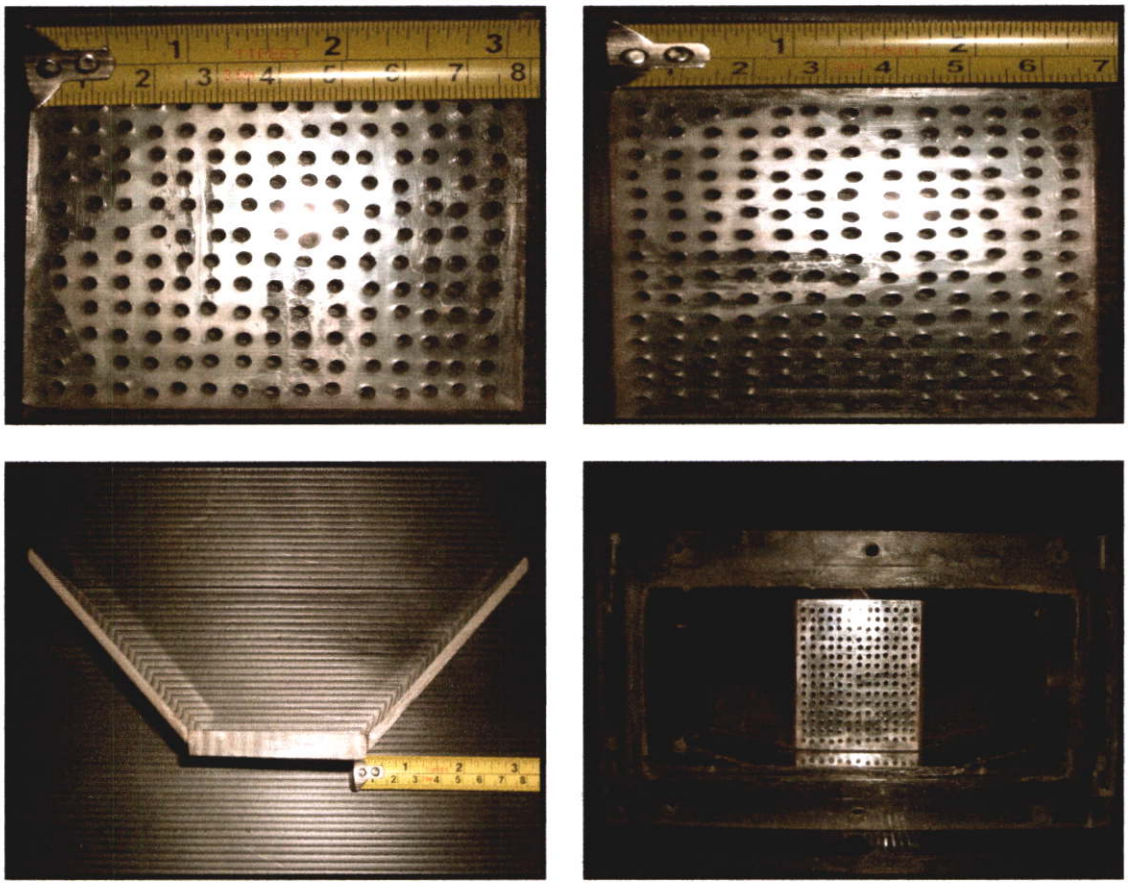
รูปที่ 5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง



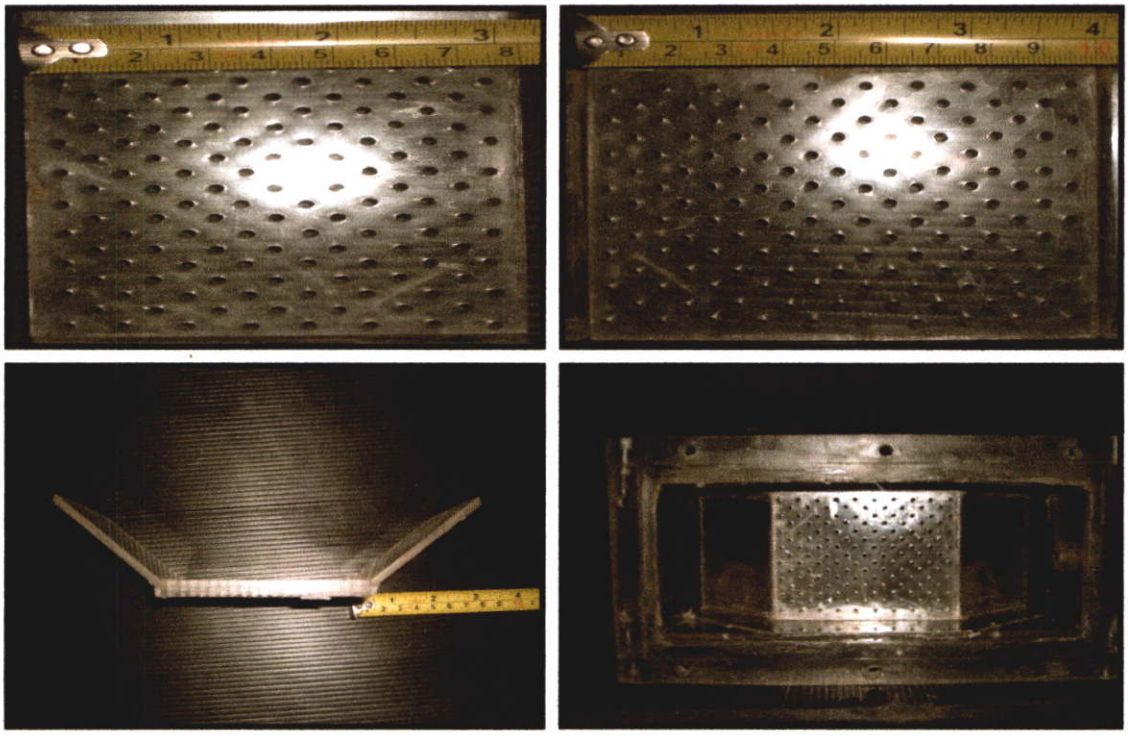
รูปที่ 5.3 ลักษณะหอทดลองแบบต่างๆ



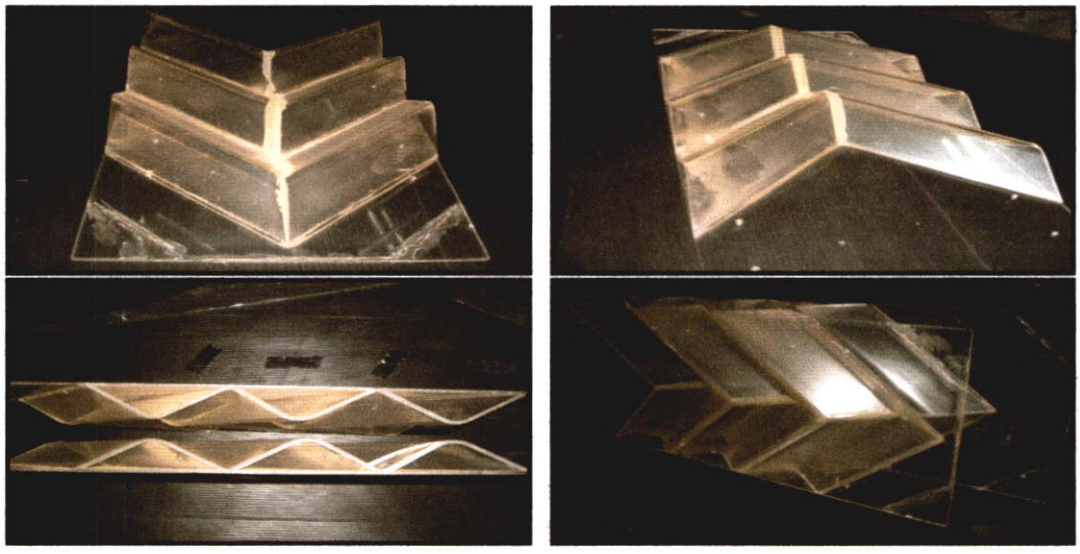
5.4 ก.



5.4 ข.



5.4 ค.



5.4 ง.

รูปที่ 5.4 ลักษณะของแผ่นกระจายลมและครีบรูปตัววีแบบต่างๆ

5.6 วิธีการทดลอง

5.6.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด

1. ทำการปรับเทียบชุดออริฟิสมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

2. ใส่เมล็ดพริกไทยลงในหอทดลอง

3. เดินเครื่องพัดลมอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง โดยค่อยๆ ผ่านอากาศที่ความเร็วต่ำๆ ก่อน แล้วค่อยๆ เพิ่มความเร็วของอากาศ

4. บันทึกผลของความดันลดคร่อมเบดจากที่อ่านได้จากมานอมิเตอร์ และบันทึกค่าความดันตกคร่อมออริฟิสมิเตอร์ เพื่อนำไปหาค่าความเร็วอากาศที่ไหลผ่านหอทดลอง

5. นำผลที่บันทึกมาเขียนเป็นกราฟและวิเคราะห์หาจุดที่ความดันลดคร่อมเบดเริ่มคงที่

6. เลือกใช้ความเร็วที่ความดันลดคร่อมเบดเริ่มคงที่เป็นค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน

5.6.2 การทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย

1. เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลมให้อากาศไหลผ่านระบบเครื่องอบแห้ง และเปิดเครื่องให้ความร้อน อุ่นเครื่องให้ได้อุณหภูมิตามต้องการประมาณ 15 นาที

2. ปรับความเร็วอากาศในหอทดลองให้ได้ตามที่กำหนด ใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมรูปที่ 5.2 ข.และ 5.2 ค.

3. ใส่เมล็ดพริกไทยลงในหอทดลอง และสังเกตผลการทดลอง

4. นำเมล็ดพริกไทยออกมาชั่งน้ำหนักของน้ำที่หายไปแต่ละช่วงเวลา 5 นาที ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลที่มีค่าความละเอียด 0.01 กรัม และบันทึกผลการทดลอง

5. ทำการทดลองจนกระทั่งมวลของเมล็ดพริกไทยไม่เปลี่ยนแปลง แล้วเปลี่ยนอุณหภูมิ ความเร็ว และดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 1 – 5 ใหม่ตามลำดับ

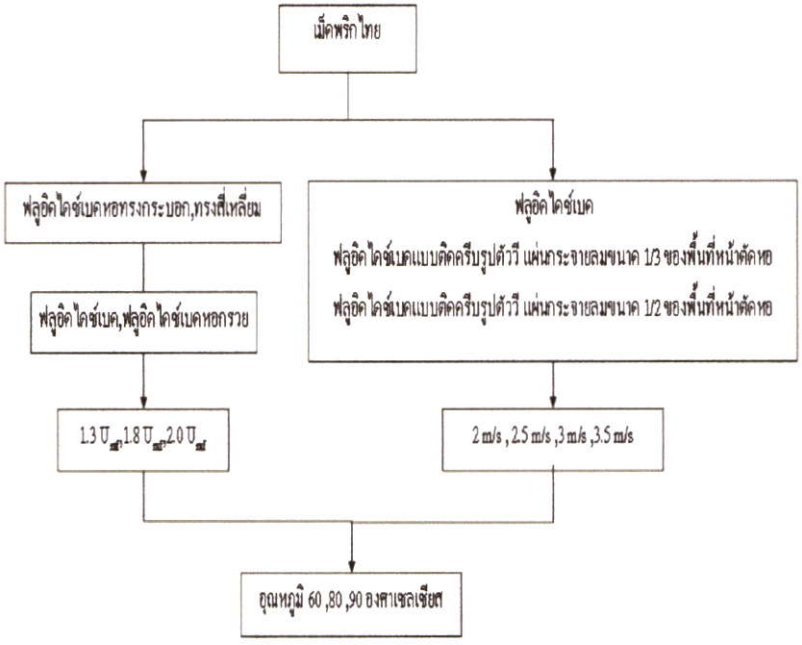
5.7 พารามิเตอร์ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม (Superficial air velocity) อุณหภูมิอากาศทางเข้าภายในเครื่องอบแห้งเทคนิคต่างๆและเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ได้จากเครื่องอบแห้งแต่ละเทคนิค โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

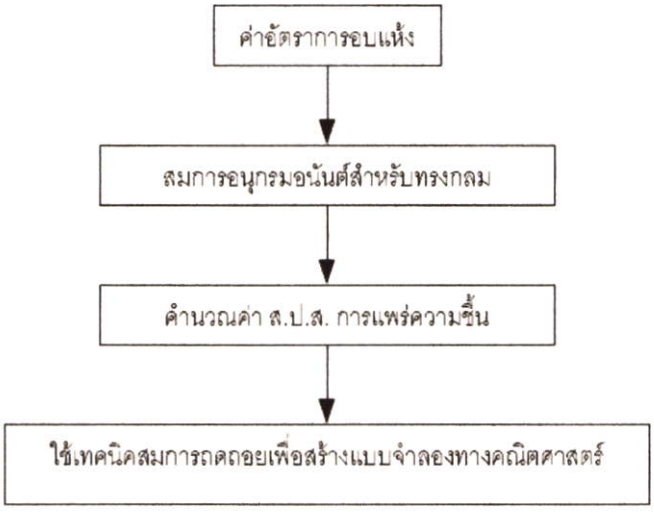
ตารางที่ 5.1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆในการทดลอง

พารามิเตอร์	ปริมาณ/ชนิด	หน่วย
หอทดลองทรงกระบอก		
เส้นผ่าศูนย์กลางหอทดลอง	140	มิลลิเมตร
ความสูงหอทดลอง	1000	มิลลิเมตร
พื้นที่แผ่นกระจายลม	17	เปอร์เซ็นต์
วัสดุ	อะคริลิก	--
หอทดลองทรงสี่เหลี่ยม		
ความกว้าง	80	มิลลิเมตร
ความยาว	200	มิลลิเมตร
ความสูง	1000	มิลลิเมตร
พื้นที่แผ่นกระจายลม	17	เปอร์เซ็นต์
วัสดุ	อะคริลิก	_
คุณสมบัติของเมล็ดพริกไทย		
เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม	3.5	มิลลิเมตร
ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	80	เปอร์เซ็นต์(มาตรฐานเปียก)
ความหนาแน่น	1180	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
เงื่อนไขทางเข้าหอทดลอง		
ความเร็วอากาศ	2,2.5,3,3.5	เมตรต่อวินาที
อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง	60,80,90	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	67-70	เปอร์เซ็นต์

5.8 ขอบเขตการทดลอง



5.9 ขั้นตอนการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์



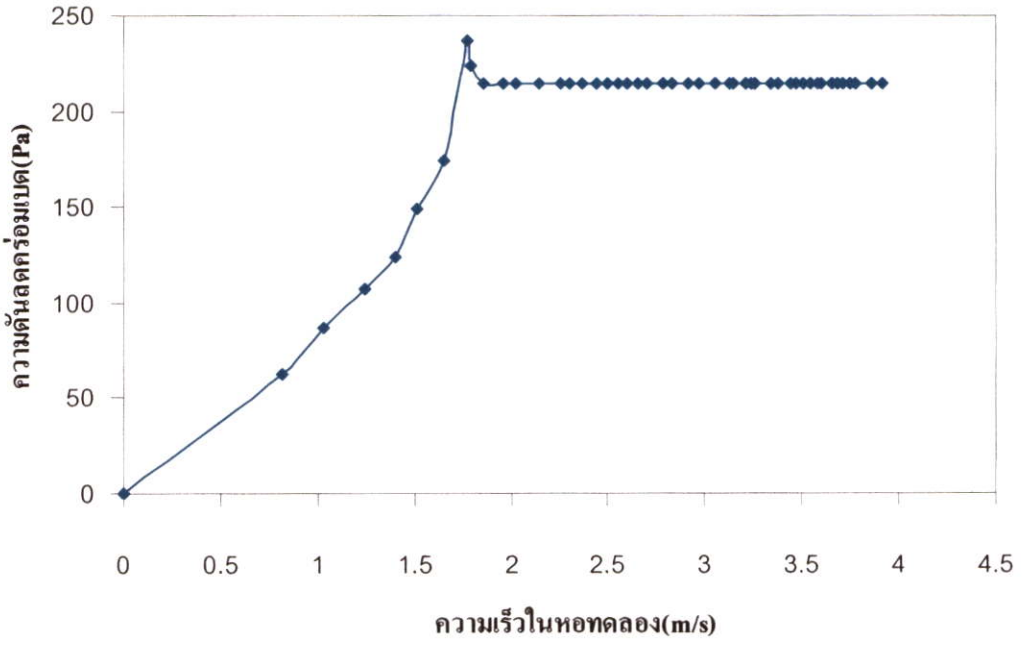
บทที่ 6
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สามารถแยกการวิเคราะห์ได้เป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ผลที่ได้จากผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

6.1 ลักษณะและอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

ในรูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศในหอทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศทีละน้อยเริ่มจากเบดนิ่ง จะมีผลทำให้ความดันตกคร่อมของเบดเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศระดับหนึ่งเมล็ดพริกไทยจะเกิดการสั่นและเริ่มขยับตัวแตกตัวเป็นอิสระออกจากกัน และหลังจากนี้ความดันตกคร่อมเบดจะไม่เพิ่มขึ้นแม้ว่าความเร็วของอากาศจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจุดนี้คือจุดเริ่มต้นในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน และฟลูอิดไดเซชันที่เกิดขึ้นเป็นแบบสองสถานะจากผลการทดลองเมล็ดพริกไทยและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%พบว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด จะมีค่าประมาณ 1.9 เมตรต่อวินาที

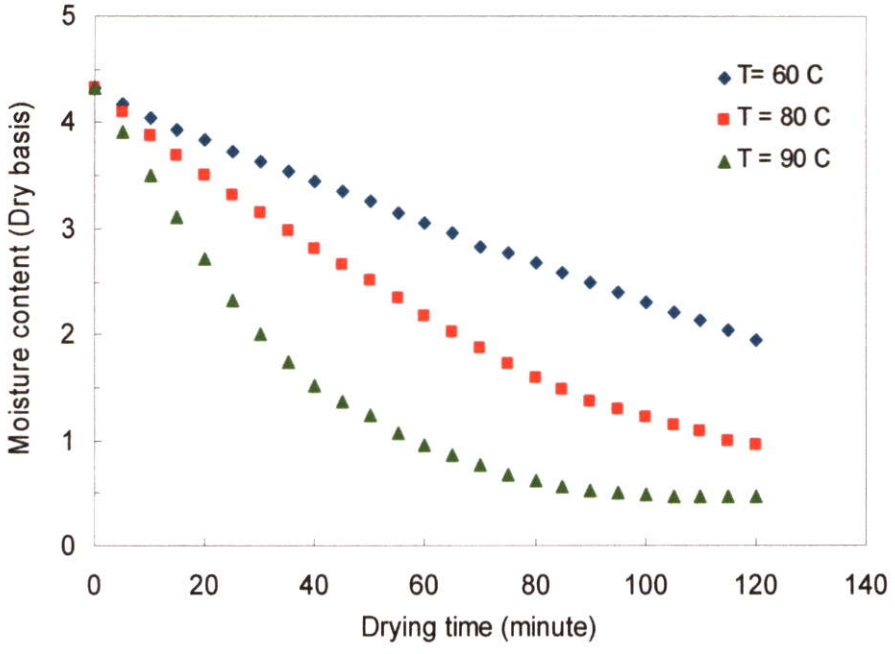
จากผลการทดลองโดยใช้หอทดลองโปร่งใส พบว่าหลังจากจุดเริ่มต้นที่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันเมื่อความเร็วของอากาศมากขึ้นจะมีอากาศบางส่วนรวมตัวและก่อเป็นถุงอากาศเกิดขึ้น ภายในเบดซึ่งเรียกว่าฟองก๊าซและลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Bubbling โดยเมื่อฟองก๊าซเหล่านี้ลอยตัวไปถึงผิวหน้าของเบดฟองก๊าซจะแตกออก ทำให้ผิวหน้าของเบดมีการกระเพื่อมขึ้นลงไม่สม่ำเสมอและเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้นเรื่อยๆ เมล็ดพริกไทยจะเริ่มหลุดลอยออกจากหอทดลอง ซึ่งจุดนี้คือจุดสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดไดเซชันหรือความเร็วสูงสุดที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน และจากผลการทดลองยังพบอีกว่าความดันตกคร่อมเบดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้นเพราะค่าความดันตกคร่อมภายในเบดนั้นจะเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของเมล็ดพริกไทยที่บรรจุอยู่ต่อพื้นที่ภาคตัดขวางหอทดลอง



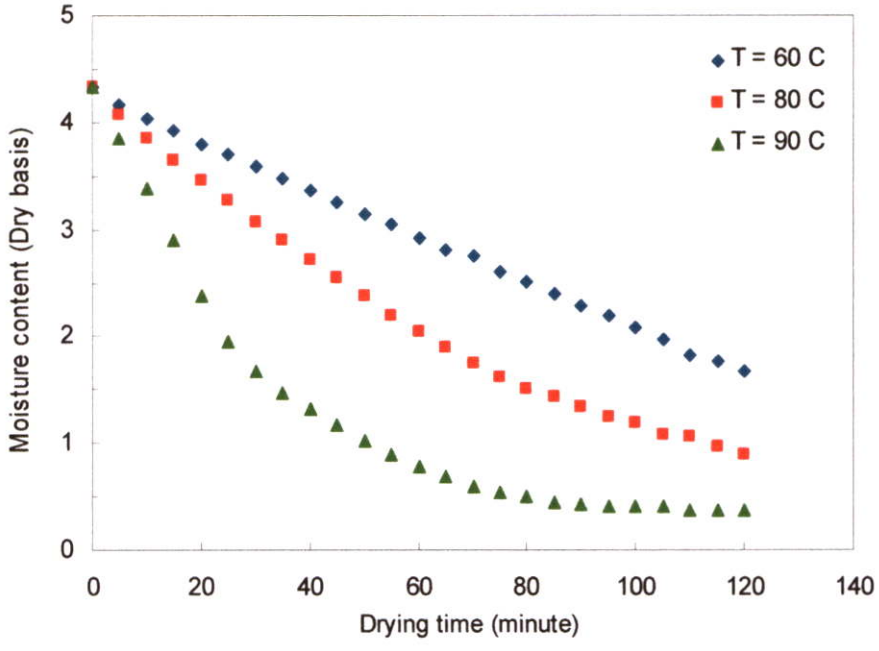
รูปที่6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศ (เมล็ดพริกไทยความชื้นเริ่มต้น 430% มาตรฐานแห้ง, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

6.2 เปรียบเทียบการอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกกับหอทรงสี่เหลี่ยม

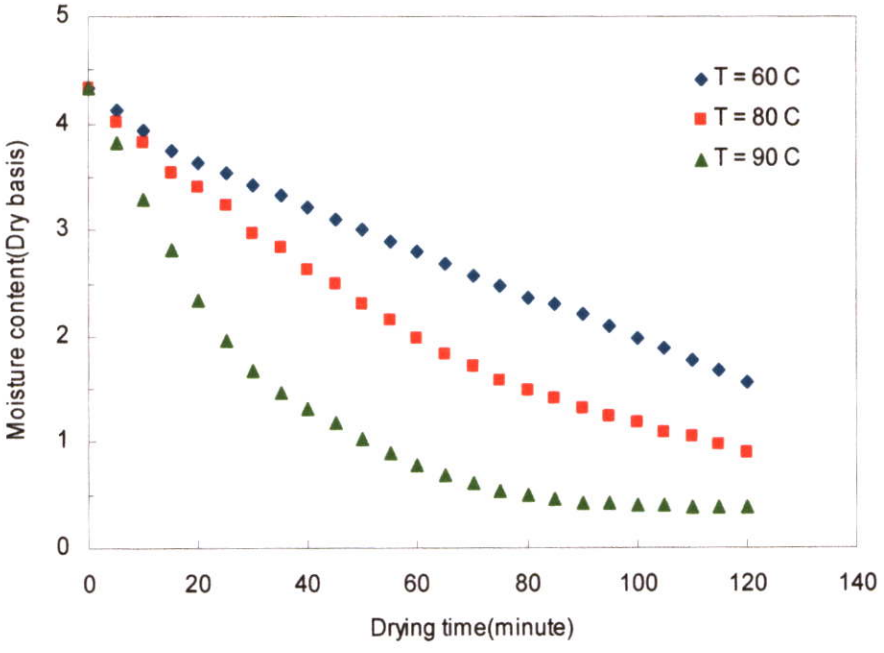
ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดพริกไทยกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 60 °C ,80 °C และ90°C, ที่ ความเร็วลม $1.3U_{mf}$,$1.8U_{mf}$ และ$2.0U_{mf}$ โดยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดหอทดลองรูปทรงกระบอกกับหอทดลองรูปทรงสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 6.2 ถึง 6.16 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของอัตราการลดลงของความชื้นของเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าต่างๆ มีแนวโน้มเหมือนกันทั้ง 2 หอทดลอง กล่าวคือที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการลดลงของความชื้นสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำซึ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วใน 1 ชั่วโมงแรก เนื่องจากความชื้นที่ผิวเมล็ดพริกไทยเกิดการระเหยเป็นไอและเคลื่อนย้ายออกจากเม็ดของแข็งเข้าสู่ตัวกลางในการอบอย่างรวดเร็ว และที่อุณหภูมิเดียวกันความเร็วลมมีผลน้อยมากต่อการอบแห้งซึ่งเหมือนกันทั้ง 2 หอทดลอง จากนั้นนำหอทดลองทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบกันจะได้ผลของอัตราการอบแห้งแตกต่างกัน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกหอทดลองแบบรูปทรงสี่เหลี่ยมเพราะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าและได้ค่าอัตราการอบแห้งดีกว่า อีกทั้งการประกอบ,ติดตั้งและบำรุงรักษาได้ง่ายกว่าหอทดลองรูปทรงกระบอก



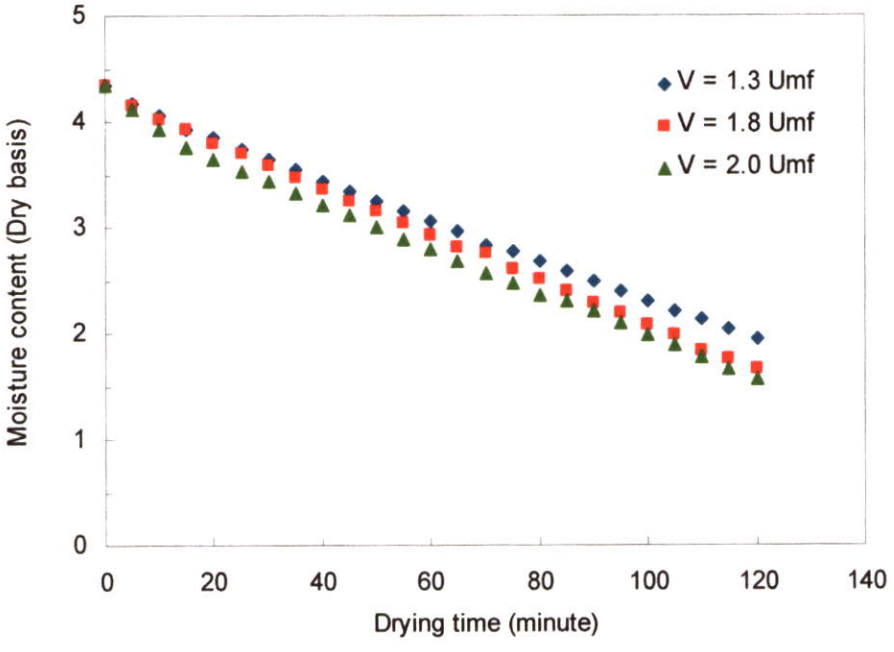
รูปที่6.2 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 1.3 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C ,80 ^{o}C และ 90 ^{o}C



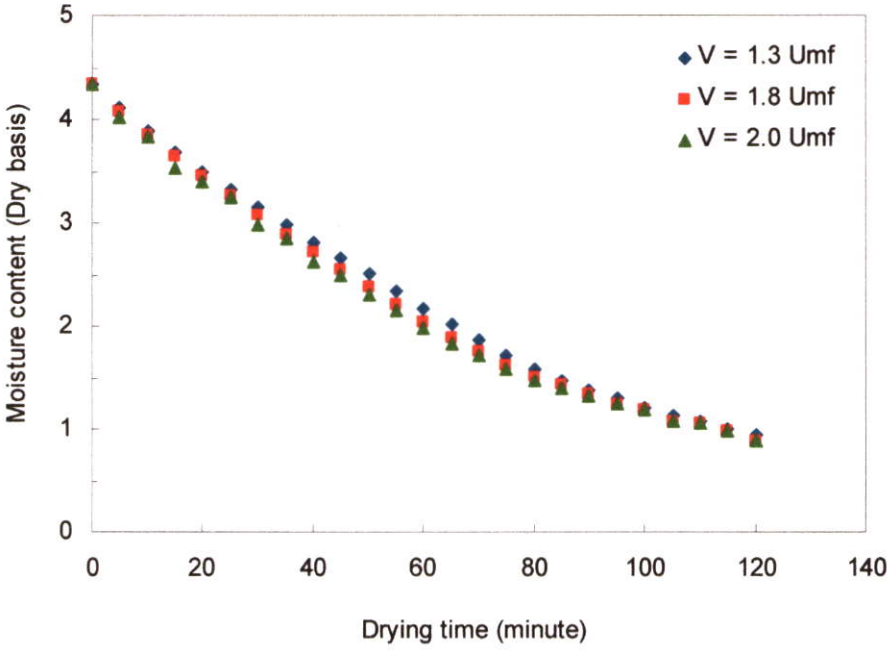
รูปที่6.3 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 1.8 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C ,80 ^{o}C และ 90 ^{o}C



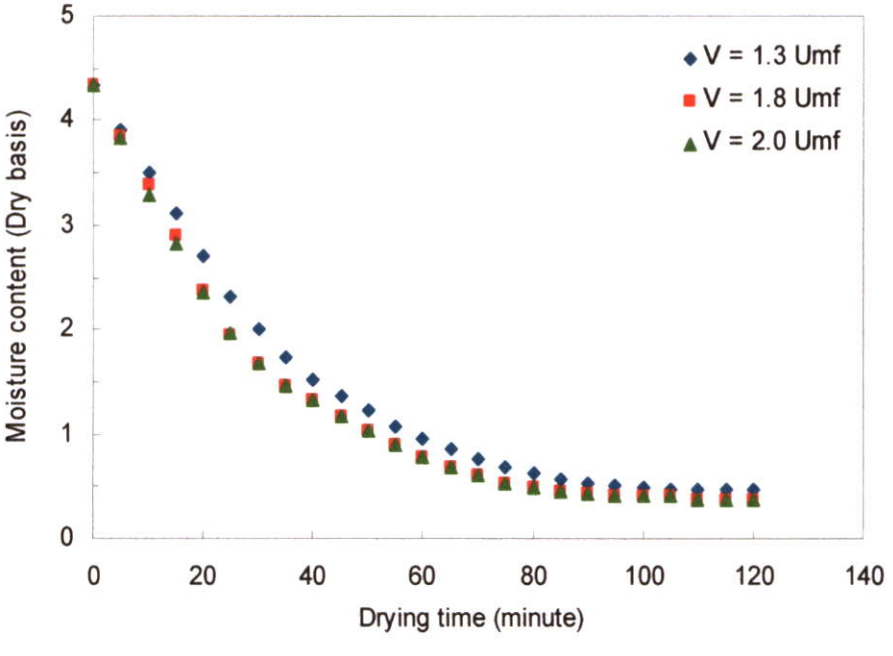
รูปที่6.4 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C ,80 ^{o}C และ 90 ^{o}C



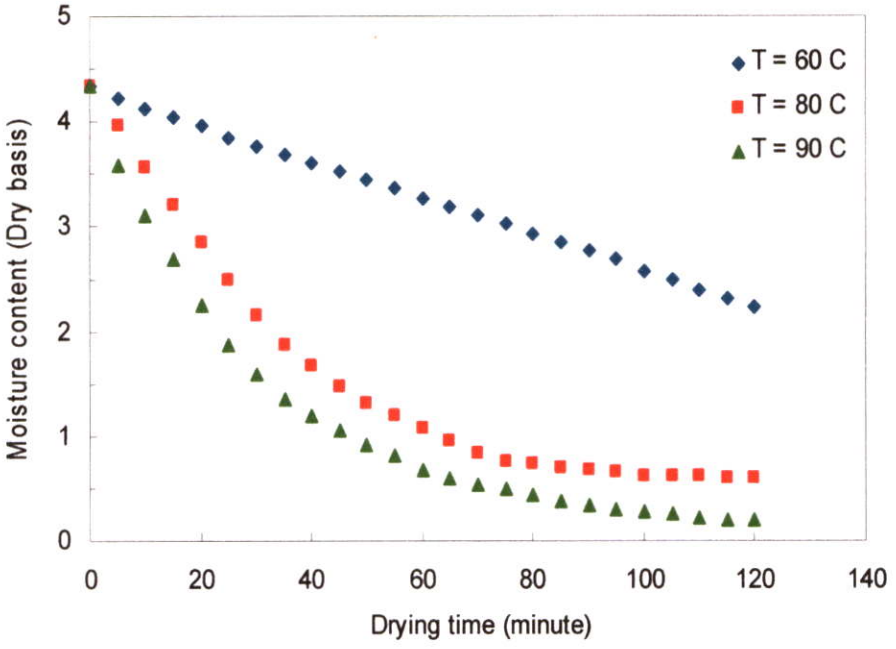
รูปที่6.5 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 1.3 ,1.8 และ 2.0Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C



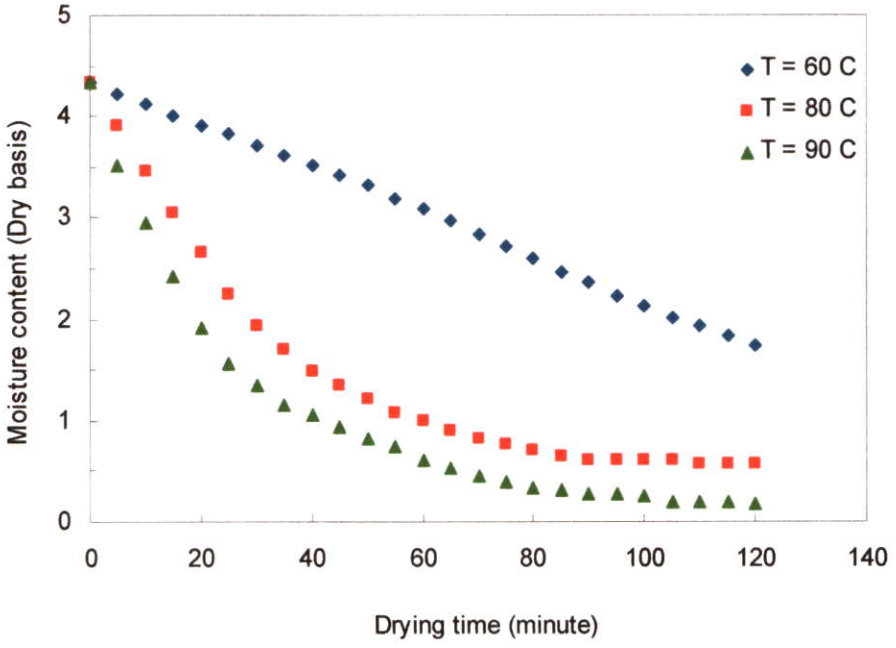
รูปที่6.6 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{O}C



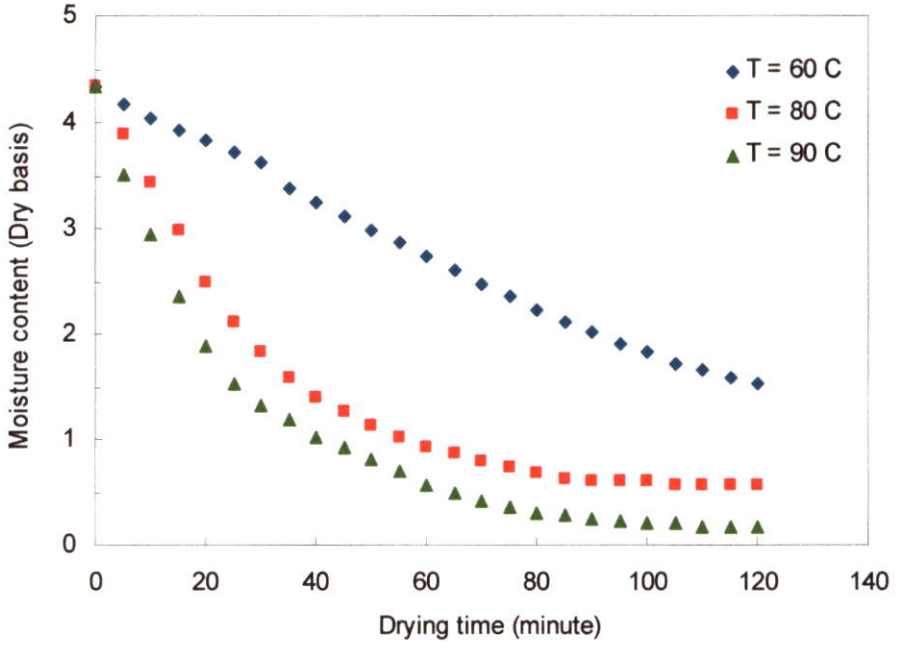
รูปที่6.7 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงกระบอกที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{O}C



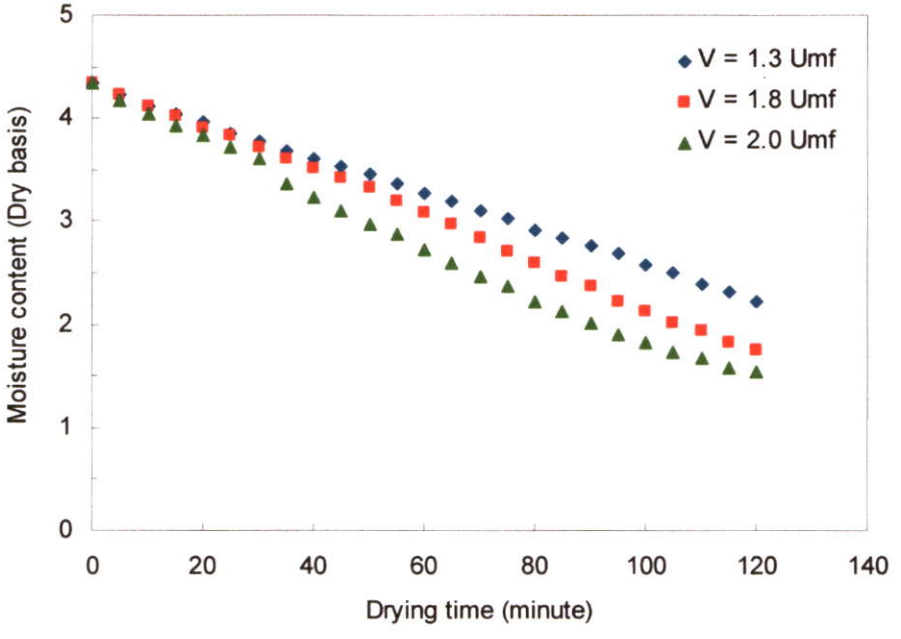
รูปที่6.8 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.3 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C



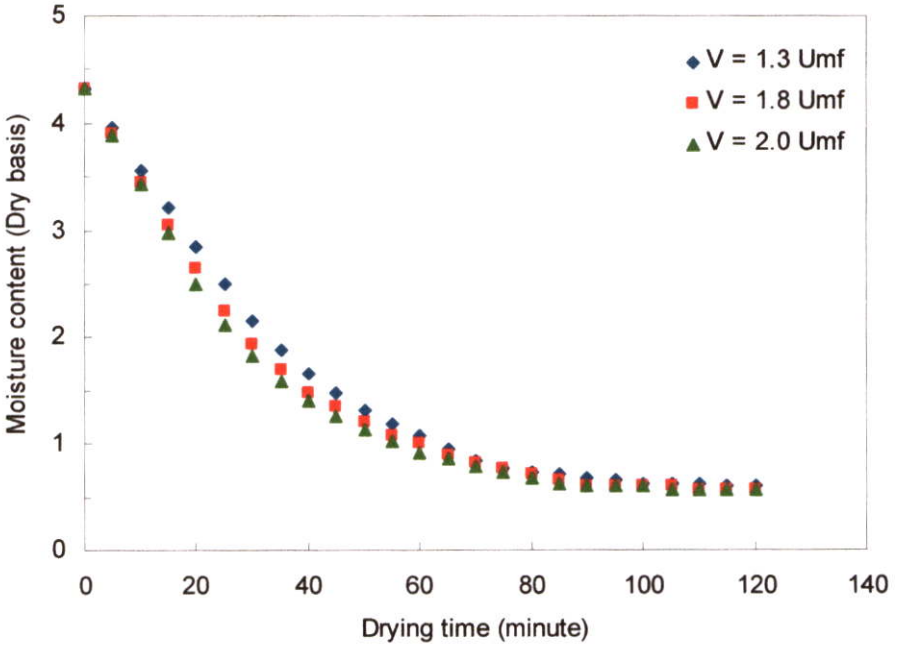
รูปที่6.9 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.8Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C



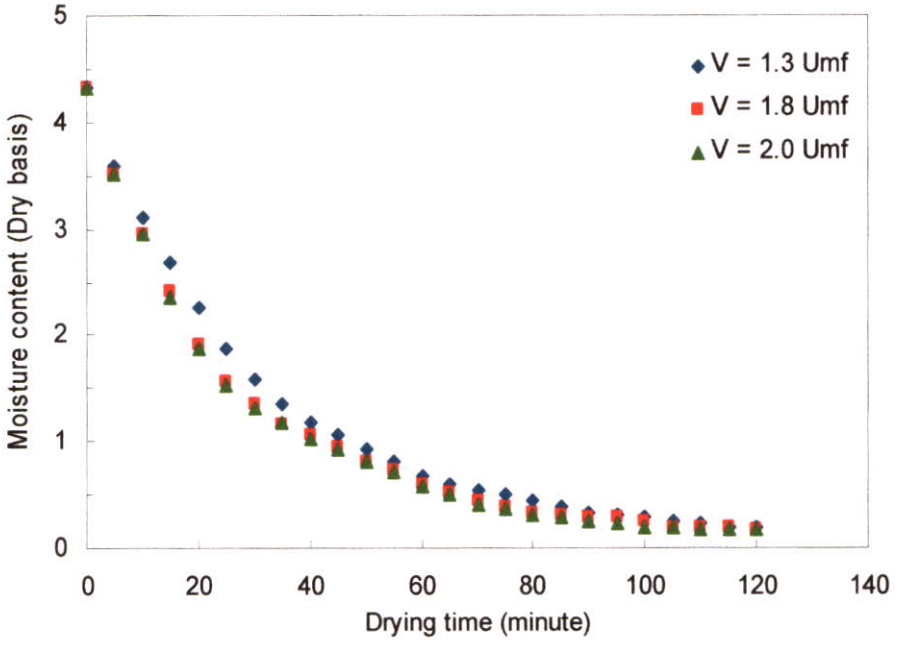
รูปที่6.10 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C



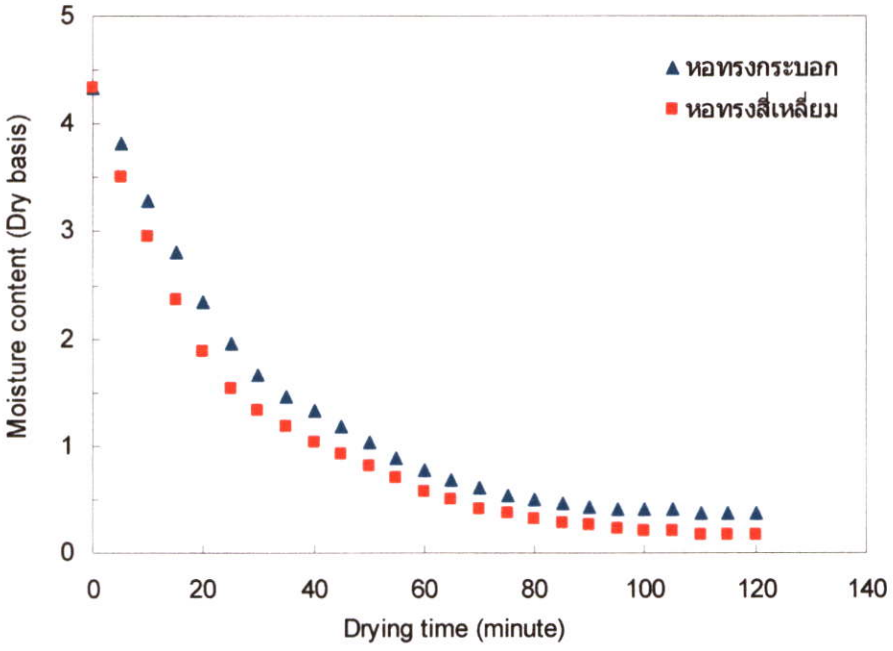
รูปที่6.11 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C



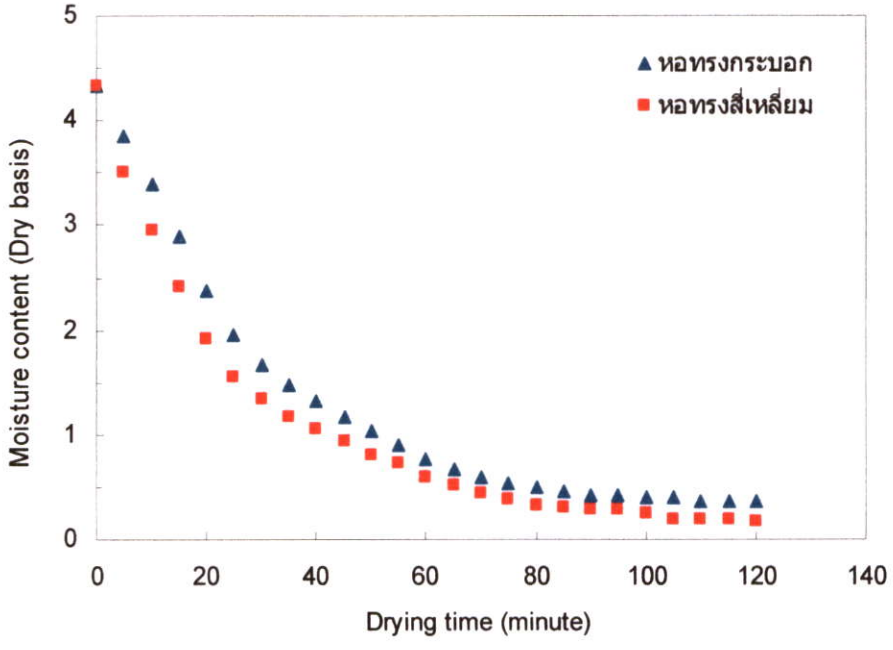
รูปที่6.12 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C



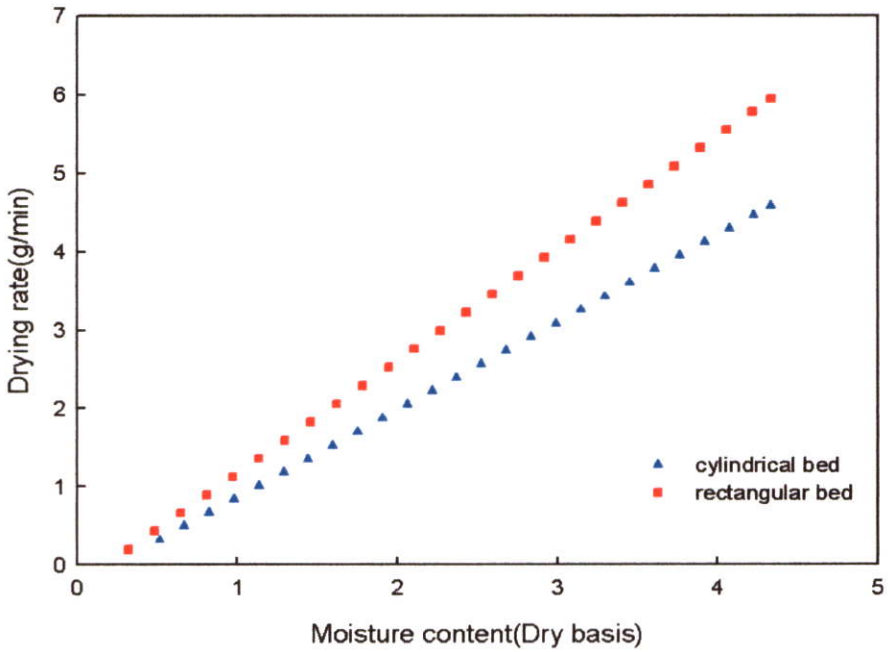
รูปที่6.13 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.3, 1.8 และ 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C



รูปที่6.14 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดรูปทรงกระบอกและรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 1.8 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C



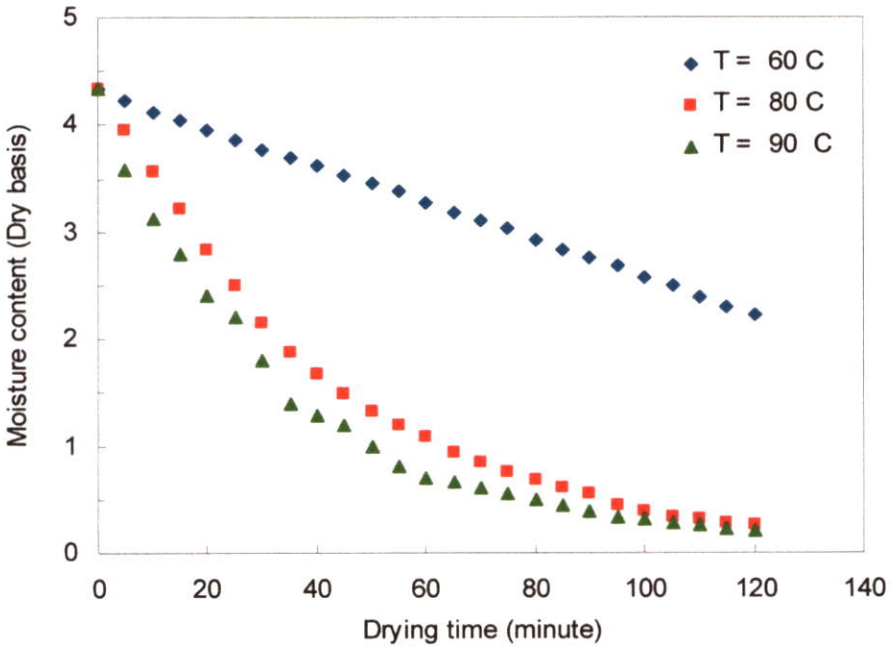
รูปที่6.15 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดรูปทรงกระบอกและรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C



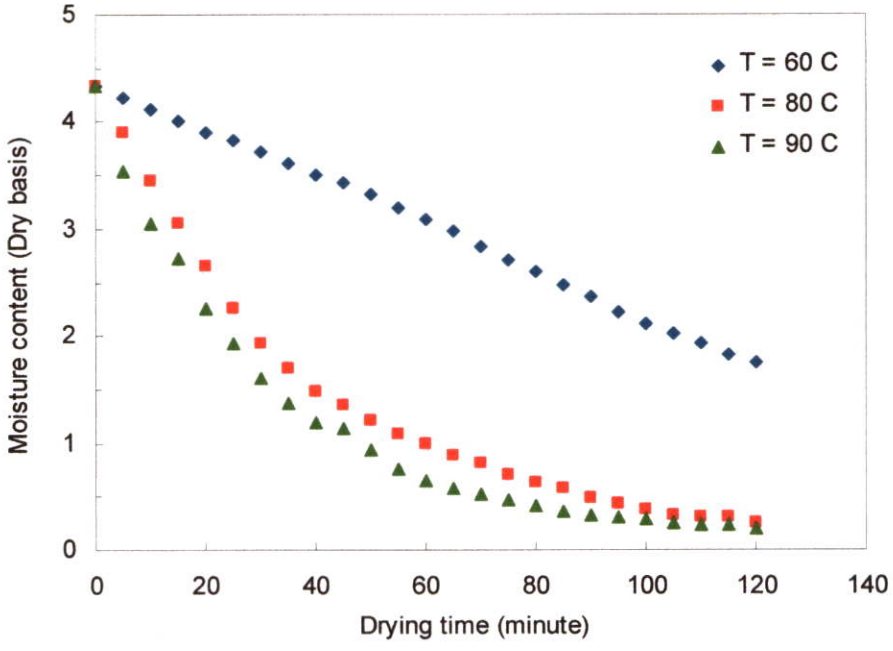
รูปที่6.16 เปรียบเทียบอัตราเร็วการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดรูปทรงกระบอกและรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 2.0 Umf ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C

6.3 เปรียบเทียบการอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอแบบกรวย

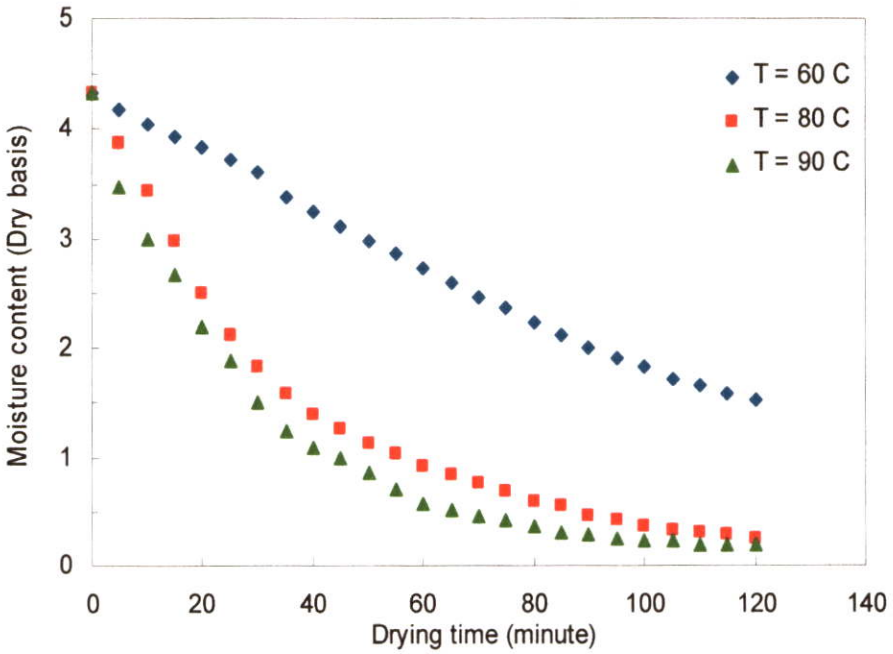
ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดกับเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอแบบกรวย ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60°C, 80°C และ 90°C โดยใช้ความเร็วของอากาศภายในหอทดลอง 1.3 U_{mf} , 1.8 U_{mf} และ 2.0 U_{mf} ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกันสำหรับการอบแห้งทั้งสองแบบดังรูปที่ 6.17 ถึง 6.31 จากการทดลองพบว่าในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ความเร็วลมมีผลต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยน้อยมาก แต่ในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอแบบกรวยพบว่าความเร็วลมมีผลต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 เทคนิค พบว่าการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอแบบกรวยให้อัตราเร็วในการอบแห้งมากกว่าแบบเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด



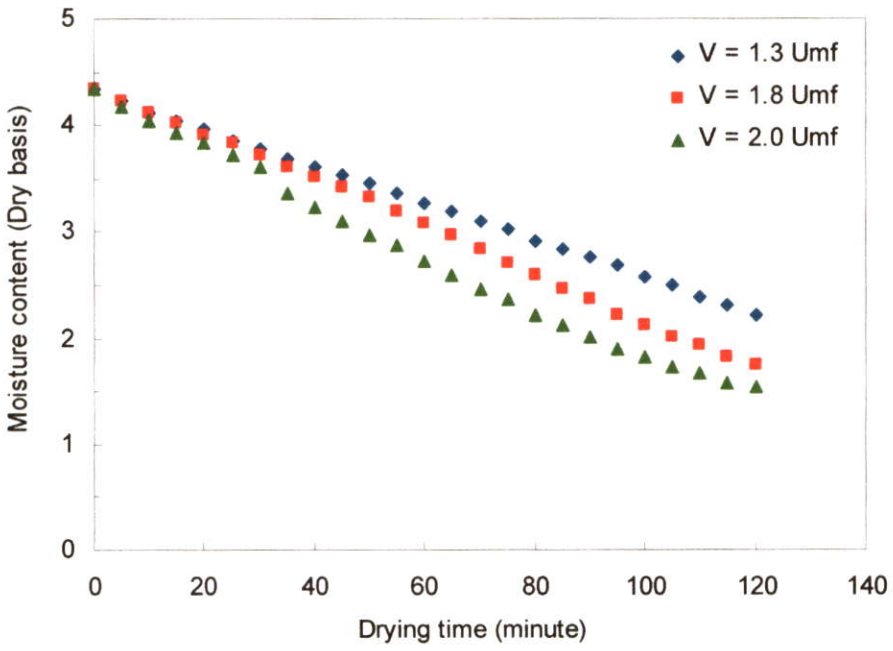
รูปที่6.17 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 1.3 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C



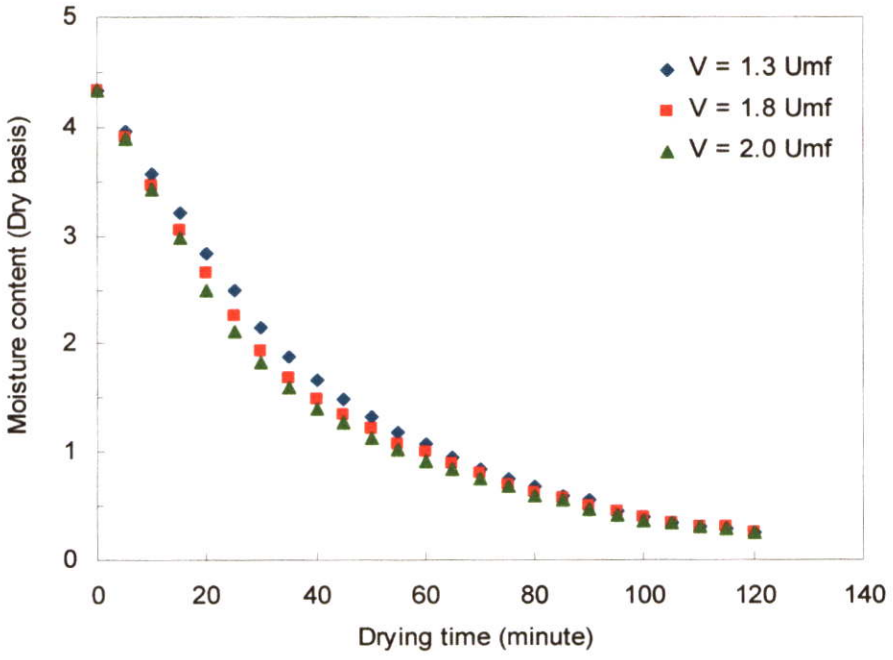
รูปที่6.18 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 1.8 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C



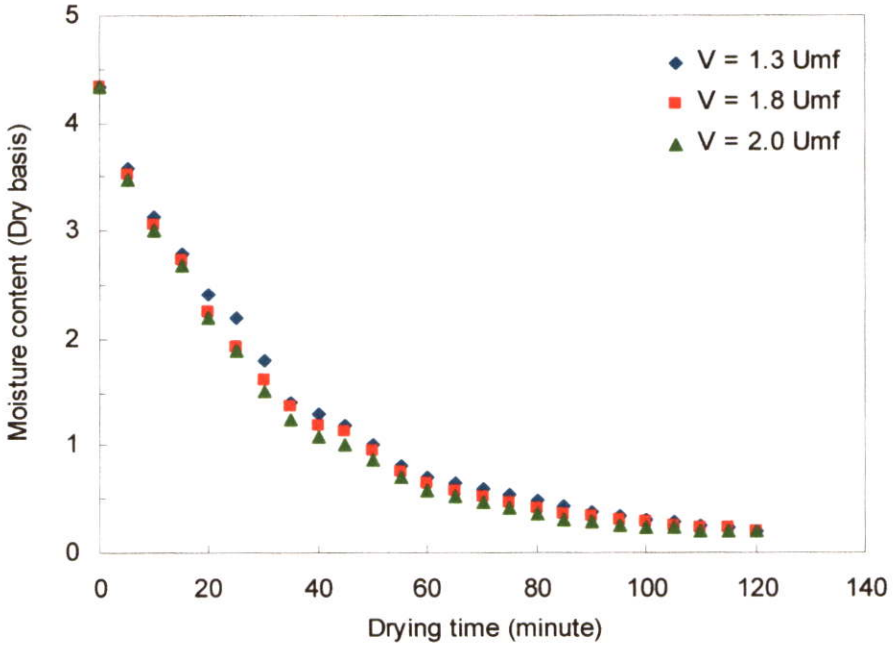
รูปที่6.19 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 2.0 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C, 80 ^{O}C และ 90 ^{O}C



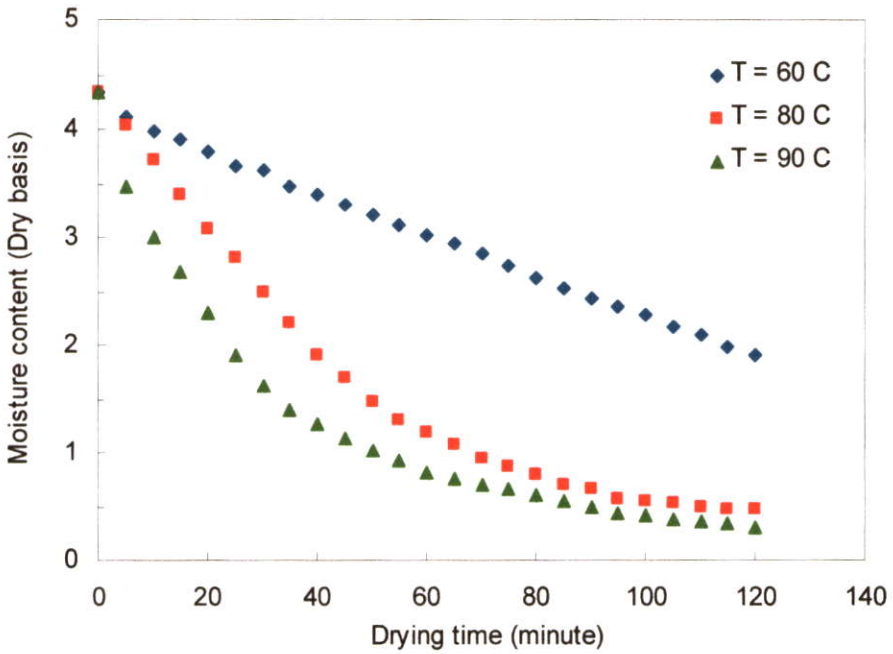
รูปที่6.20 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 60 ^{O}C และที่ความเร็วลม 1.3 Umf, 1.8 Umf, 2.0 Umf



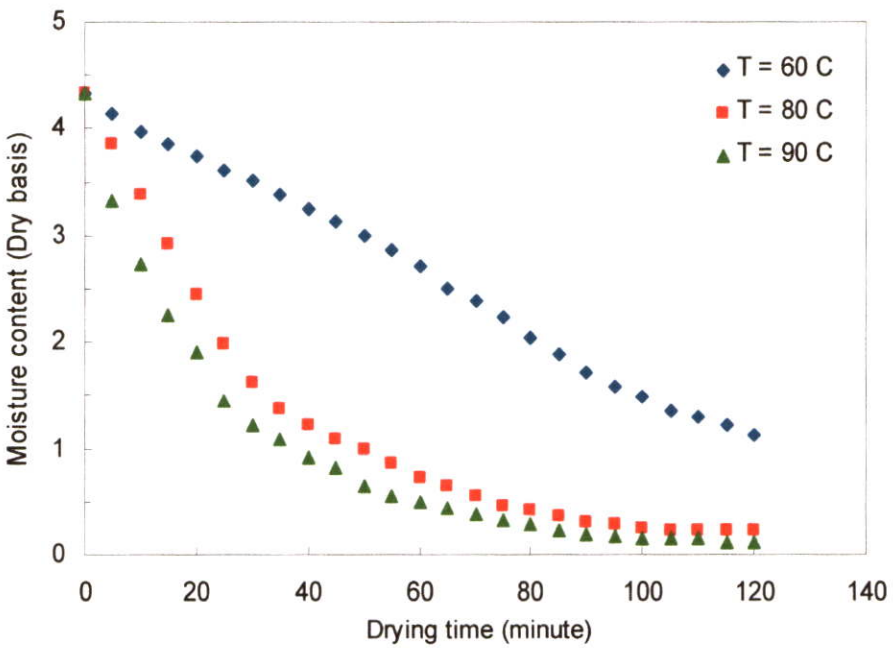
รูปที่6.21 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 80 ^{o}C และที่ความเร็วลม 1.3 Umf, 1.8 Umf, 2.0 Umf



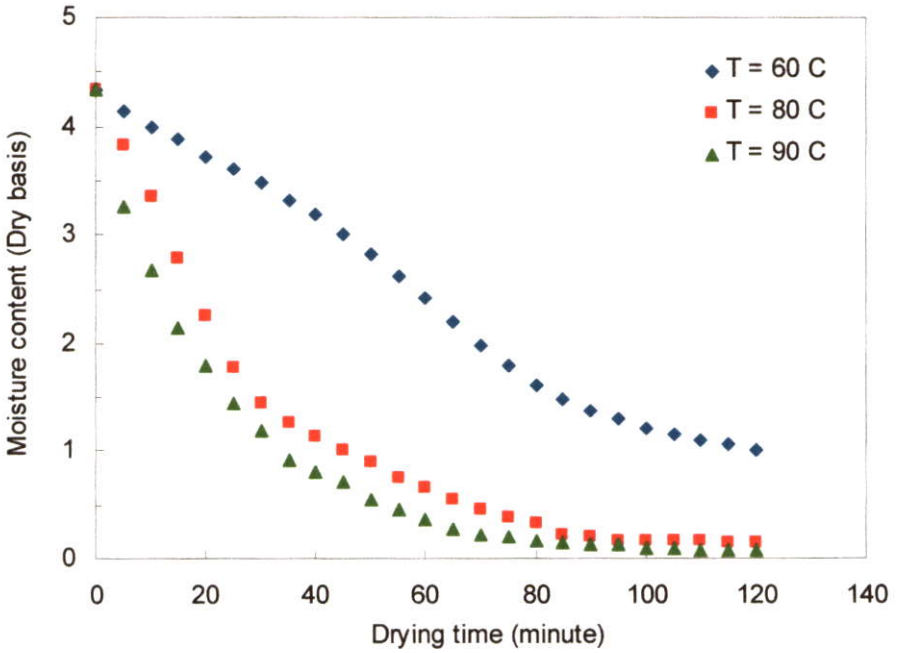
รูปที่6.22 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 90 ^{o}C และที่ความเร็วลม 1.3 Umf, 1.8 Umf, 2.0 Umf



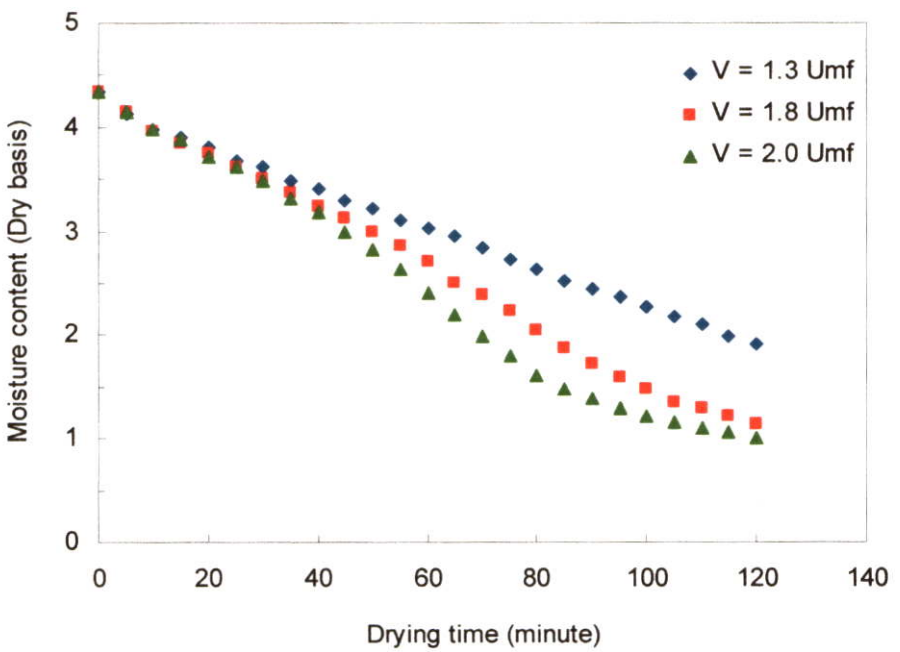
รูปที่6.23 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยความเร็ว 1.3 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90^{o}C



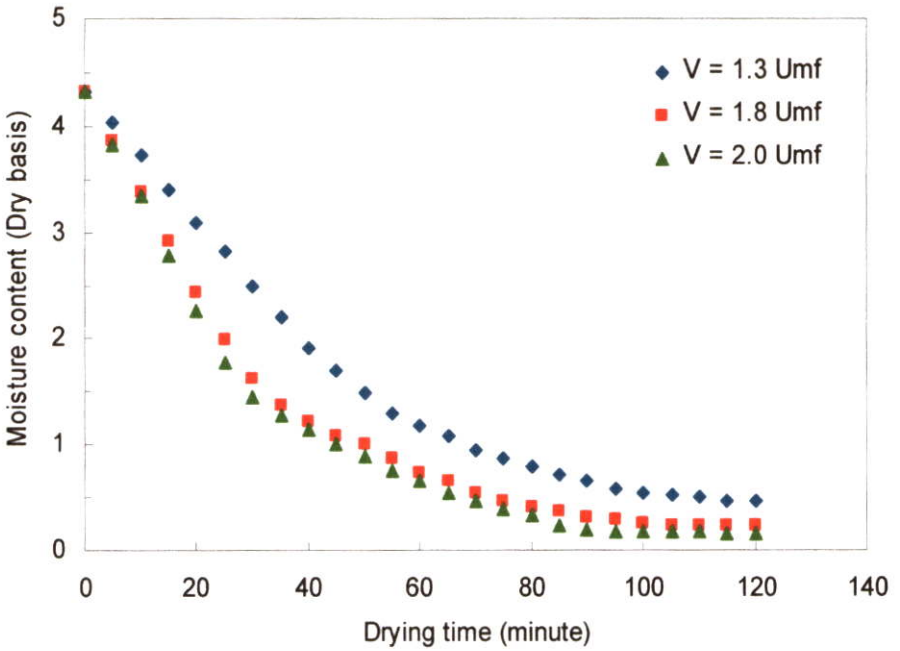
รูปที่6.24 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยความเร็ว 1.8 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C และ 90 ^{o}C



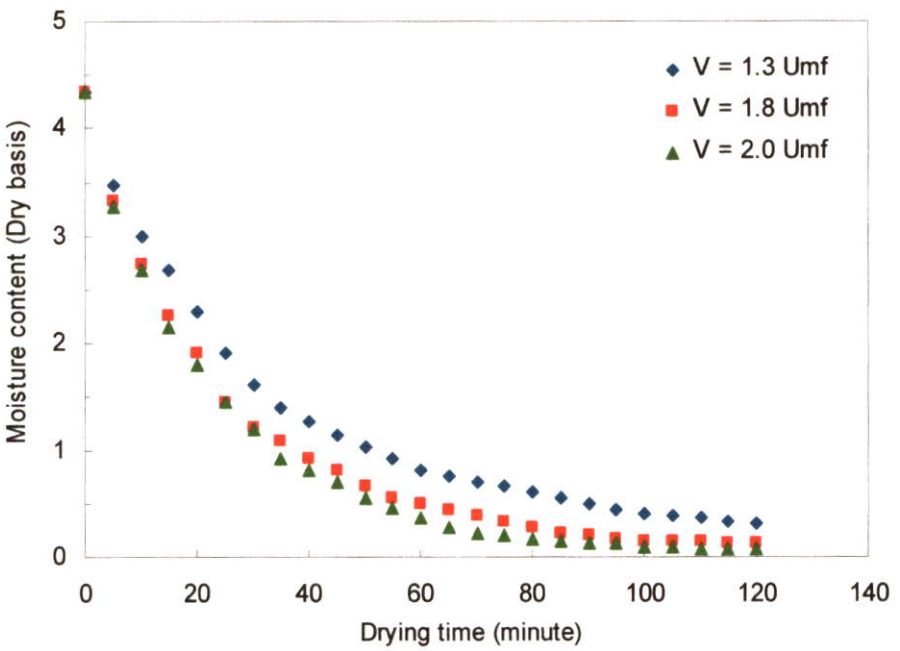
รูปที่6.25 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยความเร็ว 2.0 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C, 80 ^{O}C และ 90 ^{O}C



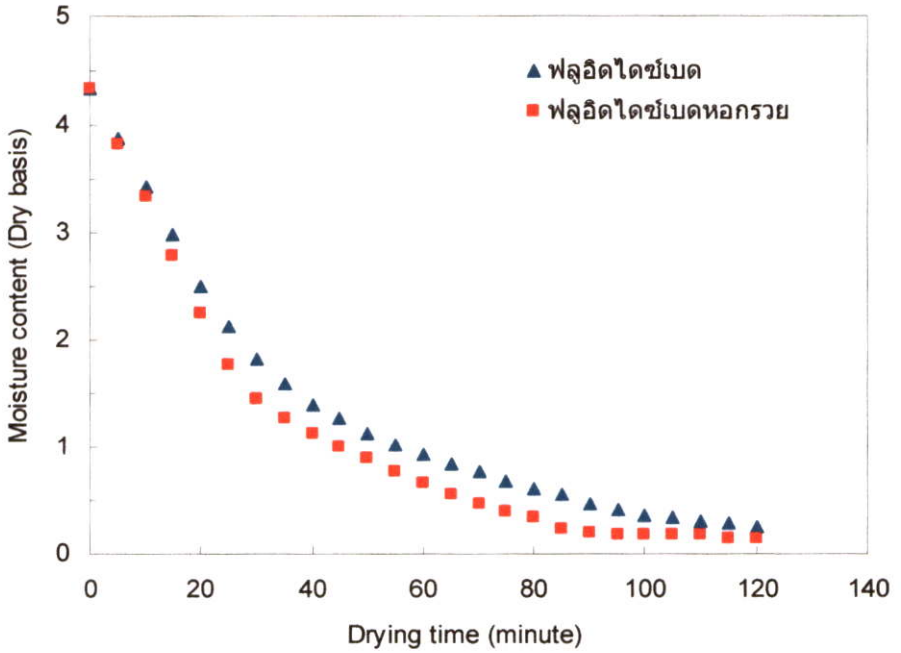
รูปที่6.26 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C และที่ความเร็ว 1.3 Umf, 1.8 Umf, และ 2.0 Umf



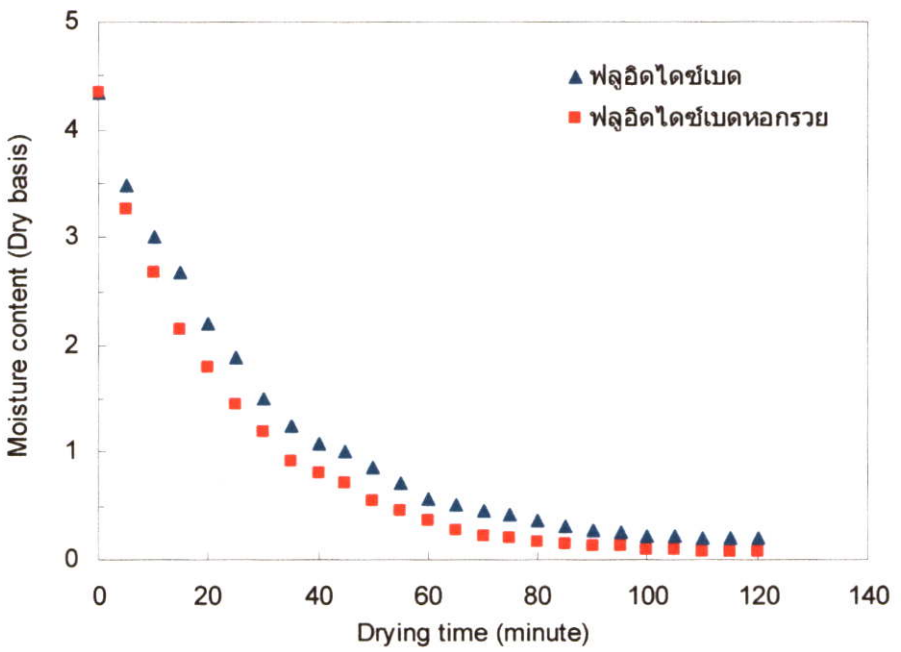
รูปที่6.27 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80^{O}C และที่ความเร็ว 1.3 Umf, 1.8 Umf, และ 2.0 Umf



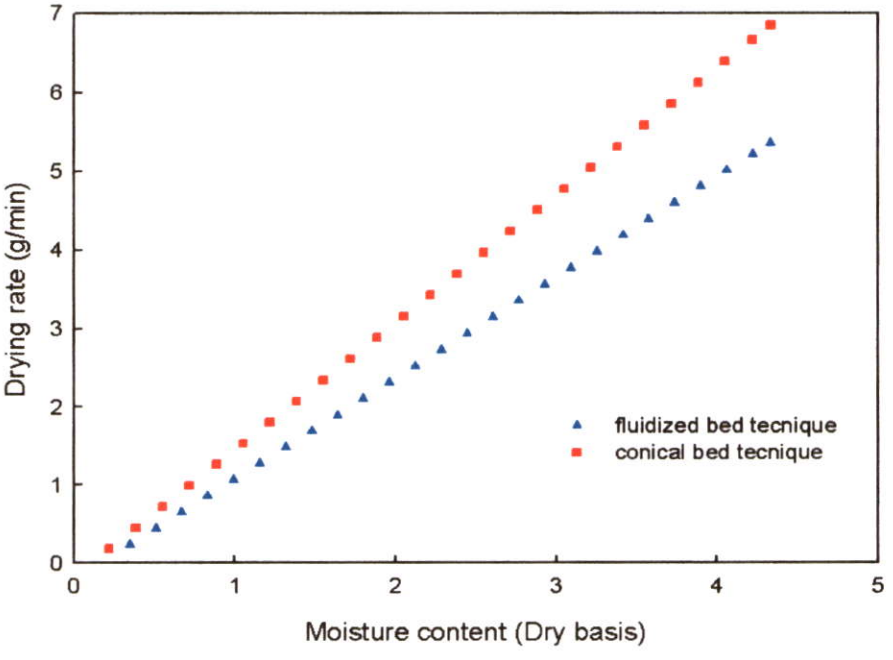
รูปที่6.28 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90^{O}C และที่ความเร็ว 1.3 Umf, 1.8 Umf, และ 2.0 Umf



รูปที่6.29 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดและเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่ความเร็ว 2.0 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80^{o}C



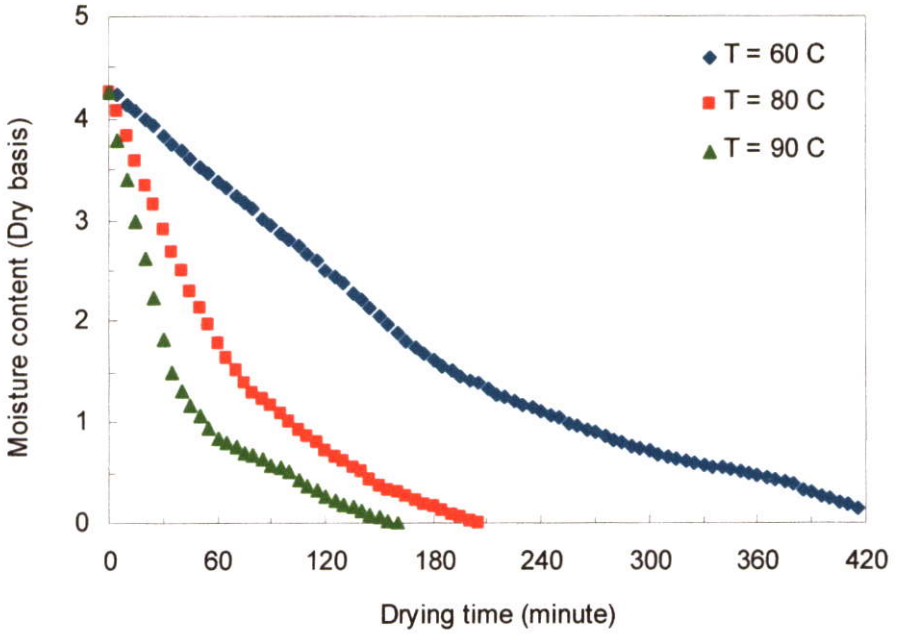
รูปที่6.30 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดและเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่ความเร็ว 2.0 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C



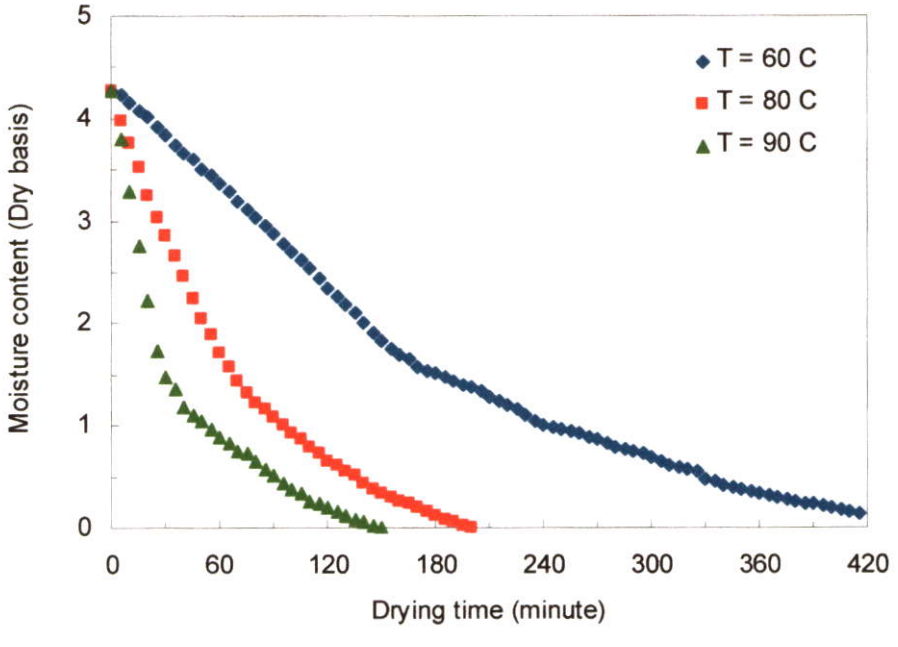
รูปที่6.31 เปรียบเทียบอัตราเร็วการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดและเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยที่ความเร็ว 2.0 Umf และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C

6.4 อิทธิพลผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้า

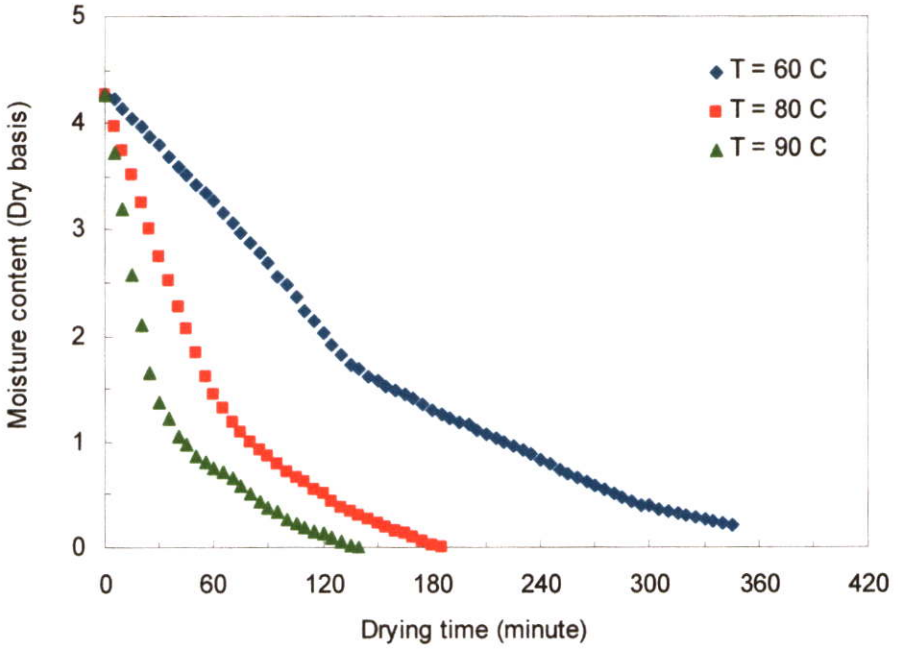
ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของเมล็ดพริกไทยกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 60, 80 และ90^{o}C, ที่ ความเร็วลม 2, 2.5, 3 และ 3.5 m/s โดยเครื่องอบแห้งเทคนิคต่างๆดังแสดงในรูปที่ 6.32 ถึง 6.43 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของอัตราการลดลงของความชื้นของเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าต่างๆ มีแนวโน้มเหมือนกันทุกเทคนิคคือที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการลดลงของความชื้นสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำซึ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วใน 1 ชั่วโมงแรก ที่อุณหภูมิ 60^{o}C ทุกเทคนิคจะใช้เวลาในการอบแห้งนานและที่อุณหภูมิ 90^{o}C จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด กล่าวคือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นการลดลงของความชื้นจะมากขึ้น



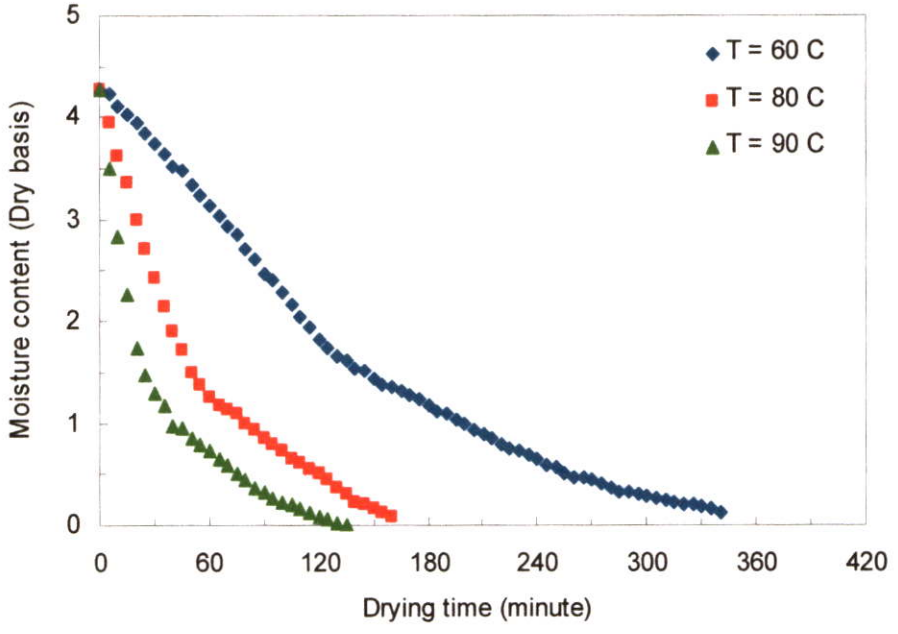
รูปที่6.32 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 2 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C ,90 ^{o}C



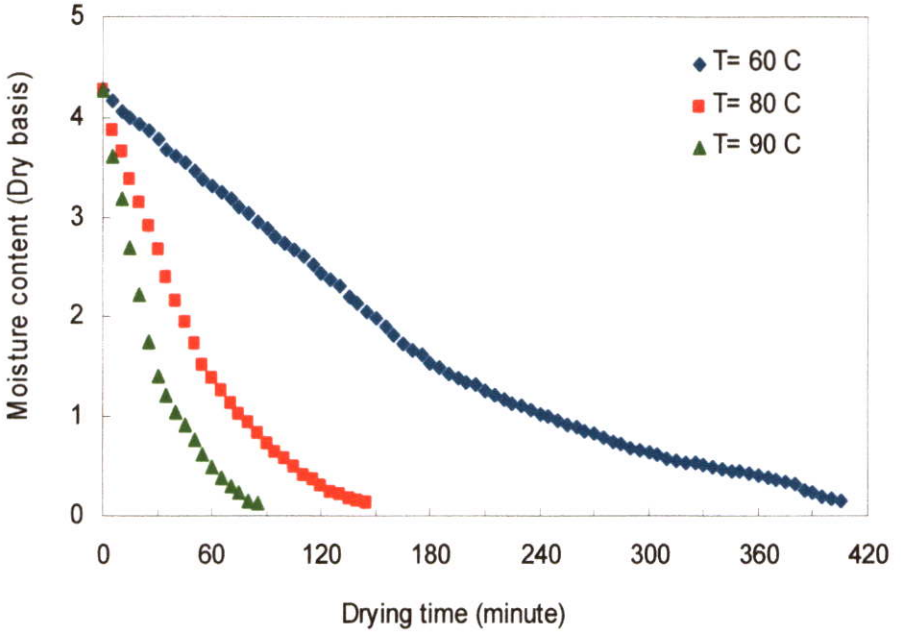
รูปที่6.33 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 2.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C ,90 ^{o}C



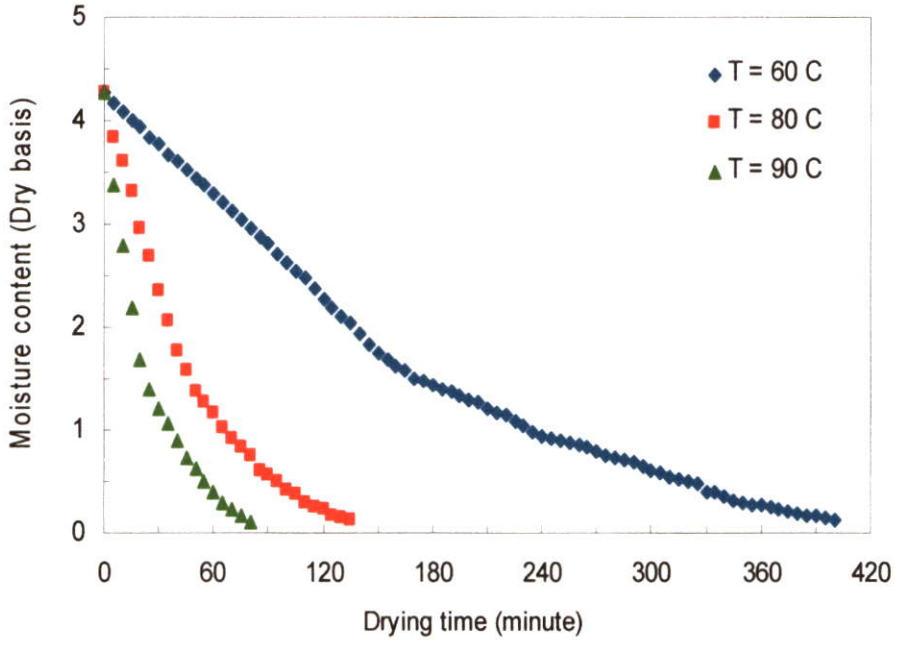
รูปที่6.34 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 3 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C, 80 ^{o}C ,90 ^{o}C



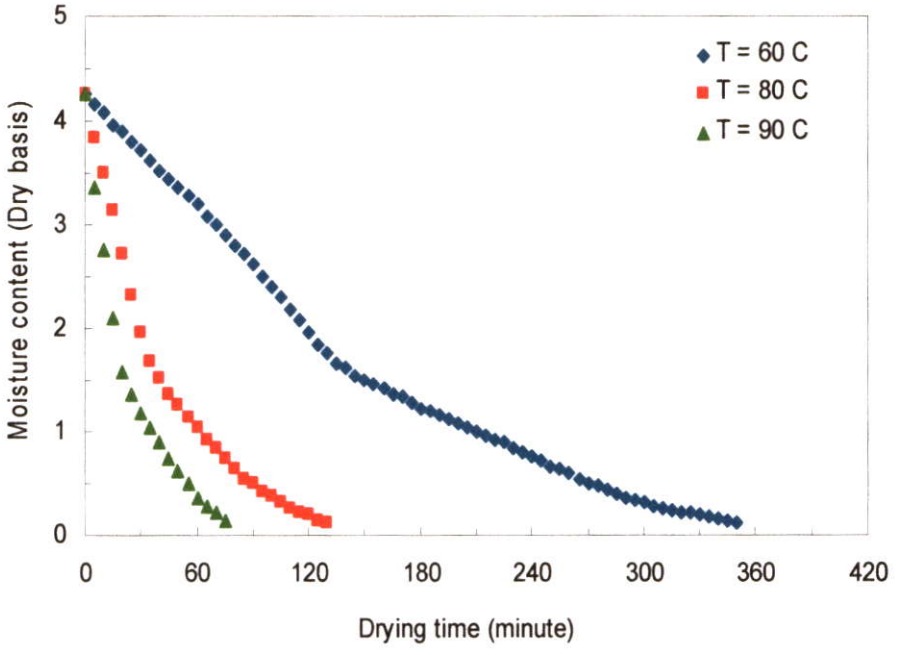
รูปที่6.35 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็ว 3.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60^{o}C, 80^{o}C, 90^{o}C



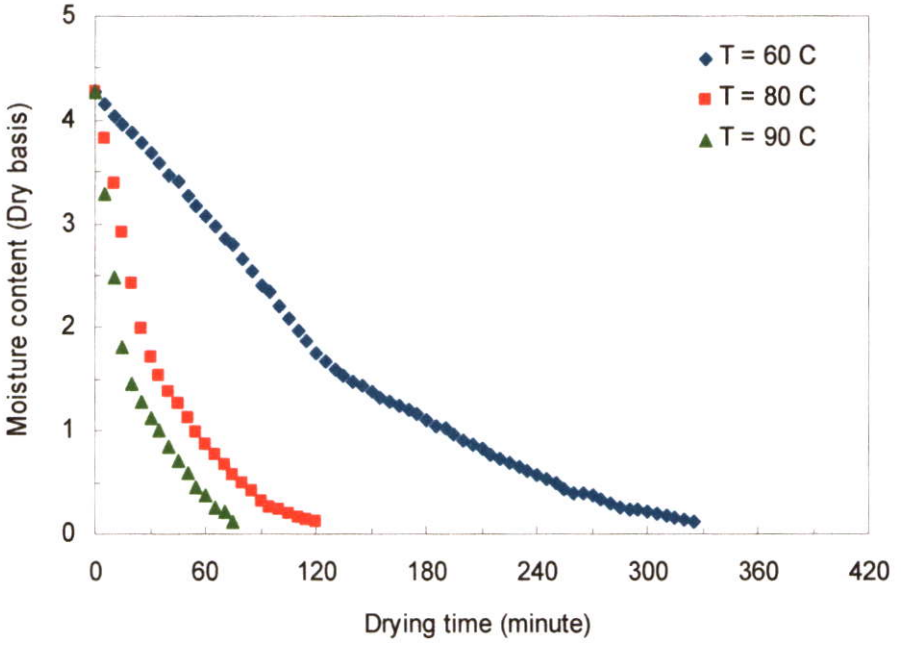
รูปที่6.36 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 2.0 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C 80^{O}C และ90^{O}C



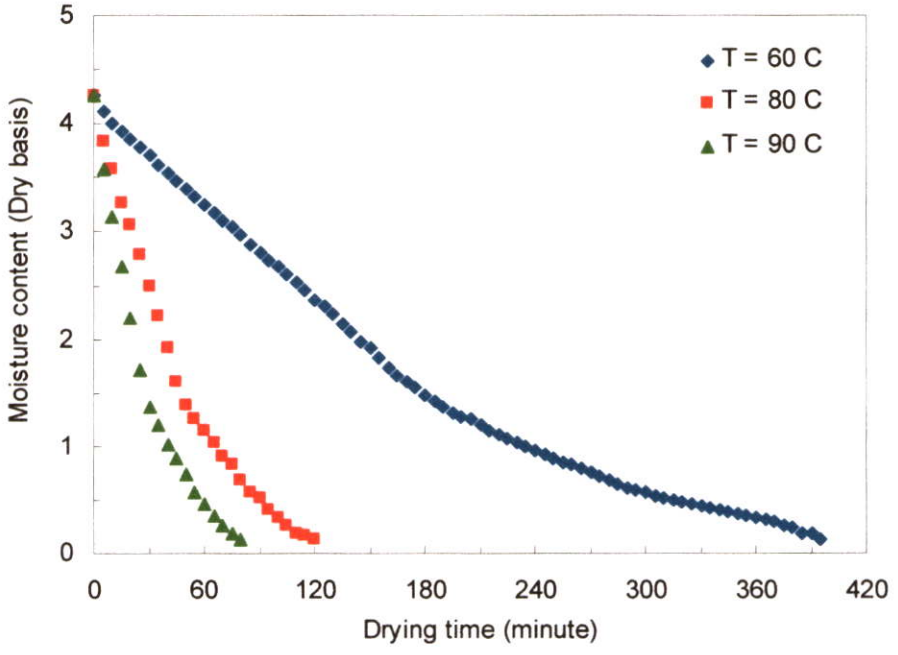
รูปที่6.37 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 2.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C 80^{O}C และ 90^{O}C



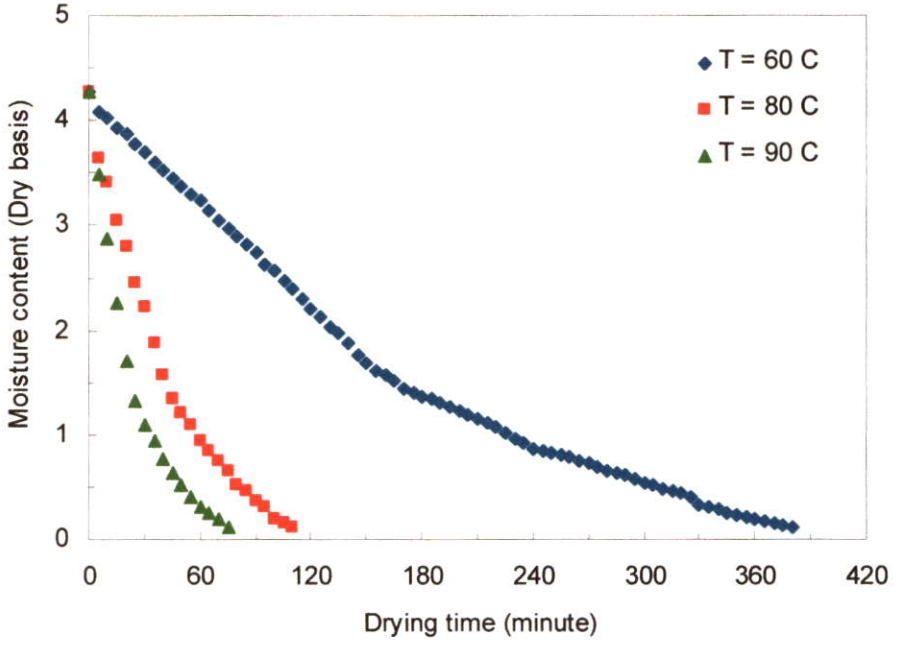
รูปที่6.38 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 3.0 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C 80 ^{O}C และ 90 ^{O}C



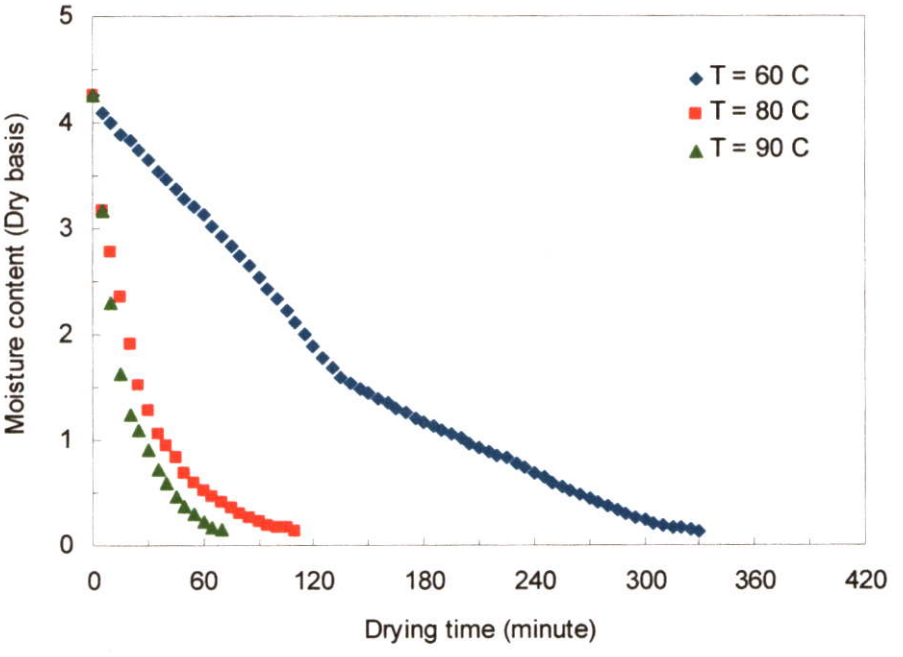
รูปที่6.39 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 3.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C 80 ^{O}C และ 90 ^{O}C



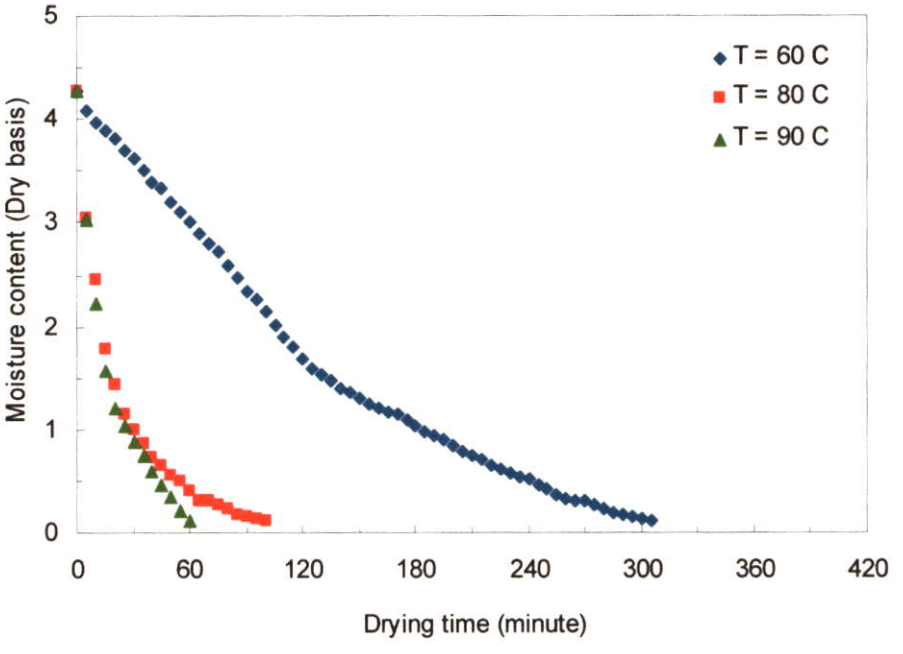
รูปที่6.40 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 2.0 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C 80 ^{O}C และ 90 ^{O}C



รูปที่6.41 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 2.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C 80 ^{O}C และ 90 ^{O}C



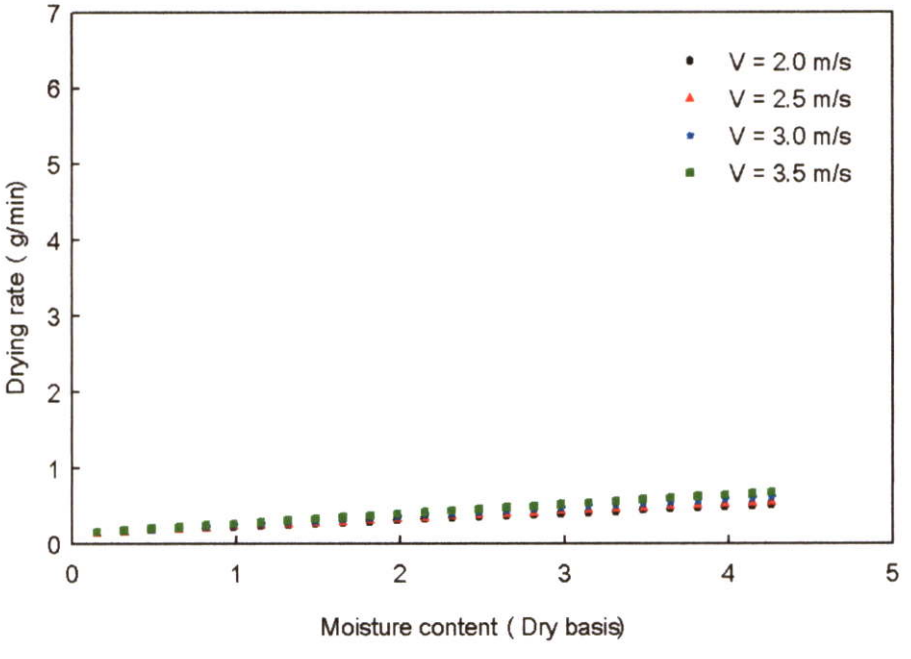
รูปที่6.42 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 3.0 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C 80 ^{O}C และ 90 ^{O}C



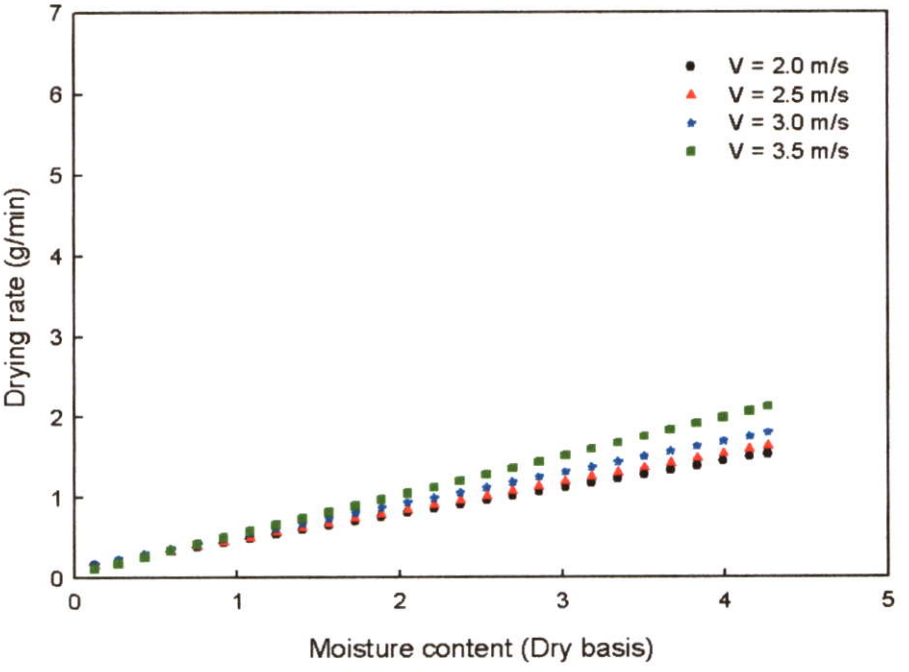
รูปที่6.43 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแผ่นกระจายลม1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็ว 3.5 m/s และที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C 80 ^{O}C และ 90 ^{O}C

6.5 อิทธิพลผลกระทบของความเร็วลมภายในหอทดลอง

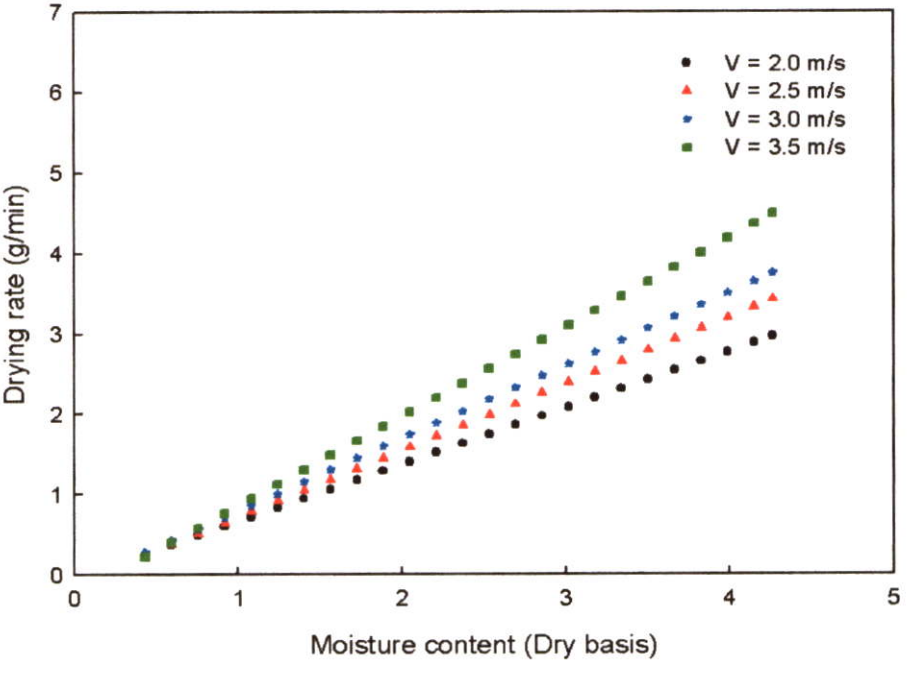
รูปที่ 6.44 ถึง 6.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับอัตราเร็วการอบแห้งโดยเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วต่างๆ และอุณหภูมิทางเข้าที่ 60,80 และ90°C จากความสัมพันธ์ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดพริกไทย จะเห็นได้ว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ความเร็วลมมีผลต่ออัตราการอบแห้งน้อยมากเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ซึ่งถ้าอบแห้งที่ความเร็วลมสูงก็ยิ่งเป็นการเพิ่มสัดส่วนของช่องว่างภายในเบดทำให้อากาศร้อนสัมผัสกับเมล็ดพริกไทยได้มากขึ้นและการใส่ครีบตัววีทำให้เมล็ดพริกไทยไม่ลอยสูง และยังทำให้เกิดกระแสลมแบบปั่นป่วนทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น โดยจากการทดลองกราฟแต่ละเส้นมีอัตราเร็วการอบแห้งมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเส้นกราฟจะชันมากขึ้นตามความเร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนนั้นมีอิทธิพลน้อยกว่าเทคนิคการอบแห้งชนิดอื่นเมื่อพิจารณาเทคนิคการอบแห้งชนิดอื่นที่ได้ทำการทดลองนั้นพบว่าทุกเทคนิคความเร็วลมมีอิทธิพลต่ออัตราการลดลงของปริมาณความชื้น



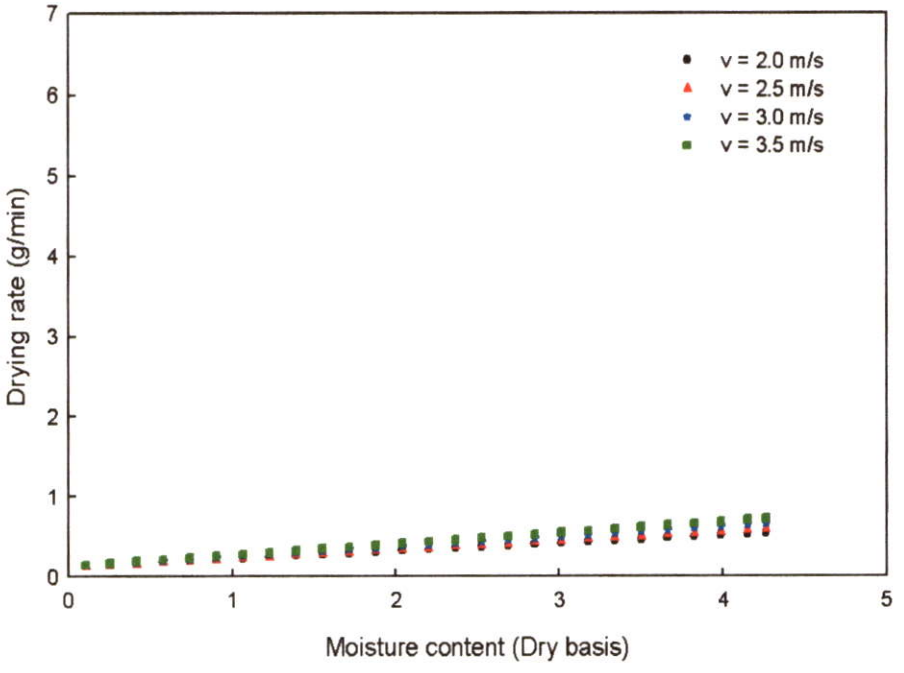
รูปที่6.44 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 °C



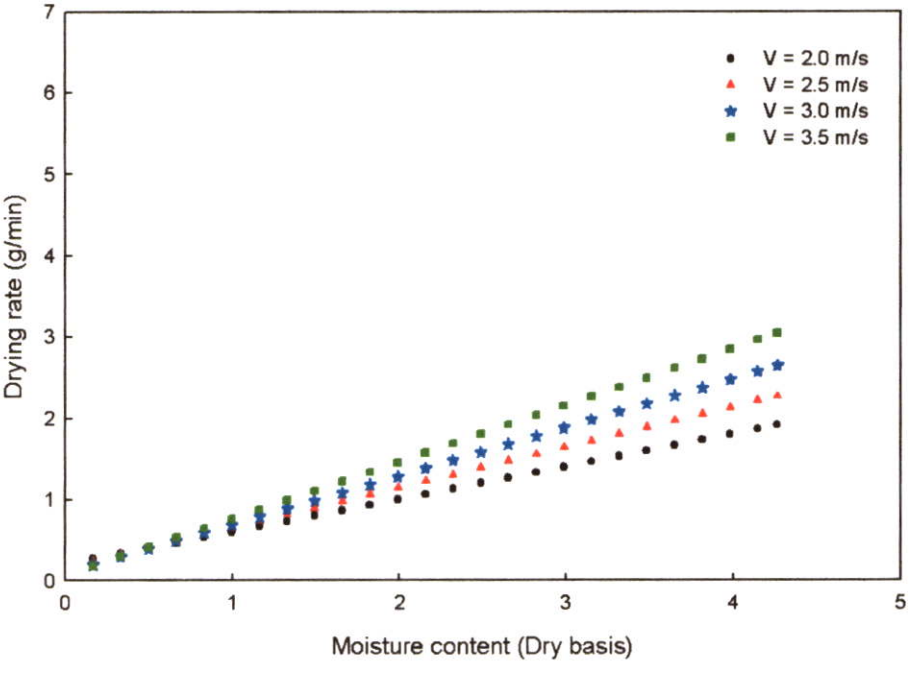
รูปที่6.45 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{O}C



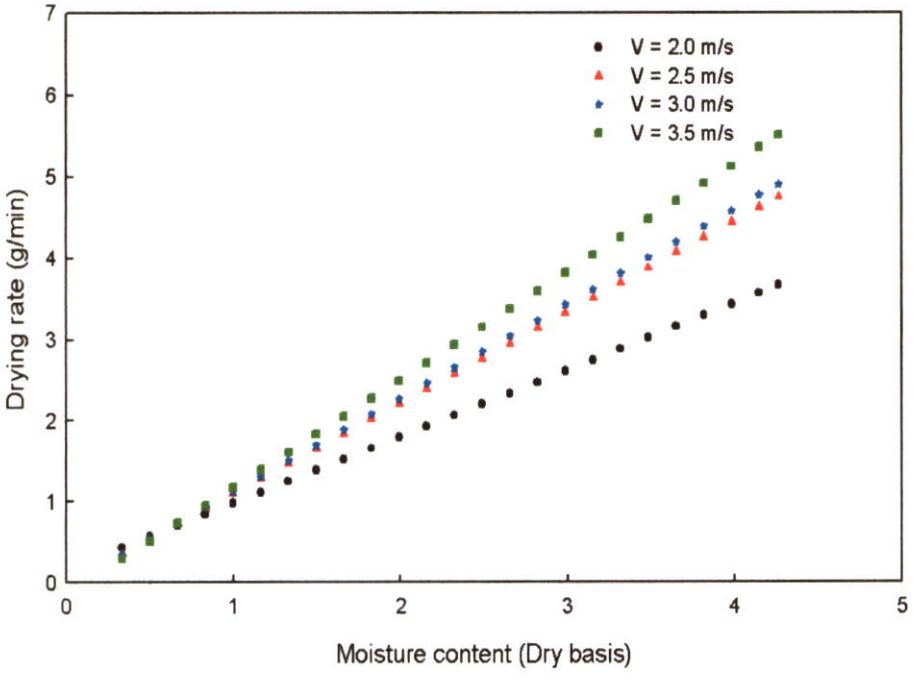
รูปที่6.46 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{O}C



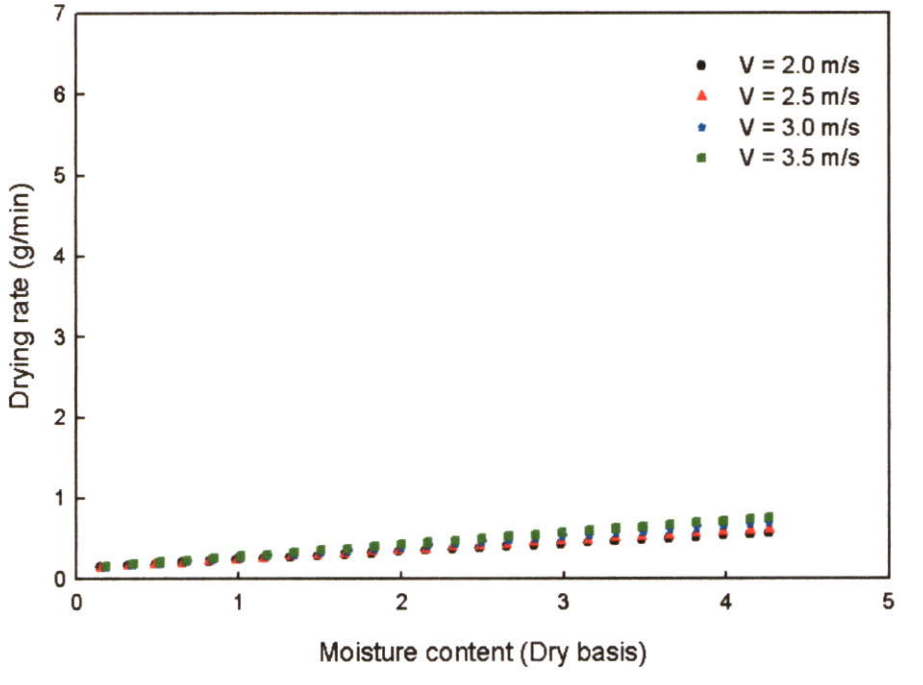
รูปที่6.47 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{o}C



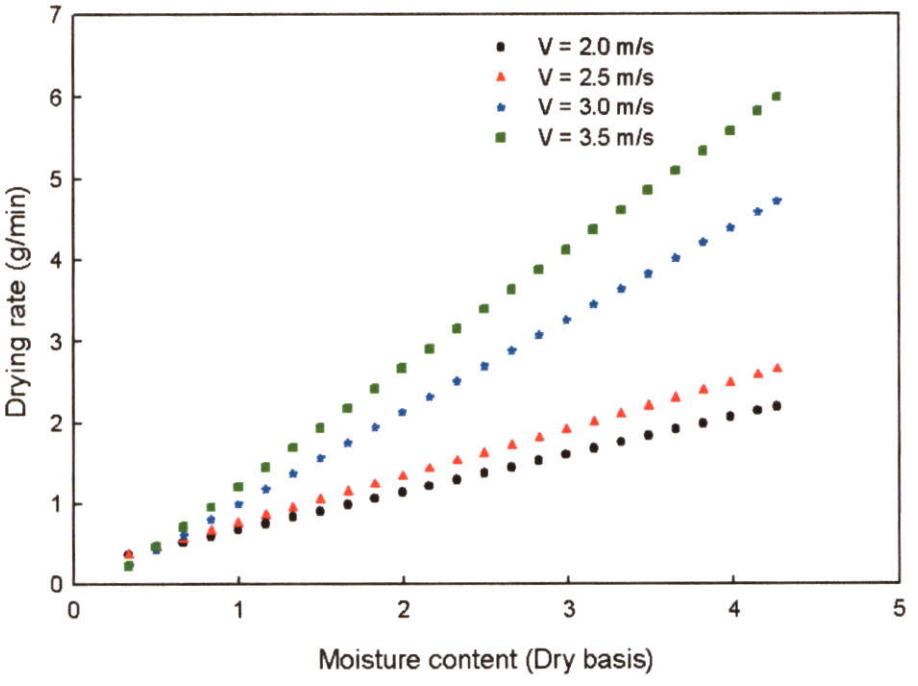
รูปที่6.48 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C



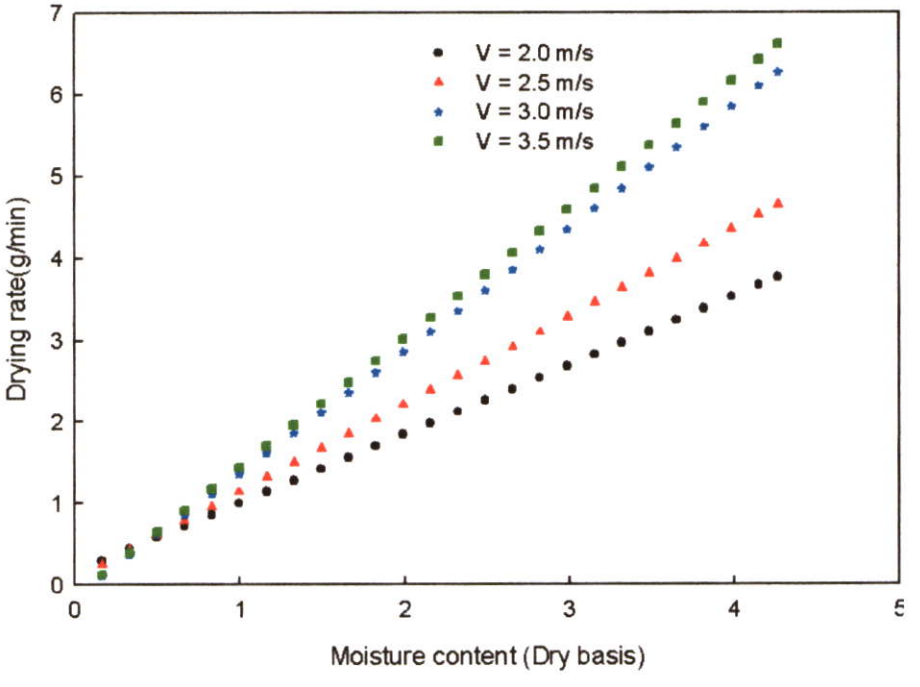
รูปที่6.49 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{O}C



รูปที่6.50 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 ^{O}C



รูปที่6.51 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C

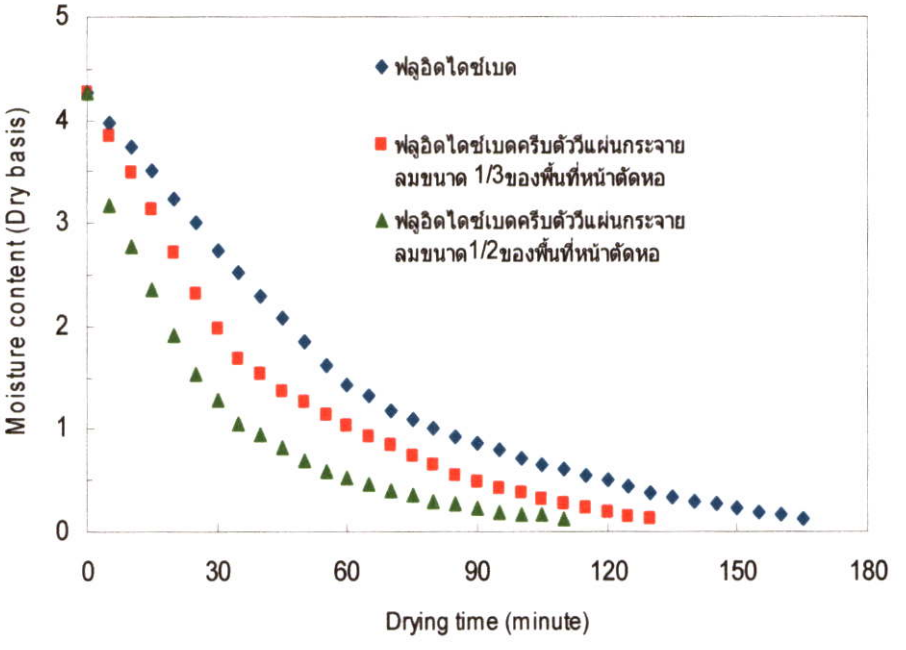


รูปที่6.52 แสดงอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดขนาดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองที่ความเร็วต่างๆและอุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{o}C

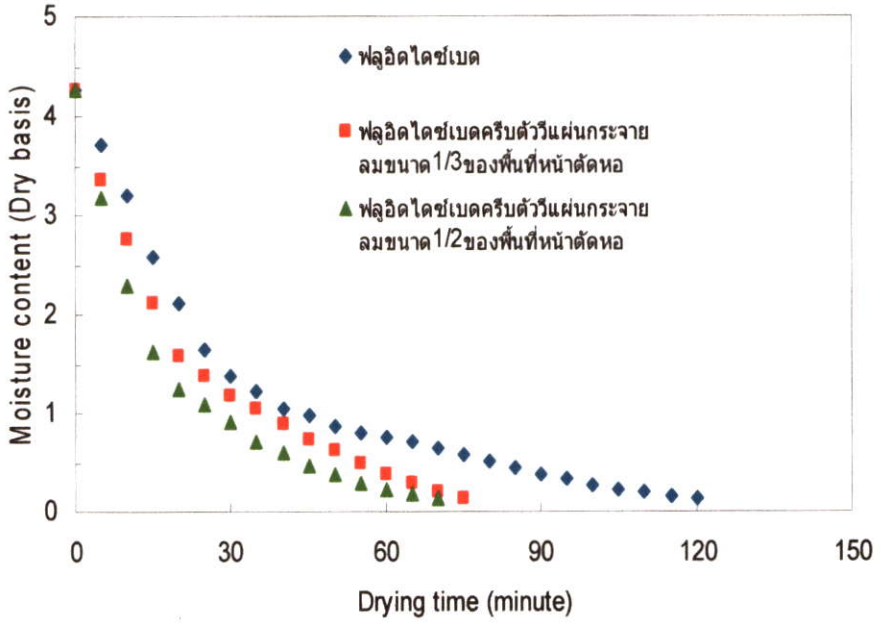
6.6 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง

6.6.1 การเปรียบเทียบและวิจารณ์ผลการอบแห้งเมล็ดพริกไทย

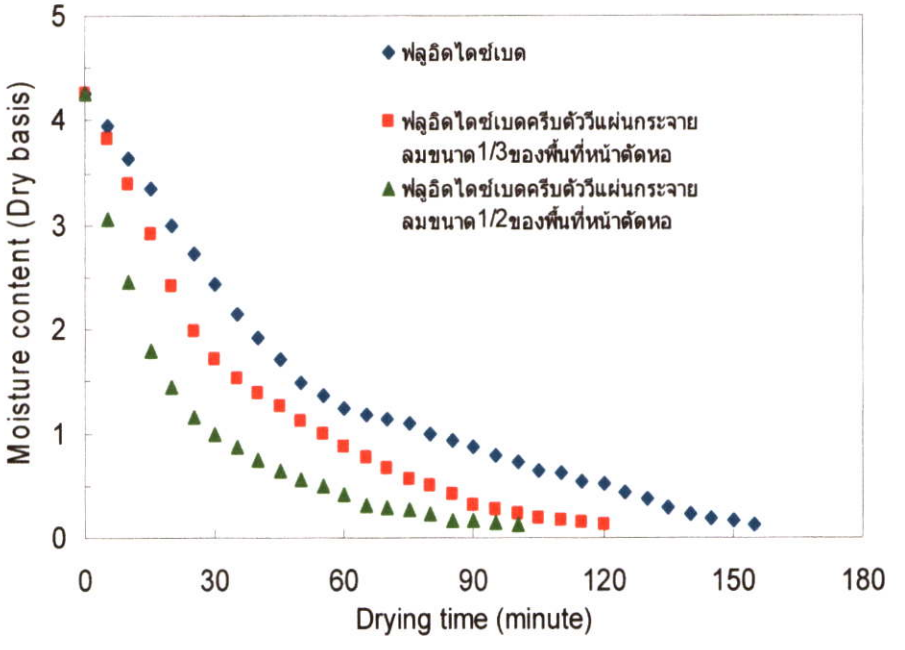
จากการทดลองอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเครื่องอบแห้งเทคนิคต่างๆเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่มีครีบรูปตัววีช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งให้กับเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด และให้อัตราการอบแห้งดีกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด และแผ่นกระจายลมที่มีขนาดพื้นที่ 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอ จะช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจากการทดลองอบแห้งเมล็ดพริกไทยนั้นสามารถทำการพัฒนาเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดได้ และได้ค้นพบเทคนิคอื่นที่ดีกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาอีกด้วย จากการทดลองนี้เทคนิคที่ให้อัตราการอบแห้งดีที่สุดคือเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่มีผิวครีบรูปตัววีแผ่นกระจายลมขนาด 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลองซึ่งให้อัตราการอบแห้งดีที่สุด ตามมาด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีผิวครีบรูปตัววีแผ่นกระจายลมขนาด 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลอง ซึ่งจากการสังเกตการทดลองพบว่าแผ่นกระจายลมขนาด1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอทดลอง จะทำให้ลมผ่านได้สะดวก ซึ่งเป็นการทำให้เกิดการปั่นป่วนของกระแสลมและยังนำความร้อนมาเติมได้เร็ว กล่าวคือมีอากาศใหม่(fresh air)เติมตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 6.53 ถึง 6.58



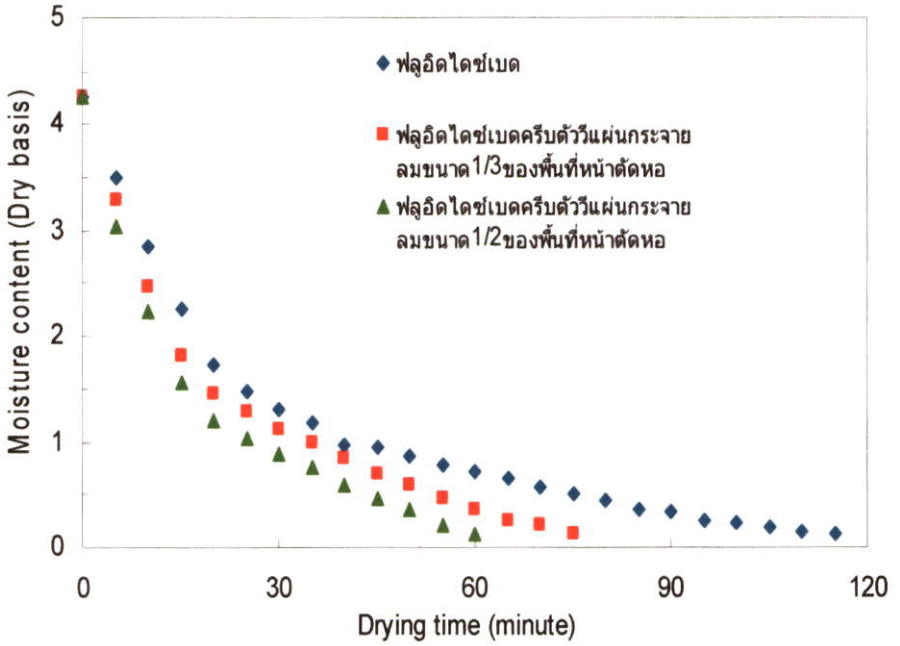
รูปที่6.53 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C



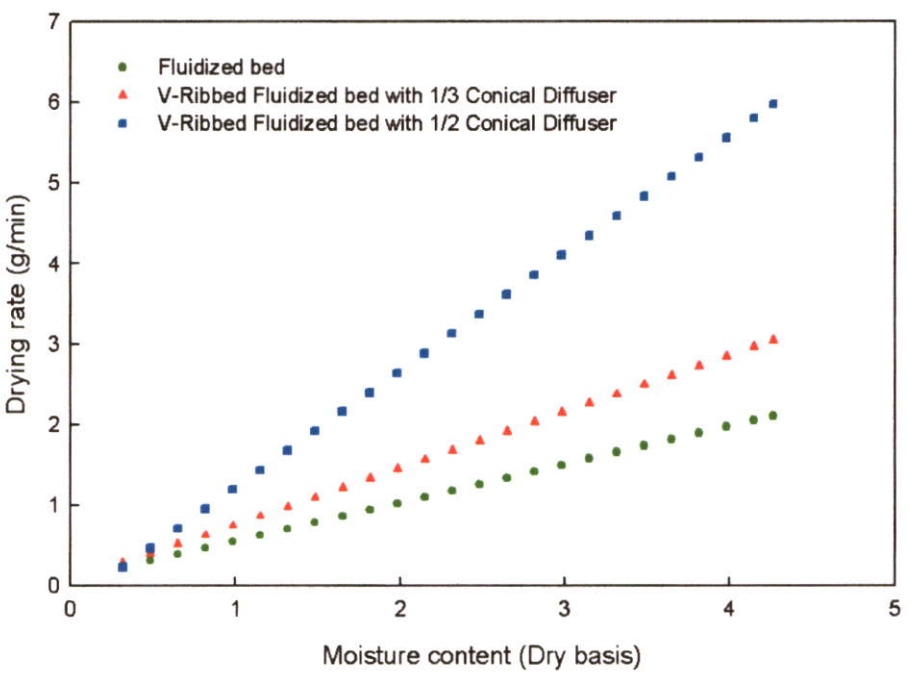
รูปที่6.54 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า90 ^{O}C



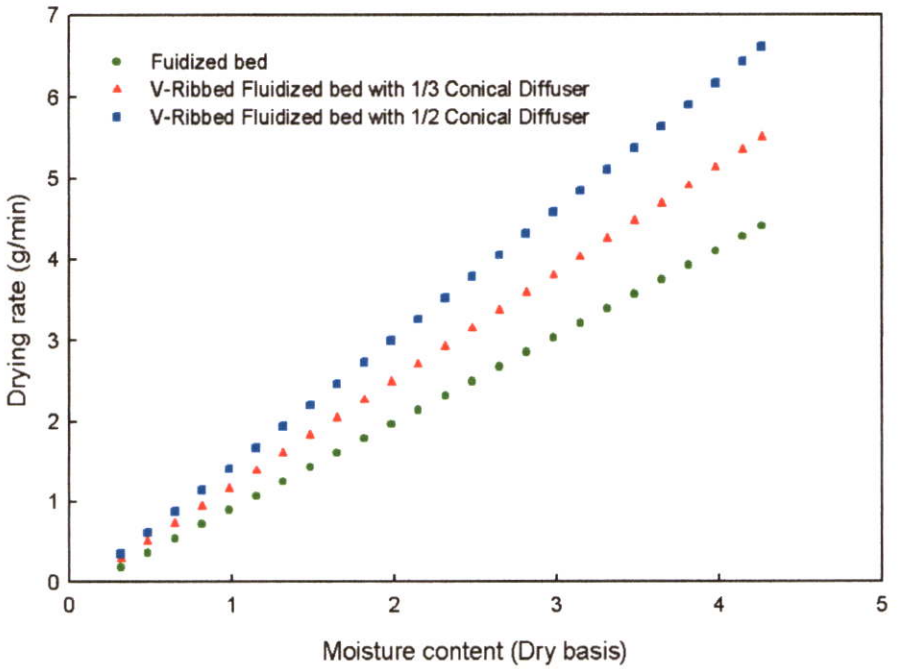
รูปที่6.55 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3.5 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{O}C



รูปที่6.56 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3.5 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{O}C



รูปที่6.57 เปรียบเทียบอัตราเร็วการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3.5 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{O}C



รูปที่6.58 เปรียบเทียบอัตราเร็วการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่างๆที่ความเร็ว 3.5 m/s อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 ^{O}C

6.7 การหาค่าคงที่ของการอบแห้ง

ในงานวิจัยได้นำรูปแบบจำลองของ Newton และ Page มาอธิบายอัตราการอบแห้งของเมล็ดกาแฟ ซึ่งรูปแบบของแบบจำลองต่างๆ มีดังนี้

6.7.1 แบบจำลองของ Newton

$$MR = \exp(-k_1 t) \tag{6.1}$$

จากสมการ (6.1) ใส่ ln ทั้งสองข้าง จะได้ดังสมการ

$$\ln MR = -k_1 t \tag{6.2}$$

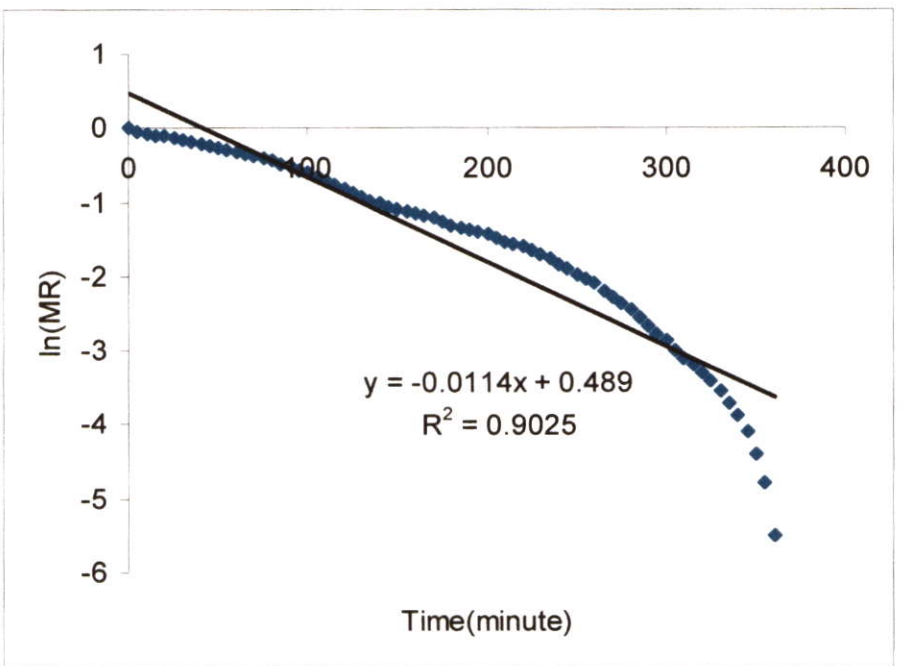
6.7.2 แบบจำลองของ Page

$$MR = \exp(-k_2 t^n) \tag{6.3}$$

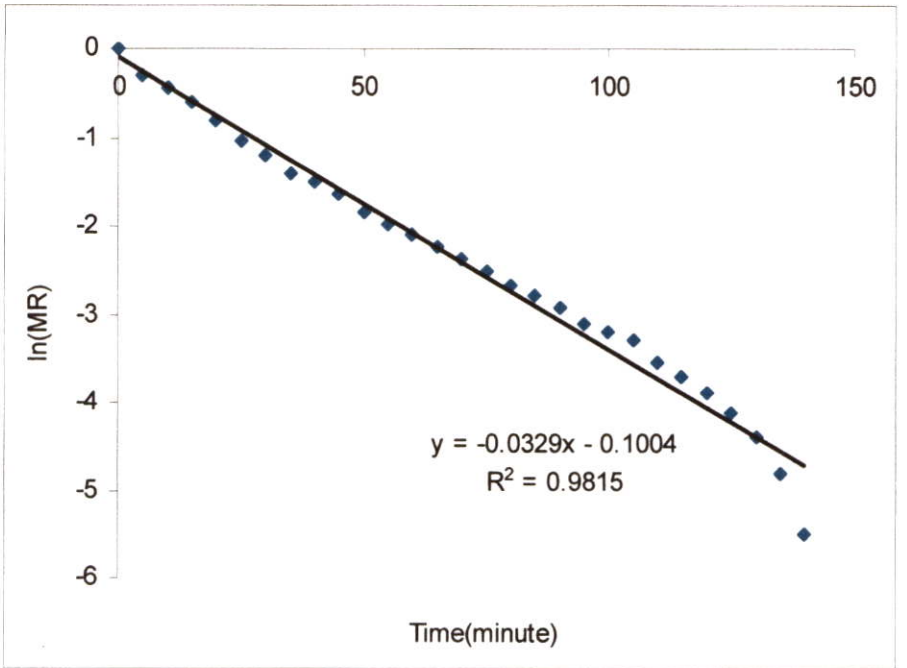
จากสมการ (6.3) ใส่ ln ทั้งสองครั้ง จะได้ดังสมการ

$$\ln(-\ln MR)=\ln k_2 + n\ln t \tag{6.4}$$

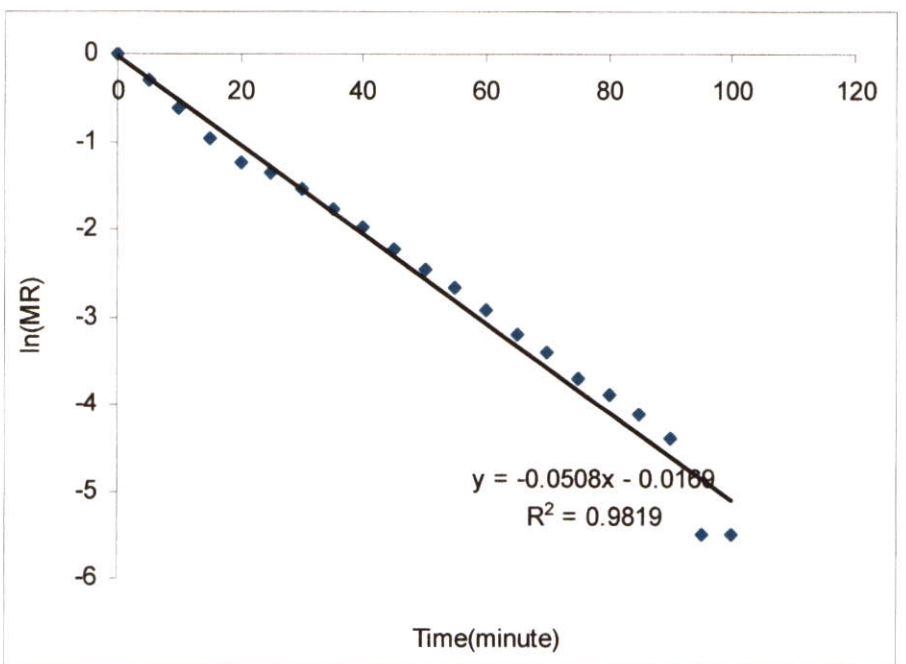
จากผลการทดลองทำการพล็อตค่าระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) ที่อยู่ในรูปของลอการิทึม กับเวลา และหาค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดพริกไทย (k_1) ดังแสดงในรูปที่ 6.59 และทำการพล็อตค่าระหว่าง $\ln(-\ln MR)$ กับ $\ln t$ และหาค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดพริกไทย (k_2) และ n ดังแสดงในรูปที่ 6.62 ดังนั้นค่าคงที่ของการอบแห้งทั้งสองสมการดังแสดงในตารางที่ 6.1



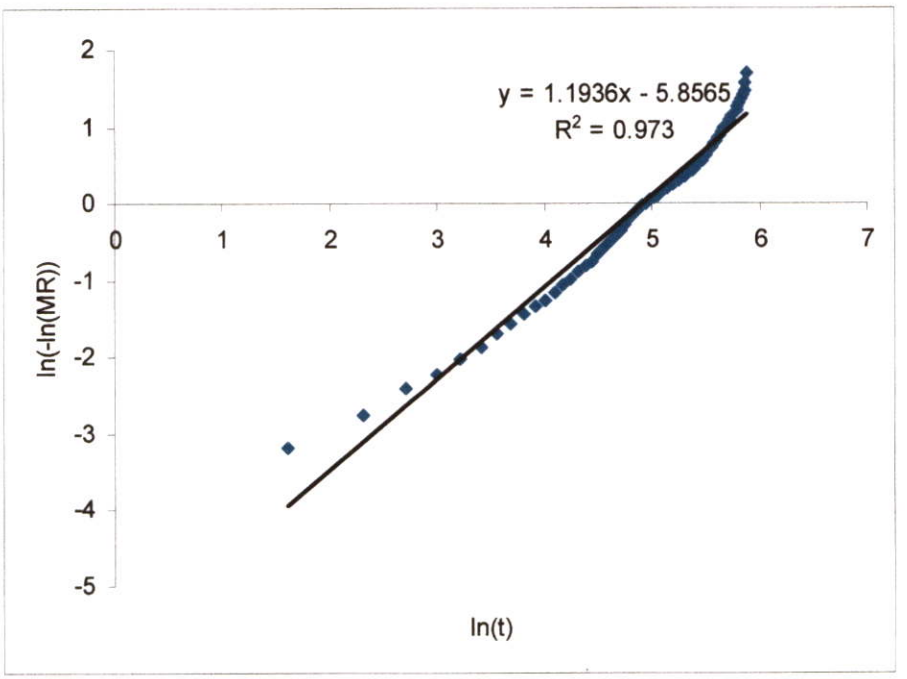
รูปที่6.59 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับ เวลาในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 60 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s



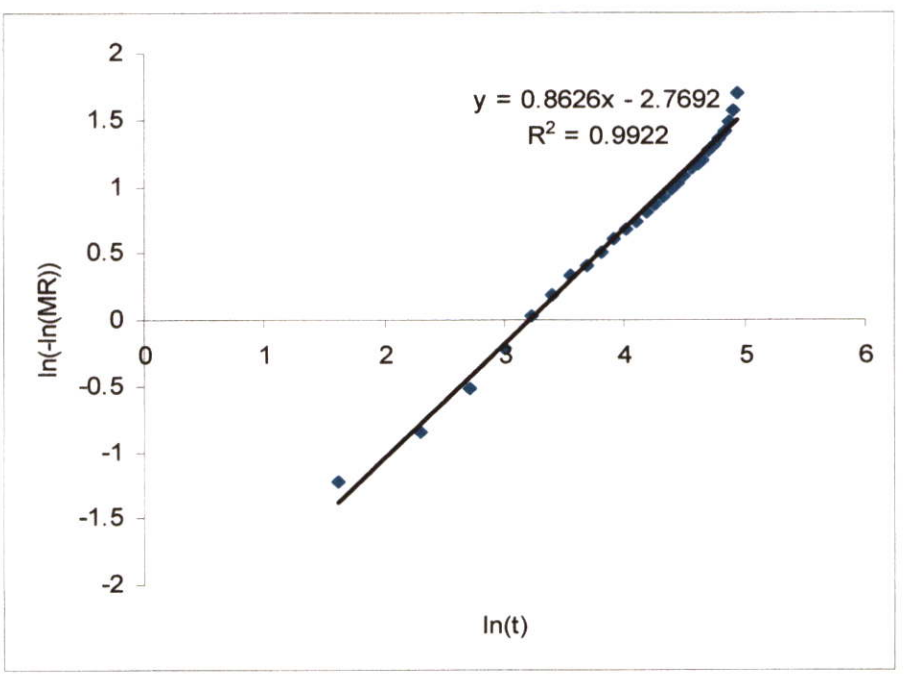
รูปที่6.60 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับ เวลาในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s



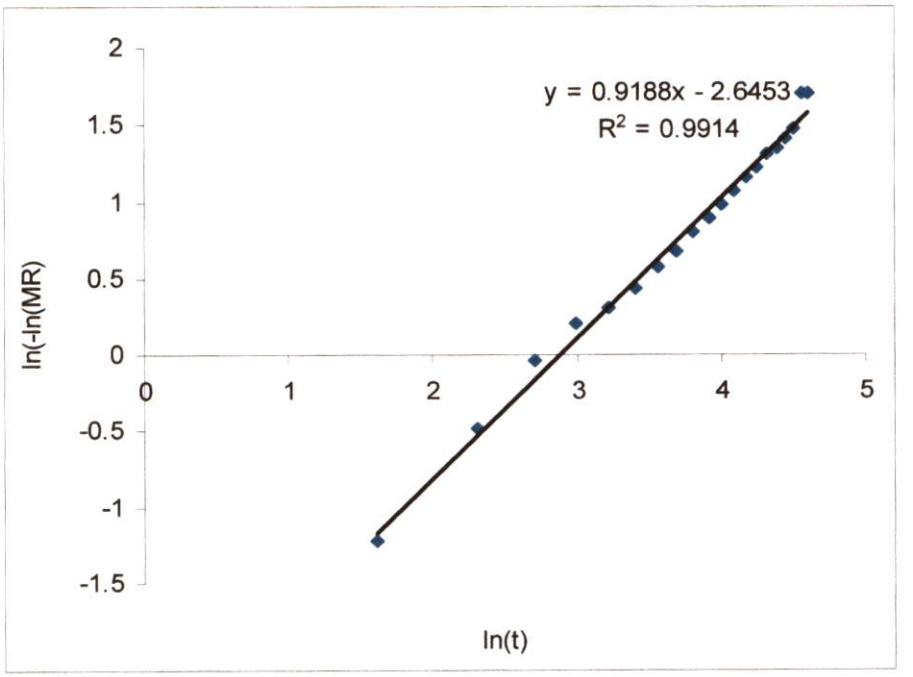
รูปที่6.61 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับ เวลาในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 90 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s



รูปที่6.62 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(t) กับ ln(-ln(MR))ในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 60 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s



รูปที่6.63 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(t) กับ ln(-ln(MR))ในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C และ ความเร็ว 3 m/s

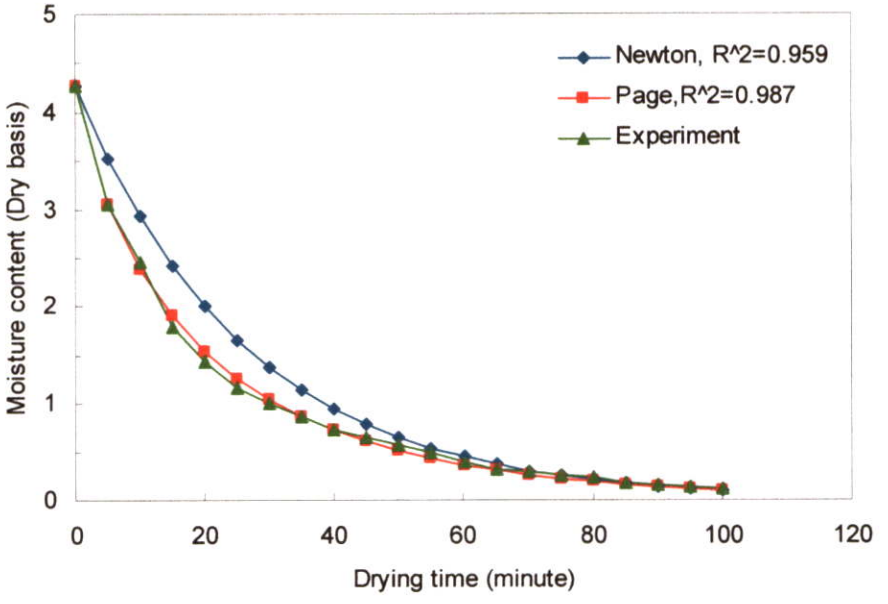


รูปที่6.64 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(t) กับ ln(-ln(MR))ในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 90 °C และ ความเร็ว 3 m/s

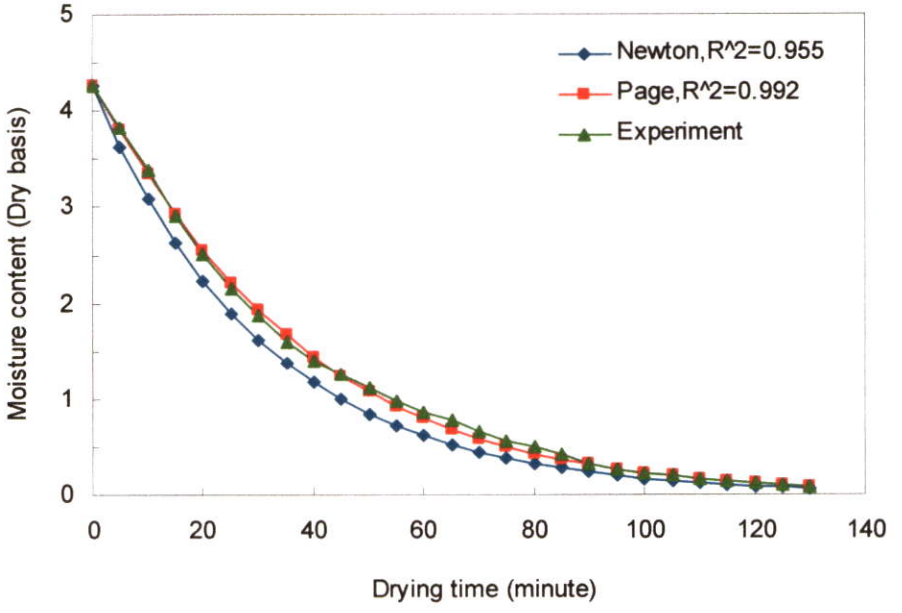
ตารางที่ 6.1 ค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดจากรูปแบบจำลองของ Newton และ Page

Test condition		Newton model		Page model		
Velocity (m/s)	Temp ,C	K1	R^2	k2	N	R^2
3	60	0.0114	0.9028	0.0029	1.1936	0.9730
	80	0.0329	0.9815	0.0627	0.8626	0.9922
	90	0.0508	0.9819	0.0709	0.9188	0.9914
3.5	60	0.0125	0.9096	0.0029	1.2057	0.9756
	80	0.0377	0.9589	0.0911	0.8058	0.9870
	90	0.0638	0.8722	0.0731	0.9327	0.9552

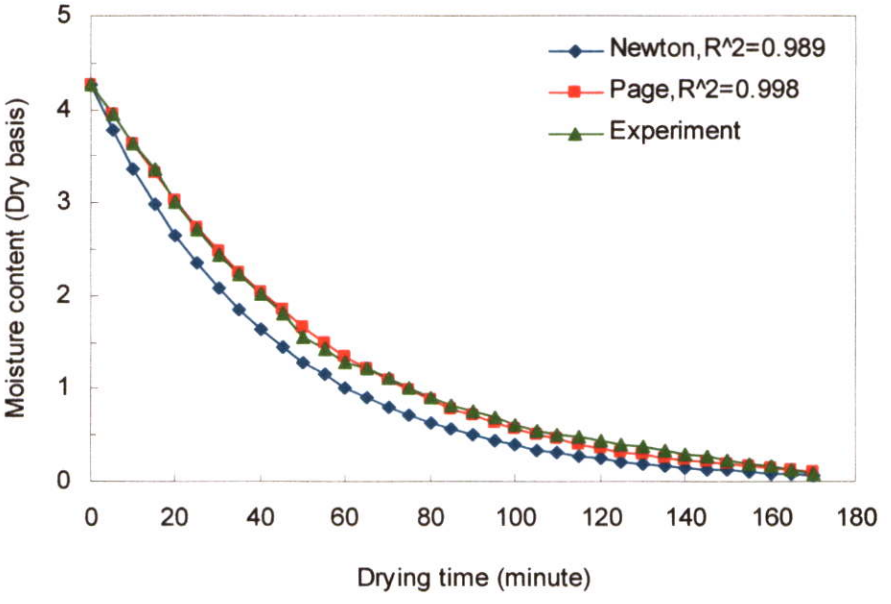
จากสมการเชิงเส้น (6.2) และ (6.4) ที่สภาวะเงื่อนไขในการทดลองค่าหนึ่งจะได้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อนำค่าคงที่มาวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลที่ได้จากการทดลองจะได้ดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่6.65 การเปรียบเทียบการทำนายอัตราอบแห้งของเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ขนาดแผ่นกระจายลม 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอ ระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่ความเร็ว 3.5 m/s และอุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C



รูปที่6.66 การเปรียบเทียบการทำนายอัตราอบแห้งของเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ขนาดแผ่นกระจายลม 1/3 ของพื้นที่หน้าตัดหอ ระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่ความเร็ว 3.5 m/s และอุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C



รูปที่6.67 การเปรียบเทียบการทำนายอัตราอบแห้งของเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่ความเร็ว 3.5 m/s และอุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C

จากรูปที่ 6.65-6.67 แสดงให้เห็นค่าการทำนายอัตราการอบแห้งของเมล็ดข้าวโพดระหว่างแบบจำลองของ Newton กับแบบจำลองของ Page ที่อุณหภูมิสูงการทำนายผลการทดลองของ Page ให้ข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองของ Newton ทุกเทคนิคการอบแห้ง ซึ่งถ้าพิจารณาจากค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ก็จะเห็นได้ว่าค่า R^2 ของ Page มีค่ามากกว่าของ Newton ทุกเทคนิคการทดลอง

บทที่ 7
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งเทคนิคต่างๆสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

7.1.1 อุณหภูมิมีอิทธิพลโดยตรงต่ออัตราการอบแห้ง แต่อาจทำให้คุณภาพของเมล็ดพริกไทยด้อยลง ดังนั้นพืชแต่ละชนิดก็จะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งแตกต่างกันไป

7.1.2 ความเร็วลมมีอิทธิพลต่อการอบแห้งทุกเทคนิค ยกเว้นเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดเนื่องจากเมื่อความเร็วลมยิ่งสูง เบดก็จะขยายตัวทำให้เบดเจือจางอากาศก็จะแทรกตัวผ่านไปตามช่องว่างโดยไม่สัมผัสกับเมล็ดพริกไทย

7.1.3 เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทดลองทรงสี่เหลี่ยมใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอทดลองทรงกระบอก ประมาณ 10 %

7.1.4 เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอกรวยใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ประมาณ 20 %

7.1.5 เทคนิคที่ให้อัตราการอบแห้งดีสุดคือเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่มีครีบตัววีแผ่นกระจายลมขนาด 1/2 ของพื้นที่หน้าตัดหอซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแล้วสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ประมาณ 50%

7.1.6 ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการอบแห้งแต่ละเทคนิคพบว่าแบบจำลองของ Page ทำนายผลอัตราการอบแห้งได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่ากว่าแบบจำลองของ Newton โดยพิจารณาจากค่า R^2 ซึ่งให้ค่าได้ใกล้เคียงกับ 1

7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ในการทดลองถ้าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเปลี่ยนแปลงมากๆ มีผลให้อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นในเมล็ดพริกไทยต่อเวลามีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นควรจะมีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และตัวแปรอื่นอีก

7.2.2 ควรที่จะศึกษาผลของการนำอากาศที่ใช้อบแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ และความคุ้มค่าของพลังงาน

7.2.3 พัฒนาการอบแห้งเมล็ดพืชโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหอรูปทรงสี่เหลี่ยมแผ่นกระจายลมแบบกรวยไปสู่อุตสาหกรรมการอบแห้งเมล็ดพืชในประเทศต่อไปในอนาคต

บรรณานุกรม

กาญจน์มุนี ศรีวิศาลภพ. 2546. **คุณรู้เรื่องกาแฟดีแค่ไหน...?**. กรุงเทพฯ : ดอกหญ้ากรุ๊ฟ.

กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย และ กิตติ สิทธิประภาพร. 2545. "การจำลองแบบและการทดลองการอบแห้งพริกแบบชั้นบาง" หน้า 592-595 ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์. 2542. **การพัฒนาการผลิตและการตลาดกาแฟ**. งานจัดประกวดเมล็ดกาแฟ ปี 2541/42 และการสัมมนา. กรุงเทพฯ : บริษัท บพิธการพิมพ์ จำกัด

ณัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ อภิชิต เทอดโยธิน. 2542. "แบบจำลองการแพร่ความชื้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน." หน้า 268-273. ใน **การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วิวัฒน์ วุฒิวิวัฒน์ชัย. 2540. "แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท**. พิมพ์ครั้งที่7. กรุงเทพฯ : หนังสือในโครงการส่งเสริมการสร้างตำรา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง.

อนันต์ พงษ์ธรกุลพานิช. 2539. "การศึกษาการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชัน." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Soponronnarit, S. Kittiporn, K. and Prachayawarakorn, S. 1999. "CORN DRYING IN A CONTINUOUS FLUIDIZED BED DRYER." **Agricultural Engineering Journal**. 8(4) : 223-231.

Srivastava, V.K. and John, J. 2002. "Deep bed grain drying modeling" **Energy Conversion and management**. 43 : 1689-1708.

Suksankraison, K. Patumsawad, S. and Fungtammasan, B. 2001 "Prediction of Minnimum Fluidisation Velocity form 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

ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติทางกายภาพของเบดที่เป็นเมล็ดพืช

1. เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลมเทียบเท่าเมล็ดพืช

ในการทดลองสมมติให้เมล็ดพืชเป็นทรงกลม โดยการหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมเทียบเท่าเมล็ดพืชทำได้โดยนำเมล็ดพืชมานับจำนวนเมล็ด แล้วใส่ในกระบอกตวง (Western Germany) ขนาด 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความละเอียด 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วอ่านค่าของเมล็ดข้าวโพดที่ถูกแทนที่ เมื่อนำไปแทนค่าในสมการของทรงกลม จะได้เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลมเทียบเท่าเมล็ดพืช

2. ค่าความหนาแน่นของเมล็ดพืช

นำเมล็ดพืชมาชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งดิจิตอล (TH2000) ขนาด 2000 กรัมและมีค่าความละเอียด 0.01 กรัมแล้วนำไปใส่ในกระบอกตวงแล้วอ่านปริมาณของของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยเมล็ดพืช แล้วทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นต่อไป

3. การหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพืช

จากการทดลองจะอบเมล็ดพืชด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยใช้ตู้อบ (Memert UM500) จนกระทั่งเมล็ดพืชมีมวลคงที่ แล้วนำค่ามวลเริ่มต้นและมวลสุดท้ายที่คงที่มาคำนวณค่าความชื้นเริ่มต้น

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> :การคำนวณหาค่าความชื้นของข้าวโพด (Corn Moisture Content)

เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก,%wb = (w-d)/w x 100%

เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง,%db = (w-d)/d x 100%

น้ำหนักกระป๋องเปล่า = 30 g

น้ำหนักกระป๋องเปล่า +น้ำหนักข้าวโพด (ก่อนเข้าตู้อบ) = 130 g

น้ำหนักกระป๋องเปล่า +น้ำหนักข้าวโพด (หลังออกตู้อบ) = 48.85 g

ดังนั้น น้ำหนักข้าวโพดก่อนเข้าตู้อบ,w = 130-30 = 100 g

น้ำหนักข้าวโพดหลังออกตู้อบ,d = 49-30 = 18.85 g

แทนค่าลงในสมการได้ดังนี้

เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก =(100-18.85)/100 x 100% = 81.15 %

เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง =(100-18.85)/18.85 x 100% = 430 %

4. สัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเมล็ดพืชเมื่อเกิดฟลูอิไดเซชัน

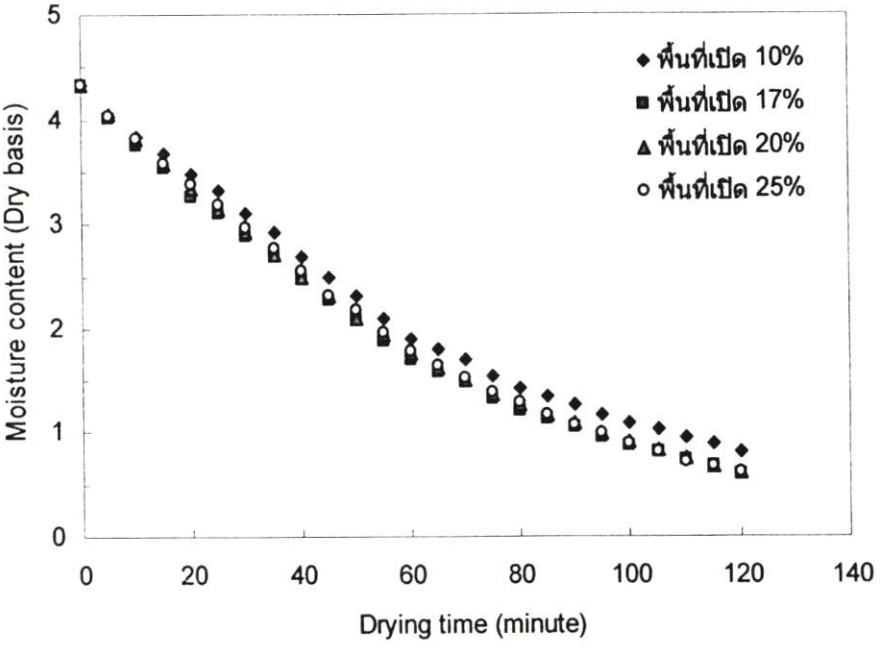
จาก WEN และ YU ในสมการที่ 3.5 คือ

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

ในการหาค่าสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเมล็ดพืชเมื่อเกิดฟลูอิไดเซชันให้ทำการแทนค่าแฟคเตอร์ความเป็นทรงกลมของพืชแต่ละชนิดเข้าไปในสมการที่ 3.5

ภาคผนวก ข.
การทดลองเปรียบเทียบแผ่นกระจายลมและการวิเคราะห์ด้านพลังงานไฟฟ้า

1. การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์พื้นที่เปิดของแผ่นกระจายลม



รูปที่ ข.1 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่เปิดของแผ่นกระจายลมความเร็ว 1.1 Umf อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 ^{o}C

จากกราฟเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์พื้นที่เปิดของแผ่นกระจายทั้ง 4 แบบ พบว่าค่าอัตราการอบแห้งของพื้นที่เปิด 17 % , 20% , 25 % ไม่แตกต่างกัน แต่พื้นที่เปิด10 % อัตราการอบแห้งน้อยกว่าแบบอื่น และยังทำให้เกิดความดันตกคร่อมมากขึ้น

2. การวิเคราะห์ด้านพลังงานไฟฟ้า

การวิเคราะห์ด้านพลังงานสามารถคำนวณได้จากการใช้กำลังทางไฟฟ้า เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับหาอัตราค่าไฟฟ้าโดยคิดจากตารางของการไฟฟ้านครหลวง เป็นอัตราค่าใช้ไฟฟ้าแบบปกติสำหรับกิจการขนาดเล็กรวมกับบ้านพักอาศัยโดยมีข้อมูลดังนี้

ตารางที่ ข.1 อัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแบบปกติ

อัตราค่าไฟฟ้า	ค่าไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าไฟฟ้าสูงสุด (บาท)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
150 ยูนิต แรก (หน่วยที่ 0-150)	1.8047	270.71	40.9
250 ยูนิตต่อไป (หน่วยที่151-400)	2.7781	694.5	40.9
เกิน 400 ยูนิตขึ้นไป (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป)	2.978	-	40.9

ที่มา การไฟฟ้านครหลวง

ตัวอย่างการคำนวณต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าของวิธี Steady หาได้จากจำนวนยูนิตคูณด้วยอัตราของค่าไฟฟ้า และจำนวนยูนิตหาได้จากกำลังทางไฟฟ้าที่วัดได้จากวิธี Steady มีค่าค่อนข้างคงที่เท่ากับ 7.46 kW คูณด้วยจำนวนชั่วโมงที่ใช้ไฟฟ้า สามารถหาได้ดังนี้

การอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิ 80 $^{\circ}C$ โดยใช้เวลาสำหรับอบแห้ง 7 ชั่วโมง จำนวนยูนิตของพัดลมอัดอากาศหาได้จาก $Unit_f = 7.46 \int_0^7 dt = 14.92\ Unit$ และขนาดของฮีตเตอร์ 12 kW จำนวนยูนิตของฮีตเตอร์หาได้จาก $Unit_h$ = 12*2= 24 $Unit$ จำนวนยูนิตรวมเท่ากับ 38.92 $Unit$ ต่อการอบแห้งหนึ่งครั้งในหนึ่งวันเครื่องจักรทำงาน 8 ชั่วโมง เครื่องอบแห้งสามารถอบแห้งได้วันละ 1 ครั้ง สามารถคิดค่าไฟฟ้าได้ดังนี้

ค่าไฟฟ้าใน 1 เดือนหาได้จากจำนวนวันทำงานใน 1 เดือนมี 24 วัน

จำนวนยูนิต/เดือน = 38.92*1*24 วัน= 934.08 ยูนิต

ค่าไฟฟ้า/เดือน = (1.8047*150)+(2.7781*250)+(2.978*331.25)+40.9

= 1,992.59 บาท/เดือน

ค่าไฟฟ้า/ปี = 1,992.59*12 = 23,911.11 บาท/ปี

ภาคผนวก ค.
ข้อมูลผลการวิจัยจากผู้วิจัยอื่น

ตารางที่ ค.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอาหารบนพื้นฐานของ Fick's law

Food Material	Specification	Temperature ($^{\circ}C$)	D_{eff} (cm^2/s)
Apple	-	66	$6.4x10^{-5}$
	McIntosh, var.	66	$1.1x10^{-5}$
	Granny Smith, var.	30	$2.6x10^{-6}$
	Granny Smith, var.	76	$3.6x10^{-5}$
	Granny Smith, var.	71	$1.6x10^{-5}$
Beet	-	66.5	$1.5x10^{-5}$
Tapioca root	-	84	$2.7x10^{-6}$
		74	$4.8x10^{-6}$
		55	$3.5x10^{-6}$
Potatoes	-	65.5	$1.6x10^{-5}$
	-	65	$1.4x10^{-5}$
	King Edward, var.	31	$1.6x10^{-6}$
	Binjie, var.	31	$0.62x10^{-5}$
	Arran Banner	31	$1.5x10^{-6}$
	Pentland Crown	31	$1.4x10^{-6}$
Fish, muscle	Cod, ~0.05% fat	30	$3.4x10^{-6}$
	Haddokk, 0.105% fat	30	$3.3x10^{-6}$
	Halibut, 0.208% fat	30	$2.5x10^{-6}$
	Whiting, 0.036% fat	30	$2.7x10^{-6}$
	Whiting, 0.036% fat	25	$0.82x10^{-6}$
Avocado	14.7% oil content	31	$1.1x10^{-6}$
	14.7% oil content	43	$2.1x10^{-6}$
	14.7% oil content	56	$3.3x10^{-6}$
	4.7% oil content	58	$1.8x10^{-6}$
	7.9% oil content	58	$1.3x10^{-6}$
	9.2% oil content	58	$1.2x10^{-6}$
Sugar beet root	-	81	$1.3x10^{-5}$
		60	$7.0x10^{-6}$
		47	$3.8x10^{-6}$

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

Food Material	Specification	Temperature ($^{\circ}C$)	D_{eff} (cm^2/s)
Fish	Herring, 2.0% fat	30	1.6×10^{-6}
	6.4% fat	30	9.5×10^{-7}
	12.5% fat	30	3.9×10^{-7}
	Dogfish, 4.0% fat	30	2.2×10^{-6}
	7.2% fat	30	1.6×10^{-6}
	14.6% fat	30	1.3×10^{-6}
Tobacco leaf	*Nicotiana tabacum L.*	30	3.2×10^{-9}
	cv Coker 258	40	4.7×10^{-9}
		50	8.1×10^{-9}
Fish	Sword fish, 2-3% fat	40	3.0×10^{-6}
		55	3.9×10^{-6}
Fish	Sword fish, salted in	40	2.6×10^{-6}
	saturated brine	55	3.3×10^{-6}

จาก Johnson และคณะ (1998)

ตารางที่ ค.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

Food Material	Specification	Temperature ($^{\circ}C$)	D_{eff} (cm^2/s)
Fish	Cod, ~0.05% fat	30	8.1×10^{-7}
	Catfish, 0.10% fat	30	8.0×10^{-7}
	Haddock, 0.105% fat	30	$\sim 6 \times 10^{-7}$
	Halibut, 0.208% fat	30	5.8×10^{-7}
	Mackerel, 0.694% fat	30	3.5×10^{-7}
	Whiting, 0.036% fat	30	4.8×10^{-7}
	Herring, 2.9% fat	30	7.9×10^{-7}
	6.9% fat	30	2.5×10^{-7}
	12.5% fat	30	1.6×10^{-7}
	16.2% fat	30	1.3×10^{-7}
Peperoni	13.3% fat	12	5.7×10^{-7}
	25.1% fat	12	4.7×10^{-7}
Apple	Below 0.13-0.15% Moisture content	30	4.9×10^{-7}
Starch gel	0.8% moisture content	25	1.0×10^{-10}
	6.3% moisture content	25	1.5×10^{-9}
	14.1% moisture content	25	3.6×10^{-8}
Potato	Below 15% moisture content	65	2.0×10^{-6}

ตารางที่ ค.3 สมการความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน

Author	Equation
Wen and Yu	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p}\left(\sqrt{1135.7 + 0.048Ar} - 33.7\right)$
Baeyens and Geldart	$Ar = 1823\,\mathrm{Re}_{mf}^{1.07} + 21.27\,\mathrm{Re}_{mf}^{2}$
Leva *et al.*	$U_{mf} = \frac{7.39 d_p^{1.82}\left(\rho_p - \rho_g\right)^{0.94}}{\rho_g^{0.06}}$
Goroshko *et al.*	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p}\left(\frac{Ar}{1400 + 5.2\sqrt{Ar}}\right)$
Leva	$U_{mf} = \frac{7.169\times10^{-4} d_p^{1.82}\left(\rho_p - \rho_g\right)^{0.94} g}{\rho_g^{0.006}\mu_g^{0.88}}$
Bena	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p}\left(\frac{1.38\times10^{-3} Ar}{\left(Ar + 19\right)^{0.11}}\right)$
Rowe and Henwood	$U_{mf} = \frac{8.1\times10^{-3} d_p^2\left(\rho_p - \rho_g\right)g}{\mu_g}$
Miller and Logwinuk	$U_{mf} = \frac{0.00125 d_p^2\left(\rho_p - \rho_g\right)^{0.9}\rho_g^{0.1} g}{\mu_g}$
Frantz	$U_{mf} = \frac{1.065\times10^{-3} d_p^2\left(\rho_p - \rho_g\right)g}{\mu_g}$
Davies and Richardson	$U_{mf} = \frac{7.8\times10^{-4} d_p^2\left(\rho_p - \rho_g\right)g}{\mu_g}$
Pillai and Raja Rao	$U_{mf} = \frac{7.01\times10^{-4} d_p^2\left(\rho_p - \rho_g\right)g}{\mu_g}$

ตารางที่ ค.3 (ต่อ)

Author	Equation
Broadhurst and Becker	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p}\left[\frac{Ar}{2.42\times10^5 Ar^{0.85}\left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{0.13} + 37.7}\right]^{0.5}$
Saxena and Vogel	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p}\left(\sqrt{25.28^2 + 0.0571Ar} - 25.28\right)$
Babu *et al.*	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p}\left(\sqrt{25.25^2 + 0.0651Ar} - 25.25\right)$
Richardson and Da St. Jeromino	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p}\left(\sqrt{25.7^2 + 0.0365Ar} - 25.7\right)$
Doichev and Akhmakov	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p}\left(1.08\times10^{-3} Ar^{0.947}\right)$
Thonglimp	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p}\left(\sqrt{31.6^2 + 0.042Ar} - 31.6\right)$
Bourgeois and Grenier	$\mathrm{Re}_{mf} = \sqrt{25.46^2 + 0.03824Ar} - 25.46$
Riba, Routie and Couderc	$\mathrm{Re}_{mf} = 1.54\times10^{-2}(Ga)^{0.66}$, $M_v^{0.7}Ga = \frac{d_p^3\rho_g^2 g}{\mu_g^2}$ $M_v = \frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}$

จาก Wu and Baeyens (1991)

ภาคผนวก ง.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

จัดโดย

สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย

ร่วมกับ

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การเปรียบเทียบคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดพืชแบบฟลูอิดไดซ์หมุนควงในหอมีครีบ

อิทธิพล แก่งสันเทียะ, อำนาจ บุญลอย, ชินรักษ์ เธียรพงษ์ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์*
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเทคนิคลมหมุนควงที่ภายในหอมีการติดครีบกับเทคนิคลมหมุนควงแบบหอโล่ง โดยทำการอบในหอทดลองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.17 เมตร สูง 1 เมตร ภายในหอมีการติดตั้งครีบตามแนวตั้ง ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 430% (มาตรฐานแห้ง) โดยทดลองที่อุณหภูมิ 80°C และ 100°C และใช้ความเร็วของอากาศภายในหอทดลอง $1.0U_{mf}$ $1.3U_{mf}$ และ$1.6U_{mf}$ (U_{mf} คือความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด) และใช้เวลาทดลองแต่ละกรณี 180 นาที วัดความชื้นของเมล็ดข้าวโพดทุกๆ 20 นาที ซึ่งผลจากการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา

จากการทดลองพบว่าในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา ความเร็วลมไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดข้าวโพด แต่ในการอบแห้งด้วยเทคนิคลมหมุนควงแบบหอโล่งและหอที่มีการใส่ครีบตามแนวตั้ง พบว่าความเร็วลมมีผลต่อการลดค่าความชื้นของเมล็ดข้าวโพด โดยช่วยให้ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดพืชระเหยออกได้เร็วขึ้น เนื่องจากเทคนิคลมหมุนควงทำให้เมล็ดพืชมีการไหลอย่างปั่นป่วนและการติดครีบช่วยให้เมล็ดพืชมีการสั่นและเกิดการกระจายตัวในหอทดลองเพิ่มมากขึ้นทำให้เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน ช่วยให้การอบแห้งเร็วขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 3 เทคนิค พบว่าการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเทคนิคลมหมุนควงที่มีการติดครีบให้ผลที่ดีกว่าแบบเทคนิคลมหมุนควงแบบหอโล่งและแบบฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา

คำสำคัญ: ฟลูอิดไดซ์หมุนควง อัตราการอบแห้ง ครีบแนวตั้ง

1. บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย ช่วยให้เก็บรักษาวัสดุไว้ได้นานและเป็นการป้องกันการเสียหายของวัสดุเนื่องจากการทำลายของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนและความชื้น การถ่ายโอนความร้อนจากอากาศไปยังวัสดุและการถ่ายโอนความชื้นจากวัสดุไปยังอากาศจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนและความชื้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของกระแสอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง

เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชอาจจะแบ่งได้เป็นสองชนิดคือเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ (fixed-bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (moving-bed dryer) ซึ่งเทคนิคการอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล [1], [3], [10] พบมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีหลายงานวิจัยที่นำเสนอด้วยเทคนิคดังกล่าว [2], [4], [6] – [8], [11], [12] แต่เมื่อพิจารณาเทคนิคการอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดพบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งทำได้ยากเนื่องจากมีเงื่อนไขหลายอย่างจึงได้ทำการทดลองหาเทคนิคใหม่ๆ มาใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืช และเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนควง [5], [9] ก็เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจ โดยในวิจัยได้นำเทคนิคดังกล่าวมาใช้และเพิ่มการติดแผ่นครีบแนวตั้งในหออบแห้ง ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดค่าความชื้นได้เร็วขึ้นและให้อัตราการอบแห้งที่ดีขึ้น

*corresponding author; kppongje@kmitl.ac.th

2. ทฤษฎี

2.1 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_w

$$M_w = \frac{w-d}{w} \tag{1}$$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง, M_d

$$M_d = \frac{w-d}{d} \tag{2}$$

เมื่อ w คือ มวลของวัสดุ , kg
d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

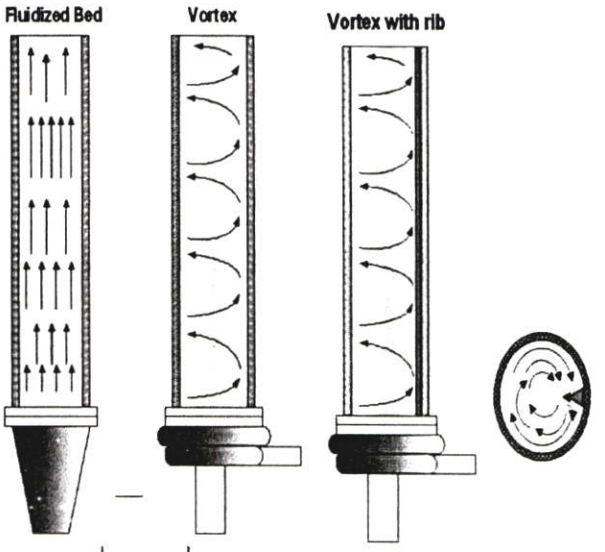
3. อัตราความเร็วของการอบแห้ง, $Drying\ rate$

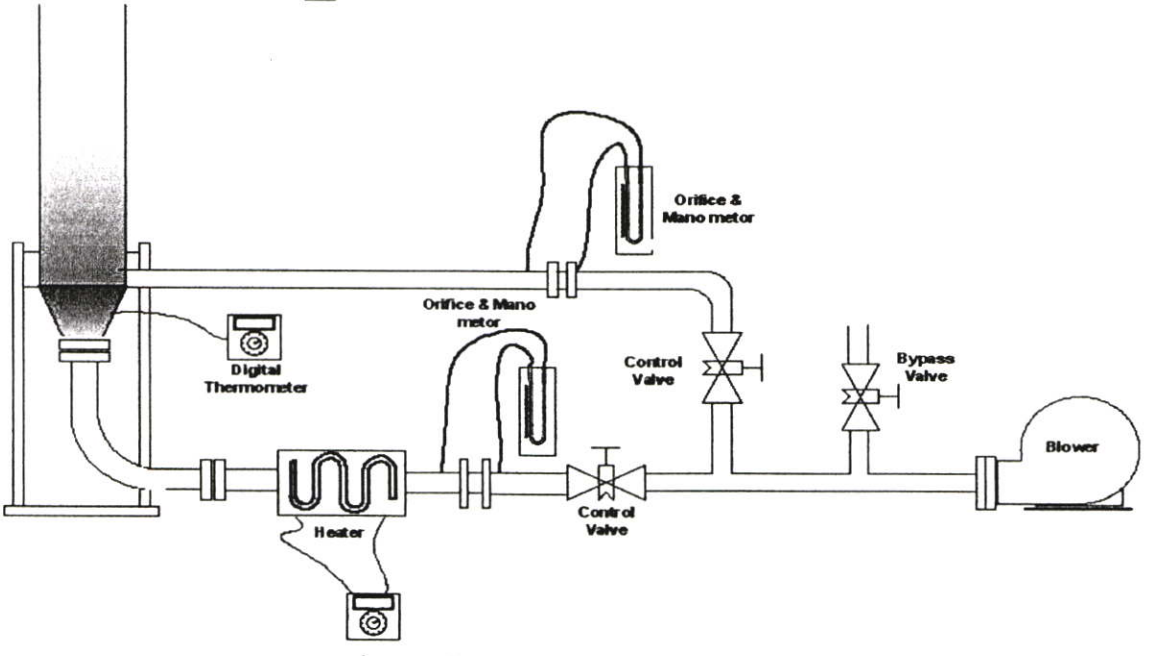
$$Drying\ rate = \frac{dX}{dt} = \frac{x_0 - x}{t - t_0} \tag{3}$$

เมื่อ $x_0 - x$ คือ ค่าความเปลี่ยนแปลงของความชื้น
$t - t_0$ คือ ค่าความเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลา

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนควงและอุปกรณ์ต่างๆได้ถูกแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย หอทดลอง, อุปกรณ์ให้ความร้อน, ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ, ชุดควบคุมความเร็วลม, โบลเวอร์, ออริฟิสมิเตอร์และ เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล





รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลองและหอทอลองแบบเทคนิคต่างๆ

3.1 เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งหอทดลองมีรูปทรงกระบอกทำจากอะคริลิกใส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.17 เมตร และความสูง 1 เมตร ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1(a) แผ่นกระจายลมเป็นแบบเจาะตรงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู เท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร และมีจำนวน 908 รู คิดเป็นพื้นที่เปิด 32%

3.2 เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนควง

เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนควงใช้อุปกรณ์พื้นฐานร่วมกับเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแต่จะมีการป้อนอากาศในแนวรัศมี ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1(b) และมีการติดครีบแนวตั้งขนาดกว้าง 2 ซม. ตลอดความสูงของหอทดลอง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1(c) โดยที่การติดตั้งครีบดังกล่าวเป็นการออกแบบลักษณะการไหลของอากาศโดยมีแนวความคิดที่จะทำให้เกิดการปั่นป่วนของลมร้อนในการอบแห้งภายในหอทดลองให้มากขึ้นซึ่งจะช่วยให้ลมร้อนสัมผัสกับเมล็ดพืชได้มากขึ้นและเพิ่มการกระจายตัวกันของเมล็ดข้าวโพดภายในหอทดลองจะช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากขึ้นด้วย

3.3 เมล็ดพืชสำหรับการทดลอง

ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดข้าวโพดนวล 200 กรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 430% (มาตรฐานแห้ง)

3.4 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองเริ่มจากใช้โบลเวอร์ขนาด 7.46 kW ที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบขับอากาศผ่านท่อขนาด 80 มม. วัดความเร็วของอากาศที่ทางเข้าหอทดลองด้วยออริฟิสมิเตอร์ อากาศถูกทำให้ร้อนด้วยขดลวดความร้อนขนาด 12 กิโลวัตต์ พร้อมควบคุมอุณหภูมิ ในการทดลอง ใช้อุณหภูมิของอากาศที่ 80°C และ 100°C วัดอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอทดลองด้วยดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ และ

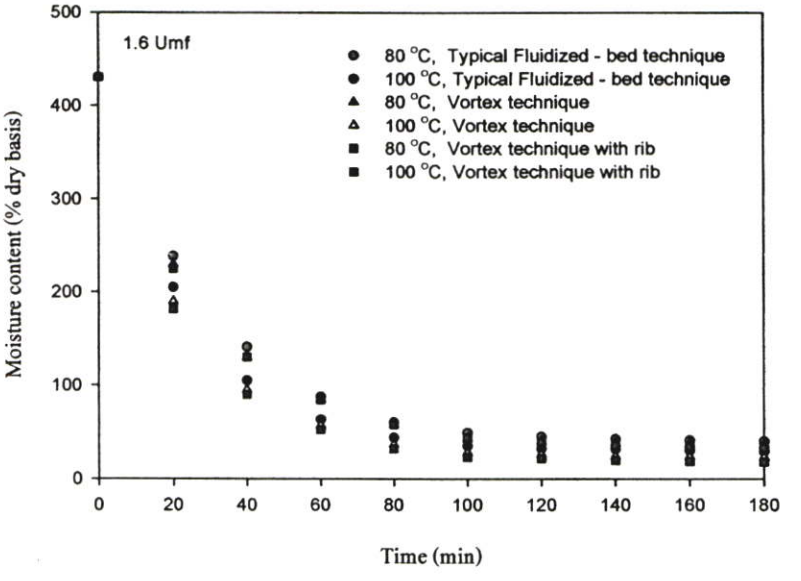
วัดอุณหภูมิภายในหอทดลองด้วยเทอร์โมคัพเปิลชนิด K โดยใช้ความเร็วลมที่ $1.0U_{mf}$, $1.3U_{mf}$ และ$1.6U_{mf}$ วัดความชื้นในเมล็ดข้าวโพดที่ลดลงทุกๆ 20 นาทีจากน้ำหนักเมล็ดข้าวโพดที่เปลี่ยนไปโดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลที่มีค่าความละเอียด 0.01 กรัม ใช้เวลาในการอบแห้งแต่ละครั้ง 180 น

4. ผลการทดลอง

วิเคราะห์ 3 ส่วนด้วยกันคือส่วนแรกจะวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนต่อการลดค่าความชื้นต่อมาจะวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของความเร็วลมที่มีผลต่อการลดค่าความชื้นและสุดท้ายคือวิเคราะห์อัตราความเร็วของการอบแห้ง (Drying rate) ของแต่ละเทคนิค

4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนต่อการอบแห้ง

ในรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่เหลืออยู่ (ค่าการอบแห้ง) ในแต่ละช่วงเวลาของการอบแห้ง ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน จากรูปจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิของลมร้อนมีผลต่อการอบแห้งของทั้ง 3 เทคนิค ซึ่งที่อุณหภูมิ 100°C ของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบลมหมุนควงที่มีการติดครีบสามารถลดค่าความชื้นได้ดีกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา และเทคนิคลมหมุนควงแบบหอโล่งที่อุณหภูมิเดียวกัน



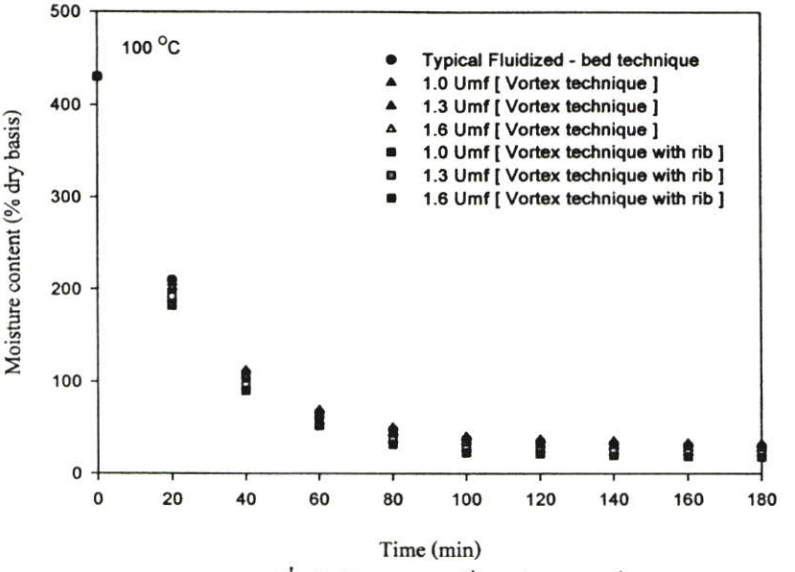
รูปที่ 2 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนต่อการอบแห้ง

4.2 อิทธิพลของความเร็วลมต่อการอบแห้ง

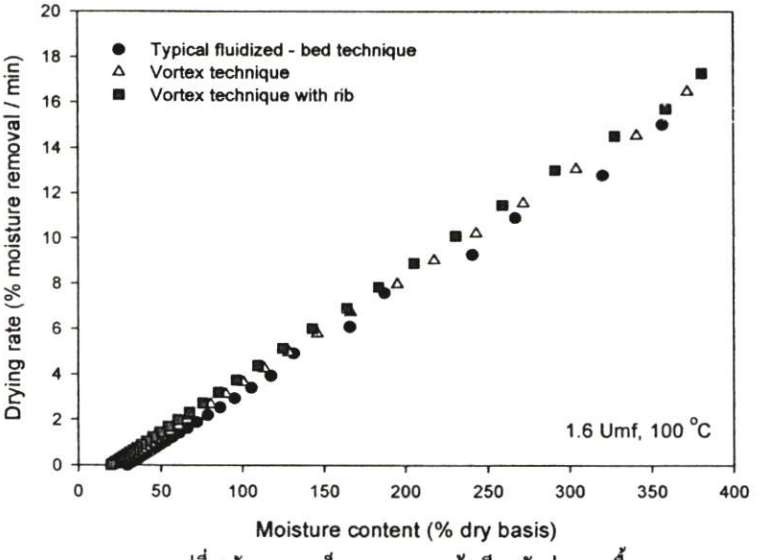
ในรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับค่าความชื้นที่ความเร็วลมร้อน $1.0U_{mf}$, $1.3U_{mf}$ และ$1.6U_{mf}$ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา เทคนิคลมหมุนควงแบบหอโล่ง และเทคนิคลมหมุนควงที่มีการติดครีบแนวตั้ง ตามลำดับ พบว่าความเร็วลมไม่มีผลต่อการอบแห้งสำหรับเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาแต่สำหรับเทคนิคลมหมุนควงแบบหอโล่งและแบบหออบที่ติดครีบแนวตั้ง พบว่าความเร็วลมมีอิทธิพลต่อการอบแห้ง ซึ่งที่ความเร็วลมสูงๆ เช่น $1.6U_{mf}$ พบว่าสามารถลดค่าความชื้นได้เร็วกว่าที่ความเร็วลมต่ำที่ $1.0U_{mf}$ และ $1.3U_{mf}$

4.3 วิเคราะห์อัตราความเร็วของการอบแห้ง

ในรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับค่าอัตราความเร็วของการอบแห้ง (Drying rate) ของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา เทคนิคลมหมุนควงแบบหอโล่ง และเทคนิคลมหมุนควงที่มีการติดครีบแนวตั้ง ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง ค่าอัตราความเร็วของการอบแห้งของทั้ง 3 เทคนิคจะมีค่าที่สูงและจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งค่าความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งค่าอัตราความเร็วของการอบแห้งของเทคนิคลมหมุนควงที่มีการติดครีบจะมีค่าที่สูงกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาและเทคนิคลมหมุนควงแบบหอโล่ง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดความปั่นป่วนของลมร้อนในหอทำให้เกิดการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างสูง ทำให้ความชื้นที่มีอยู่ที่เมล็ดข้าวโพดแพร่กระจายออกมาได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 3 อิทธิพลของความเร็วลมต่อการอบแห้ง



รูปที่ 4 อัตราความเร็วของการอบแห้งเทียบกับค่าความชื้น

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวโพด ด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด เทคนิคลมหมุนควงและเทคนิคลมหมุนควงที่มีการติดครีบ ที่ความชื้นเมล็ดพืชเริ่มต้น 430% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอากาศ 80 และ 100 องศาเซลเซียส มวล 200 กรัม สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาความเร็วลมในหอทดลองไม่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง แต่สำหรับการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบลมหมุนควง ที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าความเร็วลมในหอทดลองมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง คือเมื่อเพิ่มความเร็วลมในหอทดลองจะมีผลทำให้อัตราการอบแห้งดีขึ้น

2. ผลที่ได้จากการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบลมหมุนควงที่มีการติดครีบเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาและเทคนิคลมหมุนควงแบบหอโล่งในสภาวะที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยเทคนิคลมหมุนควงที่มีผิวครีบจะให้อัตราการอบแห้งที่ดีกว่า

3. อัตราการอบแห้ง (Drying rate) เทียบกับอัตราส่วนความชื้นของเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบลมหมุนควงที่มีผิวครีบ พบว่ามีค่าที่สูงกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาและเทคนิคลมหมุนควงแบบหอโล่งในสภาวะที่อุณหภูมิเดียวกัน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, การอบแห้งเมล็ดพืชอาหาร, พิมพ์ครั้งที่5, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2535: 50-67.

[2] A. Berna et al., Drying kinetics of Majorcan seedless grape variety, In: Mulumdar AS, editor, Drying'91, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1991: 455-462.

[3] A.N. Chandran, S. Subba Rao and Y.B.G. Varma, Fluidized bed drying of solids, AIChE Journal 36, Vol. 36, Issue 1, 1990; 1: 29–38.

[4] C.T. Kiranoudis et al., Drying kinetics of onion and green pepper, Drying Technology, 1992; 10: 955-1011.

[5] E.K. Akpinar, Y. Bicer, A. Midilli, Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer, Journal of Food Process Engineering, Vol.26 Issue 6, 2003: 515.

[6] F. Kaymak-Ertekin, Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers, Journal of Food Science 67 (1): 168–175.

[7] G.H. Foster et al., Drying grain with heat from solar energy and crop residue, ASAE—American Society of Agricultural Engineers Publication, 1980; 1: 137–141.

[8] M. Abid, R. Gibert and C. Laguerie, An experimental and theoretical analysis of the mechanisms of heat and mass transfer during the drying of corn grains in a fluidized bed, Int Chem Eng 30, 1990; 4:632–642.

[9] M.O. zbey, M.S. Soylemez, Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains, Energy Convers. Manage., Vol. 46, Issues 9-10, 2005 : 1495-1512.

[10] P.P. Thomas and Y.B.G. Varma, Fluidized bed drying of granular food materials, Powder Technoly 69, 1992: 213–222.

[11]S.R.S.Dias, F.P.L.Futata, J.A.Carvalho, H.S.Couto and M.A.Ferreira, Investigation of food grain drying with pulsating air flow, Int. Comm. in Heat Mass Transfer, Vol. 31,2004; 3.

[12] S. Watano, N. Yeh and K. Miyanami, Drying of granules in agitation fluidized bed, J Chem Eng Jpn 31, 1998; 6: 908–913.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอิทธิพล แก่งสันเทียะ
วัน เดือน ปีเกิด	25 ธันวาคม 2520 ที่จังหวัดอุบลราชธานี
ที่อยู่	422/ 117 ม.15 ต.เมืองเก่า อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000
ประวัติการศึกษา	2543 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ.2544-2546	ตำแหน่งวิศวกรโครงการ บ.เมืองทองอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม จำกัด
พ.ศ.2547-2550	ตำแหน่งวิศวกรผลิตและซ่อมบำรุง บ.ไทยแอโรว์ จำกัด
พ.ศ.2550-ปัจจุบัน	ตำแหน่งหัวหน้าแผนกซ่อมบำรุง บ.แพคเซิร์ฟ จำกัด
ผลงานวิจัย	
พ.ศ.2546	- คุณสมบัติทางสถิตของกาบรองลื่นเพลากลมชนิดสั้นมากด้วยน้ำมันไบโอดีเซล
พ.ศ.2548	- คุณลักษณะเครื่องอบแห้งรูปกรวยแบบหมุนควง
พ.ศ.2550	- การเปรียบเทียบคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดพืชแบบฟลูอิดไดซ์หมุนควงในหอมีครีบ
พ.ศ.2551	- คุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบฟลูอิดไดซ์ในหอที่มีรูปทรงกรวย