

การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

AN EXPERIMENTAL STUDY
OF FLUIDIZED BED DRYING OF COFFEE BEAN



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-9709-94-2

การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

AN EXPERIMENTAL STUDY
OF FLUIDIZED BED DRYING OF COFFEE BEAN



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-9709-94-2

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้

มีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร

AN EXPERIMENTAL STUDY
OF FLUIDIZED BED DRYING OF COFFEE BEAN



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
2004
ISBN 974-9709-94-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิค

ฟลูอิดไดซ์เบด

นักศึกษา

นายวรมธ ทัตทอง

รหัสประจำตัว

44062024

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

พ.ศ.

2547

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรของกระบวนการอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด จากเงื่อนไขในการทดลองการอบแห้งโดยใช้หอทดลองอะคริลิกใส ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 mm และ ความสูง 1000 mm อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอทดลองอยู่ในช่วง 60-100 °C อัตราการไหลจำเพาะของอากาศในช่วง 0.21-0.43 kg/s-kg dry coffee ความชื้นเริ่มต้น 68 % มาตรฐานเปียก ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีพื้นฐานแบบจำลองมาจาก Newton และ Page ผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตาม ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 100 °C ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟลดลงสู่ 14 %มาตรฐานเปียก ภายในเวลา 5 ชั่วโมง แต่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศไม่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟโดยผลเฉลยของ Fick's law อยู่ในช่วง 1.18×10^{-10} - 5.61×10^{-10} m²/s ที่อุณหภูมิที่ระบุ นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยการหาค่าคงที่การอบแห้ง (k_1) ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแล้วนำไปแทนในสมการของ Newton และการหาค่าคงที่ของการอบแห้ง (k_2) และค่าคงที่ (n) ในสมการของ Page พบว่าแบบจำลองที่พัฒนามาจากสมการของ Page ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) อยู่ในช่วง 0.9671-0.9992 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่า ที่ได้จากสมการของ Newton

Thesis Title	An Experimental Study of Fluidized Bed Drying of Coffee Bean
Student	Mr. Woramate Tudtong
Student ID.	44062024
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

ABSTRACT

The objectives of this study is to investigate the parameters of coffee bean drying process in a fluidized bed dryer. The fluidized bed dryer was made of a transparent acrylic cylindrical duct with 140 mm diameter and 1000 mm long. Drying air entering the bed is between 60°C and 100°C. The specific air flow rate is in a range of 0.21 to 0.43 kg /s-kg dry coffee. The initial moisture content of coffee bean is found to be 68% on wet basis. Mathematical models for prediction of decreasing rate of coffee bean moisture are proposed in the present work. The models are modified from the models of Newton and Page. The experimental results show that drying rate is depended on the inlet air temperature used. At drying temperature of 100 °C, moisture content of coffee in the bed is decreased from the initial (68%) to 14 % wet basis within 5 hours. Nevertheless, specific air flow rates show insignificant effect on coffee bean drying process. From experimental result analysis, it is found that the diffusion coefficient of coffee bean based on the solution of Fick's Law is in a range from 1.18×10^{-10} to 5.61×10^{-10} m²/s for specific inlet temperature. Two modified mathematical models are developed by introducing the modified drying constant (k_1) into the Newton's model and the modified drying constant (k_2) and modified exponent 'n' into The Page's model, all constants obtained from measured data. The predicted result of Page's model provides the correlation coefficient (r^2) of about 0.9671-0.9992, better than that of Newton's model in comparison with measurement.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด สำเร็จลุล่วงไปได้โดยความอนุเคราะห์สนับสนุนจากหน่วยงาน และบุคคลต่าง ๆ เป็นอย่างดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครได้จัดสรรทุนอุดหนุนการศึกษาระดับปริญญาโทแก่ ผู้วิจัย และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้จัดสรรทุนอุดหนุนในการทำ วิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาได้กรุณาให้ คำปรึกษาแนะนำ อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ งานวิจัยเรื่องนี้ยังได้รับคำแนะนำอย่างดียิ่งจากคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นประโยชน์ อย่างสูงที่ทำให้งานวิจัยเรื่องนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ผู้ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและทำวิจัยของผู้วิจัยมาโดยตลอด ได้แก่คุณพ่อ คุณแม่ และผู้ช่วยศาสตราจารย์วสุน มณีดำ คุณป้าของผู้วิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งใน พระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ร่วมงานทุกท่านจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความช่วยเหลือซ้ำๆ ในทุกๆ ด้านที่ ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณในทุกประการที่ให้แก่งานวิจัยเรื่องนี้ไว้ ณ โอกาสนี้

วรเมธ ทัดทอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
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.....	10
3.1 กระบวนการอบแห้ง.....	10
3.1.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่.....	10
3.1.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง.....	11
3.2 นิยามความชื้นในวัสดุ.....	11
3.3 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช.....	12
3.3.1 การได้เปรียบ และเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน.....	13
3.4 ความชื้นสมดุลของวัสดุ.....	13
3.5 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดกาแฟหลังอบ.....	14
3.6 ฟลูอิดไดเซชัน.....	14
3.6.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน.....	15
3.6.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด.....	15
3.7 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน.....	17
3.7.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ_s).....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ε_m).....	17
3.7.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	18
3.7.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง.....	20
3.8 ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน.....	20
3.9 การหาความเร็วของก๊าซที่ทางเข้า ฟลูอิดไดซ์เบด (u_0)	21
บทที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	22
4.1 สมการอบแห้งทางทฤษฎี.....	22
4.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี.....	24
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	26
5.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	26
5.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง	27
5.3 วิธีการทดลอง	27
5.3.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน.....	27
5.3.2 การแห้งเมล็ดกาแฟสดโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน	28
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	32
6.1 ลักษณะและอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	32
6.2 อิทธิพลของอัตราการไหลจำเพาะ.....	33
6.3 อิทธิพลผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้า.....	33
6.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟ	35
6.4.1 ผลการทดลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟ	35
6.4.2 แบบจำลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟ.....	36
6.5 การหาค่าคงที่ของการอบแห้ง.....	37
6.5.1 แบบจำลองของ Newton.....	37
6.5.2 แบบจำลองของ Page.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	45
7.1 สรุปผลการทดลอง	45
7.2 ข้อเสนอแนะ	46
บรรณานุกรม.....	47
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก.....	51
ภาคผนวก ข.....	56
ภาคผนวก ค.....	62
ภาคผนวก ง.....	68
ประวัติผู้เขียน	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของมวลชีวภาพ	4
5.1 การเปรียบเทียบปริมาณเมล็ดกาแฟสดกับความสูงของเมล็ดกาแฟสดภายในเบด.....	28
5.2 พารามิเตอร์สำหรับการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบด	29
6.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟ	35
6.2 ค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดกาแฟจากรูปแบบจำลองของ Newton และ Page	39
ค.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอาหารบนพื้นฐานของ Fick's law	63
ค.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง.....	65
ค.3 สมการความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน.....	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง	11
3.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน	16
3.3 ความความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกับสัดส่วนช่องว่าง	18
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วอากาศ	19
5.1 ชุดอุปกรณ์การอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์	26
5.2 แผนผังการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	30
5.3 แผนผังการอบแห้งเมล็ดกาแฟสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน	30
5.4 แผนผังการคำนวณประสิทธิภาพการแพร่ความชื้น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	31
5.5 แผนผังการคำนวณที่ของการอบแห้ง	31
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศ	33
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหล จำเพาะต่างๆ	34
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศ ที่ทางเข้าต่างๆ	34
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดลองกับข้อมูลสัมประสิทธิ์การแพร่ จากการคำนวณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	36
6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับ เวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าหอตกลง 100°C และ SP เท่ากับ 0.21	38
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(-\ln(MR))$ กับ $\ln(t)$ ในการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าหอตกลงที่ 100°C $^{\circ}\text{C}$ และ SP เท่ากับ 0.21	38
6.7 การเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่อุณหภูมิทางเข้าหอตกลง 100°C และ SP 0.21	41
6.8 การเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่อุณหภูมิทางเข้าหอตกลง 90°C และ SP 0.21	41
6.9 การเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่อุณหภูมิทางเข้าหอตกลง 80°C และ SP 0.21	42
6.10 การเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่อุณหภูมิทางเข้าหอตกลง 70°C และ SP 0.21	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

6.11 การเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่อุณหภูมิทางเข้าหรือทดลอง 60 °C และ SP 0.21.....	43
ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90 °C	52
ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 °C	52
ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 70 °C	53
ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 °C	53
ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าต่างๆ ที่อัตราการไหลจำเพาะ 0.26 kg/s-kg dry coffee.....	54
ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าต่างๆ ที่อัตราการไหลจำเพาะ 0.32 kg/s-kg dry coffee	54
ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าต่างๆ ที่อัตราการไหลจำเพาะ 0.43 kg/s-kg dry coffee	55
ข.1 ลักษณะภายในของเมล็ดกาแฟ	57
ข.2 ต้นกาแฟ.....	58
ข.3 เกษตรกรเก็บเมล็ดกาแฟสุกจากต้น	58
ข.4 เกษตรกรนำเมล็ดกาแฟสดมาตากแห้งบนลานดิน.....	59
ข.5 เกษตรกรนำเมล็ดกาแฟสดมาตากแห้งบนลานซีเมนต์	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

T_{wb}	อุณหภูมิกระเปาะเปียก
t	ระยะเวลาในการอบแห้ง
u_0	ความเร็วของก๊าซในหอทดลอง
u_{mf}	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน, เมตร/วินาที
u_t	ความเร็วตกอิสระของของแข็ง
u_t^*	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มิติ
V	ปริมาตรทรงกลม, เมตร ³
w	มวลของวัสดุ, kg
ε_m	สัดส่วนช่องว่าง
ε_{mf}	สัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน
ϕ_s	ค่าความเป็นทรงกลม
λ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ
λ_n	รากของสมการเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์
μ	ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม-เมตร/วินาที
ρ_s	ความหนาแน่นของก๊าซ, กิโลกรัม/เมตร ³
ρ_p	ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัม/เมตร ³

บทที่ 1

บทนำ

ทั่วโลกมีกาแฟอยู่ประมาณ 50 ชนิด แต่กาแฟที่นิยมดื่มกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมีอยู่ 2 ชนิด คือ Coffee arabica Linn หรือ อะราบิกา และ Coffee canephora Linn หรือ โรบัสต้า (กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์. 2542) สำหรับประเทศไทยมีการปลูกกาแฟกันมากในภาคใต้ และในบางจังหวัดของภาคเหนือ พื้นที่เพาะปลูกทั้งหมดประมาณ 440,000 ไร่ พันธุ์ที่ปลูกได้แก่พันธุ์โรบัสต้าคิดเป็นร้อยละ 95 และพันธุ์อะราบิกาคิดเป็นร้อยละ 5 ผลผลิตเฉลี่ยปีละประมาณ 80,000-85,000 ตัน (เฉลี่ยประมาณ 190-200 กก. ต่อไร่) ทำรายได้ให้แก่ประเทศไทยปีละประมาณ 4,000-5,000 ล้านบาท แต่เนื่องจากกาแฟเป็นผลผลิตที่ผลิตแล้วส่งออกขายยังต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 70 ของผลผลิตทั้งหมด บริโภคภายในประเทศเพียงร้อยละ 30 เท่านั้น จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องแข่งขันกับตลาดต่างประเทศที่เป็นคู่แข่งที่มีการผลิตกาแฟเพื่อให้กาแฟของประเทศไทยมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งปัจจุบันผลผลิตกาแฟของไทยบางส่วนยังมีคุณภาพต่ำไม่สามารถที่จะแข่งขันในตลาดโลกได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาวิธีในการปรับปรุงคุณภาพของกาแฟไทยให้ดีขึ้น

ในการทำสวนกาแฟ เมื่อเกษตรกรทำการเก็บเกี่ยวเมล็ดกาแฟสดแล้ว เกษตรกรจะนำเมล็ดกาแฟสดที่เก็บเกี่ยวได้ ไปตากแดดจนกว่าเมล็ดกาแฟจะแห้ง โดยต้องตากแดดประมาณ 15-20 วัน ในวันที่มีแสงแดดจ้าทั้งวัน โดยส่วนมากเกษตรกรจะนำเมล็ดกาแฟสดที่เก็บได้ไปตากไว้บนลานดิน หรือลานคอนกรีต แล้วรอจนกว่าเมล็ดกาแฟจะแห้ง หลังจากนั้นจึงนำไปทำการสีเพื่อเอาเปลือกออกต่อไป ปัญหาที่พบมากคือ เมื่อนำเมล็ดกาแฟแห้งไปทำการสีจะพบว่าเมล็ดเสียหายเกิดขึ้นจำนวนมากทำให้เกษตรกรขายกาแฟได้ในราคาต่ำ เมล็ดที่เสียหายส่วนใหญ่จะมีผลมาจากขั้นตอนการลดความชื้น ซึ่งก็คือขั้นตอนการตากนั่นเอง เมล็ดเสียหายที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการตากอาจเกิดจากในช่วงการตากมีฝนตกลงมา หากเกษตรกรเก็บไม่ทัน เมล็ดกาแฟส่วนที่เปียกจะเกิดการหมักซึ่งจะทำให้เกิดรา จึงทำให้เมล็ดกาแฟมีกลิ่นราติดมาด้วย หรือในบางกรณีเมล็ดกาแฟจะเกิดเป็นสีดำหลังทำการสี นอกจากนั้นเกษตรกรบางรายที่ทำการตากกาแฟบนลานดิน เมื่อเมล็ดกาแฟแห้งเปลือกของเมล็ดกาแฟจะมีความไวต่อการดูดกลืนทำให้มีกลิ่นดินติดมาด้วย และปัญหาที่พบอีกอย่างหนึ่งในการตากกาแฟบนลานดินก็คือ มักมีสิ่งแปลกปลอมติดมากับกาแฟด้วย เช่น กอวด หิน ดิน เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นมาจากขั้นตอนการตากเมล็ดกาแฟทั้งสิ้น ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้ทั้ง สี กลิ่น และ รสชาติ ของกาแฟที่ได้ไม่ดีไม่เป็นไปตามที่ตลาดต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปัญหาที่พบดังกล่าว ถ้าเราสามารถปรับปรุงกระบวนการที่ทำให้เมล็ดกาแฟแห้ง โดยที่ไม่ต้องตากแดด ซึ่งต้องตากบนลานดิน หรือลานคอนกรีต ปัญหาดังกล่าวก็จะลดลงไปด้วย เราก็จะได้ผลผลิตกาแฟที่มีคุณภาพดีขึ้น

การทำให้ผลผลิตจากพืช หรือเมล็ดพืชแห้งโดยไม่ต้องตากแดด สามารถทำได้โดยใช้ เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช แบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลตามกระแสอากาศร้อน โดยโครงการนี้ได้นำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมาอบแห้งเมล็ดกาแฟสดซึ่งมีข้อดีคือมีอัตราการอบแห้งสูงและความชื้นของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจะสม่ำเสมอเพื่อแก้ไข และรักษาคุณภาพเมล็ดกาแฟให้ดีขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1.1.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟสดแบบฟลูอิดไดซ์เบด
- 1.1.2 ศึกษาผลกระทบของความเร็วลมภายในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด อุณหภูมิอากาศทางเข้า และค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศในการอบแห้ง
- 1.1.3 หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในเมล็ดกาแฟ
- 1.1.4 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายอัตราการอบแห้งเมล็ดกาแฟ

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟสดแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ความจุสูงสุด 2 กิโลกรัมต่อการอบแต่ละครั้ง
- 1.2.2 ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดกาแฟสดร้อยละ 66-70 ตามมาตรฐานเปียก และทำการอบเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส

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) ทำการศึกษาหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ในห้องเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-500 องศาเซลเซียส อนุภาคที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายขนาด 500 μm และทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากการทดลองเทียบกับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากสมการการทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันที่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา (ภาคผนวก ค) พบว่าผลที่ได้จากการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน มีค่าเกินกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการทดลอง อย่างไรก็ตามผู้วิจัยแนะนำว่าการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันจากสมการการทำนายนั้นจะใช้ได้ดีในช่วงที่แต่ละสมการกำหนด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ของเชื้อเพลิงมวลชีวภาพ ถูกศึกษา โดย Abdullah, Husain and Yin Pong (2003) โดยใช้อากาศเป็นของไหลในระบบ โดยพิจารณา ความดันตกคร่อมเบดกับ Superficial air velocity และนำไปใช้หาค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของมวลชีวภาพ

ลำดับที่	ชนิดวัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	Geldart Classification	u_{mf} (m/s)
1	ซีเรีย	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

จากผลการทดลองค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของ ซีเรีย เปลือกถั่วลิสง และ ถ่านหิน ซึ่งเป็น Geldart B มีค่าใกล้เคียงค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากทฤษฎี และในงานวิจัยยังบอกว่าคุณสมบัติความหนาแน่นและช่องว่างของเบดเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของฟลูอิดไดเซชัน

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

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิวัฒน์ วุฒิววัฒน์ชัย (2540) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน โดยพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อ การอบแห้ง 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 และอัตราการไหลเฉพาะของอากาศ และพบว่า Page's model มีความเหมาะสมมากที่สุดที่ใช้อธิบายผลการทดลอง

ณัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ อภิชาติ 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 °C โดยวิธีฟลูอิดไดเซชันต่อผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับแท่งสี่เหลี่ยม และทรงกระบอก โดยใช้ผลเฉลยอนุกรมอนันต์ (Infinite series solution) บนพื้นฐานของกฎของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fick (Crank, 1975) พบว่าสำหรับมะม่วงดิบมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรง กระบอกอยู่ในช่วง 1.08×10^{-9} และ $3.32 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง 4.09×10^{-10} และ $1.18 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ และมันฝรั่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรงกระบอกอยู่ในช่วง 1.43×10^{-9} - $3.75 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง 7.55×10^{-10} - $1.40 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนความยาวไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะสูงเมื่ออัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นผิวดำ และทำการหาค่าคงที่ของการอบแห้งพบว่า ค่าคงที่ของการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น และจะสูงที่สุดที่อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นผิวดำๆ และความยาวไม่มีผลต่อค่าคงที่ของการอบแห้ง

Sarsavadia, Sawhney, Pangavhane and Singh (1999) ทำการทดลองในเครื่องอบแห้งชนิดถาด ในการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งหัวหอมแบบแผ่น 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 และยังพบอีกว่า อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น 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 80-90 องศาเซลเซียส ถ้าอบด้วยอุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง แต่สีของพริกจะคล้ำมากขึ้นและไม่สามารถจำหน่ายได้ในราคาที่ดี

Syahrul, Hamdullahpur and Dincer (2002) งานวิจัยนี้ทำการจำลองทางความร้อนของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดของอนุภาคเปียกในการศึกษาถึงการขนถ่ายความร้อนและมวล และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง โดยเทียบกับผลการทดลอง โดยศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ จากผลการทดลอง ประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดลดลงอย่างฉับพลัน เมื่อปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นของเมล็ดข้าวโพดลดลง และลดลงต่ำสุดที่จุดสิ้นสุดกระบวนการการอบแห้ง จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการขนถ่ายความชื้นจากวัตถุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นของวัตถุ ผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง

Srivastava and John (2002) ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้งเมล็ดธัญพืช โดยใช้สมการ Semi-empirical ของชั้นบางสำหรับทำนายความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ และอุณหภูมิของเมล็ดธัญพืช โดยเปลี่ยนแปลงความสูงของเบตหนึ่งของธัญพืช อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศ และช่องว่างภายในเบต

ในงานวิจัยนี้สรุปว่าความชื้นจะระเหยเป็นไอได้ดี เมื่อความสูงของเบตเพิ่มขึ้น และช่องว่างในเบตมีผลกระทบต่ออุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งเล็กน้อย แต่ไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของเมล็ดพืช

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

Togrul and Pehlivan (2003) ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของผลเอพริคอต (apricot) โดยผ่านอากาศร้อนผ่านห้องอบแห้ง ในการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่ 0.2, 0.5, 1.0 และ 1.5 m/s และอุณหภูมิอากาศ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการอบแห้งกับเวลา และปริมาณความชื้น ใช้ในการทดสอบกับแบบจำลองการอบแห้งทางคณิตศาสตร์ทั้ง 14 แบบ ซึ่งพบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ และได้ทำการพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใหม่ จากการทดลอง Logarithmic model ให้ความถูกต้องในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งผลเอพริคอตมากที่สุด การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วง Falling rate period ที่ได้จากการทดลองพบว่า การใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิค Multiple regression analysis ให้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำ 97.3% ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล และอุณหภูมิภายในผลเอพริคอต

Senadeera, Bhandari, Young and Wijesinghe (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน ของอนุภาคทั้งสามรูปทรงคือ แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงกลม ที่ได้จากมันฝรั่ง 3 ขนาดในอัตราส่วนด้านต่อความยาว 1:1, 2:1 และ 3:1 สำหรับแท่งสี่เหลี่ยม 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) ทำการศึกษาสัมพัทธ์ของ 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 และแผ่นของมะเขือยาวยิ่งบางทำให้อัตราการอบแห้งลดลง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศและเพิ่มความเร็วอากาศ จะเพิ่มความเข้มข้นของสีของผลิตภัณฑ์ ความหนาของผลิตภัณฑ์ไม่มีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มความเร็วอากาศ จะเพิ่มอัตราการลดลงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนความชื้น และมีค่าสูงสุดที่ อุณหภูมิอากาศ 50 องศาเซลเซียส แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะ (2002) สามารถจำลองการอบแห้งของมะเขือยาวได้ดีที่สุด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งมากที่สุด และจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะแตกต่างกันไปตามตามชนิดของธัญพืช และสภาวะเงื่อนไขในการอบแห้ง (ภาคผนวก ค) อย่างไรก็ตามการพัฒนาระบบแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความสำคัญต่อการทำนายการอบแห้ง เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวธัญพืชได้ต่อไปในอนาคต โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาได้ออกเป็น 2 ส่วนคือ การสร้างเครื่องแห้งฟลูอิดไดซ์เบด และพัฒนาระบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเมล็ดกาแฟสด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ทฤษฎี

3.1 กระบวนการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ในกระบวนการอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ สมชาติ ไสภภรณ์ ฤทธิ (2540)

3.1.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate Drying Period)

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

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

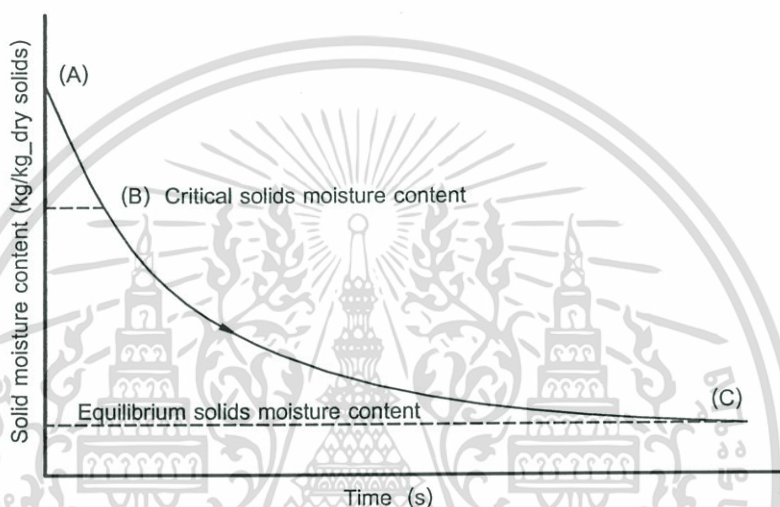
เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุไม่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ แสดงว่าความร้อนทั้งหมดถูกถ่ายโอนจากอากาศไปยังวัสดุเพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอ จากสมการที่ 3.1 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

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

เมื่อ h_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปสู่วัสดุ, λ คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและ T คือ อุณหภูมิอากาศ

3.1.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-Rate Drying Period)

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



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

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

3.2 นิยามความชื้นในวัสดุ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540)

ความชื้นเป็นตัวบอกริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_w

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

ความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในวงการค้า โดยทั่วๆ ไปจะอ้างในรูปของเปอร์เซ็นต์ $100M_w$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง, M_d

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

เมื่อ w คือ มวลของวัสดุ, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีน้ำ), kg

ความชื้นมาตรฐานแห้งเป็นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ของกระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่เกือบคงที่ผลผลิตทางเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย

3.3 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไปเรามักจะใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการ อุณหภูมิของอากาศจะสูงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปใช้งาน วิธี และเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้ง โดยมากเรามักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งเร็ว มีผลให้เครื่องอบแห้งที่ต้องใช้มีขนาดเล็กลง ทำให้การลงทุนต่ำ

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

3.3.1 การได้เปรียบ และเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน

ข้อเปรียบเทียบการได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดกับเทคนิคอื่นๆ มีรายละเอียดดังนี้

ข้อได้เปรียบ

1. เนื่องจากเมล็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งซึ่งอุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด
2. มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
3. จากคุณสมบัติที่คล้ายกันของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเติมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย
4. พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบดนิ่งที่จำพวกเม็ดของแข็งเท่ากันจึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร

ข้อเสียเปรียบ

1. เวลาของของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูงๆ หรือเบดหลายชั้น เปลืองเงินลงทุนมาก
2. มักเกิดฟองก๊าซในเบดเมื่อทำงานกับก๊าซ ทำให้การสัมผัสไม่ดีเป็นการสูญเสียเปลือง ถ้ายิ่งเป็นขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง
3. การทำงานมีข้อจำกัดเพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไปเม็ดของแข็งก็จะออกจากเบดไปพร้อมกับของไหล
4. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปื่อยหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

3.4 ความขึ้นสมมูลของวัสดุ

ความขึ้นสมมูลของวัสดุที่มีความสำคัญต่อการศึกษาระบบการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับ ความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

3.5 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดกาแฟหลังอบ

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

อุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้งมาก การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปมักทำให้คุณภาพของเมล็ดพืชลดลง อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้งจะแตกต่างจากอุณหภูมิของเมล็ดพืช เมื่อเริ่มการอบแห้ง อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะต่ำกว่าของอากาศ เมื่อเมล็ดพืชแห้งลงมากแล้ว อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะเพิ่มสูงขึ้น จนในที่สุดอาจมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศ

การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เมล็ดกาแฟสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวแข็งตัว เมื่อไซนการอบแห้งเคลื่อนย้ายจากบริเวณผิวไปยังชั้นในๆ ของเมล็ด ทำให้ชั้นในสูญเสียความชื้นและหดตัวโดยแยกตัวออกจากผิวที่แข็ง ซึ่งอาจมีผลให้เกิดรอยร้าว แยกแตก ปริหรือหักในเมล็ด ซึ่งชั้นตอนต่อไปหลังการอบแห้งของเมล็ดกาแฟคือการสีเพื่อเอาเปลือกออก และผลกระทบอีกอย่างคือเมื่อใช้อุณหภูมิสูงเกินไปเมล็ดด้านในเปลือกจะแห้งติดกับเปลือกทำให้ขั้นตอนการสีนั้นยาก

ในการทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟจะพิจารณาถึงสีของเมล็ดกาแฟด้านในเปลือก ว่าจะต้องไม่เป็นสีดำ และเมล็ดด้านในไม่เกาะติดกับเปลือก ซึ่งเป็นคุณภาพสำคัญในขั้นตอนการสี ซึ่งในการทดลองจะใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 100 องศาเซลเซียส โดยเมล็ดกาแฟด้านในเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งเริ่มจะมีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้ม และเมล็ดด้านในยังไม่เกาะติดกับเปลือก

3.6 ฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชัน เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็ง ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ด หรือชิ้น สัมผัสกับของไหลซึ่งไหลผ่านเม็ดของแข็งที่มีความเร็วสูงพอ ที่จะทำให้ของแข็งดังกล่าวเคลื่อนที่และประพัตติตัวคล้ายของไหล เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงที่รองรับแล้วให้ของไหล ไหลผ่านเม็ดของแข็งกลุ่มนั้น หลังจากนั้นทำการเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นเรื่อยๆ เมื่อของไหลมีความเร็วค่าหนึ่ง จะเห็นเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวแล้วลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้ จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไดซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไดเซชัน ซึ่งพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชันดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.6.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน

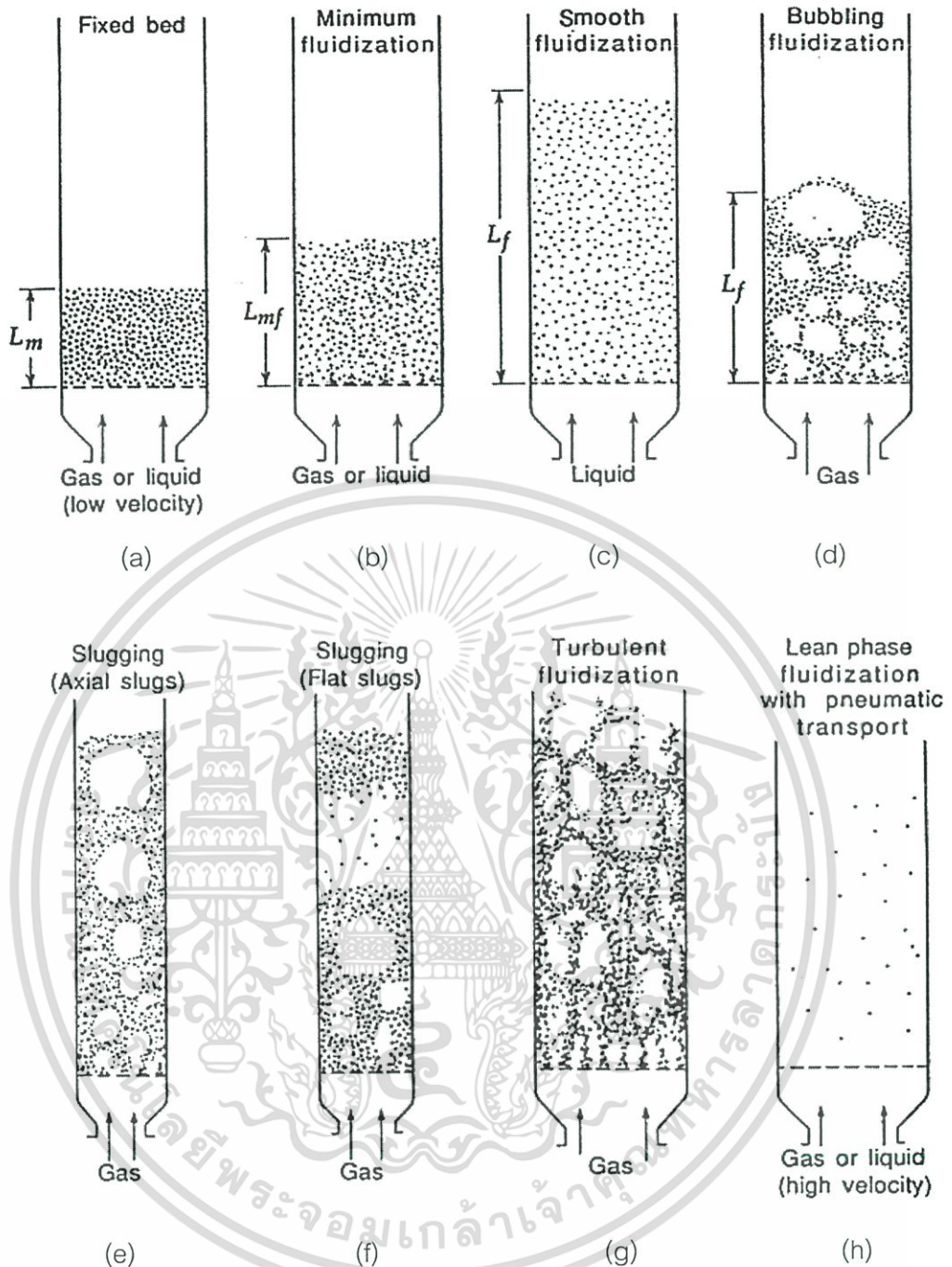
งานของฟลูอิดไดเซชันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ

1. ฟลูอิดไดเซชันแบบสองสถานะ (Two-phase Fluidization) หมายความว่า ในหอตลอดหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบไปด้วยสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน (Gas Fluidization) และ ฟลูอิดไดเซชันเหลว (Liquid Fluidization)
2. ฟลูอิดไดเซชันสามสถานะ (Three-phase Fluidization) หมายความว่าภายในหอตลอดหรือเบดจะประกอบไปด้วยสามสถานะอยู่พร้อมกัน คือ ของแข็ง ของเหลวและก๊าซสำหรับฟลูอิดไดเซชันสามสถานะนั้นเป็นขบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไดเซชันสองสถานะ

3.6.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอตลอดที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่ง หรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอตลอดจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือ ผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอตลอด

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอตลอดเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอตลอดอย่างช้า ๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไดเซชัน หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense – phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอตลอดอยู่แล้ว เบดลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิดไดซ์เบดเจือจาง (Diluted - phase fluidized bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งก็จะหลุดลอยออกจากหอตลอดไป



รูปที่ 3.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน [Daizo Kunii, 1991]

ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เราเรียกเบดนี้ว่าเบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.2 (b) ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิมแต่มีอีกส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวเองขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบต และแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของ ฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไป ตาม ภายในเบตจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างซุกมุ่นวุ่นวายเบตชนิดนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบตวุ่นวาย ดังรูปที่ 3.2 (d)

3.7 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดเซชัน

พฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดเซชันมักมีตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบอย่างมาก เพราะก่อนที่เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวหรือเกิดฟลูอิดไดซ์เบต เม็ดของแข็งจะพักอยู่บนระ แกรงรองรับ ปล่อยให้ของไหลไหลผ่านไปตามช่องว่างที่อยู่ในเบต ความเร็วของของไหลจึงมี อิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเบต ดังรายละเอียดต่อไปนี้

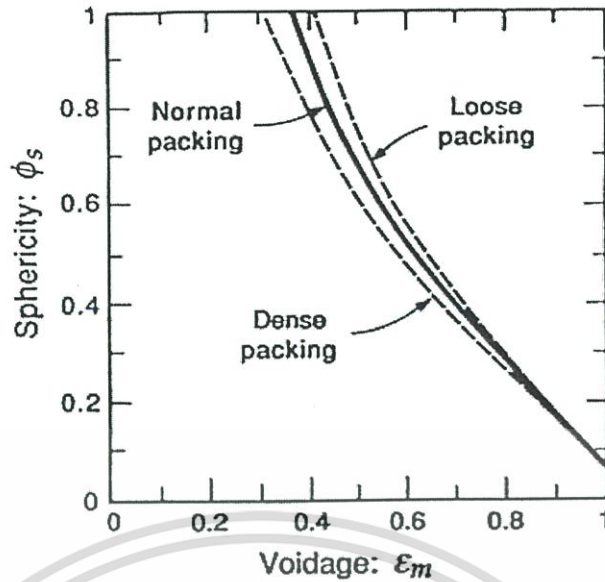
3.7.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ_s)

การวัดค่าความไม่เป็นทรงกลมศึกษาโดย Zenz และ Othmer ปี 1960 ที่อ้างอิงโดย Kunii, D. Levenspiel, O. (1991) โดยความเป็นทรงกลมหมายถึง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของ เม็ดทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าเม็ดของแข็งต่อพื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งใดๆ โดยที่เม็ดของแข็งเป็นทรง กลมค่าความเป็นทรงกลมมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($\phi_s = 1$) และถ้าเม็ดของแข็งมีรูปร่างต่างๆ ไปค่า ความเป็นทรงกลมมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ($\phi_s < 1$) เสมอ ซึ่งค่าความเป็นทรงกลมของเม็ดกลมแพ ฟันรุโรบัสตา ซึ่งมีค่าประมาณ 0.98 แต่ในงานวิจัยนี้สมมุติให้เม็ดกลมแพเป็นทรงกลม

3.7.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ϵ_m)

กรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอตลอด เราสามารถ คำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของ เม็ดทรงกลมในเบตทำให้เกิดขนาดของช่องว่างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป แต่ในกรณีที่เม็ด ของแข็งมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม Brown และ คณะ ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลม กับสัดส่วนช่องว่างไว้ดังรูปที่ 3.3

ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดเซชัน ช่องว่างในเบตจะมีการขยายตัว ช่องว่างในขณะนั้น เรียกว่าสัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบต (ϵ_{mf})



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

WEN และ YU, 1966 ได้เสนอผลคูณของช่องว่างต่ำสุดและความเป็นทรงกลม เป็นค่าคงที่และอาจสังเกตได้จากการทดลองของเขาโดยใช้วัสดุชนิดต่าง ๆ บรรจุลงในเบดแล้วสรุปว่า วัสดุอย่างหนึ่งก็จะมีสัดส่วนช่องว่างอื่นหนึ่ง ดังสมการ

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

3.7.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน, u_{mf}

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งเองกับแรงพยุงจากการไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหลซึ่งเขียนและจัดรูปใหม่ได้เป็น

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

โดยการประยุกต์สมการ (3.6) กับสมการความดันตกของ ERGUN จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่

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

เมื่อ Re_{mf} คือ Reynolds number ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

d_p คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง, เมตร

g คือ อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, เมตร/ชม.²

L_{mf} คือ ความสูงต่ำสุดของเบด, เมตร

Δp คือ ความดันต่างของเบด, นิวตัน/เมตร²

u_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน, เมตร/วินาที

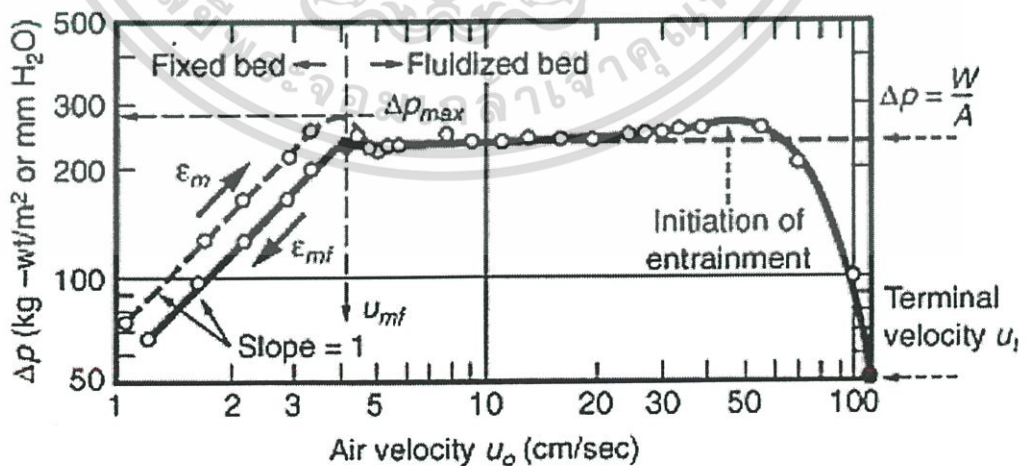
μ คือ ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม-เมตร/วินาที

ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ, กิโลกรัม/เมตร³

ρ_p คือ ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัม/เมตร³

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันสามารถหาได้อีกวิธีการหนึ่ง คือจากการทดลอง โดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความดันลบกับความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) ดังรูปที่

3.4



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลบกับความเร็วอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง, u_t

ในฟลูอิดไดเซชันนั้น มีขอบเขตความเร็วของของไหลอยู่สองอย่างคือ ขอบเขตแรก คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน และขอบเขตที่สองคือ ความเร็วของของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งลอยตัวหลุดออกจากหอคดลอง ความเร็วนี้มีขนาดเท่ากับความเร็วตกอิสระของของแข็ง

Haider และ Levenspiel ได้เสนอการหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งดังสมการ

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

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

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

ดังนั้นความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ u_t^* คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มิติ

3.8 ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน

ปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดเซชันที่เกิดจากก๊าซที่มีความซับซ้อนอย่างมาก ทั้งขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ผ่านเข้าเบด ขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็งที่ใช้เป็นเบด ในขณะที่เบดเริ่มมีลักษณะเป็นฟลูอิดไดเซชันใหม่ๆ จะมีส่วนคล้ายกับลักษณะของเบดที่เกิดในฟลูอิดไดเซชันของเหลว แต่ถ้าความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จะมีก๊าซบางส่วนรวมตัวกัน ก่อตัวเหมือนถุงอากาศ ซึ่งเรียกว่า ฟองก๊าซ

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และแผ่นกระจายของไหล ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.1 Channelling เกิดการผ่านไปของก๊าซเป็นช่องๆ โดยที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่เคลื่อนที่ แต่บริเวณข้างเคียงจะอยู่กับที่

3.8.2 Bubbling อนุภาคของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบดจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา และสม่ำเสมอในเบด แต่ถ้าบริเวณใดมีของแข็งอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น หรือไม่มีเลย เราเรียกบริเวณนั้นว่า Bubbling

3.8.3 Slugging การเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซ จนได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอตดลอง มีการแยกตัวของอนุภาคของแข็งเป็นชั้นๆ

3.8.4 Spouted Bed คือ การที่ก๊าซไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของของแข็งเท่านั้น ด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของอนุภาคน้อย เมื่อเทียบกับบริเวณด้านข้าง

3.9 การหาความเร็วของก๊าซในหอตดลองฟลูอิดไดซ์เบด (u_0)

การหาความเร็วของอากาศในหอตดลองฟลูอิดไดซ์เบด ที่ทำให้อนุภาคภายในหอตดลองสามารถลอยตัวอย่างสม่ำเสมอในหอตดลอง ความเร็วที่แนะนำคือประมาณ 1.3 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันแต่ต้องน้อยกว่าความเร็วสูงสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน (Soponronarit และ คณะ, 1995)

$$u_0 = 1.3u_{mf}$$

(3.12)

บทที่ 4

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การอบแห้งเมล็ดธัญพืชโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงการอบแห้งลดลง จากลักษณะปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้มีการนำแบบจำลองในทางคณิตศาสตร์มาอธิบายการแพร่ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ

4.1 สมการอบแห้งทางทฤษฎี (สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์, 2540)

ได้มีผู้นำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov (1966) ได้เสนอกกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ซึ่งเกิดขึ้นในแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องมาจากการไหลในรูเล็ก (Capillary flow) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (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 ดังนั้นจึงยังไม่มีให้นำแบบจำลองนี้ไปใช้

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ในระบบแกนโพลาร์สำหรับหนึ่งมิติสำหรับการแพร่ความชื้นในวัสดุจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- 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, เมตร²/วินาที

โดยเงื่อนไขที่สภาวะเริ่มต้น และขอบเขตสามารถเขียนได้ว่า

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

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

- เมื่อ M_{in} คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 M_{eq} คือ ปริมาณความชื้นที่สภาวะสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

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

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

สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลมสามารถเขียนได้ว่า

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

และสำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมากสามารถเขียนได้ว่า

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

เมื่อ λ_n คือ รากของสมการเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์
โดยที่

$$MR = \frac{\bar{M}_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (4.7)$$

และ

$$X = \frac{A}{V} \sqrt{Dt} \quad (4.8)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น
 \bar{M}_t คือ ปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 A คือ พื้นผิวทรงกลม, เมตร²
 V คือ ปริมาตรทรงกลม, เมตร³

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

4.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

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

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

หรือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เราสามารถสร้างแบบจำลองการอบแห้งง่ายๆ โดยการตั้งสมมติฐานว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่ แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของปริมาณความชื้น เมล็ดพืช และ ปริมาณความชื้นสมดุล ข้อสมมติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน สมการดังกล่าวเขียนได้ว่า

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = k(\bar{M} - M_{eq}) \quad (4.11)$$

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

$$MR = \exp(-k_1 t) \quad (4.12)$$

สมการ (4.12) คือสมการ Simple logarithmic model หรือแบบจำลองของ Newton เมื่อ K , k และ k_1 คือค่าคงที่ของการอบแห้ง, วินาที⁻¹

ในการปรับปรุงสมการ Simple logarithmic model สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

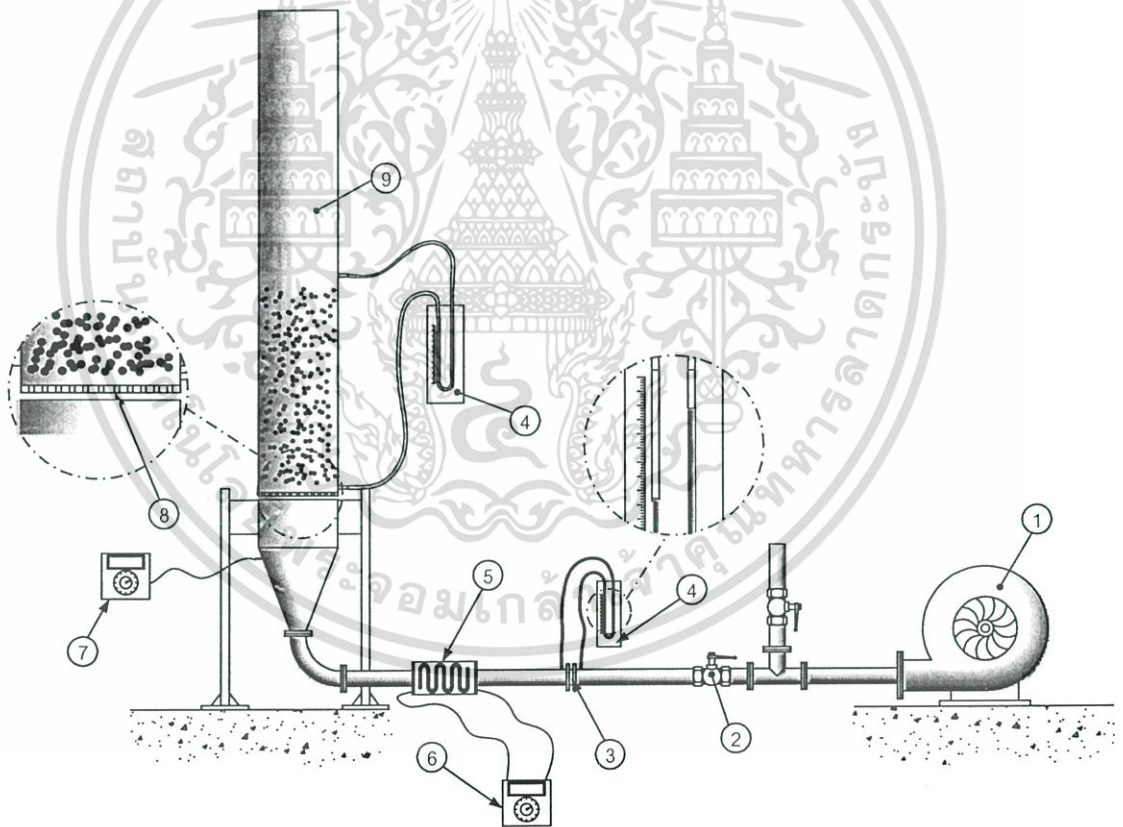
$$MR = \exp(-k_2 t^n) \quad (4.13)$$

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

บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

5.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยหอทดลองรูปทรงกระบอก ทำจากอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร และความสูง 1000 มิลลิเมตร ในการทดลองเมล็ดกาแฟจะลอยที่ความสูงระหว่าง 60-120 มิลลิเมตร และขยายตัวถึง 200-400 มิลลิเมตร ในระหว่างเกิดฟลูอิดไดเซชัน ความจุของ เมล็ดกาแฟสดอยู่ในช่วง 600-1200 กรัม แผ่นกระจายลมเป็นแบบเจาะตรงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท่ากับ 4 มิลลิเมตร และมีจำนวน 620 รู ซึ่งคิดเป็นพื้นที่เปิด 50% กาแฟที่ใช้ทดลอง เป็นพันธุ์โรบัสตาขนาดเฉลี่ยประมาณ 13.6 มิลลิเมตร และมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงที่ 66-70%



รูปที่ 5.1 ชุดอุปกรณ์การอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด โดยประกอบด้วย (1) พัดลมขนาด 3 แรงม้า, (2) โกลบวาล์ว, (3) ออร์ิฟิสมิเตอร์, (4) มานอมิเตอร์แบบท่อตัวยู, (5) ขดลวดความร้อน, (6) ชุดควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อน, (7) ชุดวัดอุณหภูมิ, (8) แผ่นกระจายอากาศ และ (9) หอทดลองรูปทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าขับลมผ่านท่อ โดยที่ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วย ออร์ฟิสมิเตอร์ ในการศึกษาพฤติกรรมของอัตราการไหลของอากาศในระหว่างการทดลอง จะถูกควบคุมโดยโกลบวาล์ว ซึ่งมีความเร็วอยู่ในช่วง 0-10 m/s และอัตราการไหลจำเพาะของอากาศอยู่ในช่วง 0.21-0.43 kg/s-kg dry coffee อากาศในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดจะถูกทำให้ร้อนด้วยขดลวดความร้อนขนาด 3 กิโลวัตต์ พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง และห้องทำความร้อน ถูกหุ้มด้วยฉนวนจนถึงทางเข้าหอทดลอง ซึ่งจะมีอุณหภูมิของอากาศสูงสุดถึง 120°C ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 30 นาที ในการควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนด อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าหอทดลองจะอยู่ในช่วง 60-100°C โดยจะทำการวัดอุณหภูมิภายในเบดด้วยเทอร์โมคัพเบิลชนิด K ในการทดลองเมล็ดกาแฟจะถูกวัดความชื้นที่ลดลงจากค่าน้ำหนักเมล็ดกาแฟที่เปลี่ยนไปซึ่งจะทำการวัดทุกๆ 15 นาทีโดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลที่มีความละเอียด 1 กรัม

5.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม (Superficial air velocity) ภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด อุณหภูมิอากาศทางเข้า และค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศในการอบแห้ง (อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของเมล็ดกาแฟแห้ง, SP) โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

5.3 วิธีการทดลอง

5.3.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

1. ทำการปรับเทียบชุดออร์ฟิสมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง และเตรียมชุดการทดลองดังรูปที่ 4.1
2. ใส่เมล็ดกาแฟสดที่ความสูงของเบด 6 เซนติเมตร ลงในหอทดลอง
3. เดินเครื่องพัดลมที่ใช้ในการอบแห้ง โดยค่อยๆ ผ่านอากาศที่อัตราการไหลต่ำๆ ก่อนแล้วค่อยๆ เพิ่มอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น
4. บันทึกผลของความดันลดคร่อมเบดจากที่อ่านได้จากมานอริมิเตอร์ และบันทึกค่าความดันตกคร่อมออร์ฟิสมิเตอร์ เพื่อนำไปหาค่าความเร็วอากาศที่ไหลผ่านหอทดลอง
5. ปรับความเร็วลมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสังเกตเห็นเมล็ดกาแฟเริ่มลอยหลุดออกจากหอทดลอง
6. เพิ่มความสูงของเบดเป็น 8 เซนติเมตร, 10 เซนติเมตร และ 12 เซนติเมตร แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2 – 5 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบปริมาณเมล็ดกาแฟสดกับความสูงของเมล็ดกาแฟสดภายในเบด

เมล็ดกาแฟสด, กรัม	ความสูงของเมล็ดกาแฟสดภายในเบด, เซนติเมตร
600	≈ 6
800	≈ 8
1000	≈ 10
1200	≈ 12

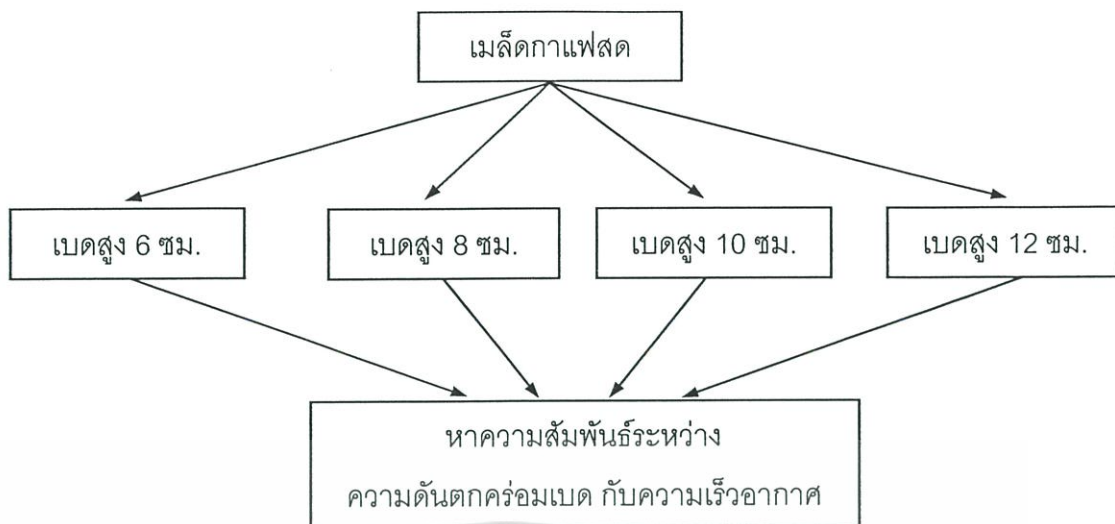
5.3.2 การแห้งเมล็ดกาแฟสดโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

1. เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านระบบเครื่องอบแห้ง และเปิดเครื่องให้ความร้อน อุณหภูมิเครื่องให้ได้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 นาที
2. ปรับความเร็วลมในหอตลอดให้ได้เท่ากับ 5.0 เมตรต่อวินาที ($1.3u_{mf}$)
3. ใส่เมล็ดกาแฟสดที่ความสูงเบด 6 เซนติเมตร ลงในหอตลอด และสังเกตผลการทดลอง
4. นำเมล็ดกาแฟออกมาชั่งน้ำหนักของน้ำที่หายไปทุกๆ 15 นาที ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลที่มีความละเอียด 1 กรัม และบันทึกผลการทดลอง
5. ทำการทดลองจนกระทั่งมวลของเมล็ดกาแฟไม่เปลี่ยนแปลง แล้วเปลี่ยนความอุณหภูมิของอากาศร้อนเป็น 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 1 – 5 ใหม่ตามลำดับ
6. เปลี่ยนความสูงของเบดเป็น 8, 10, และ 12 เซนติเมตร แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 3 – 5 ใหม่ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์สำหรับการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบด

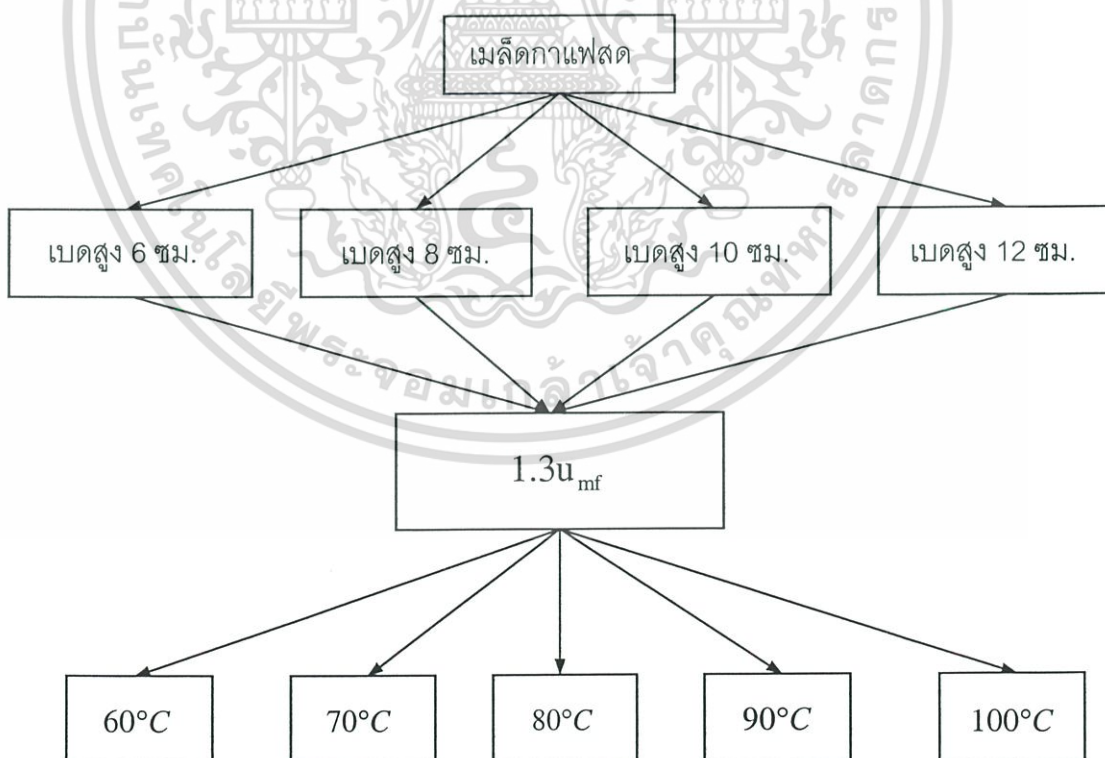
พารามิเตอร์	ปริมาณ/ชนิด	หน่วย
<i>หอตดลองฟลูอิดไดซ์เบด</i>		
เส้นผ่าศูนย์กลางหอตดลอง	140	มิลลิเมตร
ความสูงหอตดลอง	1000	มิลลิเมตร
พื้นที่แผ่นกระจายลม	50	เปอร์เซ็นต์
วัสดุ	อะคริลิก	--
<i>คุณสมบัติของเมล็ดกาแฟ</i>		
สายพันธุ์	โรบัสต้า	--
เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม	13.6	มิลลิเมตร
ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	68	เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)
ความหนาแน่น	1200	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
<i>เงื่อนไขทางเข้าหอตดลอง</i>		
ความเร็วอากาศ	0-10	เมตร/วินาที
อุณหภูมิทางเข้าหอตดลอง	60-100	องศาเซลเซียส
อัตราการไหลอากาศจำเพาะ	0.21-0.43	กิโลกรัมต่อวินาที-กิโลกรัมเมล็ดกาแฟแห้ง
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	27	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	67-70	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



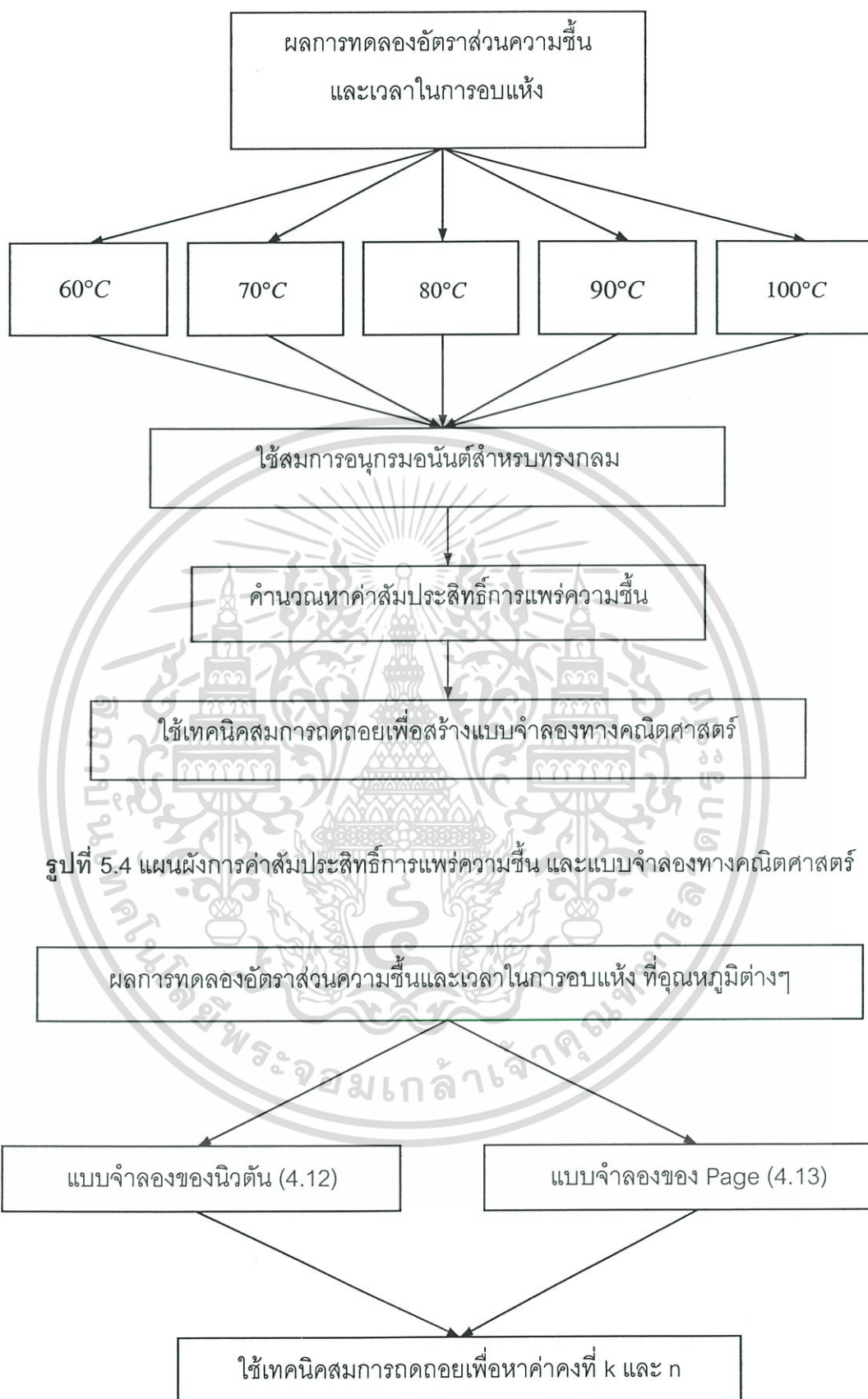
$$U_{mf}$$

รูปที่ 5.2 แผนผังการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน



รูปที่ 5.3 แผนผังการอบแห้งเมล็ดกาแฟสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แผนผังการค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 5.5 แผนผังการค่าคงที่ของการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

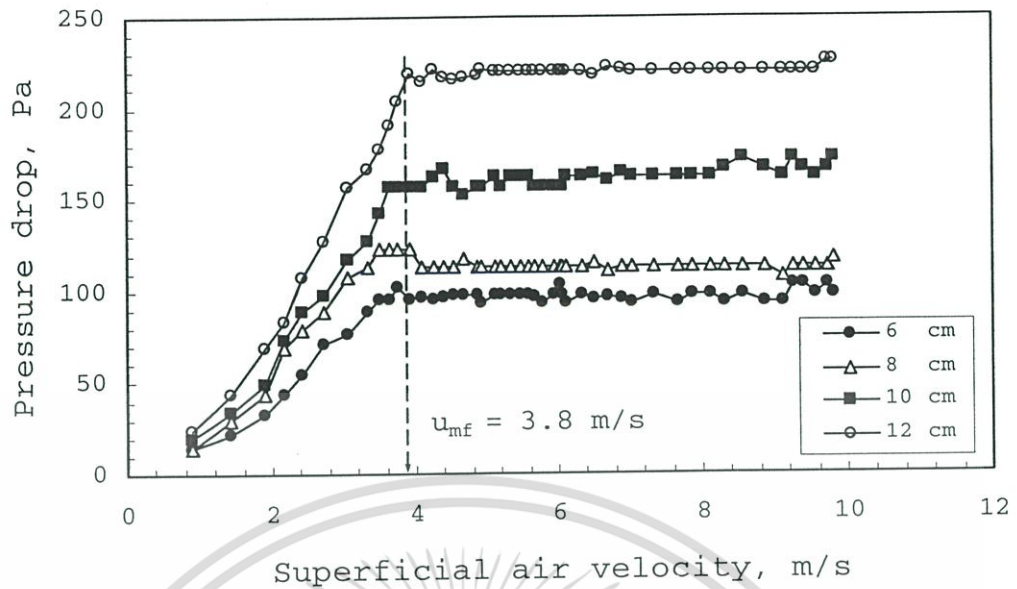
งานวิจัยนี้สามารถแยกการวิเคราะห์ได้เป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ผลที่ได้จากผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

6.1 ลักษณะและอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

ในรูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศในหอตกลงพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศที่ละน้อย เริ่มจากเบตหนึ่งจะมีผลให้ความดันตกคร่อมของเบตเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศระดับหนึ่ง เมล็ดกาแฟจะเกิดการสั่นและเริ่มขยับตัว แยกตัวเป็นอิสระออกจากกัน และหลังจากนั้นความดันตกคร่อมเบตจะไม่เพิ่มขึ้น แม้ว่าความเร็วของอากาศจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจุดนี้คือจุดเริ่มต้นในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน และฟลูอิดไดเซชันที่เกิดขึ้นเป็นแบบสองสถานะ จากผลการทดลองเมล็ดกาแฟที่ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 67% ที่ความสูงของเบต 6, 8, 10 และ 12 cm พบว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเบตที่ความสูงของเบต 6-12 cm จะมีค่าประมาณ 3.8 m/s ซึ่งมากกว่าค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเบตที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 2.5 m/s (ภาคผนวก ข.) อยู่ 30%

จากผลการทดลองโดยใช้หอตกลงโปร่งใส พบว่าหลังจากจุดเริ่มต้นที่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน เมื่อความเร็วของอากาศมากขึ้น จะมีอากาศบางส่วนรวมตัว และก่อเป็นถุงอากาศเกิดขึ้นภายในเบต ซึ่งเรียกว่าฟองก๊าซ และลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Bubbling โดยเมื่อฟองก๊าซเหล่านี้ลอยตัวไปถึงผิวหน้าของเบต ฟองก๊าซจะแตกออก ทำให้ผิวหน้าของเบตมีการกระเพื่อมขึ้นลง ไม่สม่ำเสมอ และเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้นเรื่อยๆ เมล็ดกาแฟจะเริ่มหลุดลอยออกจากหอตกลง ซึ่งจุดนี้คือจุดสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน หรือความเร็วสูงสุดที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน และจากผลการทดลองยังพบอีกว่าความดันตกคร่อมเบตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของเบตเพิ่มขึ้น เพราะค่าความดันตกคร่อมภายในเบตนั้นจะเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของเมล็ดกาแฟที่บรรจุอยู่ต่อพื้นที่ภาคตัดขวางหอตกลง ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ (3.6)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าที่ความเร็ว $1.3u_{mf}$ จะเกิดฟลูอิดไดเซชันอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจากผลการทดลองที่ความสูง 6 – 12 เซนติเมตร ความเร็วที่ $1.3u_{mf}$ มีค่าเท่ากับ 5.0 m/s



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศ ที่ความลึกของเบตต่างๆ (ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิอากาศ 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

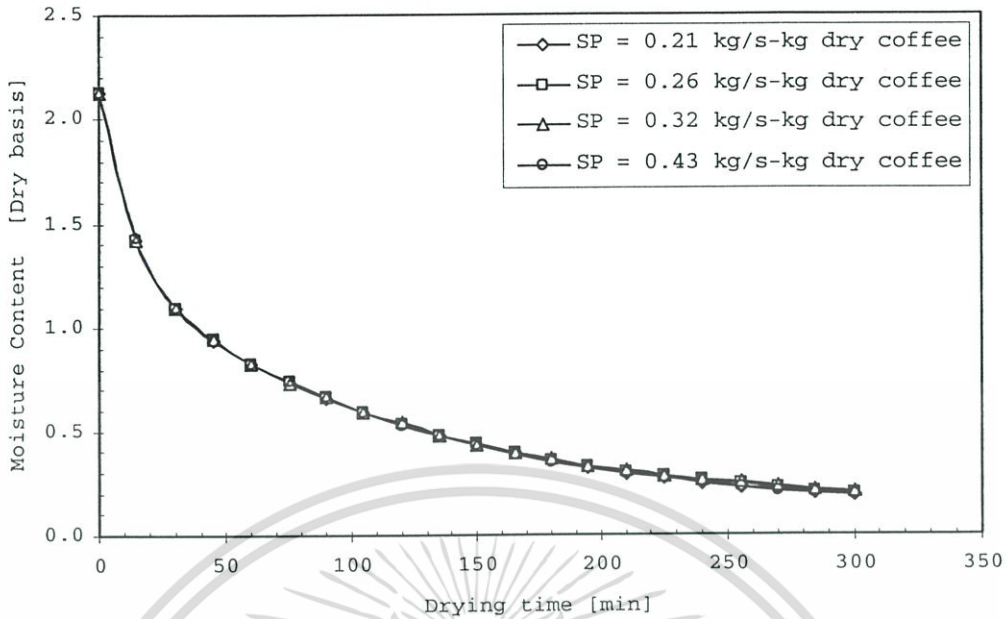
6.2 อิทธิพลของอัตราการไหลจำเพาะ, SP

รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่างๆ และอุณหภูมิทางเข้าที่ 100°C จากความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟ จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศไม่มีผลกระทบต่ออัตราการลดลงของปริมาณความชื้น โดยกราฟแต่ละเส้นจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 1 ชั่วโมงแรกซึ่งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และหลังจากนั้นปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

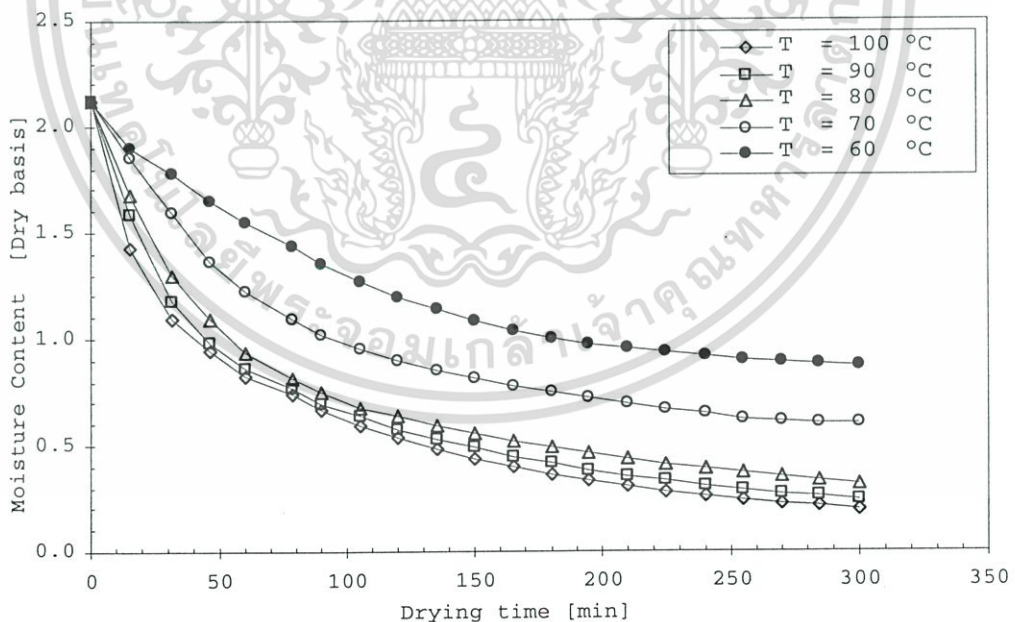
6.3 อิทธิพลผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้า

ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดกาแฟกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าหอตกลง 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C และ 100 °C, ที่ Superficial air velocity 5.0 เมตรต่อวินาที และความลึกของเบต 12 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.3 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของอัตราการลดลงของความชื้นของเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิทางเข้าต่างๆ มีแนวโน้มเหมือนกันโดยจะลดลงอย่างรวดเร็วใน 1 ชั่วโมงแรก เนื่องจากความชื้นที่ผิวเมล็ดกาแฟเกิดการระเหยเป็นไอ และเคลื่อนย้ายออกจากเมล็ดของแข็งเข้าสู่ตัวกลางในการอบอย่างรวดเร็ว โดยที่อัตราการลดลงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลเฉพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 100 °C (ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิอากาศ 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าต่างๆ ที่ SP เท่ากับ 0.21 kg/s-kg dry coffee (ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิทางเข้าสูงๆ จะมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิทางเข้าต่ำๆ และที่อุณหภูมิทางเข้าสูงปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟจะเหลือน้อยกว่าที่อุณหภูมิทางเข้าต่ำที่เวลาเดียวกัน เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเมล็ดกาแฟจะสูงขึ้นซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าที่ 100 °C มีอัตราการลดลงของความชื้นจาก 68% มาตรฐานเปียก เหลือเพียง 14% มาตรฐานเปียกภายใน 5 ชั่วโมง

6.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟ

6.4.1 ผลการทดลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟ

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟ จะใช้ผลเฉลยของสมการบนพื้นฐานของ Fick's law ตามสมการสำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม (4.5) โดยมีสมมุติฐาน คือ เป็นการแพร่ในหนึ่งมิติ, ไม่คิดการหดเหี่ยวของเมล็ดกาแฟขณะอบแห้ง, สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟเป็นค่าคงที่, ความชื้นเริ่มภายในเมล็ดกาแฟมีค่าสม่ำเสมอ โดยคิดพจน์แรกเพียงพจน์เดียว ดังนั้นสมการที่ (4.5) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 Dt}{r^2}\right] \quad (6.1)$$

เมื่อแทนค่า MR และ t ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ลงในสมการที่ (6.1) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิ 60-100 °C และอัตราการไหลจำเพาะของอากาศระหว่าง 0.021-0.43 kg/s-kg dry coffee แสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟ

SP (kg/s-kg dry coffee)	Diffusivity (m ² /s) x10 ¹⁰				
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
0.21	1.18	2.42	3.81	4.39	5.52
0.26	1.18	2.36	4.55	5.04	5.44
0.32	1.19	2.26	4.42	4.57	5.47
0.43	1.26	2.48	3.77	4.87	5.61

จากตารางที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟมีค่าระหว่าง 1.18×10^{-10} - $5.61 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าเพิ่มขึ้น โดยไม่ขึ้นกับอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิ 80-100 °C มีความแตกต่างกันน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 60-70 °C ซึ่งมีอัตราการลดลงของความชื้นน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง

6.4.2 แบบจำลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟ

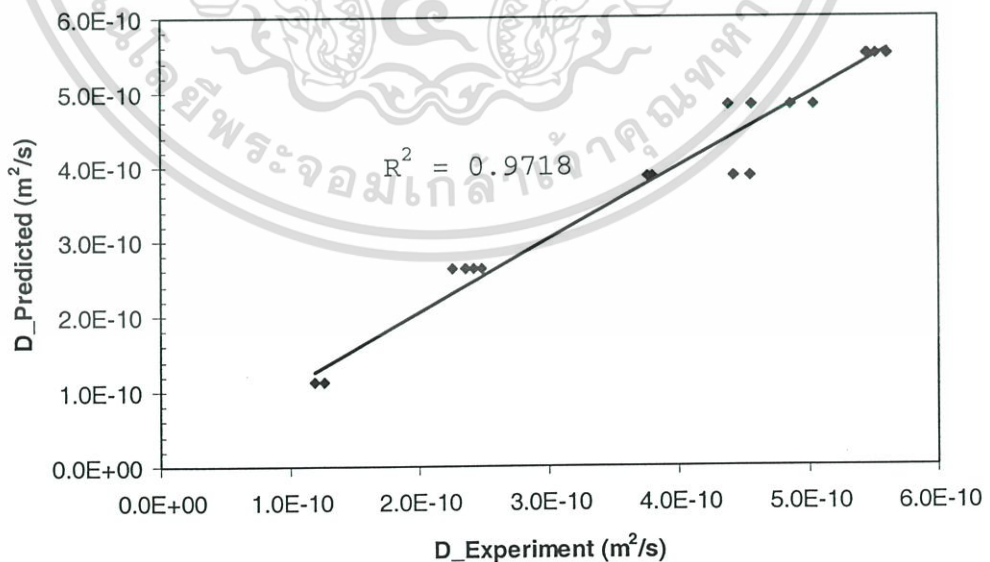
ในการหาแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การแพร่เมล็ดกาแฟ โดยใช้ผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 6.1 สำหรับสร้างสมการความสัมพันธ์กับตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟ จากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้งเพียงอย่างเดียว โดยจะไม่ขึ้นกับอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ ดังนั้นใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ Multiple Regression Analysis (Montgomery, 1997) จะได้ว่า

$$D = -1.378 \times 10^{-9} + 3.317 \times 10^{-11}T - 1.388 \times 10^{-13}T^2 \quad (6.2)$$

โดยที่

T คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้ง

จากสมการ (6.2) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R^2) เท่ากับ 0.9718 ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดลองกับข้อมูลสัมประสิทธิ์การแพร่จากการคำนวณ ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าผลของการทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟตามสมการที่ (6.2) ให้ค่า R^2 มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าผลการทำนายให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง

6.5 การหาค่าคงที่ของการอบแห้ง

ในงานวิจัยได้นำรูปแบบจำลองของ Newton และ Page มาอธิบายอัตราการอบแห้งของเมล็ดกาแฟ ซึ่งรูปแบบของแบบจำลองต่างๆ มีดังนี้

6.5.1 แบบจำลองของ Newton

$$MR = \exp(-k_1 t) \quad (6.3)$$

จากสมการ (6.2) ใส่ \ln ทั้งสองข้าง จะได้ดังสมการ

$$\ln MR = -k_1 t \quad (6.4)$$

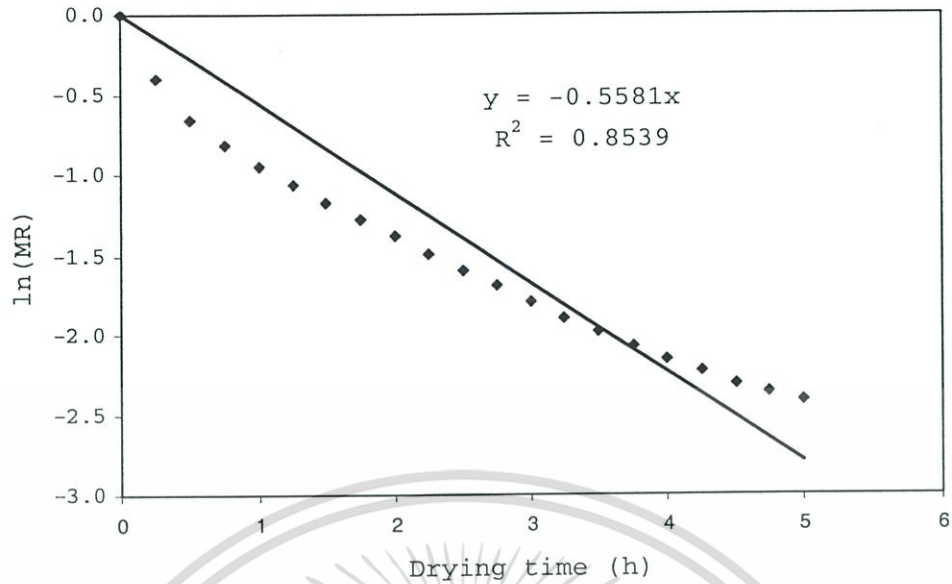
6.5.1 แบบจำลองของ Page

$$MR = \exp(-k_2 t^n) \quad (6.5)$$

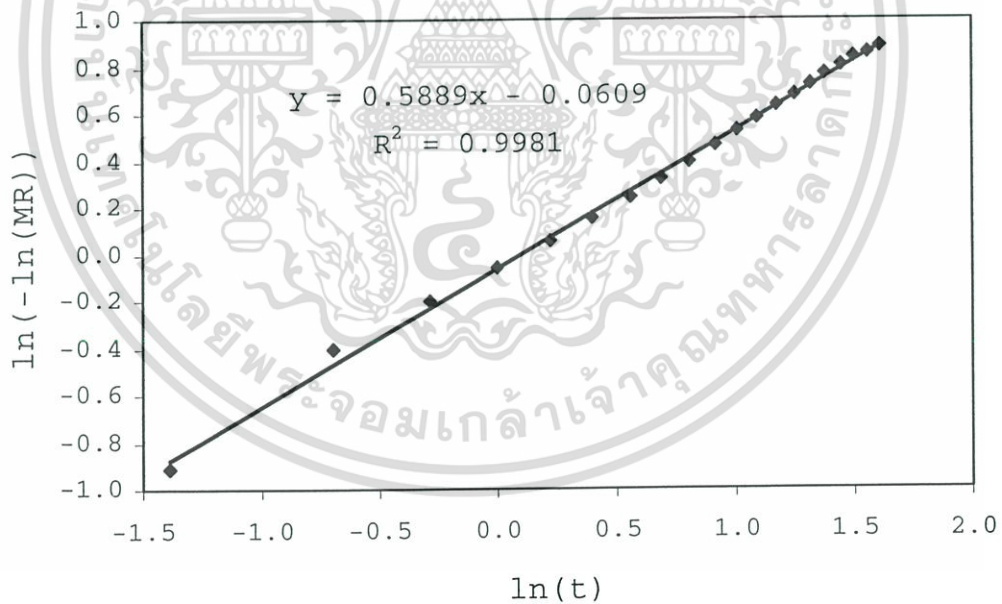
จากสมการ (6.4) ใส่ \ln ทั้งสองครั้ง จะได้ดังสมการ

$$\ln(-\ln MR) = \ln k_2 + n \ln t \quad (6.6)$$

จากผลการทดลองทำการพล็อตค่าระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) ที่อยู่ในรูปของลอการิทึม กับเวลา และหาค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดกาแฟ (k_1) ดังแสดงในรูปที่ 6.5 และทำการพล็อตค่าระหว่าง $\ln(-\ln MR)$ กับ $\ln t$ และหาค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดกาแฟ (k_2) และ n ดังแสดงในรูปที่ 6.6 ดังนั้นค่าคงที่ของการอบแห้งทั้งสองสมการดังแสดงในตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับ เวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าหอ
ทดลอง 100°C และ SP เท่ากับ $0.21 \text{ kg/s-kg dry coffee}$



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(-\ln(MR))$ กับ $\ln(t)$ ในการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลองที่
 100°C และ SP เท่ากับ $0.21 \text{ kg/s-kg dry coffee}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดกาแฟจากรูปแบบจำลองของ Newton และ Page

Test condition		Newton's model		Page's model		
SP kg/s-kg dry coffee	Temp. °C	k_1	R^2	k_2	n	R^2
0.21	60	0.226	0.8572	0.326	0.733	0.9826
	70	0.330	0.8293	0.495	0.708	0.9697
	80	0.428	0.8278	0.669	0.672	0.9718
	90	0.455	0.6342	0.915	0.442	0.9928
	100	0.558	0.8539	0.941	0.589	0.9981
0.26	60	0.226	0.8607	0.324	0.737	0.9828
	70	0.322	0.7744	0.497	0.689	0.9600
	80	0.464	0.7474	0.778	0.614	0.9564
	90	0.514	0.8249	0.848	0.617	0.9868
	100	0.549	0.8384	0.936	0.581	0.9983
0.32	60	0.226	0.8536	0.327	0.732	0.9819
	70	0.305	0.6630	0.491	0.662	0.9401
	80	0.455	0.7419	0.770	0.605	0.9541
	90	0.481	0.8020	0.826	0.582	0.9926
	100	0.544	0.8238	0.935	0.576	0.9982
0.43	60	0.233	0.9065	0.312	0.798	0.9857
	70	0.331	0.8324	0.497	0.710	0.9699
	80	0.426	0.8276	0.664	0.673	0.9726
	90	0.487	0.7116	0.850	0.578	0.9766
	100	0.560	0.8553	0.939	0.594	0.9981

จากสมการเชิงเส้น (6.3) และ (6.5) ที่สภาวะเงื่อนไขในการทดลองค่าหนึ่งจะได้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสมการถดถอย (Montgomery, 1997) ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าหอทดลองจะได้ดังรูปแบบสมการดังนี้คือ

แบบจำลองของ Newton

$$k_1 = -0.2434 + 0.00812T \quad (6.7)$$

ได้ค่า $R^2 = 0.9598$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของ Page

$$n = 1.019 - 0.0047T \quad (6.8)$$

ค่า $R^2 = 0.6897$

$$k_2 = -0.610 + 0.016T \quad (6.9)$$

ค่า $R^2 = 0.9580$

ดังนั้นเมื่อได้ค่าคงที่ของการอบแห้งของทั้งสองสมการ ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง โดยที่เมื่อแทนค่า k_1 ลงในสมการ (6.3) จะได้

แบบจำลองของ Newton

$$MR = \exp[-(-0.2434 + 0.00812T)t] \quad (6.10)$$

และแทนค่า k_2 และ n ลงในสมการ (6.5) จะได้

แบบจำลองของ Page

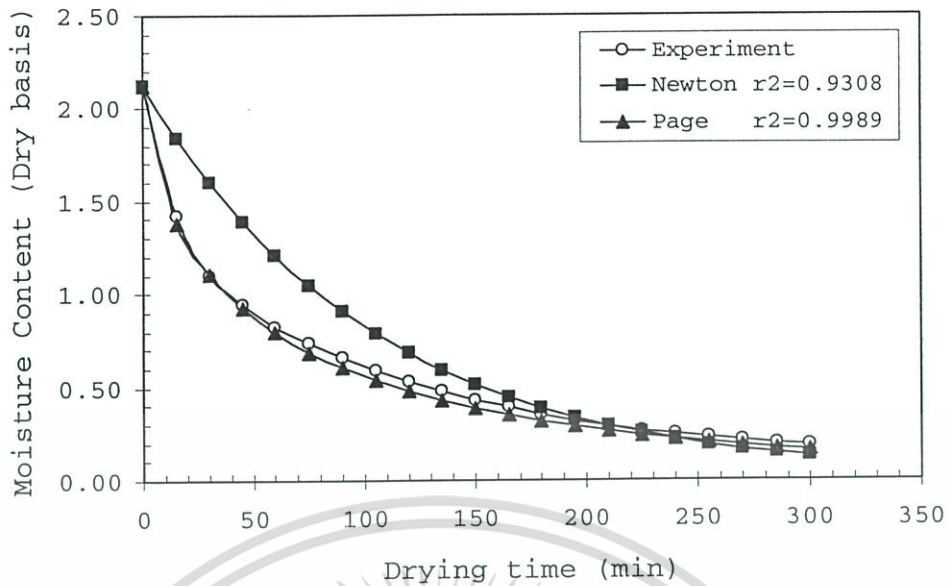
$$MR = \exp[-(-0.610 + 0.016T)t^{(1.019 - 0.0047T)}] \quad (6.11)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

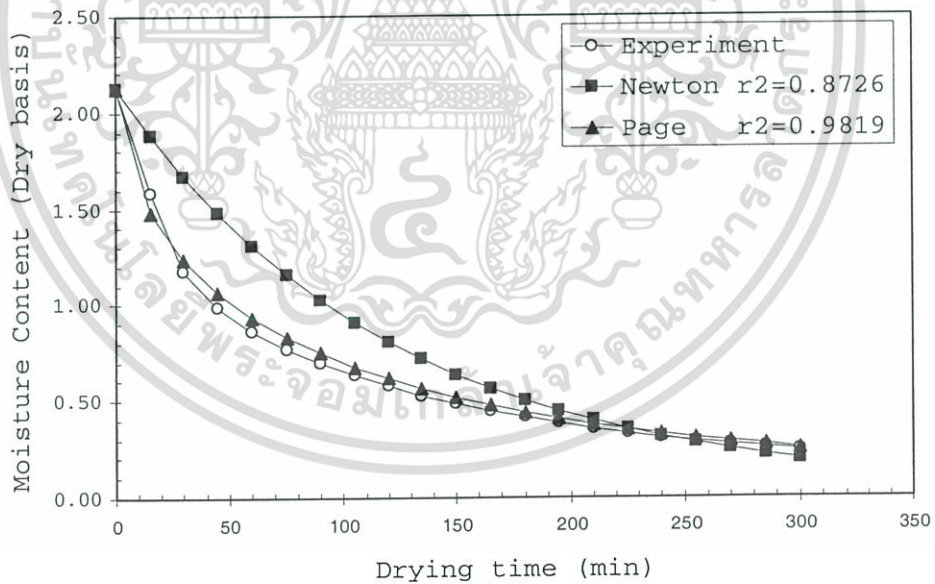
T คือ อุณหภูมิในการอบแห้ง, °C

t คือ เวลาในการอบแห้ง, ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

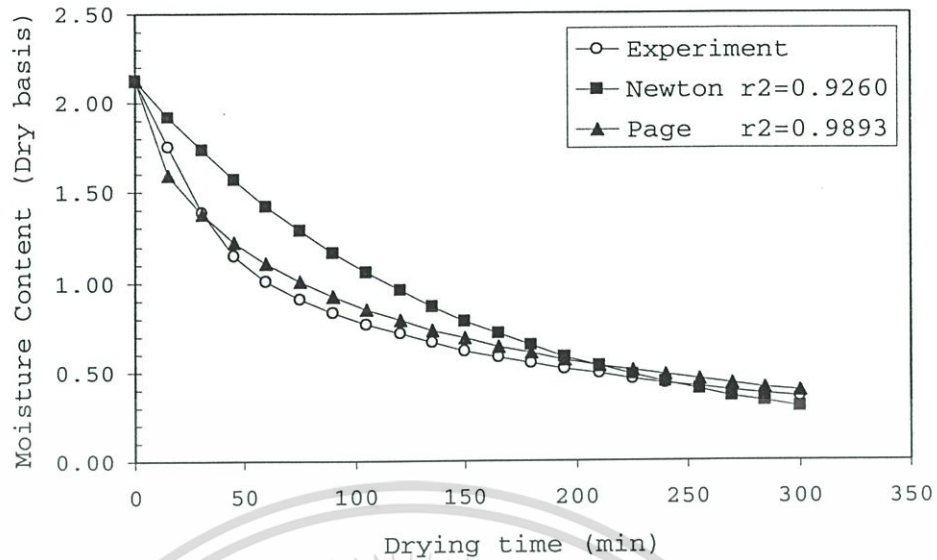


รูปที่ 6.7 การเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่อุณหภูมิทางเข้าหอตดอง 100 °C และ SP เท่ากับ 0.21 kg/s-kg dry coffee

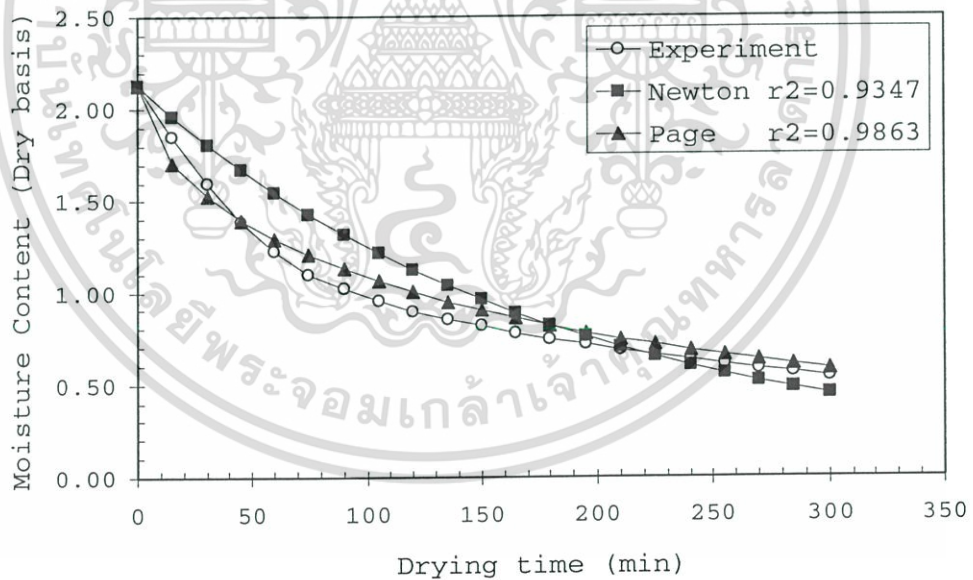


รูปที่ 6.8 การเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่อุณหภูมิทางเข้าหอตดอง 90 °C และ SP เท่ากับ 0.21 kg/s-kg dry coffee

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

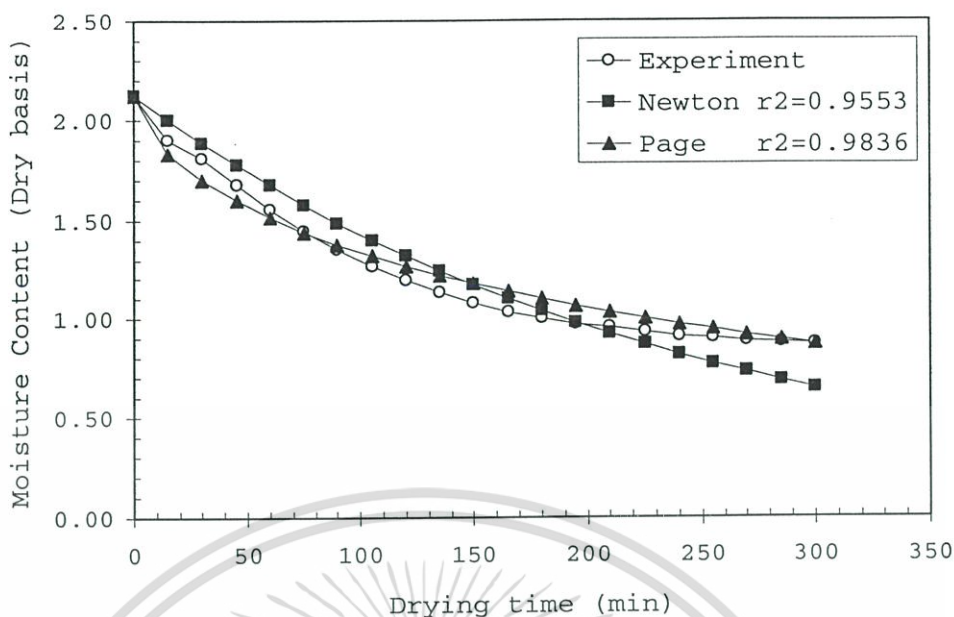


รูปที่ 6.9 การเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่อุณหภูมิทางเข้าหอตดลอง 80 °C และ SP เท่ากับ 0.21 kg/s-kg dry coffee



รูปที่ 6.10 การเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่อุณหภูมิทางเข้าหอตดลอง 70 °C และ SP เท่ากับ 0.21 kg/s-kg dry coffee

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.11 การเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton และ Page กับผลการทดลองที่อุณหภูมิทางเข้าหอตดลอง 60 °C และ SP เท่ากับ 0.21

จากรูปที่ 6.7-6.11 แสดงให้เห็นว่าการทำนายอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton กับแบบจำลองของ Page ที่อุณหภูมิสูง การทำนายผลการทดลองของ Page ให้ข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองของ Newton แต่ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีค่าอัตราการลดลงของความชื้นน้อยกว่าที่อุณหภูมิทางเข้าหอตดลองสูงๆ ผลการทำนายของแบบจำลองของ Page และการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient : r^2) จากตารางที่ 6.3 พบว่าค่าที่ได้โดยการทำนายค่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นโดยแบบจำลองของ Page ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9671-0.9992 มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าผลการทำนายค่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นโดยแบบจำลองของ Newton ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8726-0.9666 เนื่องจากแบบจำลองของ Newton ขึ้นอยู่กับค่าคงที่เพียงค่าเดียวคือ k_1 ทำให้สมการที่ได้มีการลดลงของค่าที่ได้จากสมการน้อยกว่าสมการของ Page ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่สองตัวคือ k_2 และ n

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) ของการเปรียบเทียบการทำนายค่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นกับค่าที่ได้จากผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) ของการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นกับค่าที่ได้จากผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	SP (kg/s-kg dry coffee)							
	0.21		0.26		0.32		0.43	
	Page's Model	Newton's Model	Page's Model	Newton's Model	Page's Model	Newton's Model	Page's Model	Newton's Model
100	0.9989	0.9308	0.9990	0.9289	0.9992	0.9276	0.9989	0.9319
90	0.9819	0.8726	0.9947	0.9188	0.9972	0.9217	0.9904	0.9010
80	0.9893	0.9260	0.9743	0.8802	0.9735	0.8786	0.9895	0.9274
70	0.9863	0.9347	0.9817	0.9225	0.9671	0.8958	0.9864	0.9350
60	0.9836	0.9553	0.9837	0.9565	0.9826	0.9541	0.9876	0.9666



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

7.1.1 จากผลการทดลองเมล็ดกาแฟที่ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 67% ที่ความสูงของเบด 6, 8, 10 และ 12 เซนติเมตร พบว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดจะมีค่าเท่ากับ 3.8 m/s ซึ่งมากกว่าค่าที่คำนวณอยู่ 30%

7.1.2 แฟคเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งคือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอทดลอง โดยจากผลการทดลองค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศไม่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งเมล็ดกาแฟ

7.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟอยู่ในช่วง 1.18×10^{-10} - $5.61 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าเพิ่มขึ้น

7.1.4 แบบจำลองการแพร่ของเมล็ดกาแฟถูกสร้างขึ้นโดยเทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุโดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวดังสมการ

$$D = -1.378 \times 10^{-9} + 3.317 \times 10^{-11} T - 1.388 \times 10^{-13} T^2$$

โดยที่ค่าผลของการทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดกาแฟของสมการ ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง

7.1.5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากรูปแบบสมการของ Newton และ Page ซึ่งค่าคงที่ของการอบแห้ง ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าหอทดลองเพียงอย่างเดียว โดยหาจากเทคนิคสมการถดถอย เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากรูปแบบสมการของ Newton และ Page ที่พัฒนาขึ้นมาทำนายอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นในเมล็ดกาแฟ พบว่าสมการที่พัฒนาขึ้นจากรูปแบบจำลองของ Page ให้ค่าที่สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) อยู่ในช่วง 0.9671-0.9992 ซึ่งให้ผลการทำนายถูกต้องมากกว่ารูปแบบสมการของ Newton โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อยู่ในช่วง 0.8726-0.9666 ดังสมการ

แบบจำลองของ Newton

$$MR = \exp[-(-0.2434 + 0.00812T)t]$$

แบบจำลองของ Page

$$MR = \exp[-(-0.610 + 0.016T)^{(1.019 - 0.0047T)}]$$

7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ในการทดลองถ้าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเปลี่ยนแปลงมากๆ มีผลให้อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นในเมล็ดกาแฟต่อเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นควรจะมีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และตัวแปรอื่นอีก

7.2.2 ควรที่จะศึกษาผลของการนำอากาศที่ใช้อบแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ และความคุ้มค่าของพลังงานโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

7.2.3 พัฒนาการอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดไปสู่อุตสาหกรรมการอบแห้งเมล็ดกาแฟภายในประเทศต่อไปในอนาคต



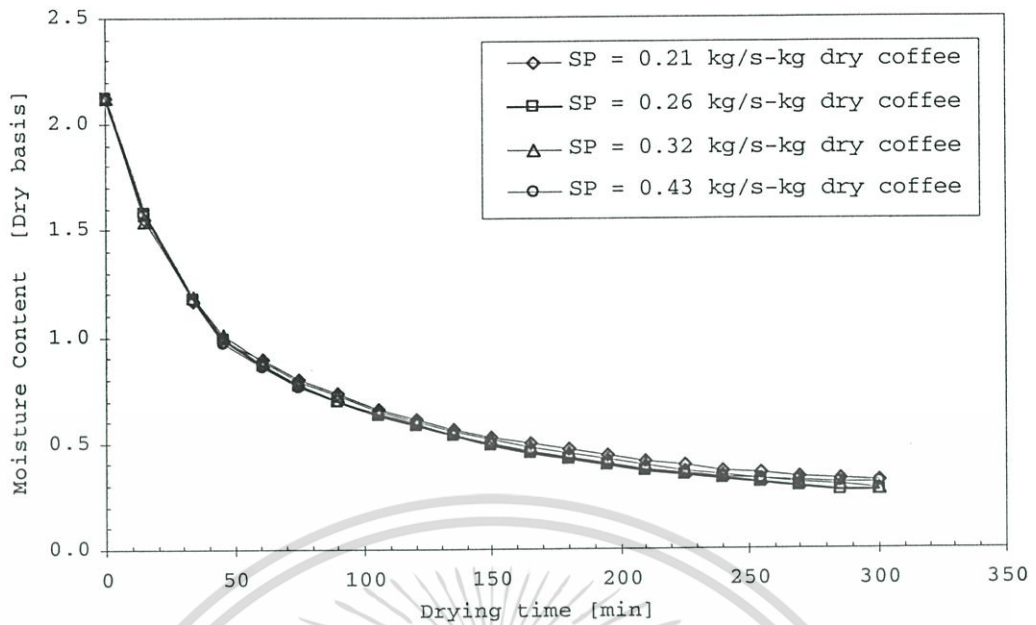
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



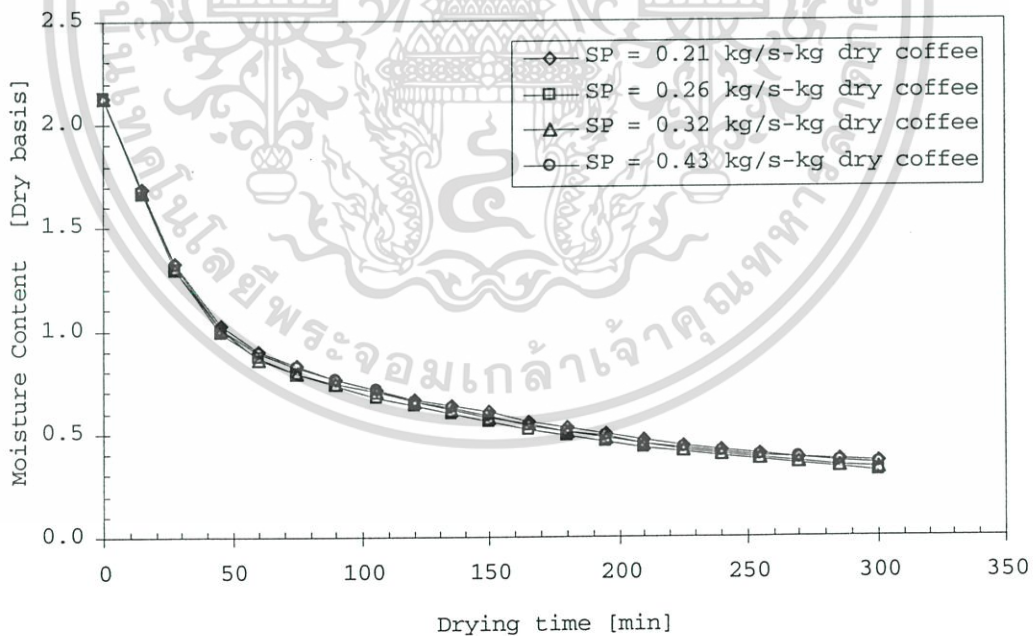
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

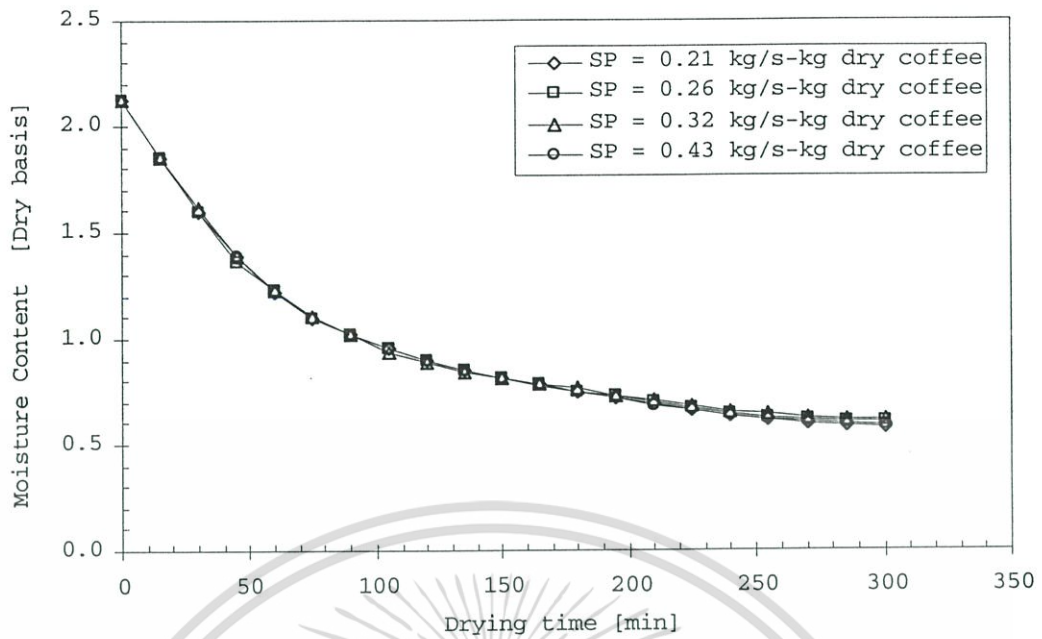


รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 90°C (ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิอากาศ 27°C , ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

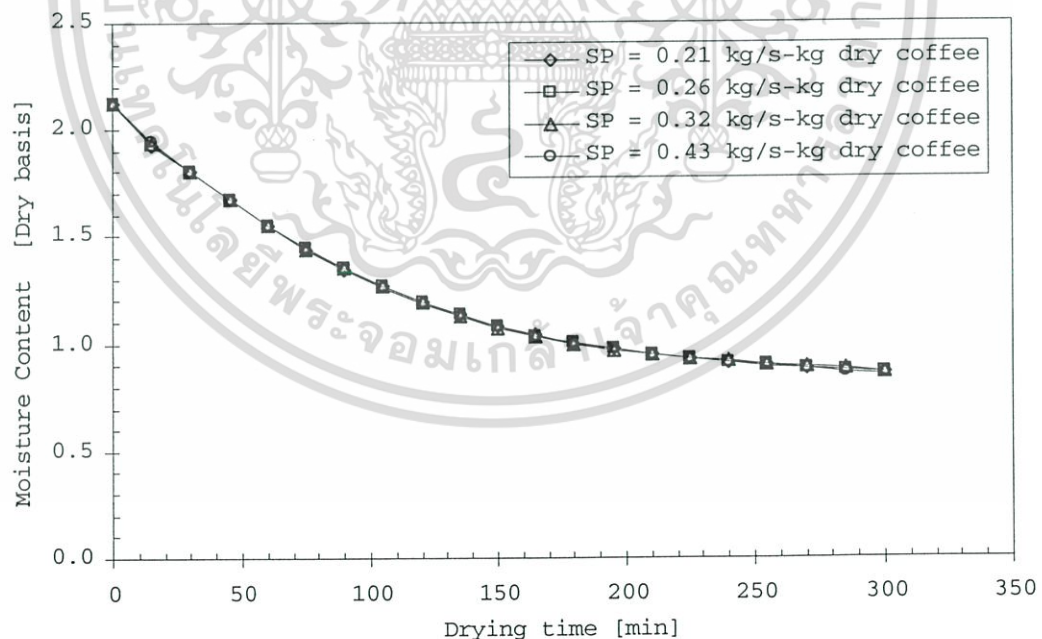


รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80°C (ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิอากาศ 27°C , ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

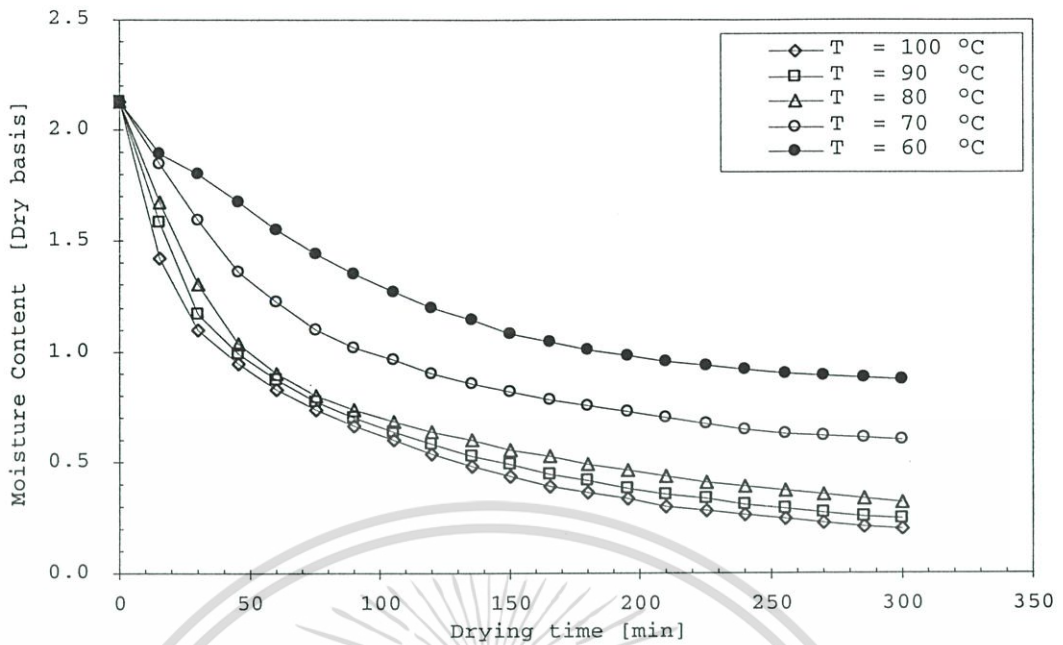


รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 70 °C (ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิอากาศ 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

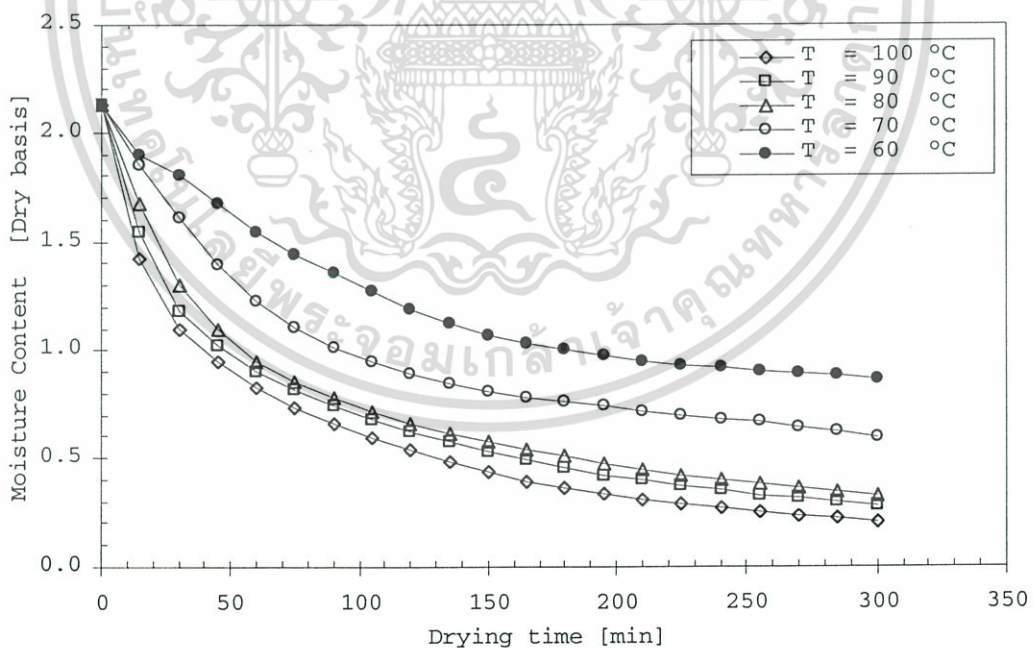


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 60 °C (ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิอากาศ 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

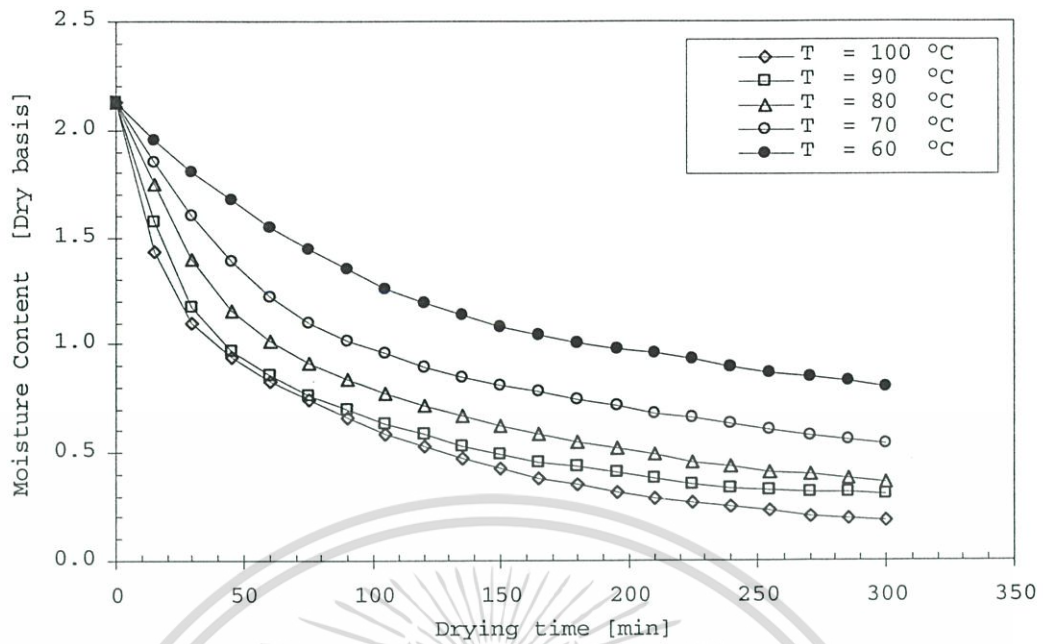


รูปที่ ๓.๕ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าต่างๆ ที่ SP เท่ากับ 0.26 kg/s-kg dry coffee (ความชื้น เริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)



รูปที่ ๓.๖ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าต่างๆ ที่ SP เท่ากับ 0.32 kg/s-kg dry coffee (ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าต่างๆ ที่ SP เท่ากับ 0.43 kg/s-kg dry coffee (ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของเบตที่เป็นเมล็ดกาแฟ

1. พฤกษศาสตร์พืชกาแฟ



ชั้น (Class) ของกาแฟ คือ Dicotyledoneae

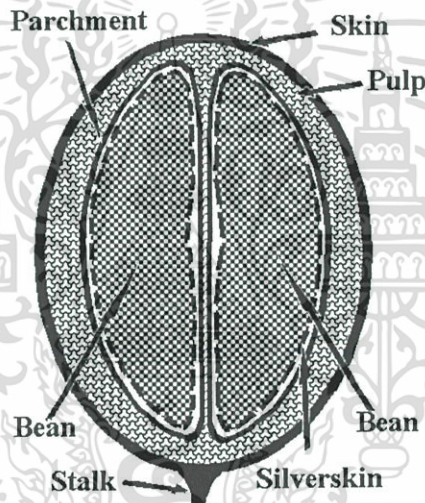
ชั้นย่อย (Subclass) ของกาแฟ คือ Sympetalae หรือ Metachlamydeae

อนุกรม (Order) ของกาแฟ คือ Rubiales

วงศ์ (Family) ของกาแฟ คือ Rubiaceae

สกุล (Genus) ของกาแฟ คือ Coffea

ชนิด (Species) ของกาแฟ คือ Coffea Robusta



รูปที่ ข.1 ลักษณะภายในของเมล็ดกาแฟ

โดยทั่วไปเมล็ดกาแฟมี 2 ซีกในผลกาแฟแต่ละผล โดยเมล็ดกาแฟจะเอาด้านเรียบประกบกัน ผิวนอกของเมล็ดกาแฟจะแข็ง และทนทานต่อการเก็บเกี่ยว เนื้อในผลกาแฟจะเหลว เปลือกหุ้มเมล็ดมีลักษณะเหนียว (กาญจน์มณี ศรีวิศาลภพ. 2546 : 18)

กาแฟปลูกมากทางภาคใต้ของประเทศไทย โดยกาแฟพันธุ์โรบัสตาที่ใช้ในการทดลอง นำมาจากจังหวัดสุราษฎร์ธานี

2. กระบวนการตากแห้งเมล็ดกาแฟโดยวิธีธรรมชาติ (ตากแดด)

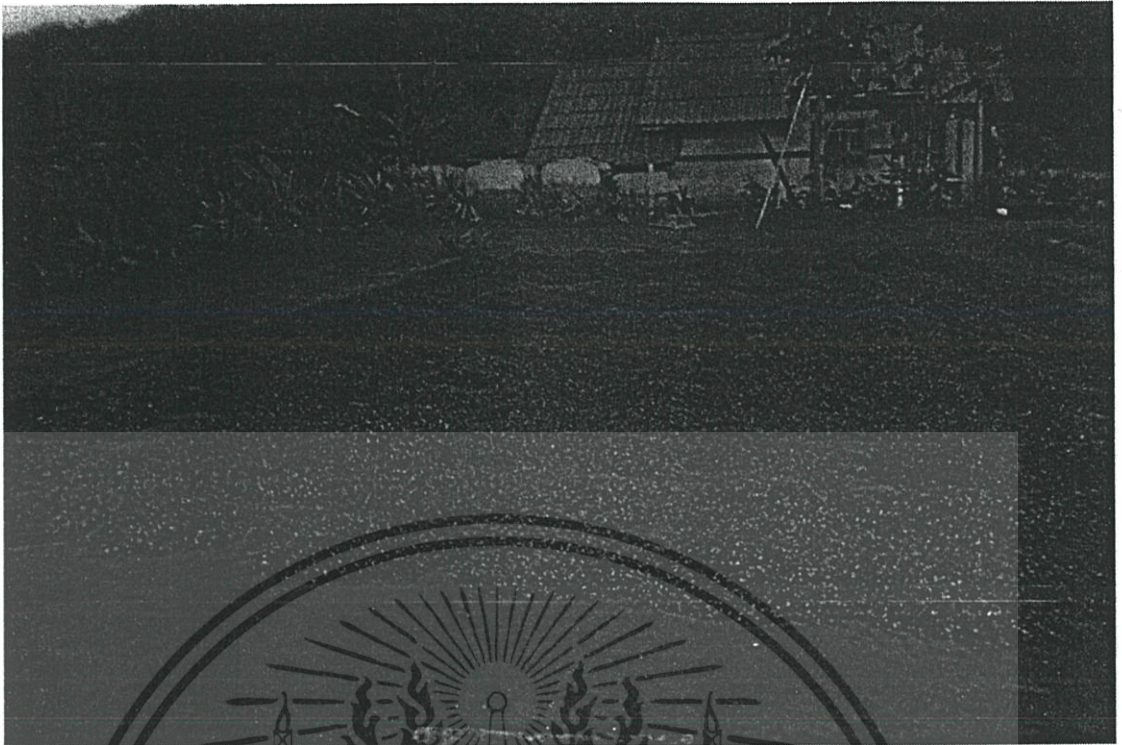


รูปที่ ข.2 ตันกาแฟ



รูปที่ ข.3 เกษตรกรเก็บเมล็ดกาแฟสุกจากต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 เกษตรกรนำเมล็ดกาแฟสดมาตากแห้งบนลานดิน



รูปที่ ข.5 เกษตรกรนำเมล็ดกาแฟสดมาตากแห้งบนลานซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมเทียบเท่าเมล็ดกาแฟ

ในการทดลองสมมุติให้เมล็ดกาแฟเป็นทรงกลม โดยการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมเทียบเท่าเมล็ดกาแฟทำได้โดยนำเมล็ดกาแฟสดมานับจำนวนเมล็ด แล้วใส่ในกระบอกตวง (Western Germany) ขนาด 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความละเอียด 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วอ่านค่าของเมล็ดกาแฟที่ถูกแทนที่ ในการทดลองจะได้ปริมาตรของเมล็ดกาแฟเท่ากับ 1327 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เมื่อนำไปแทนค่าในสมการของทรงกลม จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมเทียบเท่าเมล็ดกาแฟมีค่าเท่ากับ 13.63 มิลลิเมตร

4. ค่าความหนาแน่นของเมล็ดกาแฟ

นำเมล็ดกาแฟมาชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งดิจิตอล (TH2000) ขนาด 2000 กรัมและมีค่าความละเอียด 1 กรัม แล้วนำไปใส่ในกระบอกตวงแล้วปริมาณของของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยเมล็ดกาแฟ จากการทดลองพบว่าเมล็ดกาแฟจมน้ำทั้งหมด ซึ่งคำนวณความหนาแน่นได้เท่ากับ 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

5. ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟ

จากการทดลองจะอบเมล็ดกาแฟสดด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยใช้ตู้อบ (Memert UM500) จนกระทั่งเมล็ดกาแฟมีมวลคงที่ โดยค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสตาในการทดลองมีค่าเฉลี่ยประมาณ 68 % มาตรฐานเปียก

6. สัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเมล็ดกาแฟเมื่อเกิดฟลูอิดไดเซชัน

จาก WEN และ YU ในสมการที่ 3.5 คือ

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

ในการทดลองกำหนดให้ค่าความเป็นทรงกลมของเมล็ดกาแฟ ϕ_s มีค่า 1 ดังนั้นสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเมล็ดกาแฟเมื่อเกิดฟลูอิดไดเซชัน มีค่าเท่ากับ 0.414

7. ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_g) ที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 30 °C คือ 1.165 kg/m³ และความหนืดของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 30 °C คือ 1.86x10⁻⁵ N·s/m² เมื่อแทนค่าในสมการที่ 3.7 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1.75}{(0.414)^3(1)} \text{Re}_{mf}^2 + \frac{150(1-0.414)}{(0.414)^3(1)^2} \text{Re}_{mf} = \frac{(13.63 \times 10^{-3})^3 [1.165(1200-1.165)9.81]}{(1.86 \times 10^{-5})^2}$$

และ

$$\text{Re}_{mf} = \frac{(13.63 \times 10^{-3}) u_{mf} (1.165)}{1.86 \times 10^{-5}}$$

ดังนั้นค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของเมล็ดกาแฟคือ 2.5 m/s

8. ความเร็วตกอิสระของเมล็ดกาแฟ

จากสมการ 3.10 เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างลงไปจะได้

$$d_p^* = 13.63 \times 10^{-3} \left[\frac{0.9996(1200 - 0.9996)9.81}{(2.07 \times 10^{-5})^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$d_p^* = 411.1$$

จากสมการ 3.9 เมื่อแทนค่า d_p^* จะได้

$$u_t^* = \left[\frac{18}{(411.1)^2} + \frac{2.335 - 1.744(1)}{(411.1)^{0.5}} \right]^{-1}$$

$$u_t^* = 34.2$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.11

$$u_t = 441.1 \left[\frac{2.07 \times 10^{-5} (1200 - 0.9996) 9.81}{(0.9996)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$u_t = 21.4 \text{ m/s}$$

ค่าความเร็วตกอิสระของเมล็ดกาแฟมีค่าเท่ากับ 21.4 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอาหารบนพื้นฐานของ Fick's law

Food Material	Specification	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	D_{eff} (cm^2/s)
Apple	-	66	6.4×10^{-5}
	McIntosh, var.	66	1.1×10^{-5}
	Granny Smith, var.	30	2.6×10^{-6}
	Granny Smith, var.	76	3.6×10^{-5}
	Granny Smith, var.	71	1.6×10^{-5}
Beet	-	66.5	1.5×10^{-5}
Tapioca root	-	84	2.7×10^{-6}
		74	4.8×10^{-6}
		55	3.5×10^{-6}
Potatoes	-	65.5	1.6×10^{-5}
	-	65	1.4×10^{-5}
	King Edward, var.	31	1.6×10^{-6}
	Binjie, var.	31	0.62×10^{-5}
	Arran Banner	31	1.5×10^{-6}
	Pentland Crown	31	1.4×10^{-6}
Fish, muscle	Cod, ~0.05% fat	30	3.4×10^{-6}
	Haddock, 0.105% fat	30	3.3×10^{-6}
	Halibut, 0.208% fat	30	2.5×10^{-6}
	Whiting, 0.036% fat	30	2.7×10^{-6}
	Whiting, 0.036% fat	25	0.82×10^{-6}
Avocado	14.7% oil content	31	1.1×10^{-6}
	14.7% oil content	43	2.1×10^{-6}
	14.7% oil content	56	3.3×10^{-6}
	4.7% oil content	58	1.8×10^{-6}
	7.9% oil content	58	1.3×10^{-6}
	9.2% oil content	58	1.2×10^{-6}
Sugar beet root	-	81	1.3×10^{-5}
		60	7.0×10^{-6}
		47	3.8×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอาหารบนพื้นฐานของ Fick's law (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	<i>Nicotiana tabacum</i> L. cv Coker 258	30	3.2×10^{-9}
		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 saturated brine	40	2.6×10^{-6}
		55	3.3×10^{-6}

จาก Johnson และคณะ (1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วงอัตรากรอบแห้งลดลง

Food Material	Specification	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	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}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	$Ar = 1823 Re_{mf}^{1.07} + 21.27 Re_{mf}^2$
Leva <i>et al.</i>	$U_{mf} = \frac{7.39 d_p^{1.82} (\rho_p - \rho_g)^{0.94}}{\rho_g^{0.06}}$
Goroshko <i>et al.</i>	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\frac{Ar}{1400 + 5.2\sqrt{Ar}} \right)$
Leva	$U_{mf} = \frac{7.169 \times 10^{-4} d_p^{1.82} (\rho_p - \rho_g)^{0.94} g}{\rho_g^{0.006} \mu_g^{0.88}}$
Bena	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\frac{1.38 \times 10^{-3} Ar}{(Ar + 19)^{0.11}} \right)$
Rowe and Henwood	$U_{mf} = \frac{8.1 \times 10^{-3} d_p^2 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g}$
Miller and Logwinuk	$U_{mf} = \frac{0.00125 d_p^2 (\rho_p - \rho_g)^{0.9} \rho_g^{0.1} g}{\mu_g}$
Frantz	$U_{mf} = \frac{1.065 \times 10^{-3} d_p^2 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g}$
Davies and Richardson	$U_{mf} = \frac{7.8 \times 10^{-4} d_p^2 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g}$
Pillai and Raja Rao	$U_{mf} = \frac{7.01 \times 10^{-4} d_p^2 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 สมการความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน (ต่อ)


Author	Equation
Broadhurst and Becker	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left[\frac{Ar}{2.42 \times 10^5 Ar^{0.85} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0.13} + 37.7} \right]^{0.5}$
Saxena and Vogel	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{25.28^2 + 0.0571Ar} - 25.28 \right)$
Babu <i>et al.</i>	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{25.25^2 + 0.0651Ar} - 25.25 \right)$
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	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(1.08 \times 10^{-3} Ar^{0.947} \right)$
Thonglimp	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{31.6^2 + 0.042Ar} - 31.6 \right)$
Bourgeois and Grenier	$Re_{mf} = \sqrt{25.46^2 + 0.03824Ar} - 25.46$
Riba, Routie and Couderc	$Re_{mf} = 1.54 \times 10^{-2} (Ga)^{0.66}, M_v^{0.7} Ga = \frac{d_p^3 \rho_g^2 g}{\mu_g^2}$ $M_v = \frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}$

จาก Wu and Baeyens (1991)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



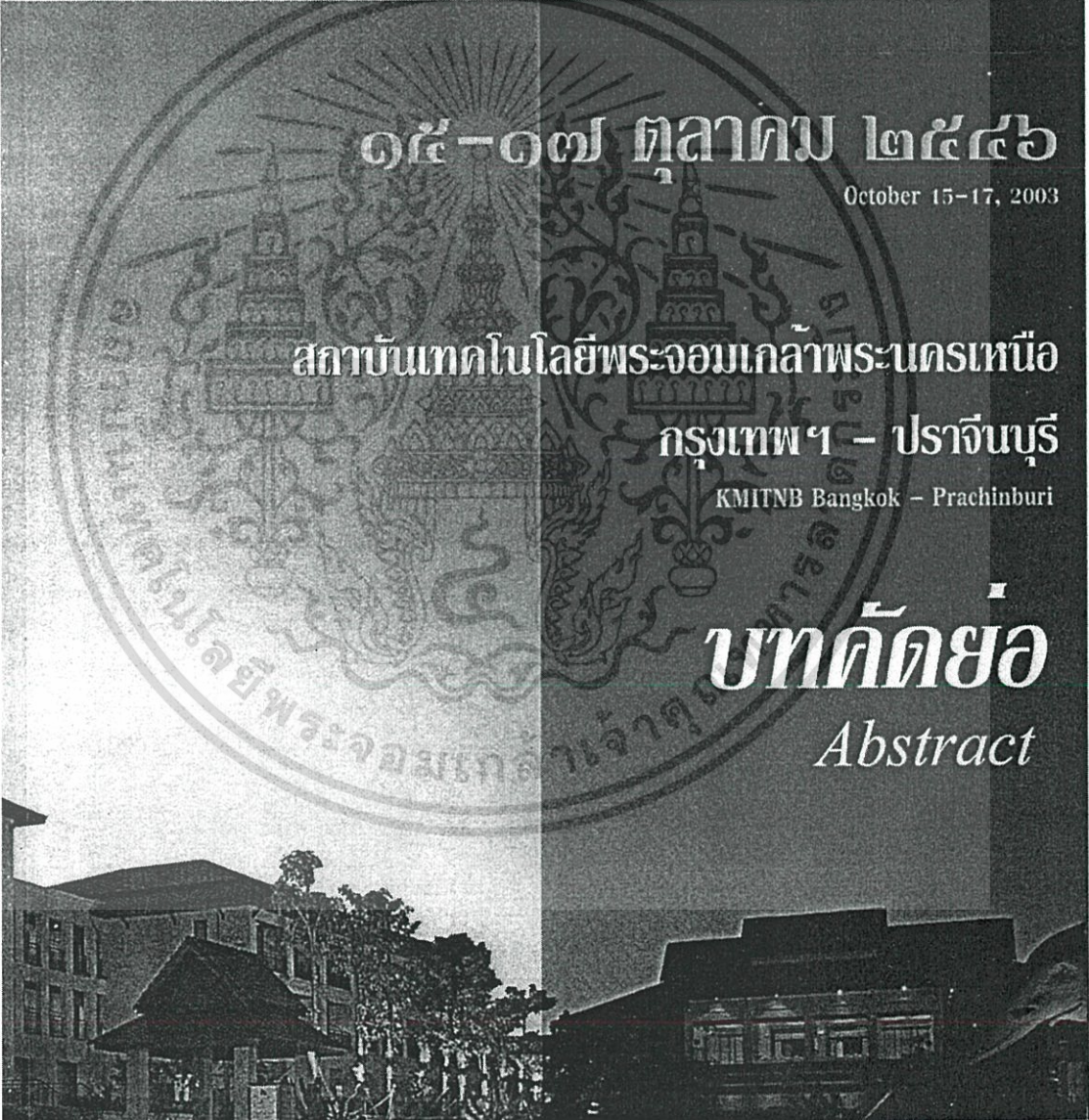
http://www.me-nett.com

การประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๑๗
The 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand

๑๕-๑๗ ตุลาคม ๒๕๕๖
October 15-17, 2003

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
กรุงเทพฯ - ปราจีนบุรี
KMITNB Bangkok - Prachinburi

บทคัดย่อ
Abstract



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Drying Characteristic of Coffee Bean with Fluidized bed dryer การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

วรมะ ทัดทอง¹ สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด² พงษ์เจต พรหมวงศ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 66(2) 326-4197 โทรสาร 66(2) 326-4198 E-mail: woramate@mut.ac.th, kpongje@kmitl.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

โทร 66(2) 988-3666 ต่อ 241 โทรสาร 66(2) 988-3666 ต่อ 241 E-mail: woramate@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับการอบแห้งเมล็ดกาแฟสดให้มีคุณภาพของผลผลิตดีขึ้น เทคนิคนี้จะช่วยลดเวลาการอบแห้งของเมล็ดกาแฟสดจากปกติ 2 อาทิตย์ เหลือเพียง 5 ชั่วโมง ในชุดการทดลองหอดูดฟลูอิดไดซ์เบดทำจากท่ออะคริลิกใสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 140 มิลลิเมตร และมีความสูง 1,000 มิลลิเมตร ขณะที่แผ่นการกระจายอากาศจะถูกวางไว้ที่ปลายทางเข้าของหอดูดฟลูอิดไดซ์เบดโดยมีสัดส่วนพื้นที่ว่างของลมที่ออกจากแผ่นกระจายอากาศเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของแผ่นการกระจายอากาศ ในการทดลองจะทำการอบที่ความจุ 0.6 ถึง 1.2 กิโลกรัมของเมล็ดกาแฟสด ซึ่งอากาศที่เข้าชุดฟลูอิดไดซ์เบดจะถูกให้ความร้อนจากชุดฮีตเตอร์ขนาด 3 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 30 นาที จนกระทั่งได้อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าได้ตามความต้องการในการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ไว้ที่ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส, ค่าอัตราการไหลของอากาศจำเพาะ และความเร็วลมที่ทางเข้าชุดฟลูอิดไดซ์เบด 2 ถึง 4 เมตรต่อวินาที ซึ่งตัวแปรทั้งหมดได้ถูกนำมาศึกษาผลกระทบต่ออัตราการลดลงของความชื้นของเมล็ดกาแฟสด จากผลการทดลองสามารถที่จะลดความชื้นของเมล็ดกาแฟสดจาก 68 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 14 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 5 ถึง 7 ชั่วโมง และพบว่าในช่วง 1 ถึง 2 ชั่วโมงแรกจะเกิดการลดลงของความชื้นของเมล็ดกาแฟอย่างมาก

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด, อัตราการลดความชื้น, ความเร็วในฟลูอิดไดซ์เบด, อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ

Abstract

This paper presents application of fluidized bed technique for drying the coffee beans to increase the coffee productivity with better quality. This technique will enable the coffee producers to

reduce drying time from some 2 weeks of natural drying to about 5 hours. In the experiments, the fluidized bed dryer is a cylindrical vessel (bed) made of an acrylic material with 140-mm in diameter and 1000-mm in height. It is operated at capacity of 0.6 - 1.2 kg of green coffee beans. A distributor plate was placed at the entry of the bed with fractional free area of 60%. The fluidized bed is pre-heated first by 3 kW electric heaters for 30 minutes to reach a required bed temperature and kept constant for drying period. Then, the effect of inlet hot air temperatures in a range of 50 to 90°C, specific air flow rate, and superficial air velocity of 2-4 m/s on the reduction of moisture content of coffee beans is investigated. During the experiments, a temperature of various positions such as bed temperature and temperatures at the outlet and inlet were measured with type-K thermocouples. The experiments are carried out to dry coffee from 68% moisture content to 14% moisture content in 5-7 hours. Experimental results indicate that the evaporation rate is fast during the first 1-2 hours and the drying rate hastened thereafter.

Keywords; fluidized bed dryer, drying rate, superficial air velocity, specific air flow rate

1. บทนำ

โดยทั่วไปต้นกาแฟมีอยู่ประมาณ 50 ชนิด แต่กาแฟที่นิยมดื่มแพร่หลายในปัจจุบันมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ Coffee arabica Linn หรือ อาราบิกา และ Coffee canephora Linn หรือ โรบัสต้า [1] สำหรับในประเทศไทยได้มีการปลูกกันมากทางภาคใต้ และในบางจังหวัดทางภาคเหนือ โดยแบ่งเป็นพันธุ์โรบัสต้าร้อยละ 95 และกาแฟพันธุ์อาราบิการ้อยละ 5 ในปี พ.ศ. 2539 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกกาแฟทั้งสิ้น

ประมาณ 440,000 ไร่ ผลผลิตเฉลี่ยปีละประมาณ 80,000-85,000 ตัน (เฉลี่ยประมาณ 190-200 กก. ต่อไร่) ทำรายได้ให้แก่ประเทศไทยปีละประมาณ 4,000-5,000 ล้านบาท แต่กาแฟเป็นพืชที่ผลิตแล้วส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศถึง ร้อยละ 70 ของผลผลิตทั้งหมด บริโภคภายในประเทศเพียง ร้อยละ 30 เท่านั้น จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องแข่งขันกับตลาดคู่แข่ง ที่มีการผลิตกาแฟ แต่ในปัจจุบันกาแฟไทยมีคุณภาพต่ำลง ไม่สามารถที่จะแข่งขันในตลาดโลกได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาวิธีในการปรับปรุงคุณภาพกาแฟให้ดีขึ้น ซึ่งในการทำสวนกาแฟเมื่อเกษตรกรทำการเก็บเกี่ยวเมล็ดกาแฟสดแล้ว เกษตรกรจะนำเมล็ดกาแฟสดที่เก็บเกี่ยวได้ ไปตากแดดจนกว่าเมล็ดกาแฟจะแห้ง โดยต้องตากแดดประมาณ 15-20 วัน ในวันที่มีแสงแดดจ้าทั้งวัน โดยส่วนมากเกษตรกรจะนำเมล็ดกาแฟสดที่ได้ไปตากไว้บนพื้นดินตั้งแสดงในรูปที่ 1 หรือ พื้นคอนกรีต แล้วรอจนกว่าเมล็ดกาแฟจะแห้ง แล้วจึงนำไปทำการสี ซึ่งเป็นขั้นตอนต่อไป ปัญหาที่พบส่วนมากคือ เมื่อนำเมล็ดกาแฟไปทำการสีจะพบว่าเมล็ดเสียหายเกิดขึ้นมากทำให้เกษตรกรขายกาแฟได้ในราคาต่ำ ซึ่งเมล็ดที่เสียหายส่วนมากจะมีผลมาจากขั้นตอนการลดความชื้น ซึ่งก็คือขั้นตอนการตากนั่นเอง ซึ่งเมล็ดเสียหายที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการตาก เกิดจากในช่วงการตากมีฝนตกลงมา ถ้าเกษตรกรเก็บไม่ทัน เมล็ดกาแฟส่วนที่เปียกจะเกิดการหมักขึ้นซึ่งจะทำให้เกิด รา ทำให้เมล็ดกาแฟมีกลิ่นรสชาติมาด้วย และในบางสวนสวนกาแฟจะเกิดเป็นสีดำหลังทำการสี เกษตรกรบางรายทำการตากกาแฟบนพื้นดิน ซึ่งเมื่อเมล็ดกาแฟแห้งเปลือกของเมล็ดกาแฟจะมีความไวต่อการดูดกลืนทำให้มีกลิ่นดินติดไปด้วย และปัญหาที่พบบ่อยอีกอย่างในการตากบนลานดินก็คือมีสิ่งแปลกปลอมติดมาด้วยเช่น กววด หิน ดิน และเศษโลหะต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่าปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นมาจากการขั้นตอนการตากเมล็ดกาแฟทั้งสิ้นทำให้ทั้ง สี กลิ่น และ รสชาติ ของกาแฟที่ได้ไม่เป็นไปตามที่ตลาดต้องการ



รูปที่ 1 การตากเมล็ดกาแฟสดบนลานดิน

จากปัญหาที่พบดังกล่าว ถ้าเราสามารถลดขั้นตอนการตากเมล็ดกาแฟลงได้ ปัญหาดังกล่าวก็จะลดลงด้วย ซึ่งในการคงคุณภาพของเมล็ดกาแฟไว้นั้น หลังจากการเก็บเกี่ยวเกษตรกรควรทำให้เมล็ดกาแฟแห้งโดยเร็วที่สุด

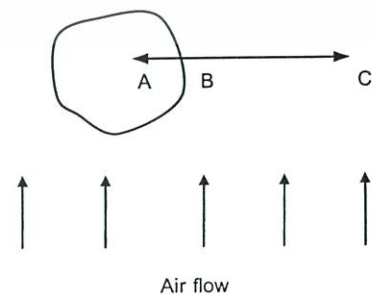
ในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมาใช้ในการลดความชื้นสำหรับผลผลิตทาง การเกษตรกรรมอย่างมากมาย เช่น ข้าวเปลือกและข้าวโพด เนื่องจากการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดสามาลดความชื้นได้ในเวลาอันสั้น มีการกระจายอุณหภูมิในการอบอย่างสม่ำเสมอ มีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของแข็งและของเหลวมาก [2] ทำให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูงในอดีตถึงปัจจุบันได้มีนักวิจัยนำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมาลดความชื้นในผลผลิตการเกษตรไม่ว่าจะเป็น Mulet et al. [3], Bema et al. [4,5] และ Rossello et al. [6] ซึ่งส่วนใหญ่จะสนใจผลกระทบของความเร็วยของลมร้อนต่อกลไกการลดความชื้น โดยส่วนใหญ่จะระบุว่าความเร็วของอากาศร้อนที่ 1-1.5 m/s จะมีผลกระทบต่อการลดความชื้นอย่างมาก ต่อมา Kiranoudis et al. [7] ได้เสนอว่าความเร็วของอากาศร้อนมีผลกระทบต่อการอบแห้งไม่มากนักเมื่อเทียบกับอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ทางเข้าและความหนาของชั้นผิวในการอบแห้ง

ในโครงการนำให้นำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมาอบเมล็ดกาแฟสดเพื่อแก้ไขและรักษาคุณภาพเมล็ดกาแฟให้ดีขึ้น การอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยใช้เครื่องอบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นวิธีที่ช่วยลดความเสียหายของเมล็ดกาแฟสดที่มีความชื้นสูง, ยืดเวลาในการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้น และลดเวลาการตากแห้งเพื่อช่วยลดปัญหาคุณภาพของกาแฟเมื่อเทียบกับวิธีตากแห้งตามธรรมชาติ โดยในบทความฉบับนี้ได้ทำการศึกษามูลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม (superficial air velocity) ภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด, อุณหภูมิอากาศทางเข้า และค่าอัตราการไหลของอากาศจำเพาะในการอบแห้ง (อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของเมล็ดกาแฟแห้ง, SP)

2. ทฤษฎี

2.1 การถ่ายเทความร้อนและมวลในฟลูอิดไดซ์เบด

การอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในเวลาเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2 ความร้อนจะทำให้ความชื้นหรือของเหลวที่อยู่ในเม็ดของแข็งเกิดการระเหยเป็นไอ และเคลื่อนย้ายออกจากเม็ดของแข็งเข้าสู่ตัวกลางในการอบ (อากาศ) ความร้อนถูกเคลื่อนย้ายโดยการพาจากสิ่งแวดล้อม (C) เข้าสู่ผิวของเม็ดของแข็ง (B) และจากผิวของเม็ดของแข็ง (B) ไป (A) โดยการนำความร้อน และความชื้นภายในเม็ดของแข็งถูกเคลื่อนย้ายในทิศทางตรงกันข้าม บนผิวเม็ดของแข็งความชื้นระเหยสู่สิ่งแวดล้อมโดยการพาความร้อน



รูปที่ 2 การถ่ายเทความร้อนและมวลในฟลูอิดไดซ์เบดของเม็ดของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไฮโดรไดนามิกของก๊าซฟลูอิดไอเซชัน [8]

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งเองกับแรงพยุงจากการไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหล

$$\text{แรงพยุง (แรงเสียดทาน+แรงต้าน)} = \text{น้ำหนักของเม็ดของแข็ง} \quad (1)$$

หรือ

$$\frac{\text{(ความดันตกในพื้นที่ภาคตัดขวางของเบด)(พื้นที่ภาคตัดขวางของท่อทดลอง)} = \text{(ปริมาตรของเบด)(ส่วนของของแข็งในเบด)(ความถ่วงจำเพาะของของแข็ง)} \quad (2)$$

ซึ่งเขียนและจัดรูปใหม่ได้

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g \quad (3)$$

โดยการประยุกต์สมการ (3) กับสมการความดันตกของ ERGUN จะได้

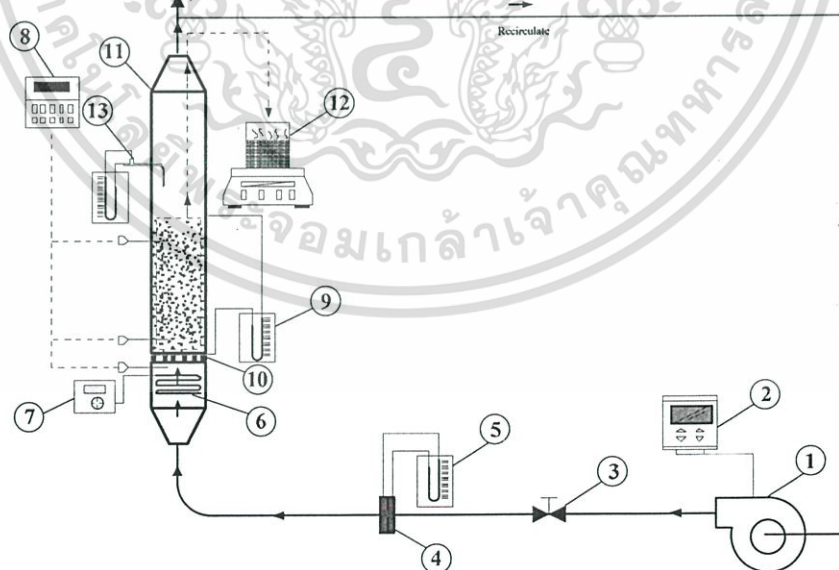
$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{Re}_{mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \text{Re}_{mf} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (4)$$

$$\text{Re}_{mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (5)$$

เมื่อ Re_{mf} คือ Reynolds number ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน

3. การทดลองและวิธีการ

เครื่องมือการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันเบดและอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยหอทดลองรูปทรงกระบอก ทำจากอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร และความสูง 1000 มิลลิเมตร ในการทดลองเม็ดกาแฟจะลอยที่ความสูงระหว่าง 60-120 มิลลิเมตร และขยายตัวถึง 400-800 มิลลิเมตร ในระหว่างเกิดฟลูอิดไอเซชัน ความจุของเม็ดกาแฟสดอยู่ในช่วง 600-1200 กรัม แผ่นกระจายลมเป็นแบบเจาะตรงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และมีจำนวน 100 รู ซึ่งคิดเป็นพื้นที่เปิด 60% กาแฟที่ใช้ทดลองเป็นพันธุ์โรบัสตาขนาดเฉลี่ยประมาณ 10-11 มิลลิเมตร และมีความชื้นเริ่มต้นที่ 68% พัดลมที่ใช้ในการทดลองขนาด 3 แรงม้า ต่อกับชุดควบคุมความเร็วรอบ (inverter) ซึ่งใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วยออร์ฟิสมิเตอร์ในการศึกษาพฤติกรรมของความเร็วอากาศในระหว่างการทดลองจะถูกควบคุมโดยโกลบวาล์ว ซึ่งมีความเร็วอยู่ในช่วง 4-6 m/s และอัตราการไหลของอากาศจำเพาะอยู่ในช่วง 0.12-0.24 kg/s/kg dry coffee อากาศในเครื่องฟลูอิดไอเซชันเบดจะถูกทำให้ร้อนด้วยขดลวดความร้อนขนาด 3 กิโลวัตต์ ที่ตำแหน่งทางเข้าหอทดลอง ซึ่งจะมีอุณหภูมิของอากาศสูงสุดถึง 120°C ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 30 นาที ในการควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้มีค่าตามที่กำหนด อุณหภูมิทดสอบภายในหอทดลองจะอยู่ในช่วง 50-90°C โดยจะทำการวัดอุณหภูมิภายในเบดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการทดลองเม็ดกาแฟจะถูกลดความชื้นลงจาก 68% ให้เหลือเพียง 14% และจะทำการวัดความชื้นที่ลดลงจากค่าน้ำหนักเม็ดกาแฟที่เปลี่ยนไปซึ่งจะทำการวัดทุกๆ 15 นาทีโดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลที่มีความละเอียด 1 กรัม



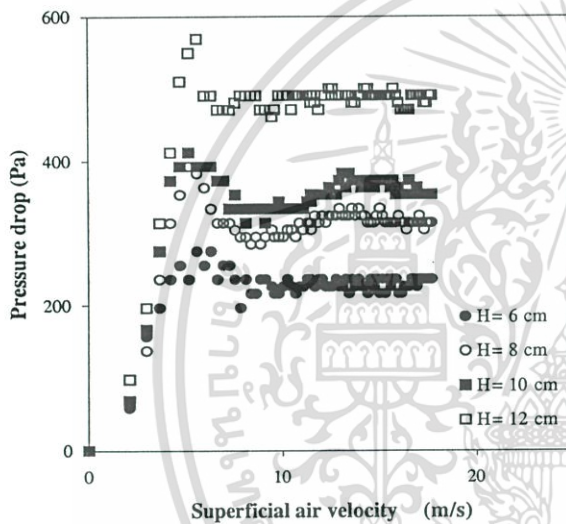
รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์การอบแห้งเม็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันเบด โดยประกอบด้วย (1) พัดลมขนาด 3 แรง, (2) ชุดควบคุมความเร็วรอบ (inverter), (3) โกลบวาล์ว, (4) ออร์ฟิสมิเตอร์, (5) มานอมิเตอร์แบบท่อตัว, (6) ขดลวดความร้อน, (7) ชุดควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อน, (8) ชุดวัดอุณหภูมิ, (9) มานอมิเตอร์แบบท่อตัว, (10) แผ่นกระจายอากาศ, (11) หอทดลองรูปทรงกระบอก, (12) ตาชั่งน้ำหนักดิจิทัล และ (13) ท่อปีโตท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลกระทบของความลึกเบต

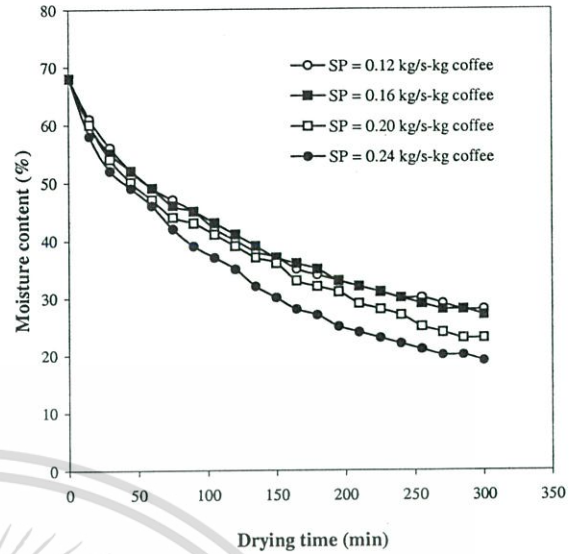
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง superficial air velocity กับ ความดันตกคร่อมที่ความลึกของเบต 6 cm, 8 cm, 10 cm และ 12 cm จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมของเมล็ดกาแฟที่ความลึกต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน ที่ superficial air velocity จาก 1-5 m/s และมีแนวโน้มลดลงในช่วง 5-6 m/s และหลังจากช่วงนี้ค่า superficial air velocity จะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ ความดันตกคร่อมของเมล็ดกาแฟที่ ดังนั้นจุดเริ่มต้นที่ความดันตกคร่อมคงที่คือค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน [8] คือ 5 m/s โดยจะเห็นได้ว่าที่ความสูงของเบตที่มีค่ามาก ค่าความดันตกคร่อมจะมีค่ามากเช่นเดียวกัน และที่ความลึกของเบต 0.12 m พบว่ามีความดันตกคร่อมสูงสุด 570 Pa แต่ที่ความลึกของเบต 0.6 m มีค่าความดันตกคร่อมสูงสุดเพียง 225 Pa



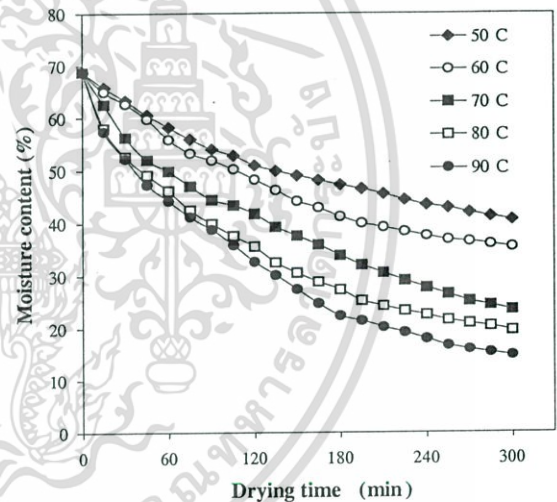
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง superficial air velocity กับความดันตกคร่อมที่ความลึกของเบตต่าง 6-12 ซม.

4.2 ผลกระทบของอัตราการไหลจำเพาะ

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดกาแฟกับเวลาในการอบแห้งที่อัตราการไหลของอากาศจำเพาะต่างๆ ที่ superficial air velocity 5 m/s และอุณหภูมิทางเข้าที่ 90 °C จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 1-2 ชั่วโมงแรกและหลังจากนั้นปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ สังเกตว่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นที่อัตราการไหลต่ำๆ น้อยกว่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นที่อัตราการไหลสูงๆ เนื่องจากที่อัตราการไหลของอากาศจำเพาะสูงๆ จะเกิดความปั่นป่วนอย่างหนาแน่นระหว่างเมล็ดกาแฟกับอากาศร้อนภายในเบต ซึ่งทำให้อัตราการขนถ่ายความร้อนและมวลมาก แต่ที่อัตราการไหลจำเพาะต่ำๆ เมล็ดกาแฟจะหนาแน่นบริเวณเหนือแผ่นกระจายลมจะทำให้อัตราการขนถ่ายความร้อนและมวลระหว่างอากาศร้อนกับเมล็ดกาแฟภายในเบตต่ำลงซึ่งเป็นกลไกของการพาความร้อน



รูปที่ 5 ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟกับเวลาในการอบแห้งโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศจำเพาะ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าหอตลอดต่างๆ

4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้า

ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดกาแฟกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าหอตลอด 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C และ 90 °C ที่ superficial air velocity 5 m/s และความลึกของเบต 100 mm ถูกแสดงในรูปที่ 6 จากรูปจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟมีแนวโน้มลดลง โดยที่อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิทางเข้าสูงๆ จะมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิทางเข้าต่ำๆ และที่อุณหภูมิทางเข้าสูงปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟจะเหลือน้อยกว่าที่อุณหภูมิทางเข้าต่ำที่เวลาเดียวกัน เป็นผลมาจากอัตราการขนถ่ายความร้อนสูงระหว่างอากาศร้อนและเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิของอัตราการลดลงของความชื้นของเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเข้าต่างๆ มีแนวโน้มเหมือนกันสำหรับที่อัตราการไหลจำเพาะต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 อัตราการลดลงของความชื้นจะเร็วในช่วงแรกของ เวลาที่ใช้ในการอบเมล็ดกาแฟและหลังจากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆ การอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าที่ 90 °C มีอัตราการลดลงของความชื้นจาก 68% เหลือเพียง 14% ภายใน 5 ชั่วโมง

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟสดโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิทางเข้าหอตลอดและอัตราการไหลของอากาศจำเพาะ โดยสามารถลดปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟลงสู่ 14% (ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม) ที่อุณหภูมิทางเข้าหอตลอด 90 °C และอัตราการไหลของอากาศจำเพาะ เทคนิคนี้สามารถช่วยให้ผู้ผลิตลดเวลาในการตากแห้งเมล็ดกาแฟจาก 15 วัน เหลือเพียง 5 ชั่วโมง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมการค้าภายใน, กระทรวงพาณิชย์, "การพัฒนากาแฟสดและการตลาดกาแฟ", เอกสารงานจัดการประกวดเมล็ดกาแฟ ปี 2541/42
- [2] Nargal MS, Ooraikul B., 1996, "Effect of some physical and chemical pretreatments on improvement of drying characteristics of hash-brown potatoes", J Food Sci Technol, 33, pp. 436-439.
- [3] Mulet A, Berna A, Borra M, Pinaga F., 1987, "Effect of air flow rate on carrot drying. Drying Technol", 5:25-258.
- [4] Berna A, Rossello C, Canellas J, Mulet A., 1990, "Drying kinetics of apricots. In : Spiess WEL, Schubert H, editors. Engineering and food", Physical properties and process control. London : Elsevier Applied Science, 1, pp. 628-636.

- [5] Berna A, Rossello C, Canellas J, Mulet A., 1991, "Drying kinetics of Majorcan seedlessgrape variety", In: Mulumdar AS, editor. Drying '91, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, pp. 455-462.
- [6] Rossello C, Canellas J, Simal S A, 1992, "Simple mathematical model to predict the drying rates of potatoes", J Agric Food Chem, 40, pp. 2374-2378.
- [7] Kiranoudis CT, Maroulis ZB, Marinou-Kouris D., 1992a, "Drying kinetics of onion and green pepper", Drying Technology, 10, pp. 955-1011.
- [8] D. Kunii, O. Levenspiel, "Fluidization Engineering", John Wiley, New York, 1969

สัญลักษณ์

d_p	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง (เมตร)
g	=	อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/ชม. ²)
H	=	ความสูงของเบด (ชม.)
L_{mf}	=	ความสูงต่ำสุดของเบด (เมตร)
Δp	=	ความดันต่างของเบด (นิวตัน/เมตร ²)
U_{mf}	=	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน (เมตร/วินาที)
ϵ_{mf}	=	สัดส่วนช่องว่างต่ำสุด
μ	=	ความหนืดของของไหล (กิโลกรัม-เมตร/วินาที)
ρ_g	=	ความหนาแน่นของก๊าซ (กิโลกรัม/เมตร ³)
ρ_p	=	ความหนาแน่นของของแข็ง (กิโลกรัม/เมตร ³)
ϕ_s	=	แฟคเตอร์รูปร่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวรเมธ ทัดทอง
วัน เดือน ปีเกิด	25 เมษายน 2522 ที่จังหวัดนครสวรรค์
ที่อยู่	2/416 ม.13 ต.วัดไทร อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000
ประวัติการศึกษา	2543 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ.2543	ตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
พ.ศ.2544-ปัจจุบัน	ตำแหน่งอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผลงานวิจัย	
พ.ศ.2545	<ul style="list-style-type: none"> - ออกแบบอุปกรณ์วัดของไหล - เครื่องกำจัดฝุ่นแบบผสมตุ้บกรองกับใยหิน - การศึกษาระบบทำความเย็นเมื่อมีการบายพาส
พ.ศ.2546	<ul style="list-style-type: none"> - การวัดอัตราการไหลของของไหลด้วย Four-Hole Pressure Probe - เครื่องลำเลียงอนุภาค - แบบจำลองเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้