

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น
A FLUIDIZED – BED COFFEE BEAN DRYER WITH WAVY SURFACE



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **62120**
วัน,เดือน,ปี. **3 1 ก.ค. 2549**

b. **11582194**
i.

ปฏิญานีพจน์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์
บัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น

A FLUIDIZED-BED COFFEE BEAN DRYER WITH WAVY SURFACE

ผู้จัดทำ

1. นายพงษ์ศักดิ์ หมทอง รหัสประจำตัว 45015464
2. นายสกล ผลิกระโทก รหัสประจำตัว 45015478
3. นายสยาม เป็น เป็น รหัสประจำตัว 45015483



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. พงษ์เจตน์ พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น

นายพงษ์ศักดิ์ หมทอง 45015464

นายสกุล ผลิกระโทก 45015478

นายสยาม เป็น 45015483

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่นสำหรับการอบเมล็ดกาแฟสดให้มีคุณภาพของผลผลิตให้ดียิ่งขึ้น เทคนิคนี้จะช่วยลดเวลาในการอบแห้งของเมล็ดกาแฟสดจาก 2 อาทิตย์ เหลือเพียง 5 ชั่วโมง ในชุดการทดลองหอตดลองฟลูอิดไดซ์เบดจะมีด้วยกัน 4 ชนิดและท่อภายนอกทำจากอะคริลิกใสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.17 เมตร สูง 1 เมตร ขณะที่แผ่นกระจายอากาศจะถูกวางไว้ที่ปลายทางเข้าของหอตดลองฟลูอิดไดซ์เบดโดยมีสัดส่วนพื้นที่ว่างของลมที่ออกจากแผ่นกระจายอากาศเป็น 24 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของแผ่นกระจายอากาศ โดยในการทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดกาแฟที่มีความจุประมาณ 1 กิโลกรัมของเมล็ดกาแฟสด ซึ่งอากาศที่เข้าสู่ฟลูอิดไดซ์เบดจะถูกให้ความร้อนโดยการผ่านชุดฮีตเตอร์ขนาด 3 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 30 นาที จนกระทั่งได้อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าได้ตามความต้องการในการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ไว้ที่ 80 และ 100 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการไหลของอากาศจำเพาะและความเร็วลมที่ทางเข้าสู่ฟลูอิดไดซ์เบด 4 ถึง 6 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองสามารถที่จะลดความชื้นของเมล็ดกาแฟสดจาก 66 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 14 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 5 ถึง 7 ชั่วโมง และพบว่าในช่วง 1 ถึง 2 ชั่วโมงแรกจะเกิดการลดลงของความชื้นของเมล็ดกาแฟอย่างมาก

A FLUIDIZED – BED COFFEE BEAN DRYER WITH WAVY SURFACE

Mr. Pongsak Homtong

Mr. Sakol Plikratok

Mr. Siam Pern

Assoc.Prof. Dr.Pongjet Promvongse Advisor

ABSTRACT

This paper present 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 experiment, the fluidized bed with have four type dryer is a cylindrical vessel (bed) made of an acrylic material with 0.17-m in diameter and 1-m in height. It is operated at capacity of 1 kg of green coffee beans. A distributor plate was placed at the entry of the bed with frictional free area of 24%. 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 temperature in a range of 80 degree Celsius to 100 degree Celsius, specific air flow rate, and superficial air velocity of 4 - 6 m/s on the reduction of moisture content of coffee beans is investigated. The experiments are carried out to dry coffee from 66% 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 the drying rate hastened thereafter.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และความร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ และพี่กฤษฎิ์ เลาะมานและพี่ดิษฐพร ตุงโกลานนท์ รุ่นพี่ปริญญาโทที่ให้ความเอาใจใส่แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

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



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 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง.....	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.....	14
3.5 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดกาแฟหลังอบ.....	14
3.6 ฟลูอิดไดเซชัน.....	15
3.6.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน.....	15
3.6.2 ฟลูอิดไดเซชันแบบเรียบและแบบขุลมุน.....	15
3.6.3 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด.....	15
3.6.4 ลักษณะคล้ายของฟลูอิดไดซ์เบด.....	18
3.7 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน.....	18

สารบัญ (ต่อ)

3.7.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ_s)	18
3.7.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ε_m)	19
3.7.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	20
3.7.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง	21
3.8 ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน	22
3.9 การหาความเร็วของก๊าซที่ทางเข้า ฟลูอิดไดซ์เบด (u_0)	23
3.10 ฟลูอิดไดเซชันของความเร็วต่ำสุด	23
3.11 การเกิดฟองก๊าซและชั้นสลับของไหลกับเม็ดของแข็ง	23
3.12 อิทธิพลของตัวกระจายก๊าซ	23
3.13 การผสมของเมล็ดของแข็งในก๊าซฟลูอิดไดซ์เบด	24
3.14 การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบด	25
3.15 การออกแบบผนังถ่ายเทความร้อนสำหรับ	26
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	28
4.1 อุปกรณ์การทดลอง	28
4.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง	34
4.3 วิธีการทดลอง	34
4.3.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	34
4.3.2 ความแห้งเมล็ดกาแฟสดโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน	35
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	39
5.1 ลักษณะและอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	39
5.2 อิทธิพลของอัตราการไหลจำเพาะ	40
5.3 อิทธิพลผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้า	43
5.4 ประสิทธิภาพความร้อนต่ออัตราส่วนความชื้น	45
5.5 ประสิทธิภาพความร้อนต่อเวลาในการอบแห้ง	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	49
6.1 สรุปผลการทดลอง	49
6.2 ข้อเสนอแนะ	50
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก.....	55
ภาคผนวก ข	73
ภาคผนวก ค.....	79



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของมวลชีวภาพ	4
4.1 การเปรียบเทียบปริมาณเมล็ดกาแฟสดกับความสูงของเมล็ดกาแฟสดภายในเบด.....	35
4.2 พารามิเตอร์สำหรับการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบด	36
ก.1 ข้อมูลน้ำหนักของเมล็ดกาแฟใยการอบแห้ง.....	67
ค.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอาหารบนพื้นฐานของ Fick's law	80
ค.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง	82
ค.3 สมการความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน	83



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง	11
3.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน	17
3.3 ความความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกับสัดส่วนช่องว่าง	19
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วอากาศ	21
4.1 ชุดอุปกรณ์การอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์	28
4.2 รูปหอบอบและอุปกรณ์ต่างๆ.....	29
4.3 แผนผังการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	37
4.4 แผนผังการอบแห้งเมล็ดกาแฟสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน	38
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศ	40
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหล จำเพาะต่างๆ	41
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศ ที่ทางเข้าต่างๆ	43
5.4 ประสิทธิภาพความร้อนต่ออัตราส่วนความชื้น.....	45
5.5 ประสิทธิภาพความร้อนต่อเวลาในการอบแห้ง.....	47
ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหล จำเพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 °C.....	56
ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหล จำเพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 100 °C.....	57
ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศ ที่ทางเข้าต่างๆ ที่อัตราการไหลจำเพาะ 0.114 kg/s-kg dry coffee.....	58
ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศ ที่ทางเข้าต่างๆ ที่อัตราการไหลจำเพาะ 0.136 kg/s-kg dry coffee.....	59
ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศ ที่ทางเข้าต่างๆ ที่อัตราการไหลจำเพาะ 0.159 kg/s-kg dry coffee.....	60

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

ก.6 Thermal efficiency VS Normalized moisture โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้า หอตดลองและที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.114 kg/s-kg coffee.....	61
ก.7 Thermal efficiency VS Normalized moisture โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอตดลองและที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.136 kg/s-kg coffee.....	62
ก.8 Thermal efficiency VS Normalized moisture โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอตดลองและที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.159 kg/s-kg coffee.....	63
ก.9 Thermal efficiency VS Drying time โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอตดลองและที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.114 kg/s-kg coffee.....	64
ก.10 Thermal efficiency VS Drying time โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอตดลองและที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.136 kg/s-kg coffee.....	65
ก.11 Thermal efficiency VS Drying time โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอตดลองและที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.159 kg/s-kg coffee.....	66
ข.1 ลักษณะภายในของเมล็ดกาแฟ.....	74
ข.2 ต้นกาแฟ.....	75
ข.3 เกษตรกรเก็บเมล็ดกาแฟสุกจากต้น.....	75
ข.4 เกษตรกรนำเมล็ดกาแฟสดมาตากแห้งบนลานดิน.....	76
ข.5 เกษตรกรนำเมล็ดกาแฟสดมาตากแห้งบนลานซีเมนต์.....	76

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวทรงกลม, 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
L_{mf}	ความสูงต่ำสุดของเบด, เมตร
M	ปริมาณความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_d	ความชื้นมาตรฐานแห้ง
M_w	ความชื้นมาตรฐานเปียก
p	ความดันย่อยของไอในอากาศ
p_{wb}	ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก
Δp	ความดันต่างของเบด, นิวตัน/เมตร ²
Re_{mf}	Reynolds number ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน
r	รัศมีทรงกลม, เมตร
SP	อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ
T	อุณหภูมิอากาศ

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

T_{wh}	อุณหภูมิกระเปาะเปียก
t	ระยะเวลาในการอบแห้ง
u_0	ความเร็วของก๊าซในหอตดลอง
u_{mf}	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน, เมตร/วินาที
u_r	ความเร็วตกอิสระของของแข็ง
u_r^*	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_g	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 แต่เนื่องจากกาแฟเป็นผลผลิตที่ผลิตแล้วส่งออกไปขายยังต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 70 ของผลผลิตทั้งหมด บริโภคภายในประเทศเพียง ร้อยละ 30 เท่านั้น จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องแข่งขันกับตลาดต่างประเทศที่เป็นคู่แข่งที่มีการผลิตกาแฟเพื่อให้กาแฟของประเทศไทยมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งปัจจุบันผลผลิตกาแฟของไทยบางส่วนยังมียุภาพต่ำไม่สามารถที่จะแข่งขันในตลาดโลกได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาวิธีในการปรับปรุงคุณภาพของกาแฟไทยให้ดีขึ้น

ในการทำสวนกาแฟ เมื่อเกษตรกรทำการเก็บเกี่ยวเมล็ดกาแฟสดแล้ว เกษตรกรจะนำเมล็ดกาแฟสดที่เก็บเกี่ยวได้ ไปตากแดดจนกว่าเมล็ดกาแฟจะแห้ง โดยต้องตากแดดประมาณ 15-20 วัน ในวันที่มีแสงแดดจ้าทั้งวัน โดยส่วนมากเกษตรกรจะนำเมล็ดกาแฟสดที่เก็บได้ไปตากไว้บนลานดิน หรือลานคอนกรีต แล้วรอจนกว่าเมล็ดกาแฟจะแห้ง หลังจากนั้นจึงนำไปทำการสีเพื่อเอาเปลือกออกต่อไป ปัญหาที่พบมากคือ เมื่อนำเมล็ดกาแฟแห้งไปทำการสีจะพบว่ามีเมล็ดเสียหายเกิดขึ้นจำนวนมากทำให้เกษตรกรขายกาแฟได้ในราคาต่ำ เมล็ดที่เสียหายส่วนใหญ่จะมีผลมาจากระยะขั้นตอนการลดความชื้น ซึ่งก็คือขั้นตอนการตากนั่นเอง เมล็ดเสียหายที่เกิดขึ้นจากระยะขั้นตอนการตากอาจเกิดจากในช่วงการตากมีฝนตกลงมา หากเกษตรกรเก็บไม่ทัน เมล็ดกาแฟส่วนที่เปียกจะเกิดการหมักซึ่งจะทำให้เกิดรา จึงทำให้เมล็ดกาแฟมีกลิ่นราติดมาด้วย หรือในบางกรณีเมล็ดกาแฟจะเกิดเป็นสีดำหลังทำการสี นอกจากนั้นเกษตรกรบางรายที่ทำการตากกาแฟบนลานดิน เมื่อเมล็ดกาแฟแห้งเปลือกของเมล็ดกาแฟจะมีความไวต่อการดูดกลืนน้ำให้มีกลิ่นดินติดมาด้วย และปัญหาที่พบอีกอย่างหนึ่งในการตากกาแฟบนลานดินก็คือ มักมีสิ่งแปลกปลอมติดมากับกาแฟด้วย เช่น กวาด หิน ดิน เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นมาจากระยะขั้นตอนการตากเมล็ดกาแฟทั้งสิ้นที่เป็นสาเหตุที่ทำให้ทั้ง สี กลิ่น และ รสชาติ ของกาแฟที่ได้ไม่ดีไม่เป็นไปตามที่ตลาดต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปัญหาที่พบดังกล่าว ถ้าเราสามารถปรับปรุงกระบวนการที่ทำให้เมล็ดกาแฟแห้ง โดยที่ไม่ต้องตากแดด ซึ่งต้องตากบนลานดิน หรือลานคอนกรีต ปัญหาดังกล่าวก็จะลดลงไปด้วย เราก็จะได้ผลผลิตกาแฟที่มีคุณภาพดีขึ้น

การทำให้ผลผลิตจากพืช หรือเมล็ดพืชแห้งโดยไม่ต้องตากแดด สามารถทำได้โดยใช้ เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช แบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล ตามกระแสอากาศร้อน โดยโครงการนี้ได้นำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมาอบแห้งเมล็ดกาแฟสดซึ่งมีข้อดีคือมีอัตราการอบแห้งสูงและความชื้นของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจะสม่ำเสมอเพื่อแก้ไขและรักษาคุณภาพเมล็ดกาแฟให้ดีขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1.1.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด
- 1.1.2 ศึกษาผลกระทบของความเร็วลมภายในเครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและ อุณหภูมิทางเข้าของอากาศ และค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศในการอบแห้ง
- 1.1.3 ศึกษาผลกระทบของค่าตัวแปรต่างๆในการทดลอง
- 1.1.4 เปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองของเครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดทั้ง 4 แบบ

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่ความจุสูงสุด 1 กิโลกรัมต่อการอบแต่ละครั้ง
- 1.2.2 ทำการอบเมล็ดกาแฟสดที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส
- 1.2.3 ทำการอบเมล็ดกาแฟสดที่อัตราการไหลจำเพาะอากาศที่ Superficial air velocity 1 Umf, 1.2 Umf, 1.4 Umf
- 1.2.4 นำผลข้อมูลจากการทดลอง ของแต่ละชนิดหอบมาเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

การอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรเป็นกระบวนการหนึ่งในงานด้านเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาคุณภาพ ลดความสูญเสีย และยืดระยะเวลาการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นสิ่งที่ไม่สลบับซับซ้อน แต่การวางแผนการดำเนินการอบแห้งภายใต้สภาวะอากาศและเงื่อนไขที่กำหนด เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษา ทั้งนี้เพื่อให้ได้วิธีดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด โดยงานที่เกี่ยวข้องจะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

Suksankraisorn, Patumsawad and Fungtammasan (2001) ทำการศึกษาหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ในห้องเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด โดยทำการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-50 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

การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ของเชื้อเพลิงมวลชีวภาพ ถูกศึกษาโดย Abdullah, Husain and Yin Pong (2003) โดยใช้อากาศเป็นของไหลในระบบ โดยพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	กลบ	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 และในงานวิจัยยังบอกว่าคุณสมบัติและช่องว่างของเบดเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของฟลูอิดไดเซชัน

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

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ณัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์ และ อภิชาติ เทอดโยธิน (2542) พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของข้าวเปลือก ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้สมการการอบแห้งทางทฤษฎี โดยพิจารณารูปร่างข้าวเปลือกเป็นทรงกระบอกสั้น และใช้แบบจำลองสมการของ Arrhenius พบว่าสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ตลอดช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิจากอากาศในการอบแห้งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมากกว่าความชื้นของข้าวเปลือก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(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 และยังพบอีกว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น และที่ความเร็วสูงสุด อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าน้อย อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด

กิตติชัย ไตรรัตน์ศิริชัย 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 จากผลการทดลองประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดลดลงอย่างฉับพลัน เมื่อปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นของเมล็ดข้าวโพดลดลง และลดลงต่ำสุดที่จุดสิ้นสุดกระบวนการการอบแห้ง จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการขนถ่ายความชื้นจากวัตถุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นของวัตถุ ผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง

Srivastava and John (2002) ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้งเมล็ดธัญพืช โดยใช้สมการ Simi-empirical ของชั้นบางสำหรับทำนายความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ และอุณหภูมิของเมล็ดธัญพืช โดยเปลี่ยนแปลงความสูงของเบตนิ่งของธัญพืช อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศ และช่องว่างภายในเบต

ในงานวิจัยนี้สรุปว่าความชื้นจะระเหยเป็นไอได้ดี เมื่อความสูงของเบตเพิ่มขึ้น และช่องว่างในเบตมีผลกระทบต่ออุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งเล็กน้อย แต่ไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของเมล็ดพืช

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วง Falling rate period ที่ได้จากผลการทดลองพบว่า การใช้เทคนิค Multiple regression analysis ให้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำ 97.3% ขึ้นอยู่กับอัตราการใช้ การไหล 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) ทำการศึกษาลักษณะสัมพันธ์ของ 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 จะเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ ความหนาของผลิตภัณฑ์ไม่มีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มความเร็วกาศ จะเพิ่มอัตราการลดลงของอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งมากที่สุด และจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะแตกต่างกันไปตามตามชนิดของธัญพืช และสภาวะเงื่อนไขในการอบแห้ง (ภาคผนวก ค) อย่างไรก็ตามการพิจารณาแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความสำคัญต่อการทำนายการอบแห้ง เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวธัญพืชได้ต่อไปในอนาคต โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาได้ออกเป็น 2 ส่วนคือ การสร้างเครื่องแห้งฟลูอิดไดซ์เบด และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเมล็ดกาแฟสด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ทฤษฎี

3.1 กระบวนการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ในกระบวนการอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ สมชาติ โสภณธรฤทธิ์

(2540)

3.1.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate Drying Period)

จากรูปที่ 3.1 ในช่วง A ถึง B วัสดุดูจะมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการระเหยของน้ำที่ผิวล้าช้ากว่าการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุมายังผิวของวัสดุ จึงส่งผลให้อุณหภูมิของผิววัสดุมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ T_{wb} และความเข้มข้นของน้ำที่ผิววัสดุคงที่ ดังนั้นอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง ถ้า p_{wb} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, p คือ ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ และ K_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ดังนั้นค่าอัตราการระเหยน้ำต่อหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุ N_c ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ กำหนดโดยสมการ

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

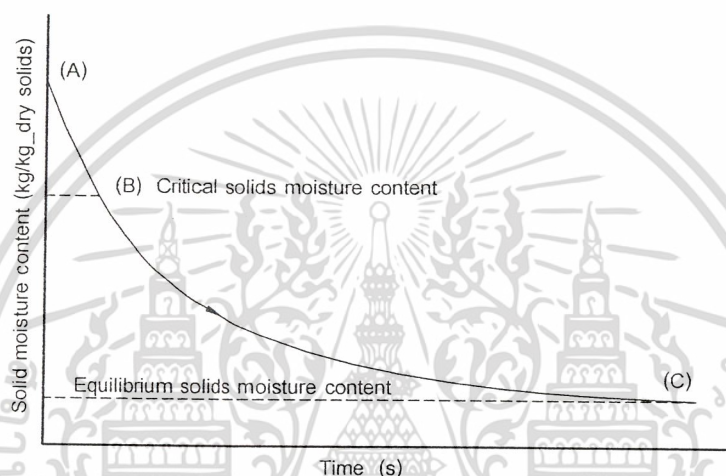
เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุไม่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ แสดงว่าความร้อนทั้งหมดถูกถ่ายโอนจากอากาศไปยังวัสดุเพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอ จากสมการที่ 3.1 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

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

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 ไสภกรณฤทธิ์ (2540)

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขั้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ ส่วนของประสิทธิภาพทางความร้อน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_w

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

ความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในวงการค้า โดยทั่วไปจะอ้างในรูปของเปอร์เซ็นต์ $100M_w$.

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง, M_d

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

3. ประสิทธิภาพทางความร้อน

$$\eta_e = \frac{\text{Energy transmitted to the solid}}{\text{Energy incorporated in the drying air}} \quad (3.5)$$

$$\eta_e = \frac{Wd[h_{fg}(M_{p1} - M_{p2}) + c_m(T_{m2} - T_{m1})]}{m_{da}(h_1 - h_0)\Delta t}$$

เมื่อ

w คือ มวลของวัสดุ, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

ความชื้นมาตรฐานแห้งนี้เป็นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ของกระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่เกือบคงที่ผลผลิตทางเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย

3.3 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไปเรามักจะใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการ อุณหภูมิของอากาศจะสูงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปใช้งาน วิธี และเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้ง โดยมากเรามักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งเร็ว มีผลให้เครื่องอบแห้งที่ต้องใช้มีขนาดเล็กลง ทำให้การลงทุนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.3.1 การได้เปรียบ และเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน

ข้อเปรียบเทียบการได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันกับเทคนิคอื่นๆ มีรายละเอียดดังนี้

ข้อได้เปรียบ

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

ข้อเสียเปรียบ

1. เวลาของของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูง ๆ หรือเบดหลายชั้น เปลืองเงินลงทุนมาก
2. มักเกิดฟองก๊าซในเบดเมื่อทำงานกับก๊าซ ทำให้การสัมผัสไม่ดีเป็นการสูญเสียเปล่า ถ้ายังเป็นขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง
3. การทำงานมีข้อจำกัดเพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไปเม็ดของแข็งก็จะออกจากเบดไปพร้อมกับของไหล
4. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปื่อยหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ความชื้นสัมพัทธ์ของวัสดุ

ความชื้นสัมพัทธ์ของวัสดุที่มีความสำคัญต่อการศึกษาระบบการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับ ความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย เราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสัมพัทธ์ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

3.5 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดกาแฟหลังอบ

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

อุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้งมาก การใช้ อุณหภูมิที่สูงเกินไปมักทำให้คุณภาพของเมล็ดพืชลดลง อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้งจะแตกต่างจากอุณหภูมิของเมล็ดพืช เมื่อเริ่มการอบแห้ง อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะต่ำกว่าของอากาศ เมื่อเมล็ดพืชแห้งลงมากแล้ว อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะเพิ่มสูงขึ้น จนในที่สุดอาจมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับ อุณหภูมิอากาศ

การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เมล็ดกาแฟสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวแข็งตัว เมื่อสิ้นการอบแห้งเคลื่อนย้ายจากบริเวณผิวไปยังชั้นในๆ ของเมล็ด ทำให้ชั้นในสูญเสีย ความชื้นและหดตัวโดยแยกตัวออกจากผิวที่แข็ง ซึ่งอาจมีผลให้เกิดรอยร้าว แยกแตก ปริหรือหักในเมล็ด ซึ่งชั้นตอนต่อไปหลังการอบแห้งของเมล็ดกาแฟคือการสีเพื่อเอาเปลือกออก และผลกระทบ อีกอย่างคือเมื่อใช้อุณหภูมิสูงเกินไปเมล็ดด้านในเปลือกจะแห้งติดกับเปลือกทำให้ขั้นตอนการสีนั้น ยาก

ในการทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟจะพิจารณาถึงสีของเมล็ดกาแฟด้านในเปลือก ว่าจะต้องไม่เป็นสีดำ และเมล็ดด้านในไม่เกาะติดกับเปลือก ซึ่งเป็นคุณภาพสำคัญในขั้นตอนการสี ซึ่ง ในการทดลองจะใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 100 องศาเซลเซียส โดยเมล็ดกาแฟด้านในเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งเริ่มจะมีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้ม และเมล็ดด้านในยังไม่เกาะติดกับเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชัน เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็ง ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ด หรือชิ้น สัมผัสกับของไหลซึ่งไหลผ่านเม็ดของแข็งที่มีความเร็วสูงพอ ที่จะทำให้ของแข็งดังกล่าวเคลื่อนที่และประพัตติตัวคล้ายของไหล เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงที่รองรับ แล้วให้ของไหล ไหลผ่านเม็ดของแข็งกลุ่มนั้น หลังจากนั้นทำการเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นเรื่อยๆ เมื่อของไหลมีความเร็วค่าหนึ่ง จะเห็นเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวแล้วลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกันของแข็งที่อยู่ใกล้ๆ นี้ จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพัตติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไดซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไดเซชัน ซึ่งพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ฟลูอิดไดซ์เบด จะเกิดขึ้นได้ก็อาศัยแฟลคเตอร์หลายอย่างมาผสมผสานกันให้เกิดความพอเหมาะขึ้นในเบด เบดนั้นจึงจะเกิดมีคุณสมบัติคล้ายของไหลได้ แฟลคเตอร์หรือตัวแปรที่สำคัญในลำดับแรกคือ ความเร็วของของไหล ความเร็วของของไหลที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อยนั้น ในระยะแรกเบดยังอยู่หนึ่งอยู่ความดันตกก็พัฒนาไปพร้อมกับความเร็วของไหล จนถึงระดับหนึ่งเมื่อเม็ดของแข็งเริ่มขยับและแยกตัวเป็นอิสระ ความดันตกของเบดก็ไม่พัฒนาต่อไป ไม่ว่าเราเพิ่มความเร็วให้กับของไหลทำไรก็ตามเบดในช่วงนี้ เราเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบด

3.6.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน

งานของฟลูอิดไดเซชันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ

1. ฟลูอิดไดเซชันแบบสองสถานะ (Two-phase Fluidization) หมายความว่า ในหลอดหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบไปด้วยสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน (Gas Fluidization) และ ฟลูอิดไดเซชันเหลว (Liquid Fluidization)

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

3.6.2 ฟลูอิดไดเซชันแบบเรียบ (เป็นระเบียบ) และแบบขุลมุน

WILHELM และ KWAWK⁽³⁾ ได้อธิบายไว้ว่า ฟลูอิดไดเซชันแบบเบดเรียบ มีลักษณะดังนี้ เม็ดของแข็งแยกจากกันโดยอิสระระยะห่างระหว่างเม็ดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ระยะห่างน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเร็วของของไหล เบดมีเนื้อสม่ำเสมอหรือกล่าวอีกประการหนึ่งคือ มีความหนา

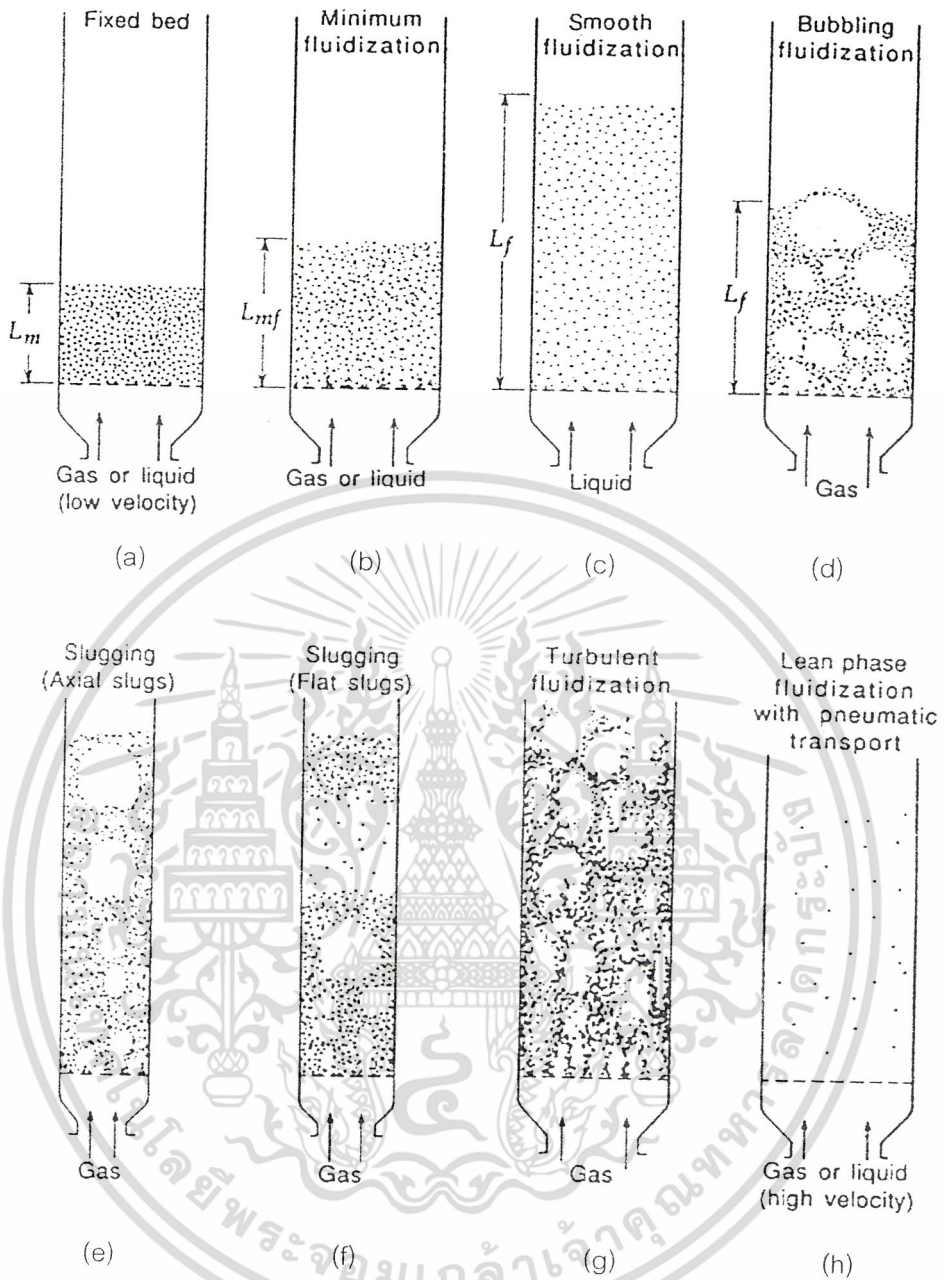
แน่นของเม็ดของแข็งสม่ำเสมอ ลักษณะเช่นนี้ มักเกิดขึ้นในฟลูอิดไดเซชันของเหลว ในก๊าซฟลูอิดไดซ์เบดเกิดขึ้นยาก นอกจากเบดที่มีความเร็วสูงกว่าความต่ำสุดเล็กน้อย

ส่วนเบดซุลมุน เม็ดของแข็งไม่ได้เคลื่อนที่อย่างอิสระมันมีแนวโน้มที่จะรวมอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ๆ การเคลื่อนไหวของกลุ่มเป็นไปอย่างซุลมุน นอกจากนี้บางส่วนของของไหลก่อตัวเป็นฟองที่ส่วนล่างของเบดแล้วฟองนี้ก็จะชักนำให้เม็ดของแข็งลอยตามขึ้นไปจนถึงเบด ถ้าของไหลเป็นของเหลวการก่อตัวเป็นฟองมีส่วนคล้ายกับการเกิดฟองของก๊าซ เมื่อเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ขึ้นเบดจึงมีลักษณะเหมือนกับของเหลวกำลังเดือด เบดจึงไม่สม่ำเสมอ ภายในเบดจึงประกอบด้วย สถานะ 2 สถานะ คือ เบดหนาแน่นและเบดเจือจางอยู่พร้อมกัน

3.6.3 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

เบด (Bed) หมายถึง ภาชนะในหอตดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่ง หรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอตดลองจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือ ผิวหน้าของเม็ดแข็งที่อยู่ในหอตดลอง

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอตดลองเรียบร้อยตามต้องการแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอตดลองอย่างช้า ๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งเริ่มยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไดเซชัน หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense – phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอตดลองอยู่แล้ว เบดลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิดไดซ์เบดเจือจาง (Diluted - phase fluidized bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งก็จะหลุดลอยออกจากหอตดลองไป



รูปที่ 3.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน [Daizo Kunii, 1991]

ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เราเรียกเบดนี้ว่าเบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.2 (b) ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิมแต่มีอีกส่วนหนึ่ง

รวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวเองขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบตและแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปตามภายในเบตจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างซุกมุ่นวุ่นวายเบตชนิดนี้เรียกว่าฟลูอิดไดซ์เบตวุ่นวาย ดังรูปที่ 3.2 (d)

3.6.4 ลักษณะคล้ายกับของไหลของฟลูอิดไดซ์เบต

ในขณะที่เม็ดของแข็งลอยตัวอยู่ในลักษณะ ฟลูอิดไดซ์ชั้นแบบหนาแน่นแล้วนั้น ผิวหน้าของเบตจะเรียบสม่ำเสมอเหมือนกับผิวหน้าของของไหลที่ใสอยู่ในภาชนะ โดยเฉพาะถ้าเป็นฟลูอิดไดซ์เบตแบบเดียวกัน หรือว่าจัดหอดทดลองเอนไปทางซ้ายหรือขวาก็ตาม ผิวหน้าก็ยังคงเรียบอยู่อย่างเดิม ดังรูปที่ 1.4 ถ้านำวัตถุของแข็งที่มีความจำเพาะน้อยกว่าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในเบตใส่ลงไปบนเบต วัตถุของแข็งนั้นจะลอยตัวอยู่บนผิวหน้าของเบต นอกจากนั้นถ้าเจาะรูด้านข้างของเบต เม็ดของแข็งจะไหลออกมาทางรูนั้นได้เหมือนของเหลว หรือถ้านำเอาเบต 2 เบตมาต่อท่อถึงกัน เม็ดของแข็งจากเบตสูงกว่าจะไหลไปยังเบตที่มีเม็ดของแข็งต่ำกว่า จากคุณสมบัติที่ของแข็งในเบตทำหน้าที่คล้ายกับของเหลวนี้จึงมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมอย่างมหาศาลที่สามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ทำงานในระบบต่อเนื่อง (Continuous process) ได้ตั้งในหอดทดลองที่มีหลาย ๆ ชั้นเม็ดของแข็งจากชั้นบนจะไหลมายังชั้นล่างและไหลออกนอกหอดทดลองในที่สุด ลักษณะเช่นนี้เหมือนกับ การไหลของเหลวในหอกลับ หรือใช้ป้อนวัสดุของแข็งเข้าทางซ้ายแล้วให้ออกมาทางด้านขวาของหอดทดลองในขณะที่ผ่านเบตออกมานี้ย่อมต้องมีการเปลี่ยนแปลงบางอย่างในเบตแน่นอน อย่างเช่นการตากแห้งเม็ดธัญญาหาร เม็ดผลไม้ต่าง

3.7 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชั้น

พฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชั้นมักมีตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบบ่อยๆ มาก เพราะก่อนที่เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวหรือเกิดฟลูอิดไดซ์เบต เม็ดของแข็งจะพักอยู่บนระนาบรองรับ ปล่อยให้ของไหลไหลผ่านไปตามช่องว่างที่อยู่ในเบต ความเร็วของของไหลจึงมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเบต ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.7.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ_s)

การวัดค่าความไม่เป็นทรงกลมศึกษาโดย Zenz และ Othmer ปี 1960 ที่อ้างอิงโดย Kunii, D. Levenspiel, O. (1991) โดยความเป็นทรงกลมหมายถึง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของเม็ดทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าเม็ดของแข็งต่อพื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งใดๆ โดยที่เม็ดของแข็งเป็นทรง

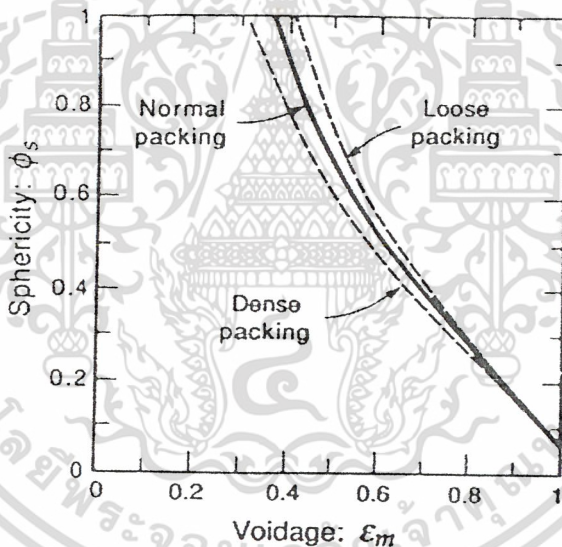
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลมค่าความเป็นทรงกลมมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($\phi_s = 1$) และถ้าถ้าเม็ดของแข็งมีรูปร่างต่างๆ ไปค่าความเป็นทรงกลมมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ($\phi_s < 1$) เสมอ ซึ่งค่าความเป็นทรงกลมของเม็ดลึทกาแพฟัันรุ้โรบัสตา ซึ่งมีค่าประมาณ 0.98 แต่ในงานวิจัยนี้สมมุติให้เม็ดลึทกาแพฟัันเป็นทรงกลม

3.7.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ϵ_m)

กรณีที่มีเม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอตลอด เราสามารถคำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดทรงกลมในเบดทำให้เกิดขนาดของช่องว่างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป แต่ในกรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม Brown และ คณะ ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่างไว้ดังรูปที่ 3.3

ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน ช่องว่างในเบดจะมีการขยายตัว ช่องว่างในขณะนั้นเรียกว่าสัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไอเซชันเบด (ϵ_{mf})



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่าง (Kunii, D. Levenspiel, O. 1991) WEN และ YU, 1966 ได้เสนอผลคูณของช่องว่างต่ำสุดและความเป็นทรงกลม เป็นค่าคงที่และอาจสังเกตได้จากการทดลองของเขาโดยใช้วัตถุชนิดต่างๆ บรรจุลงในเบดแล้วสรุปว่าวัตถุอย่างหนึ่งก็จะมีสัดส่วนช่องว่างอันหนึ่ง ดังสมการ

$$\epsilon_{mf} = \left(\frac{0.071}{\phi_s} \right)^3 \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน, u_{mf}

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งเองกับแรงพยุงจากการไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหลซึ่งเขียนและจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g \tag{3.7}$$

โดยการประยุกต์สมการ (3.7) กับสมการความดันตกของ ERGUN จะได้

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{Re}_{mf}^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \text{Re}_{mf} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \tag{3.8}$$

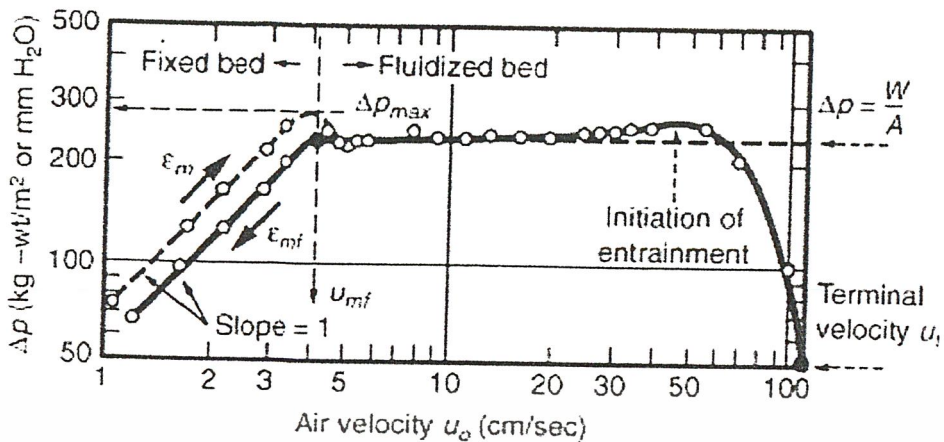
โดยที่

$$\text{Re}_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \tag{3.9}$$

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 คือจากการทดลองโดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วก๊าซ

3.7.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง, u_t

ในฟลูอิดไดเซชันนั้น มีขอบเขตความเร็วของของไหลอยู่สองอย่างคือ ขอบเขตแรก คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน และขอบเขตที่สองคือ ความเร็วของของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งลอยตัวหลุดออกจากหอดูดลง ความเร็วนี้มีขนาดเท่ากับความเร็ตกอิสระของเม็ดของแข็ง Haider และ Levenspiel ได้เสนอการหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งดังสมการ

$$u_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi_s}{(d_p^*)^{0.5}} \right]^{-1} \tag{3.10}$$

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

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

ดังนั้นความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งมีค่าเท่ากับ

$$u_t = u_t^* \left[\frac{\mu (\rho_s - \rho_g) g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ u_r คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไว้มิติ

3.8 ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน

คุณลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบดที่เกิดจากก๊าซนั้นมีความสลับซับซ้อนเป็นอย่างมาก ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ผ่านเข้าไปในเบด และขนาดของเม็ดของแข็งที่ใช้เป็นเบด ในขณะที่เบดเริ่มมีลักษณะเป็นฟลูอิดไดเซชัน ใหญ่ ๆ จะมีส่วนคล้ายกับลักษณะของเบดที่เกิดขึ้นในฟลูอิดไดเซชันของเหลว แต่ถ้าความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นจะมีก๊าซบางส่วนรวมตัวกันแล้ว ก่อตัวเหมือนถุงอากาศ เรามักเรียกส่วนนี้ว่า ฟองก๊าซ และส่วนที่มีแต่เม็ดของแข็งลอยตัวอยู่ เราเรียกว่า เบดที่มีของแข็งหนาแน่น (dense bed หรือ emulsion phase) รวมกันเราเรียกเบดนี้ว่า aggregated bed ในขณะที่ความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จำนวนฟองก๊าซมีมากขึ้น ฟองเหล่านี้ครั้นลอยไปถึงผิวหน้าของเบดก็แตกกระจายออก ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาในระหว่างเบด เม็ดของแข็งบางส่วนวิ่งตามฟองก๊าซขึ้นมาด้วย พอถึงผิวหน้าจะกระจายอยู่เหนือผิวแล้วตกกลับมายังเบดใหม่ บริเวณที่มีฟองก๊าซและบริเวณเหนือผิวของเบดที่มีฟองก๊าซแตกกระจาย (ideal bed) ทั้งนี้เนื่องจากในก๊าซฟลูอิดไดเซชันจะมีช่องว่างเกิดขึ้น 2 ประเภท

ประเภทที่ 1 เป็นช่องว่างที่อยู่ระหว่างเม็ดของแข็ง

ประเภทที่ 2 เป็นช่องว่างที่มีเม็ดของแข็งล้อมรอบอยู่

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และแผ่นกระจายของไหล ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

3.8.1 Channelling เกิดการผ่านไปของก๊าซเป็นช่องๆ โดยที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่เคลื่อนที่ แต่บริเวณข้างเคียงจะอยู่กับที่

3.8.2 Bubbling อนุภาคของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบดจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา และสม่ำเสมอในเบด แต่ถ้าบริเวณใดมีของแข็งอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น หรือไม่มีเลย เราเรียกบริเวณนั้นว่า Bubbling

3.8.3 Slugging การเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซ จนได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทดลอง มีการแยกตัวของอนุภาคของแข็งเป็นชั้นๆ

3.8.4 Spouted Bed คือ การที่ก๊าซไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของของแข็งเท่านั้น ด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของอนุภาคน้อย เมื่อเทียบกับบริเวณด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การหาความเร็วของก๊าซในหลอดลองฟลูอิดไดซ์เบด (u_0)

การหาความเร็วของอากาศในหลอดลองฟลูอิดไดซ์เบด ที่ทำให้อนุภาคภายในหลอดลองสามารถลอยตัวอย่างสม่ำเสมอในหลอดลอง ความเร็วที่แนะนำคือประมาณ 1.3 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ชันแต่ต้องน้อยกว่าความเร็วสูงสุดที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ชัน (Soponronnarit และ คณะ, 1995)

$$u_0 = 1.3u_{mf} \quad (3.13)$$

3.10 ฟลูอิดไดซ์ชันความเร็วของไหลต่ำสุด

หมายถึงฟลูอิดไดซ์ชันในช่วงความเร็วของไหลแคบมาก ๆ คือ ช่วงระหว่างความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด และความเร็วที่สูงกว่าเล็กน้อย ลักษณะของเบดที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งเบด (Uniform and Homogeneous) ผิวหน้าของเบดราบเรียบ ไม่ว่าของไหลนั้นจะเป็นของเหลวหรือก๊าซ เม็ดของแข็งเริ่มลอยอยู่ในกระแสน้ำของไหลระยะห่างระหว่างเม็ดน้อยมาก เม็ดต่อเม็ดเกือบติดกัน การเคลื่อนไหวก็น้อยมาก เพราะอยู่ในวงจำกัด ในทางปฏิบัติผู้ทำการทดลอง มักใช้ความเร็วของไหลสูงกว่าความเร็วต่ำสุดอย่างน้อย 1.5 เท่า

3.11 การเกิดฟองก๊าซและชั้นสลับของไหลกับเม็ดของแข็ง

ลักษณะของเบดทั้งสองเกิดขึ้นเฉพาะในเบดซูลมุนเท่านั้น ฟองที่เกิดขึ้นคล้ายกับฟองก๊าซเริ่มแรกเกิดขึ้นที่ส่วนกลางเหนือแผ่นกระจาย หลังจากนั้นหลุดลอยผ่านชั้นเบดขึ้นไปจนถึงผิวหน้าของเบดแล้วก็แตกกระจายออก ชั้นสลับเกิดขึ้นได้เมื่อฟองก๊าซหลาย ๆ ฟองมารวมกันแล้วเกิดฟองขนาดใหญ่จนขนาดเต็มผ่านศูนย์กลางโตเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด ฟองก๊าซแยกของแข็งออกเป็นชั้น ๆ ให้เห็นชัดเจน การเคลื่อนที่ของเม็ดแข็งจะเคลื่อนที่คล้ายกับการเคลื่อนที่ของลูกสูบ เม็ดของแข็งเคลื่อนที่จนถึงความสูงระดับหนึ่ง ก็แยกออกตกกลับลงในเบดเหมือนกับฝนตก แล้วก่อตัวเป็นเบดซูลมุนใหม่ เบดชนิดนี้เกิดขึ้นได้ง่าย ๆ กับเบดที่มีความสูงมาก ๆ และ/หรือความเร็วของก๊าซก็มากด้วย

3.12 อิทธิพลของตัวกระจายก๊าซ

ในขณะที่เบดเกิดฟลูอิดไดซ์เบดด้วยความเร็วก๊าซต่ำสุด ลักษณะของเบดยังเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเบด คราวนี้เพิ่มความเร็วของก๊าซให้มากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกระจาย (distributor) ที่รองรับเบด

อยู่ว่าเป็นชนิดใด อย่างเช่นตัวกระจายทำด้วยแผ่นโลหะเจาะรู (perforated) ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่า ตัวกระจายที่เป็นรูพรุนซึ่งเกิดจากใช้เม็ดโลหะขนาดเล็กมาอัดด้วยความดันสูง ๆ จนติดกับแผ่นตัวกระจายก๊าซ (sintered plated) ตัวกระจายแบบหลังนี้ก๊าซผ่านได้อย่างสม่ำเสมอ ฟองก๊าซจึงเกิดได้เป็นจำนวนมาก ตัวกระจายที่เป็นแผ่นเจาะรูก๊าซจะผ่านออกไปเหมือนกับเจ็ต (jet) การเกิดจำนวนฟองก็ขึ้นอยู่กับจำนวนรูที่เจาะบนแผ่นตัวกระจาย

นอกจากตัวกระจายก๊าซสองแบบที่กล่าวมาแล้ว ก็มีหลายคนได้พยายามคิดสร้างตัวกระจายก๊าซแบบต่างๆ ขึ้นเพื่อให้เหมาะกับงานที่ใช้และมีการกระจายของก๊าซดีขึ้น HENGL (22) เขาได้พัฒนาตัวกระจายแบบเจาะรูโดยเพิ่มเม็ดทรงกลมขนาดโตกว่ารูที่เจาะเล็กน้อย วางอยู่บนแผ่นเจาะรูอีกต่อหนึ่ง เม็ดทรงกลมนี้ทำด้วยโลหะหนัก การวางเขาวางแบบเดาสุ่ม พบว่าการกระจายของก๊าซเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเบตความดันตกที่ตัวกระจายนี้น้อยกว่าใช้แผ่นอัดมากทีเดียว

ตัวกระจายก๊าซแบบต่าง ๆ ที่ปรากฏในเอกสารอ้างอิง พอสรุปได้ดังนี้

แบบ (a) ใช้แผ่นเจาะรูแผ่นเดียว

แบบ (b) ใช้แผ่นเจาะรู 2 แผ่นซ้อนกัน

แบบ (e) ใช้เม็ดโลหะวางอยู่บนแผ่นเจาะรู

แบบ (f) ใช้แผ่นโลหะแคววางเรียงกันจะมีช่องว่างเป็นช่องยาว

แบบ (g) ใช้ nozzle หลายอัน

แบบ (h) ใช้เป็น bubble caps เหมือนในหอกลั่น

3.13 การผสมของเม็ดของแข็งในก๊าซฟลูอิดไดซ์เบด

ขณะที่ฟองก๊าซลอยผ่านขึ้นมาในเบตนั้น จะทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตกลงทางข้างของฟองก๊าซคล้ายกับของไหลที่ไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะทรงกลม

ทางส่วนล่างของฟองก๊าซก็จะมีเม็ดของแข็งถูกฟองก๊าซดูดให้ลอยตามขึ้นไปพร้อมกับฟองก๊าซ ดังนั้นเม็ดของแข็งที่เคลื่อนที่ลงมาตามด้านข้างบางส่วนมีโอกาสเคลื่อนเข้าไปกลุ่มเม็ดของแข็ง รวมเข้าทางส่วนท้ายของฟองก๊าซด้วยเหมือนกัน ส่วนที่เหลือก็จะตกลงไปยังด้านล่างของเบต ดังนั้นของแข็งจึงมีโอกาสเดินท่องเที่ยวไปทุกหนแห่งในเบตได้เสมอ

3.13.1 การเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็ง

จากเหตุการณ์ที่ว่าเม็ดของแข็งสามารถอยู่ได้ทุกแห่งในเบตเช่นนี้ KONDUKOV และผู้ร่วมงานจึงได้ศึกษาการเดินทางของเม็ดของแข็งภายในเบตว่ามีการเดินทางเป็นอย่างไร โดยเขาทำการย้อมสีเม็ดของแข็งขึ้นเม็ดแล้วปล่อยให้ปะปนลงในเบตเขาได้ติดตาม การเดินทางของเม็ดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็ง เม็ดนี้ด้วยกล้องถ่ายภาพยนต์ เบคที่ใช้ทำการศึกษาเป็นแบบสามมิติ กล่าวคือ หอทดลองเป็นรูปทรงกระบอกโปร่งใส ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 มม. ความสูงของเบค 160 มม. การติดตามคูการเคลื่อนที่นั้นเขาติดตามคูทั้งด้านข้างและด้านบนของเบค

เขาพบว่า การเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็ง จะเป็นไปอย่างรวดเร็วขณะเคลื่อนตัวขึ้นด้านบน และจะวนเวียนอยู่ส่วนบนของเบคพักหนึ่งจากนั้น จึงจะตกลงสู่ด้านล่างของเบคด้วยอัตราความเร็วช้ากว่าตอนเคลื่อนตัวขึ้น ดังนั้น เม็ดของแข็งจะใช้เวลามากตอนเขาลง แต่ถ้าตัวกระจายไม่จะมีการหมุนเวียนของเม็ดของแข็งอยู่เหนือตัวกระจายก๊าซเป็นเวลานาน จากนั้นจึงหลุดจากการหมุนเวียนแล้วเคลื่อนตัวขึ้นส่วนบนของเบค

3.14 การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบค

การถ่ายเทความร้อนระหว่างของสองสิ่งเป็นงานที่วิศวกรต้องการพบอยู่เสมอในเวลาทำงาน ทำอย่างไรเราถึงจะทำให้งานนั้นมีประสิทธิภาพสูงมาก ๆ อย่างการถ่ายเทความร้อนจากของเหลวหนึ่งไปยังอีกของเหลวหนึ่งหรือจากก๊าซหนึ่งไปยังอีกชนิดหนึ่งวิศวกรมักจะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell and tube ซึ่งจะมีพื้นที่สัมผัสผุมาก สำหรับของแข็งกับของไหลเรา จะใช้วิธีการดังกล่าวแล้วไม่ได้ เราอาจใช้วิธีปล่อยของไหลให้ผ่านของแข็งโดยตรง แต่ประสิทธิภาพที่ใช้ได้มากน้อยขนาดใดขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของการสัมผัส ฟลูอิดไดซ์เป็นเทคนิคหนึ่งซึ่งของแข็งแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลได้อย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงตลอดทั้งหมดเบค การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลและการถ่ายเทความร้อนระหว่างเม็ดของแข็งกับผนังของหอทดลอง

3.14.1 การถ่ายเทความร้อนระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหล

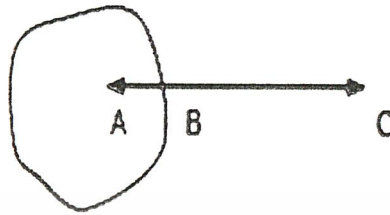
กลไกของขบวนการนี้ยังแบ่งย่อยได้เป็นกระบวนการย่อย 2 ประเภท คือ

- ก. ความร้อนจากของไหลถ่ายเทให้กับเม็ดของแข็งในเบค
- ข. ความร้อนจากเม็ดของแข็งถ่ายเทให้กับของไหล กระบวนการนี้กระทำแบบต่อเนื่อง ทั้งของไหลและเม็ดของแข็ง

3.14.2 การถ่ายเทความร้อนและมวลในฟลูอิดไดซ์เบค

การอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในเวลาเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2 ความร้อนจะทำให้ความชื้นหรือของเหลวที่อยู่ในเม็ดของแข็งเกิดการระเหยเป็นไอ แล้วเคลื่อนย้ายออกจากเมล็ดของแข็งเข้าสู่ตัวกลางในการอบ (อากาศ) ความร้อนถูกเคลื่อนย้ายโดย การพาจากสิ่ง

แวล้อม (C) เข้าสู่ผิวของเม็ดของแข็ง (B) และจากผิวของเม็ดของแข็ง (B) ไป (A) โดยการนำความร้อนแลความชื้นภายในเม็ดของแข็งถูกเคลื่อนย้ายในทิศทางตรงกันข้ามบนผิวเม็ดของแข็ง ความชื้นระเหยสู่สิ่งแวดล้อมโดยการพาความร้อน



3.15 สมการและการออกแบบผนังถ่ายเทความร้อนสำหรับฟลูอิดไดซ์เบด

ดังที่เราได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังหลอดหรือผนังท่อกับเบดและของไหล เราเห็นแล้วว่าเป็นระบบที่ยุ่งและสลับซับซ้อนมาก ปริมาณความร้อนที่เคลื่อนที่ระหว่างเบดก็ตรวจหารายละเอียดได้ยาก แฟลคเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องมีอยู่มาก การที่จะสร้างสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างผนังกับเบดเองไม่สูงมากนัก เรามักจะตัดส่วนการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีออกไป เลยมานั้นหนักในในระบบการพาเป็นส่วนใหญ่สรุปตัวแปรที่เกิดขึ้นในระบบพอมี่ดังนี้

1. คุณสมบัติของก๊าซ

- ความหนาแน่น
- ความหนืด
- ความร้อนจำเพาะ
- สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

2. คุณสมบัติของแข็ง

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
- ความหนาแน่น
- แฟลคเตอร์รูปร่าง
- ความร้อนจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

3. สภาพที่เป็นฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด

ความเร็วต่ำสุด

สัดส่วนช่องว่างต่ำสุด

4. สภาพการไหล

ความเร็วของไหล

สัดส่วนช่องว่าง

5. คุณสมบัติทรงเรขาคณิต

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเบด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุภายในเบด

ความสูงของเบด

ความสูงของผนังความร้อน



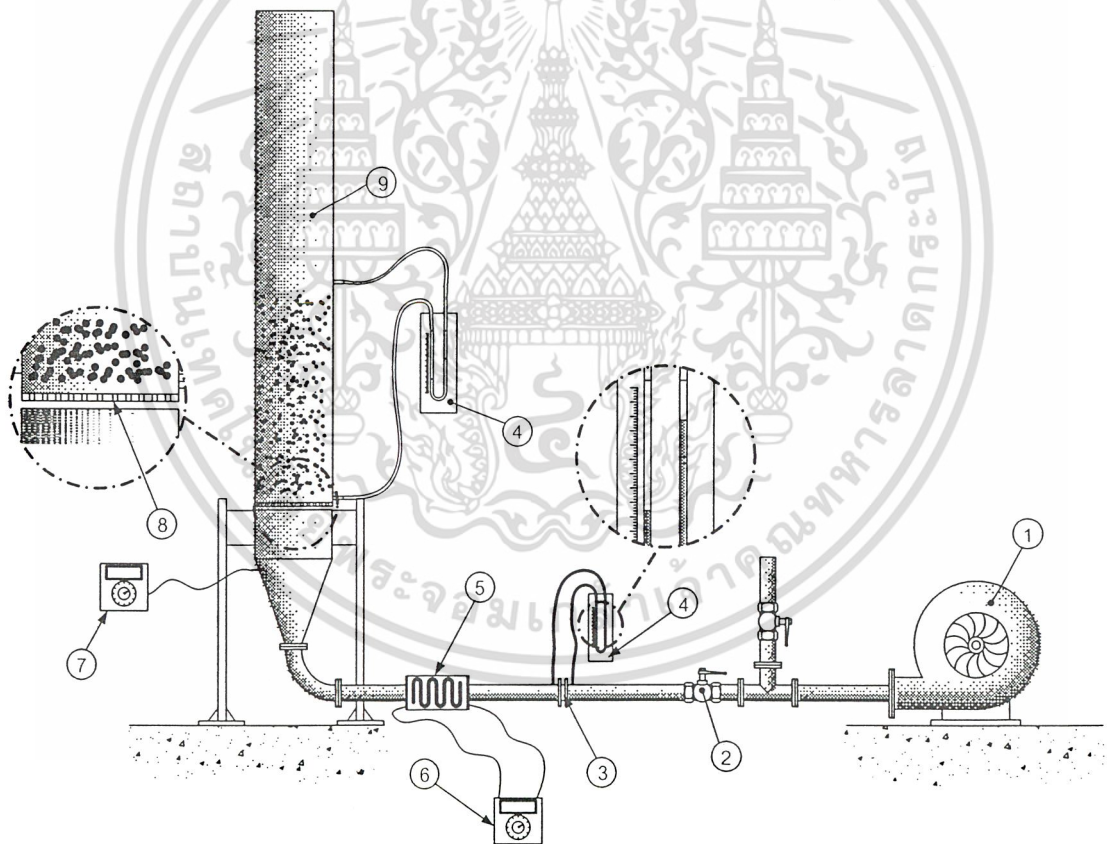
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยหอทดลองรูปทรงกระบอก ทำจากอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 170 มิลลิเมตร และความสูง 1000 มิลลิเมตร ในการทดลองเมล็ดกาแฟจะลอยที่ความสูงระหว่าง 60-120 มิลลิเมตร และขยายตัวถึง 200-400 มิลลิเมตร ในระหว่างเกิดฟลูอิดไดเซชัน ความจุของเมล็ดกาแฟสดอยู่ในช่วง 1000 กรัม แผ่นกระจายลมเป็นแบบเจาะตรงซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร และมีจำนวน 567 รู ซึ่งคิดเป็นพื้นที่เปิด 24% กาแฟที่ใช้ทดลองเป็นพันธุ์โรบัสตาขนาดเฉลี่ยประมาณ 13.6 มิลลิเมตร และมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงที่ 66-70%



รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์การอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด โดยประกอบด้วย (1) พัดลมขนาด 3 แรงม้า, (2) โกลบวาล์ว, (3) ออร์ิฟิสมิเตอร์, (4) มานอมิเตอร์แบบท่อตัวยู, (5) ขดลวดความร้อน, (6) ชุดควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อน, (7) ชุดวัดอุณหภูมิ, (8) แผ่นกระจายอากาศ และ (9) หอทดลองรูปทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

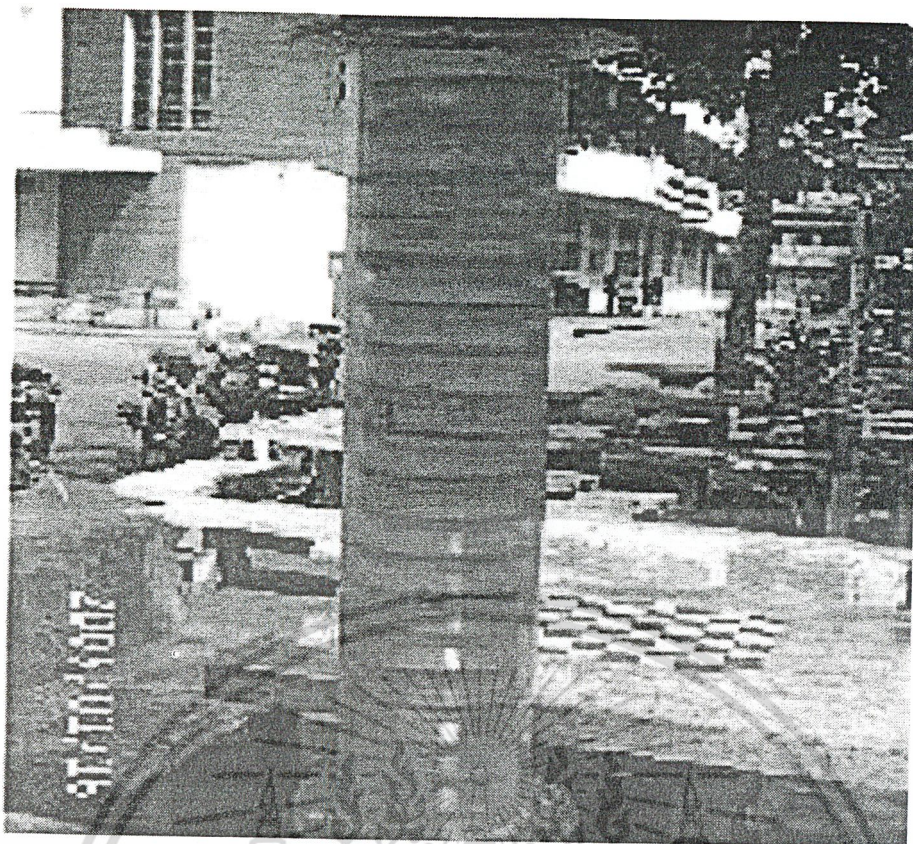
มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าขับลมผ่านท่อ โดยที่ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วย ออร์ฟีสมิเตอร์ ในการศึกษาพฤติกรรมของอัตราการไหลของอากาศในระหว่างการทดลอง จะถูกควบคุมโดยโกลบวาล์ว ซึ่งมีความเร็วอยู่ในช่วง 4 - 6 m/s และอัตราการไหลเฉพาะของอากาศอยู่ในช่วง 0.114 – 0.159 kg/s-kg dry coffee อากาศในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดจะถูกทำให้ร้อนด้วยขดลวดความร้อนขนาด 3 กิโลวัตต์ พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง และห้องทำความร้อน ถูกหุ้มด้วยฉนวนจนถึงทางเข้าหอดทดลอง ซึ่งจะมีอุณหภูมิของอากาศสูงสุดถึง 100°C ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 300 นาที ในการควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนด อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าหอดทดลองจะอยู่ในช่วง 80-100°C โดยจะทำการวัดอุณหภูมิภายในเบดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการทดลองเมล็ดกาแฟจะถูกวัดความชื้นที่ลดลงจากค่าน้ำหนักเมล็ดกาแฟที่เปลี่ยนไปซึ่งจะทำการวัดทุกๆ 15 นาทีโดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลที่มีค่าความละเอียด 1 กรัม

4.1.1 รูปหอบและอุปกรณ์ต่างๆ

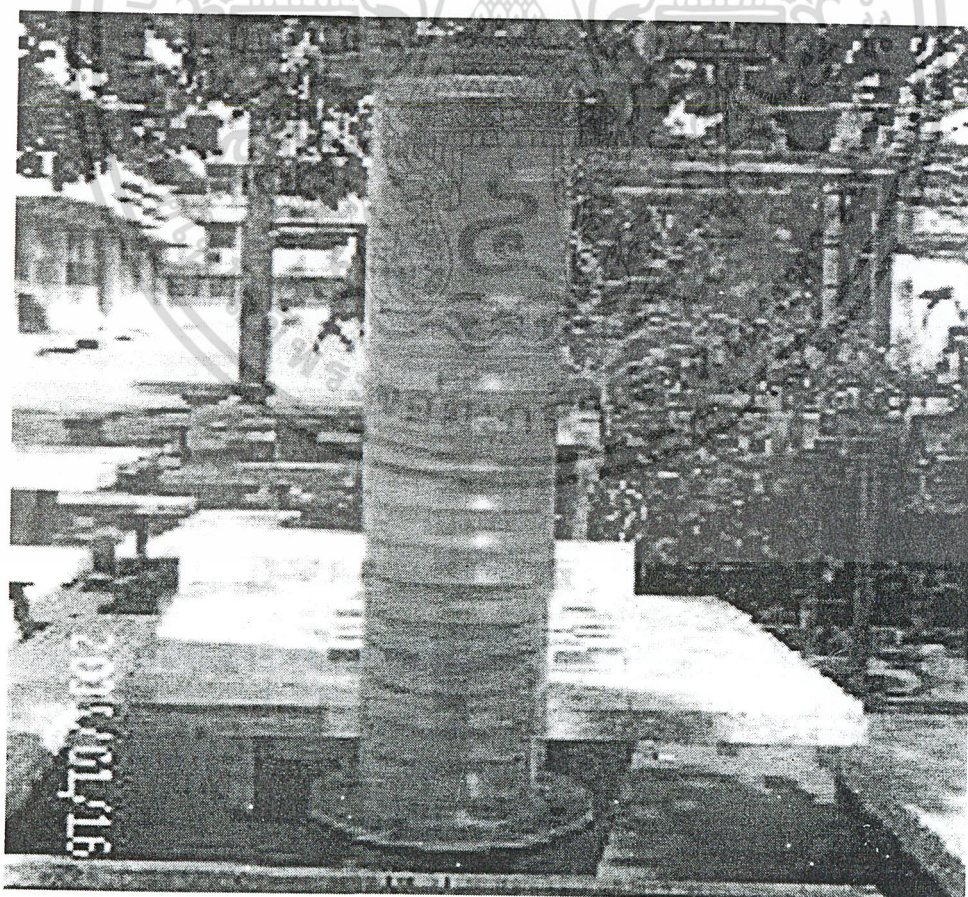


รูป หอบธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

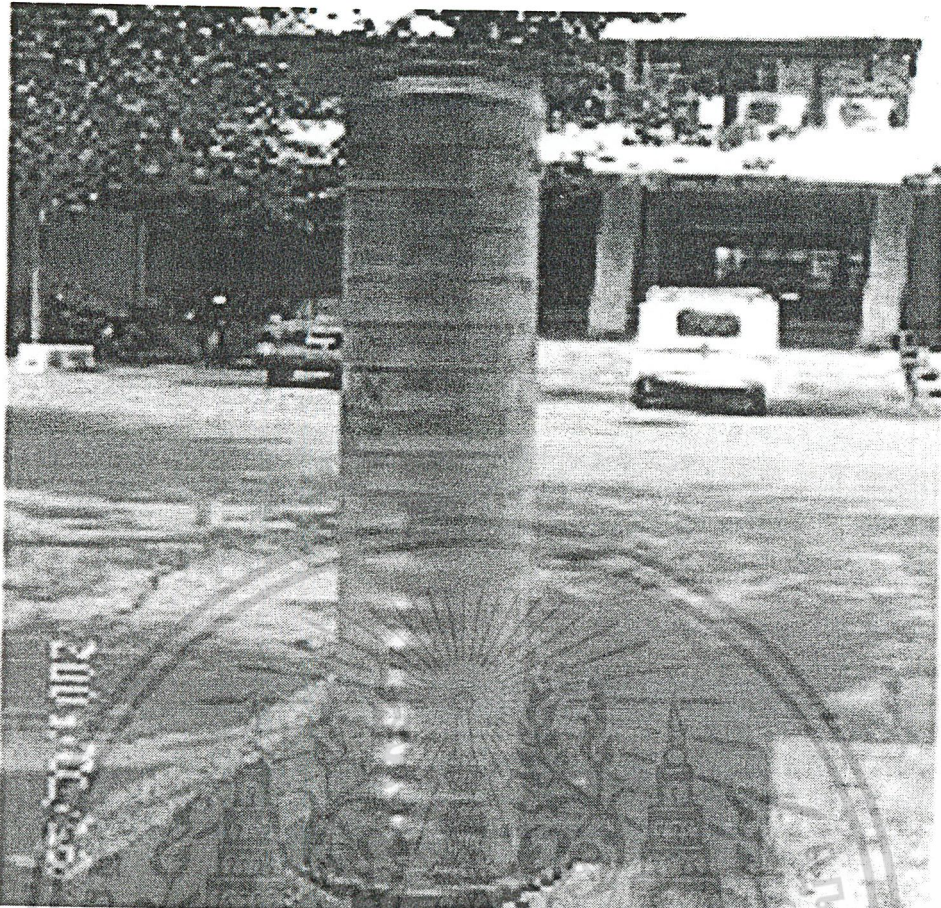


รูป หอบบผิวคลื่น

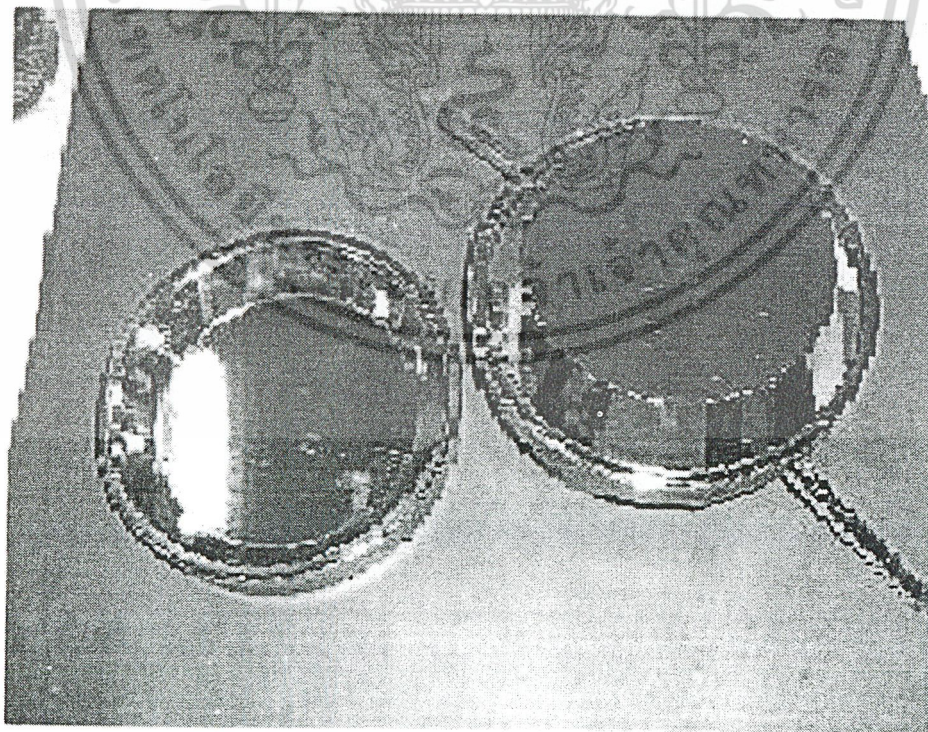


รูป หอบบผิวคลื่นวงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

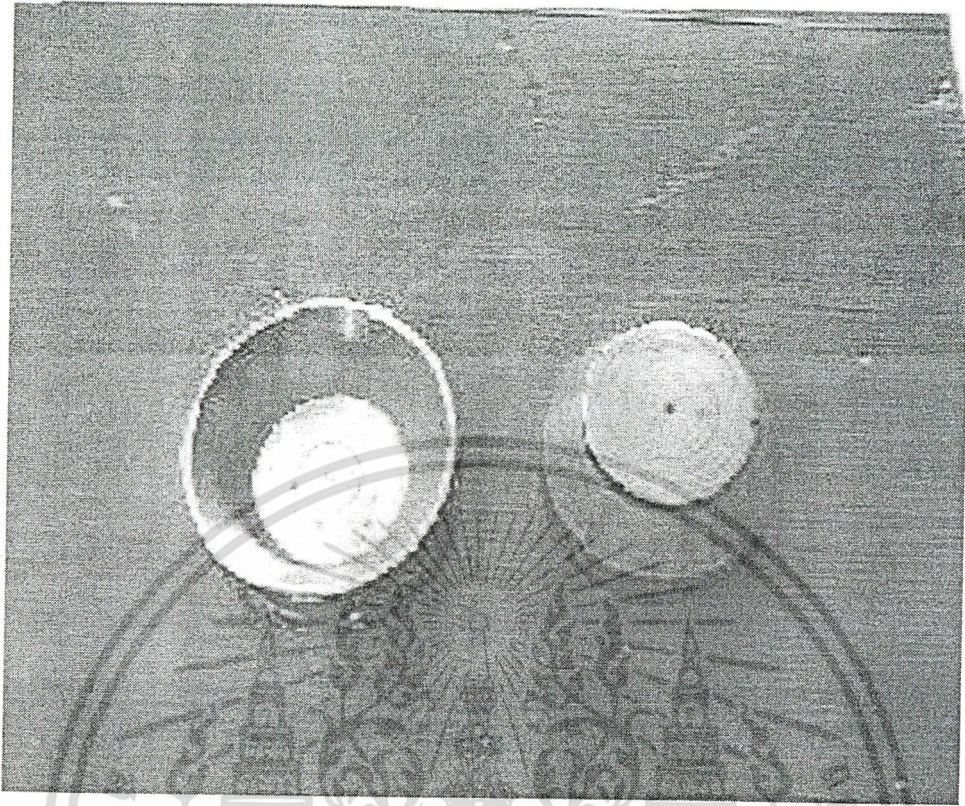


รูป หออบนิเวศลินีมีแกนกลาง

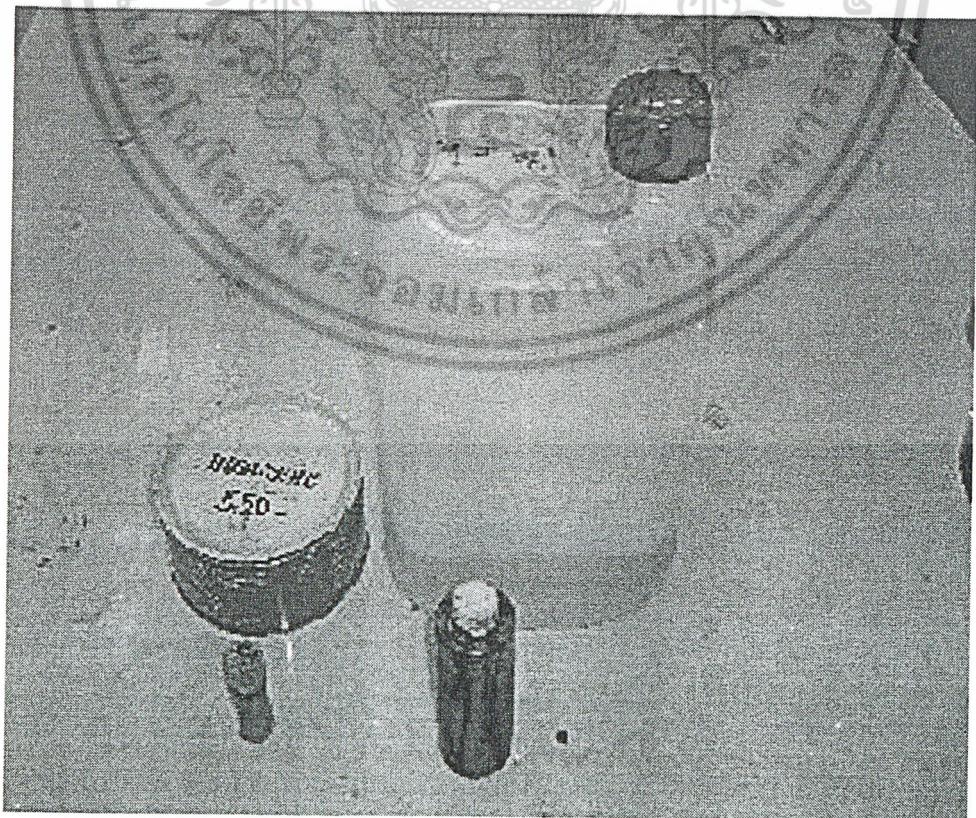


รูป แม่พิมพ์หล่อเรซิน พิมพ์ใหญ่

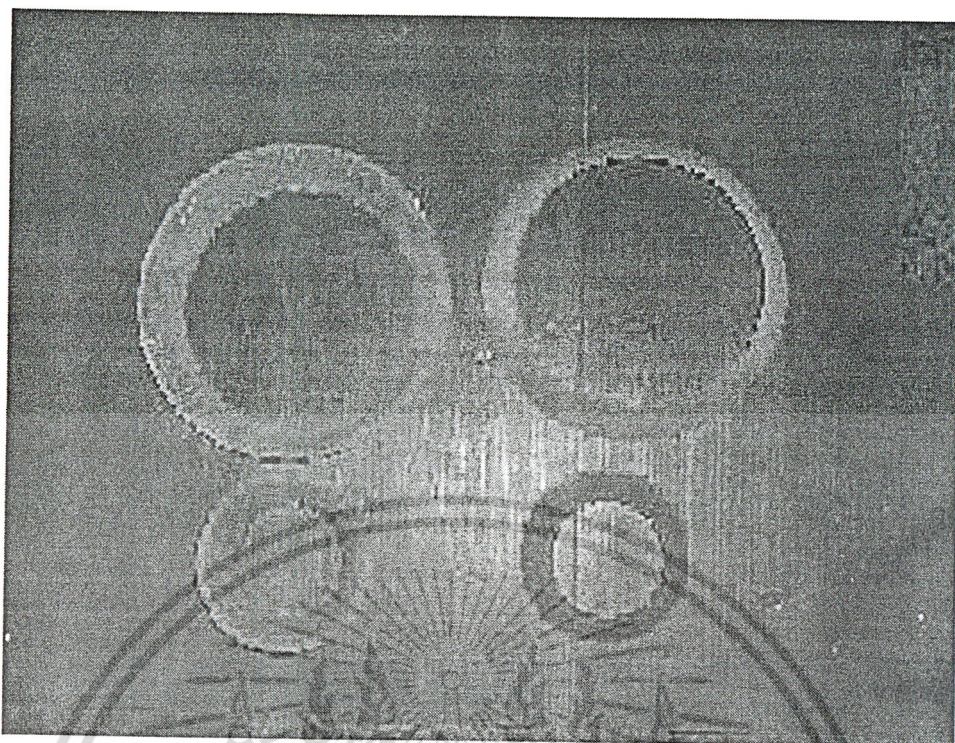
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



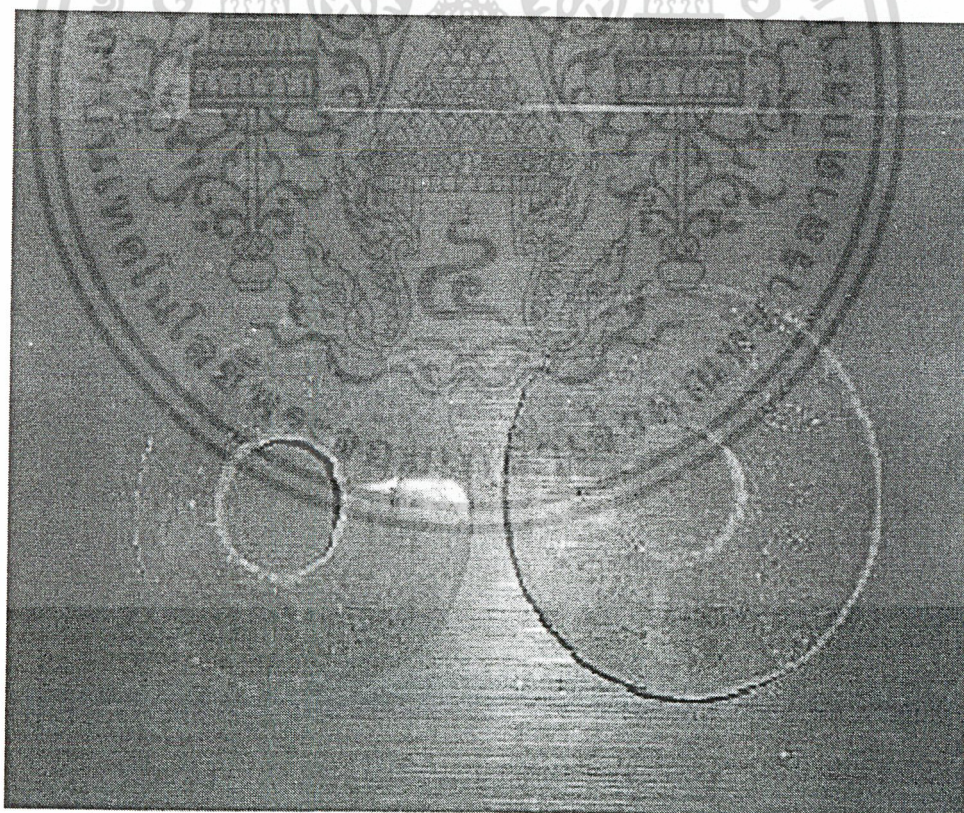
รูป แม่พิมพ์หล่อเรซิน พิมพ์เล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปถ่ายหลักฐานนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

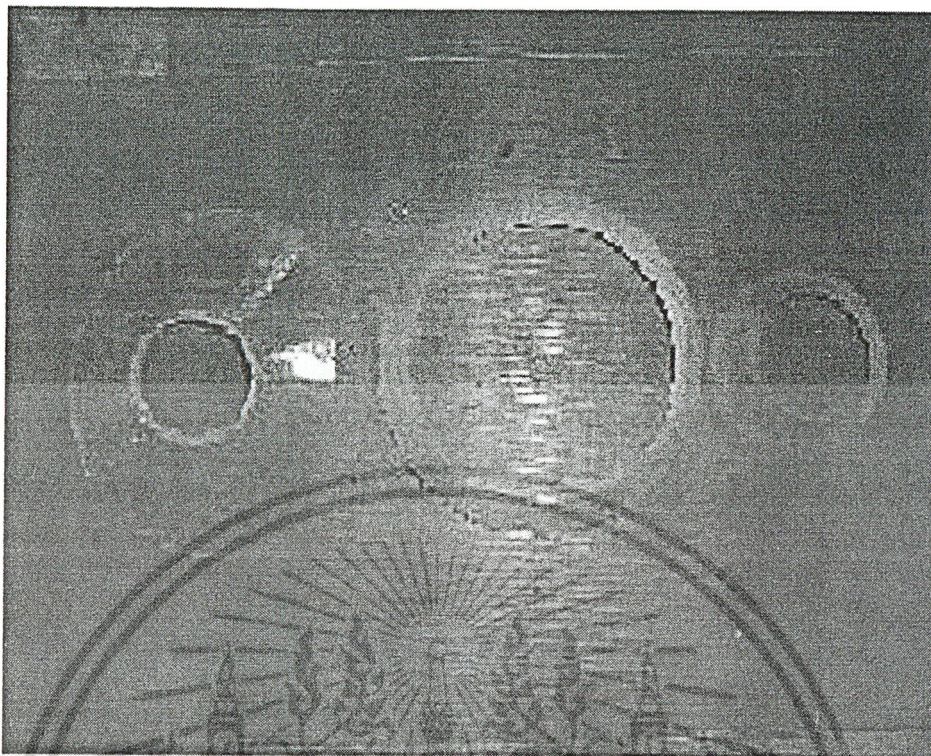


รูป กรวยคลื่นเรซินที่หล่อเสร็จแล้ว



รูป กรวยเรซินที่ผ่านการขัดผิวแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปเปรียบเทียบกรวยที่ผ่านการตัดผิวกับที่ยังไม่ตัดผิว

4.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม (Superficial air velocity) ภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด อุณหภูมิอากาศทางเข้า และค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศในการอบแห้ง (อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของเม็ดกาแฟแห้ง, SP) โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

4.3 วิธีการทดลอง

4.3.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

1. ทำการปรับเทียบชุกอริฟิสมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง และเตรียมชุดการทดลอง
2. ใส่เมล็ดกาแฟที่ความจุ 1 กิโลกรัม ลงในหอดทดลอง
3. เดินเครื่องโบล์เวอร์ที่ใช้ในการทดลอง โดยค่อยๆผ่านอากาศที่อัตราไหลต่ำๆก่อนแล้วค่อยๆเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น
4. บันทึกผลของความดันตกคร่อมเบดจากที่ได้อ่านจากมานอมิเตอร์ และบันทึกค่าความดันตกคร่อมจากอริฟิสมิเตอร์ เพื่อนำ

ไปหาค่าความเร็วของอากาศที่ผ่านหอดทดลอง

5. ปรับความเร็วลมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสังเกตเห็นเมล็ดกาแฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มลดยาลูกออกจากหอดทดลอง

6. เปลี่ยนหอบชนิดอื่นเข้ากับเครื่องอบ แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2 – 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบชนิดของหอบกับความสูงของเมล็ดกาแฟสดภายในเบด

ชนิดของหอบ	ความสูงของเมล็ดกาแฟสดภายในเบด, เซนติเมตร
หอบธรรมดา	10
หอบผิวคลื่น	15
หอบผิวคลื่นวงแหวน	17
หอบผิวคลื่นมีแกนกลาง	18

4.3.2 ความแห้งเมล็ดกาแฟสดโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

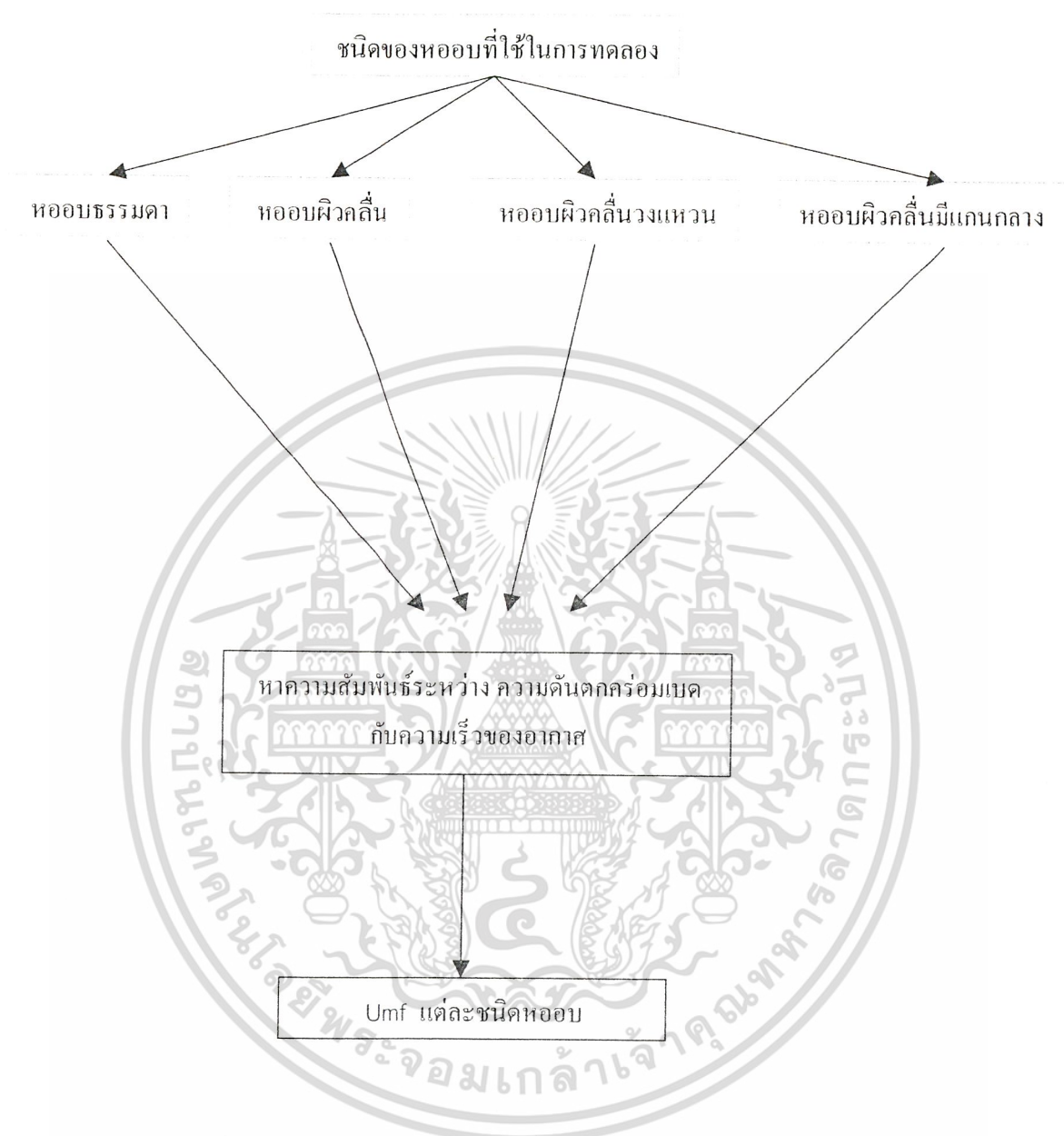
- เปิดสวิทช์เดินเครื่องโบลเวอร์ให้อากาศไหลผ่านระบบเครื่องอบแห้ง และเปิดเครื่องให้ความร้อนอุ่นเครื่องให้ได้อุณหภูมิ 80 - 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 นาที
- ปรับความเร็วลมในหอดทดลองให้ได้เท่ากับ 1Umf, 1.2Umf 1.4Umf ตามลำดับ
- ใส่เมล็ดกาแฟสดที่ความจุ 1 กิโลกรัม ลงในหอดทดลอง แล้วสังเกตผลการทดลอง
- นำเมล็ดกาแฟออกมาชั่งน้ำหนักของน้ำที่หายไปทุกๆ 15 นาที ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลที่มีค่าความละเอียด 1 กรัม และบันทึกผลการทดลอง
- ทำการทดลองจนมวลของเมล็ดกาแฟไม่เปลี่ยนแปลง แล้วเปลี่ยนอุณหภูมิของอากาศร้อนเป็น 100 องศาเซลเซียสแล้วดำเนินการทำซ้ำตามขั้นตอน 1 – 5 ใหม่ตามลำดับ
- เปลี่ยนหอบชนิดอื่นเข้ากับเครื่องอบแล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 2 – 5 ใหม่ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์สำหรับการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบด

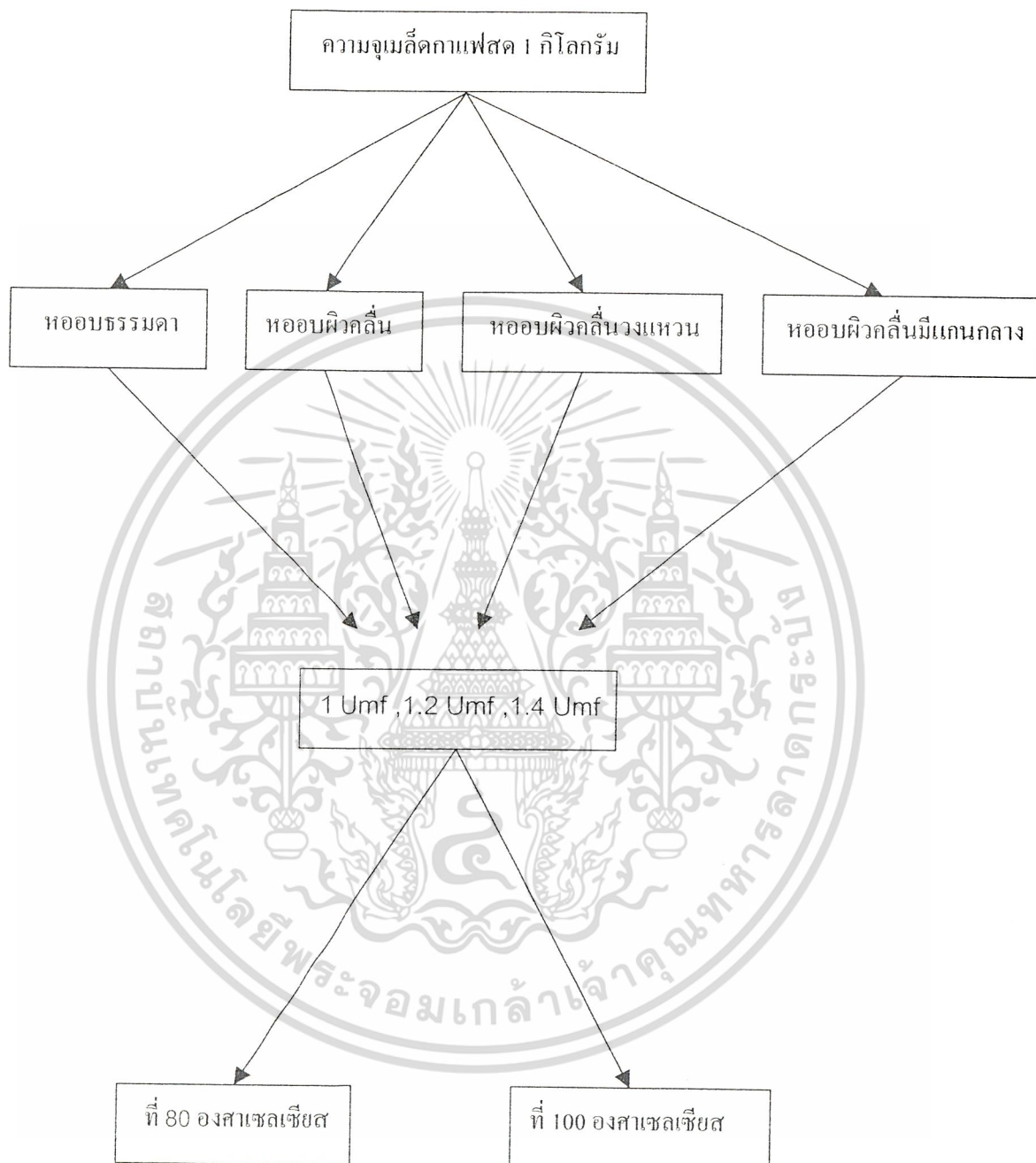
พารามิเตอร์	ปริมาณ/ชนิด	หน่วย
หอตดลองฟลูอิดไดซ์เบด		
เส้นผ่าศูนย์กลางหอตดลอง	170	มิลลิเมตร
ความสูงหอตดลอง	1000	มิลลิเมตร
พื้นที่แผ่นกระจายลม	24	เปอร์เซ็นต์
วัสดุ	อะคริลิก	--
คุณสมบัติของเมล็ดกาแฟ		
สายพันธุ์	โรบัสต้า	--
เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม	13.6	มิลลิเมตร
ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	66	เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)
ความหนาแน่น	1200	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
เงื่อนไขทางเข้าหอตดลอง		
ความเร็วอากาศ	4 - 6	เมตรวินาที
อุณหภูมิทางเข้าหอตดลอง	80-100	องศาเซลเซียส
อัตราการไหลอากาศจำเพาะ	0.114-0.159	กิโลกรัมต่อวินาที-กิโลกรัมเมล็ดกาแฟแห้ง
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	27	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	67-70	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แผนผังการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แผนผังการอบแห้งเมล็ดคาแพสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีการออกแบบหอบบแห้งด้วยกัน 4 แบบซึ่งหอบบแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันออกไป และการวิเคราะห์ผลที่ได้จากผลการทดลองของหอบบแต่ละชนิด ดังต่อไปนี้

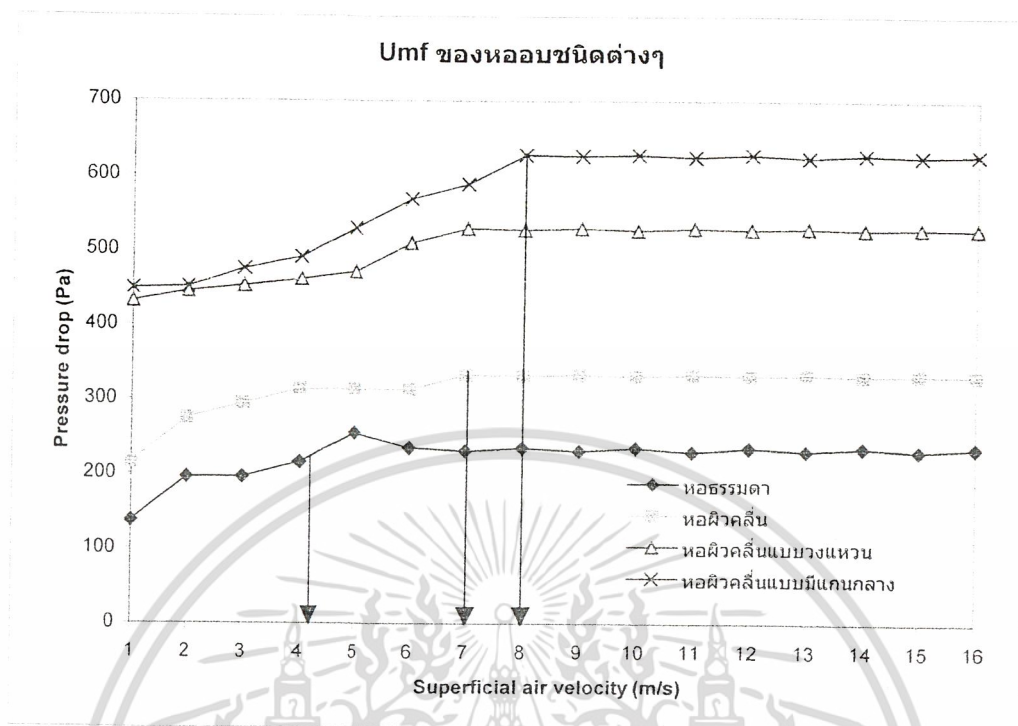
5.1 ลักษณะและอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

ในรูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศในหอบทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศทีละน้อย เริ่มจากเบตหนึ่งจะมีผลให้ความดันตกคร่อมของเบตเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศระดับหนึ่ง เมล็ดกาแฟจะเกิดการสั่นและเริ่มขยับตัว แยกตัวเป็นอิสระออกจากกัน และหลังจากนี้ความดันตกคร่อมเบตจะไม่เพิ่มขึ้น แม้ว่าความเร็วของอากาศจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจุดนี้คือจุดเริ่มต้นในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน และฟลูอิดไดเซชันที่เกิดขึ้นเป็นแบบสองสถานะ จากผลการทดลองเมล็ดกาแฟที่ความชื้นเริ่มต้น 66% มาตรฐานเปียกอุณหภูมิอากาศ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 67% ที่หอบบแบบต่างๆ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเบตมีค่าแตกต่างกัน และพบว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเบตของหอบบธรรมดา จะมีค่าประมาณ 4.25 m/s ซึ่งมากกว่าค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเบตที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 2.5 m/s (ภาคผนวก ข.) อยู่ 40%

จากผลการทดลองโดยใช้หอบทดลองโปร่งใส พบว่าหลังจากจุดเริ่มต้นที่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน เมื่อความเร็วของอากาศมากขึ้น จะมีอากาศบางส่วนรวมตัว และก่อเป็นถุงอากาศเกิดขึ้นภายในเบต ซึ่งเรียกว่าฟองก๊าซ และลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Bubbling โดยเมื่อฟองก๊าซเหล่านี้ลอยตัวไปถึงผิวหน้าของเบต ฟองก๊าซจะแตกออก ทำให้ผิวหน้าของเบตมีการกระเพื่อมขึ้นลง ไม่สม่ำเสมอ และเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้นเรื่อยๆ เมล็ดกาแฟจะเริ่มหลุดลอยออกจากหอบทดลอง ซึ่งจุดนี้คือจุดสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน หรือความเร็วสูงสุดที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน และจากผลการทดลองยังพบอีกว่าความดันตกคร่อมเบตจะมีค่าเพิ่มขึ้นของหอบบที่มีส่วนของคลื่นติดอยู่และความสูงของเบตเพิ่มขึ้นอีกด้วยเพราะค่าความดันตกคร่อมภายในเบตนั้นจะเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของเมล็ดกาแฟที่บรรจุอยู่ต่อพื้นที่ภาคตัดขวางหอบทดลอง ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ (3.6)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าที่ความเร็ว $1.3u_{mf}$ จะเกิดฟลูอิดไดเซชันอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นงานทดลองนี้จึงใช้ความเร็วในการอบของหอบบแบบต่างๆ ที่ 1 Umf , 1.2 Umf , 1.4 Umf ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศ ของหอบแบบต่างๆ (ความชื้นเริ่มต้น 68% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิอากาศ 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

5.2 อิทธิพลของอัตราการไหลจำเพาะ, SP

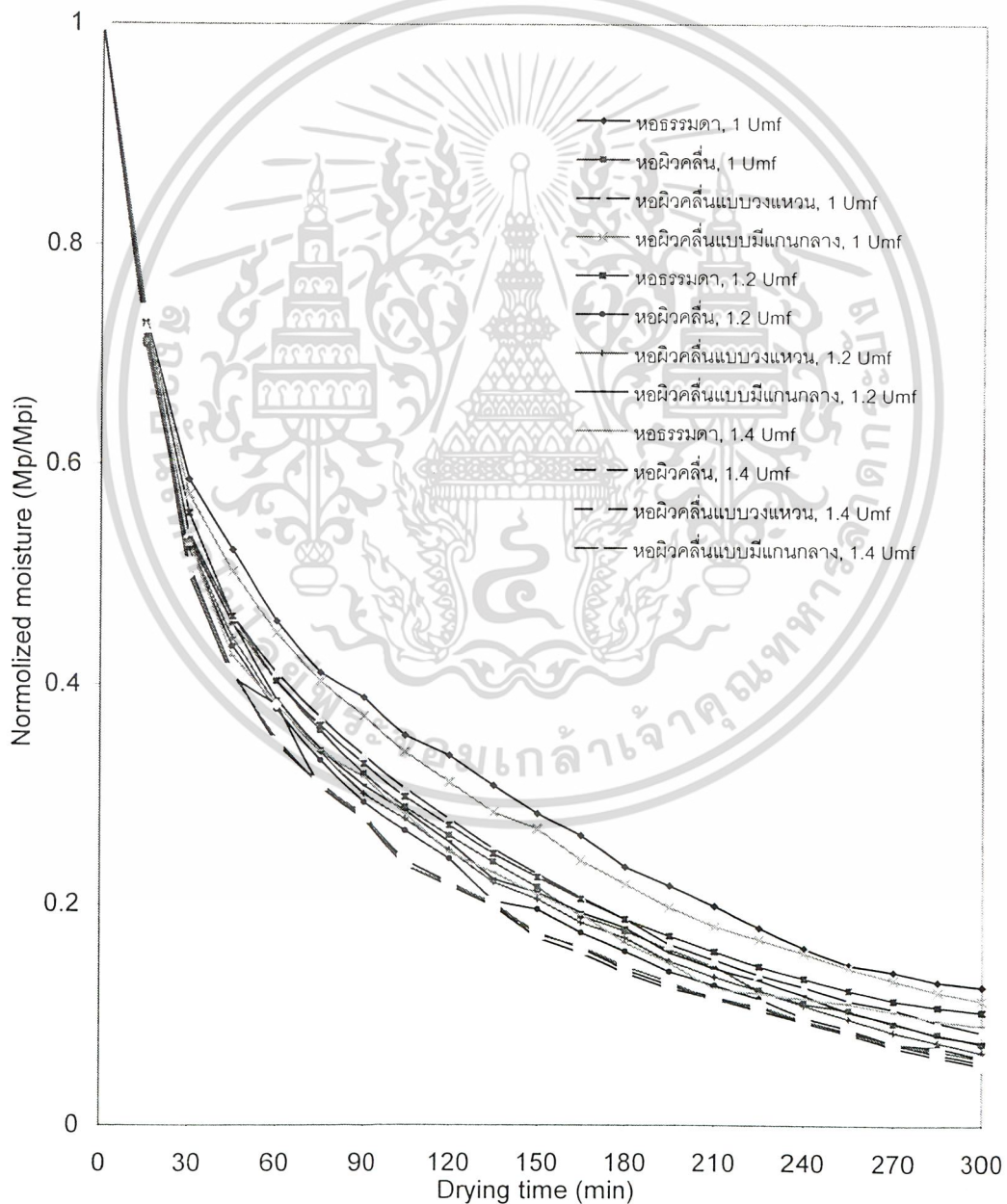
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่างๆ และอุณหภูมิทางเข้าที่ 100°C จากความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟ จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศมีผลกระทบต่ออัตราการลดลงของปริมาณความชื้น โดยกราฟแต่ละเส้นจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 1 - 2 ชั่วโมงแรกซึ่งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และหลังจากนั้นปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

จากเงื่อนไขการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศจำเพาะค่าต่างๆ (1 Umf, 1.2 Umf, 1.4 umf) ของหอบทั้ง 4 แบบที่อุณหภูมิทางเข้าที่ 80 และ 100 °C จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 1 - 2 ชั่วโมงแรกและหลังจากนั้นปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ สังเกตว่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศจำเพาะที่ 1Umf ของหอบทั้ง 4 แบบจะมีค่าต่ำที่สุด และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลอากาศจำเพาะขึ้นเป็น 1.2 Umf, 1.4 Umf อัตราการลดลงของปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

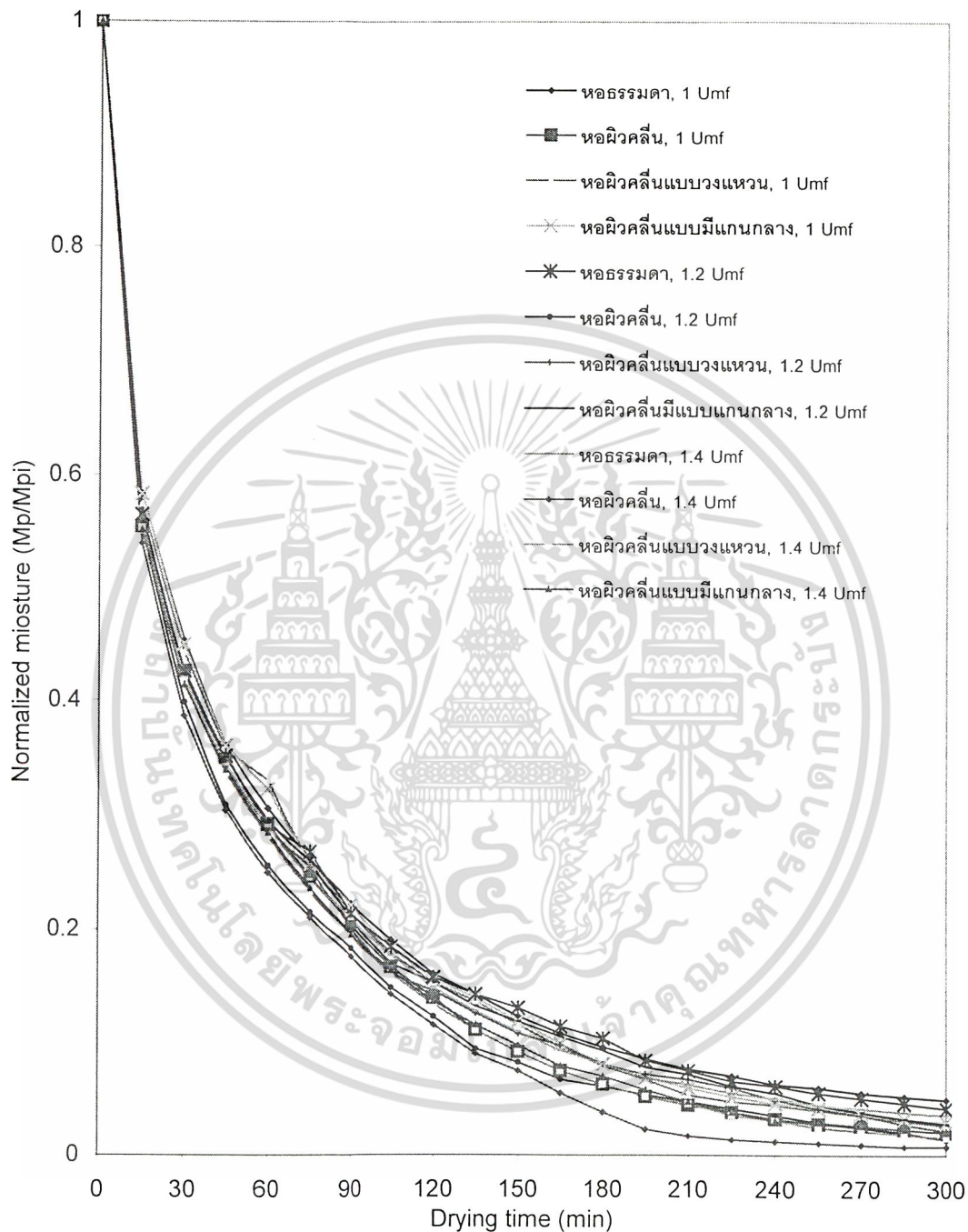
ความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราการไหลของอากาศจำเพาะที่สูงๆ จะทำให้เกิดความปั่นป่วนอย่างรุนแรงระหว่างเมล็ดกาแฟกับอากาศร้อนภายในเบตซึ่งทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลมีมากแต่ที่อัตราการไหลของอากาศจำเพาะต่ำเมล็ดกาแฟจะอยู่หนาแน่นบริเวณเหนือแผ่นกระจายลม จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างอากาศร้อนกับเมล็ดกาแฟภายในเบตมีค่าต่ำลงซึ่งเป็นกลไกของการพาความร้อน

ที่ 80 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 100 องศาเซลเซียส

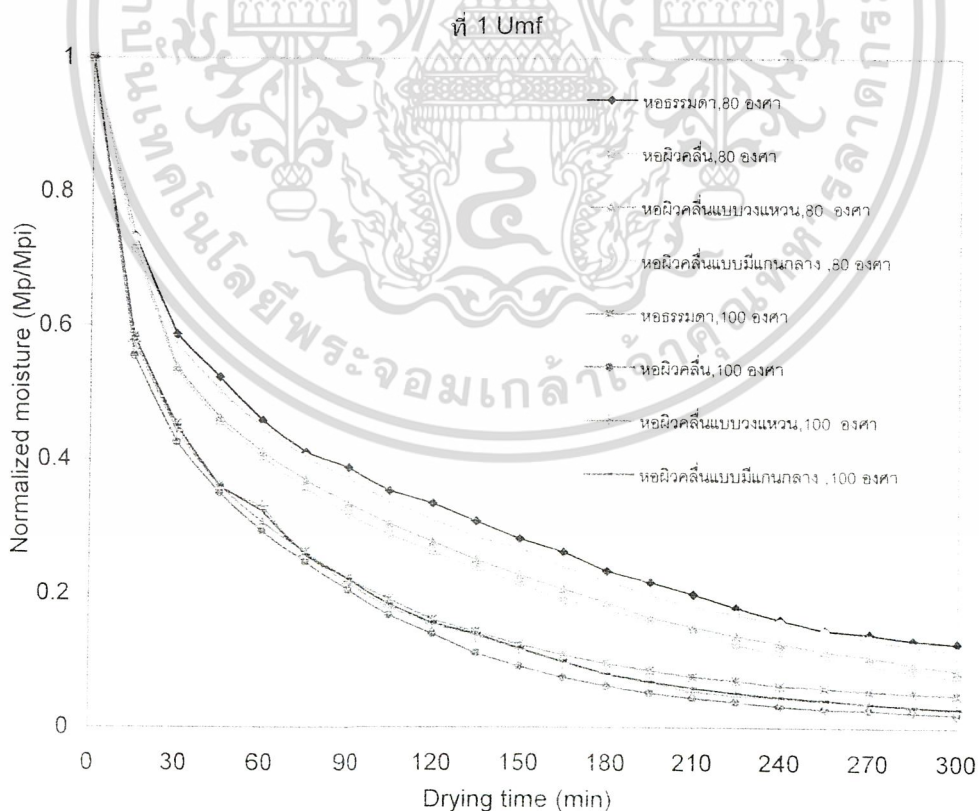


รูปที่ 5.2 ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟกับเวลาในการอบแห้ง โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเฉพาะของอากาศและที่อุณหภูมิ 80 – 100 องศาเซลเซียส

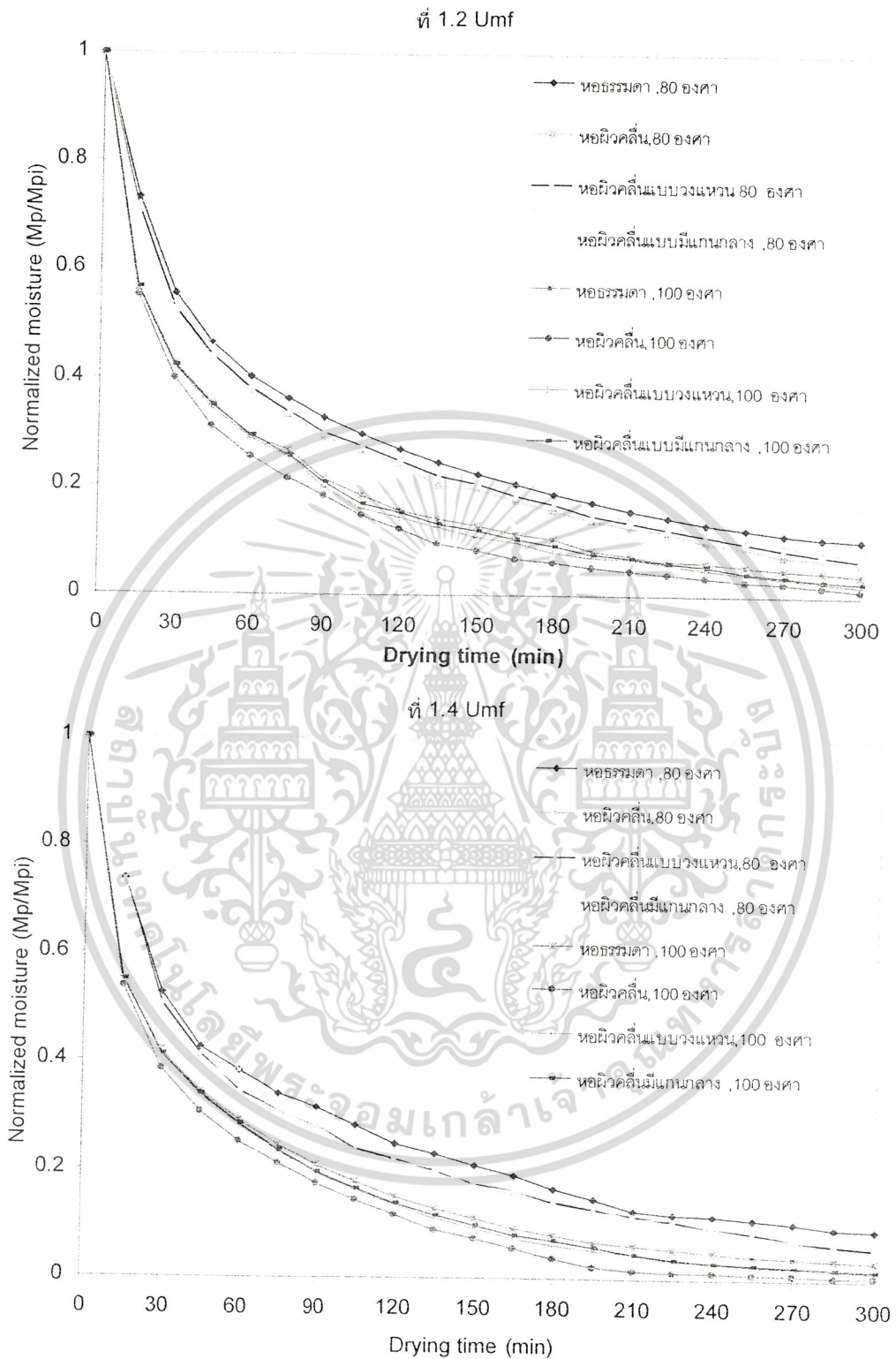
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 อิทธิพลผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้า

ความสัมพันธ์ Normalized moisture กับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้าหอตกลง 80 และ 100 °C ที่หอบทั้ง 4 แบบ ถูกแสดงในรูปที่ 5.3 จากรูปจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟมีแนวโน้มลดลง โดยที่อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิทางเข้า 100 องศาเซลเซียส จะมีค่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟสูงกว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟจะเหลือน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นของหอบชนิดอื่นจะมีมากกว่าหอบแบบอื่นที่อัตราการไหลอากาศจำเพาะและอุณหภูมิการอบเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนและเมล็ดกาแฟ ซึ่งแนวโน้มของอัตราการลดลงของความชื้นของเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิทางเข้าต่างๆ และหอบทั้ง 4 แบบ นั้นมีแนวโน้มการลดลงของปริมาณความชื้นในทิศทางเดียวกัน สำหรับที่อัตราการไหลอากาศจำเพาะต่างๆ จากรูปอัตราการลดลงของความชื้นจะเร็วมากในช่วงแรกของเวลาที่ใช้ในการอบ เมล็ดกาแฟคือ 1 – 2 ชั่วโมงแรก จากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆ การอบแห้งที่อุณหภูมิทางเข้า 80 และ 100 องศาเซลเซียส มีอัตราการลดลงของความชื้นจาก 66 % เหลือต่ำกว่า 14 % ภายในเวลาการอบแห้ง 5 – 7 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

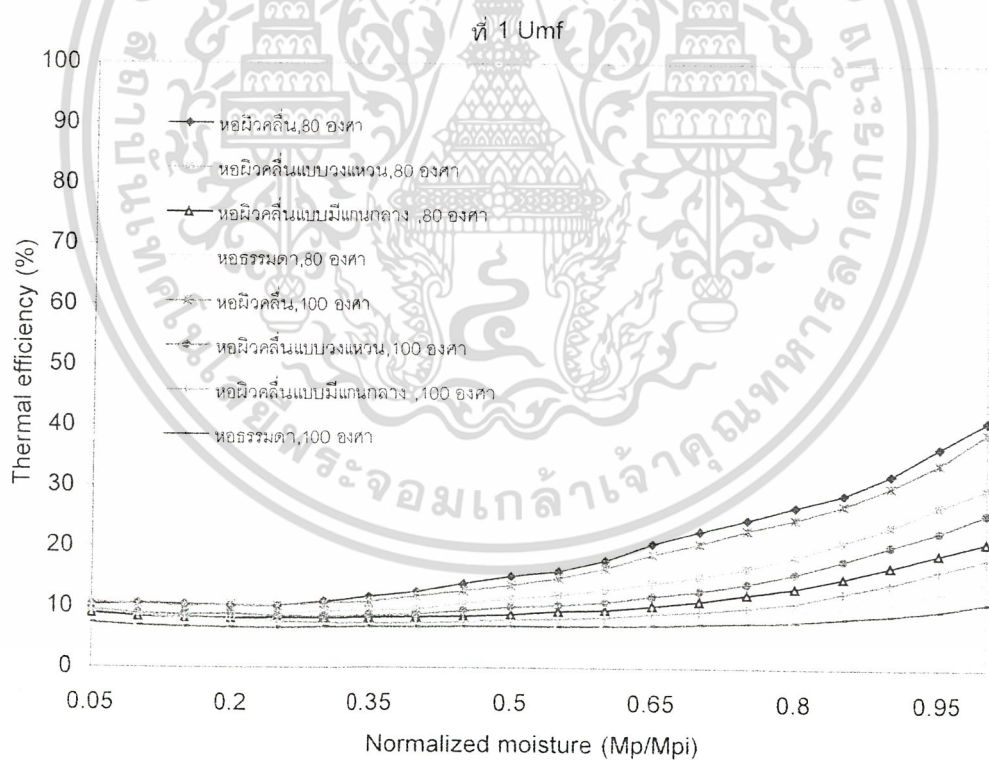


รูปที่ 5.3 ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟกับเวลาในการอบแห้ง โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอทดลองและที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.114 – 0.159 kg/s-kg coffee

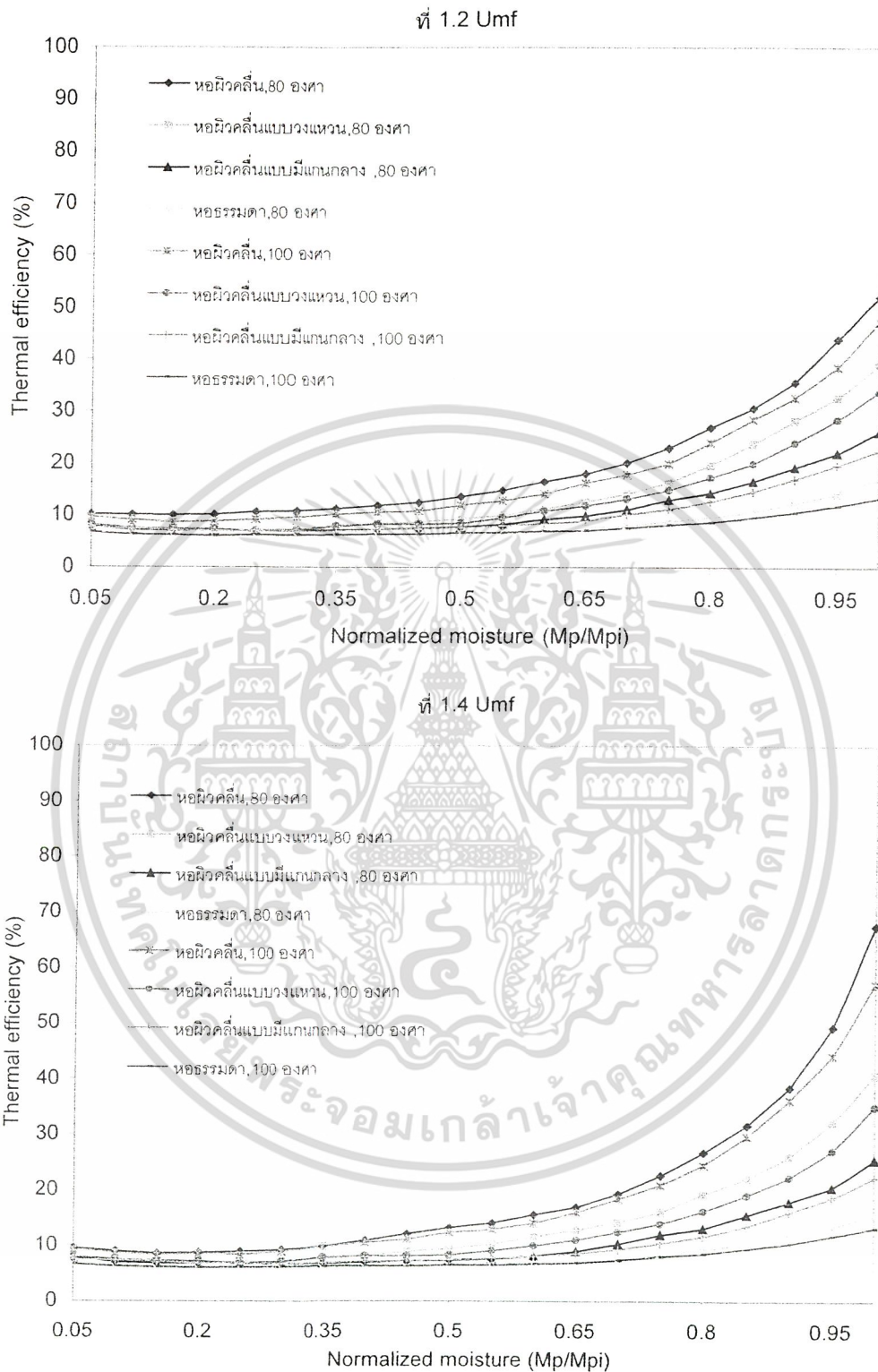
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ประสิทธิภาพความร้อนต่ออัตราส่วนความชื้น

จากรูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Thermal efficiency กับ Normalized moisture ที่อุณหภูมิหอบ 80 , 100 องศาเซลเซียส ของหอบทั้ง 4 แบบ พบว่าอัตราการไหลอากาศจำเพาะที่ 1 Umf และอุณหภูมิในการอบที่ 80 องศาเซลเซียส Thermal efficiency จะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิในการอบที่ 100 องศาเซลเซียสที่ Normalized moisture และที่ลักษณะของหอบแบบเดียวกันและเมื่ออัตราการไหลอากาศจำเพาะอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 1.2 Umf และ 1.4 Umf, Thermal efficiency ของหอบทั้ง 4 แบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราการไหลอากาศจำเพาะด้วยเช่นกัน สังเกตว่าที่อุณหภูมิในการอบ 80 องศาเซลเซียส ก็จะมี Thermal efficiency สูงกว่าอุณหภูมิในการอบที่ 100 องศาเซลเซียสในทุกๆเงื่อนไขการอบแห้ง ซึ่งที่อัตราการไหลอากาศจำเพาะมากขึ้นจะทำให้การเคลื่อนของเม็ดตากแห้งมีความปั่นป่วนมาก ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับเม็ดตากแห้งมากจึงส่งผลให้ Thermal efficiency มีค่าสูงตามไปด้วยเพราะว่าที่อุณหภูมิในการอบที่ 80 องศาเซลเซียส พลังงานความร้อนที่ให้ในการอบมีค่าต่ำกว่าพลังงานความร้อนที่ให้ในการอบที่ 100 องศาเซลเซียส จึงทำให้ Thermal efficiency ที่ 80 องศาเซลเซียสสูงกว่าที่ 100 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



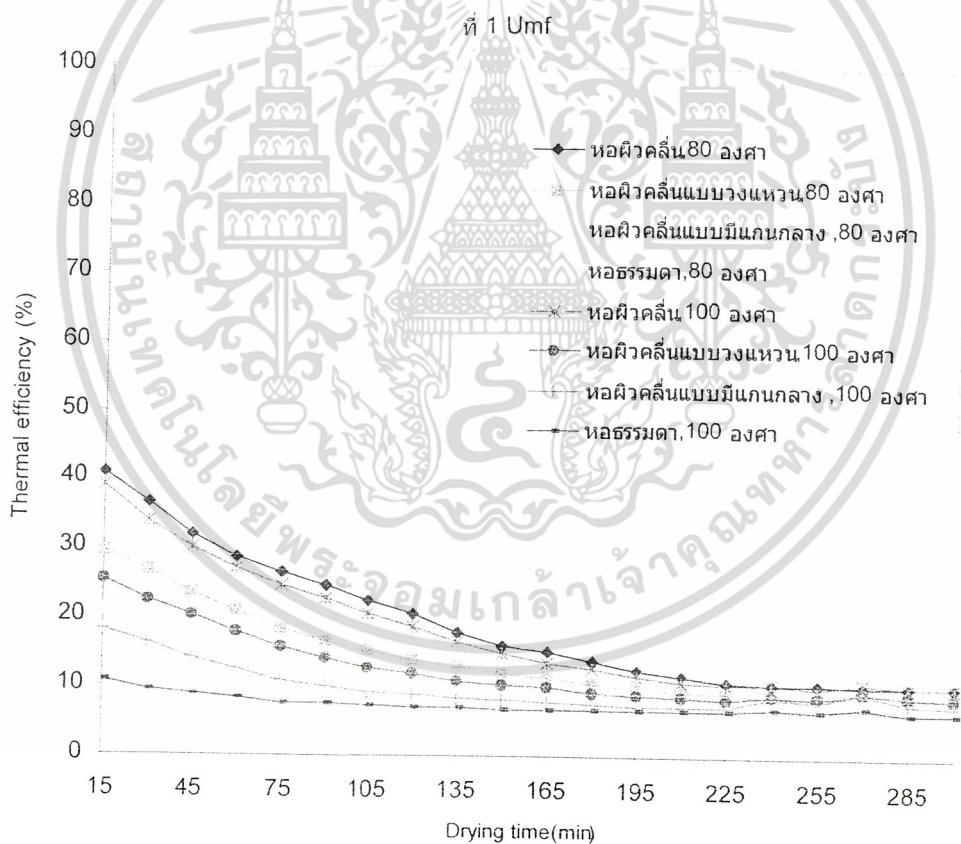
รูปที่ 5.4 Thermal efficiency VS Normalized moisture โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอทอดและที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.114 – 0.159 kg/s-kg coffee

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

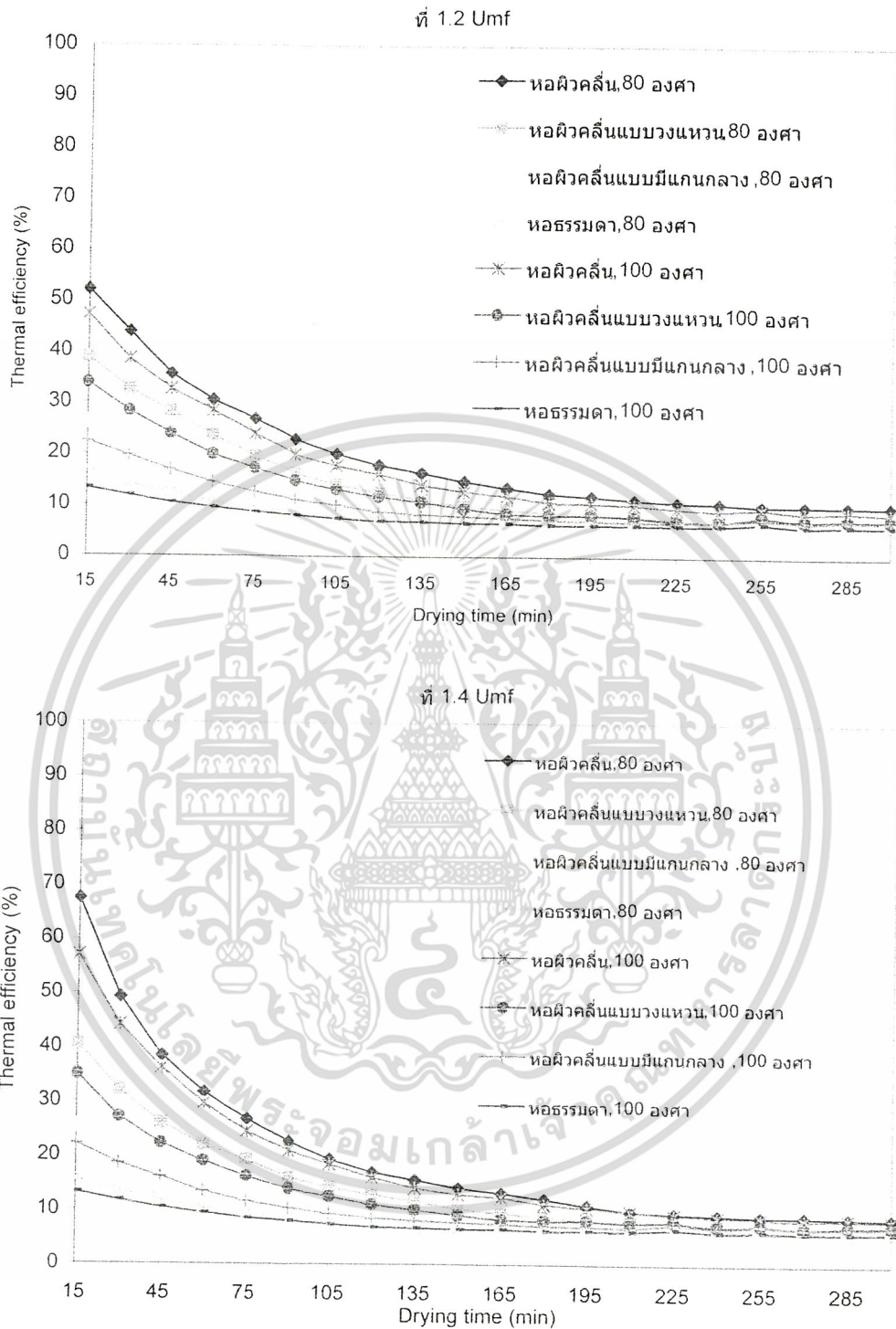
5.5 ประสิทธิภาพความร้อนต่อเวลาในการอบแห้ง

จากรูป 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Thermal Efficiency กับ Drying Rate พบว่า ประสิทธิภาพทางความร้อนในช่วงเวลาการอบแห้ง 1 – 2 ชั่วโมงแรก นั้นจะมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงแต่เมื่อหลังจากช่วงเวลา 3 ชั่วโมงผ่านไปการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพทางความร้อนจะมีค่าน้อยลงและคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการอบ ประสิทธิภาพทางความร้อนมีค่าสูงที่อัตราการไหลของอากาศจำเพาะสูงและที่อุณหภูมิในการอบที่ 80 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพทางความร้อนจะมีค่าต่ำลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศจำเพาะต่ำลงและที่อุณหภูมิในการอบที่ 100 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพทางความร้อนของหอบแบบผิวคลื่นจะมีค่าสูงกว่าหอบแบบอื่นๆ

ซึ่งประสิทธิภาพทางความร้อนจะมีค่าสูงในช่วงเวลาดันๆของการอบ อันเนื่องมาจากปริมาณของน้ำที่อยู่ในเมล็ดกาแฟจะมีปริมาณสูงอยู่ซึ่งทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนและเมล็ดกาแฟมีค่าสูงตามไปด้วย และเมื่อเวลาการอบผ่านไปปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดกาแฟจะมีน้อยลงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนกับเมล็ดกาแฟน้อยลงด้วยและคงที่ในที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 Thermal efficiency VS Drying Rate โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง และที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.114 – 0.159 kg/s-kg coffee

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันสามารถสรุปของหอบทั้ง 4 แบบที่เงื่อนไขของการอบได้ดังต่อไปนี้

6.1.1 จากผลการทดลองเมล็ดกาแฟที่ความชื้นเริ่มต้น 66% มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 67% หอบทั้ง 4 แบบนั้นมีความดันตกคร่อมภายในเบดแตกต่างกันและความสูงของเบดก็มีผลต่อความดันตกคร่อมด้วยเช่นกัน และพบว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของหอบธรรมดาจะมีค่าเท่ากับ 4.25 m/s ซึ่งมากกว่าค่าที่คำนวณอยู่ 40%

6.1.2 แฟคเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งมากที่สุดคือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอบทดลอง และจากผลการทดลองค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งเมล็ดกาแฟน้อยกว่าอุณหภูมิของอากาศ

6.1.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นเมล็ดกาแฟของหอบผิวคลื่นมีค่าสูงที่สุด ที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน

6.1.4 อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟจะเหลือน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

6.1.5 หอบผิวคลื่นมีผลทำให้ลักษณะการลอยตัวของเมล็ดกาแฟเกิดความปั่นป่วนภายในหอบมากกว่าหอบแบบอื่นๆ ซึ่งส่งผลต่ออัตราการลดลงของปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟในระหว่างการอบ

6.1.6 อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศจำเพาะที่ 1 Umf, 1.2 Umf, 1.4 Umf หอบธรรมดาจะมีค่าต่ำกว่าหอบมีครีบท่อนที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน

6.1.7 ประสิทธิภาพความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจะสูงกว่าที่ 100 องศาเซลเซียสและอัตราการไหลอากาศจำเพาะที่ 1.4 Umf จะมีค่าประสิทธิภาพความร้อนสูงที่สุดเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ในการทดลองถ้าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเปลี่ยนแปลงมากๆ มีผลให้อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นในเมล็ดกาแฟต่อเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นควรจะมีงานวิจัยที่ศึกษาลักษณะของการเปลี่ยนค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และตัวแปรอื่นอีก

6.2.2 ควรที่จะศึกษามลของการนำอากาศที่ใช้อบแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ และความคุ้มค่าของพลังงานโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

6.2.3 พัฒนาการอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดไปสู่อุตสาหกรรมการอบแห้งเมล็ดกาแฟภายในประเทศต่อไปในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- กาญจน์มณี ศรีวิศาลภพ. 2546. **คุณรู้เรื่องกาแฟดีแค่ไหน...?**. กรุงเทพฯ : ดอกหญ้าการ์ฟ.
- กิตติชัย ไตรรัตน์ศิริชัย และ กิตติ สิทธิประภาพร. 2545. "การจำลองแบบและการทดลองการอบแห้งพริกแบบชั้นบาง" หน้า 592-595 ใน **การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
- กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์. 2542. **การพัฒนาการผลิตและการตลาดกาแฟ**. งานจัดประกวดเมล็ดกาแฟ ปี 2541/42 และการสัมมนา. กรุงเทพฯ : บริษัท บพิตรการพิมพ์ จำกัด
- ณัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์ และ อภิชาติ เทอดโยธิน. 2542. "แบบจำลองการแพร่ความชื้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน." หน้า 268-273. ใน **ประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วิวัฒน์ วุฒิววัฒน์ชัย. 2540. "แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์. 2540. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : หนังสือในโครงการส่งเสริมการสร้างตำรา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- อนันต์ พงษ์ธรรกุลพานิช. 2539. "การศึกษาการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Abdullah, M.Z. Husain, Z. and Yin Pong, S.L. 2003. "Analysis of cold flow fluidization test results for various." *Biomass & Bioenergy*. 24 : 487-494.
- Akpinar, E. Midilli, A. and Bicer, Y. 2003. "Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling." *Energy Conversion and Management*. 44 : 1689-1705.
- Brooker, D.B. Bakker-Arkema, F.D. and Hall, C.W. 1981. *Drying Cereal Grains*. The AVI publish Company, Inc, Westport, Connecticut

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Crank, J. 1975. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed. Oxford : Oxford University Press.
- Davidson, J. F. Clift, R. and Harrison, D. 1985. *Fluidization*. 2nd ed. London : Academic Press
- Ertekin, C. and Yaldiz, O. 2004. "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model." *Journal of Food Engineering*. 63 : 349-359.
- Kozanoglu, B.U. Welti Chanes, J. Garcia Cuautle, D. and Santos Jean J.P. 2002. "Hydrodynamics of large particle fluidization in reduced pressure operations: an experimental study." *Power Technology*. 125 : 55-60.
- Kunii, D. Levenspiel, O. 1991. *Fluidization Engineering*. 2nd. United States of America : Butterworth-Heinemann.
- Mawatari, Y. Tatemoto, Y. Noda, K. 2003. "Prediction of minimum fluidization velocity for vibrated fluidized bed." *Power Technology*. 131 : 66-70.
- Midilli, A. Olgun, H. and Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513.
- Montgomery, D.C. 1997. *DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS*. Fourth edition. Canada : John Wiley & Sons, Inc.
- Senadeera, W. Bhandari, B.R. Toung, G. Wijesinghe, B. 2003. "Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying." *Journal of Food Engineering*. 58 :277-283.
- Sharma, R.R. 1999. "Fluidized bed drying characteristics of green-mango and potato." A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of master of Engineering. Asian Institute of technology.
- Soponronarit, S. Yapha, M. and Prachayawarakorn, S. 1995. "Cross-flow fluidized bed paddy dryer." *Drying Technology*. 53(8) : 2207-2216
- Soponronarit, S. Kittiporn, K. and Prachayawarakorn, S. 1999. "CORN DRYING IN A CONTINUOUS FLUIDIZED BED DRYER." *Agricultural Engineering Journal*. 8(4) : 223-231.
- Srivastava, V.K. and John, J. 2002. "Deep bed grain drying modeling" *Energy Conversion and management*. 43 : 1689-1708.

- Suksankraison, K. Patumsawad, S. and Fungtammasan, B. 2001 "Prediction of Minimum Fluidisation Velocity form Correlations: An Observation." *Asia J. Energy Environ.* 2(2) : 145-154.
- Syahrul, S. Hamdullahpur, F. and Dincer, I. 2002. "Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles." *Applied Thermal Engineering.* 22 : 1763-1775.
- Togrul, I.T. and Pehlivan, D. 2003. "Modeling of drying kinetics of single apricot." *Journal of Food Engineering* 58 : 23-32.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

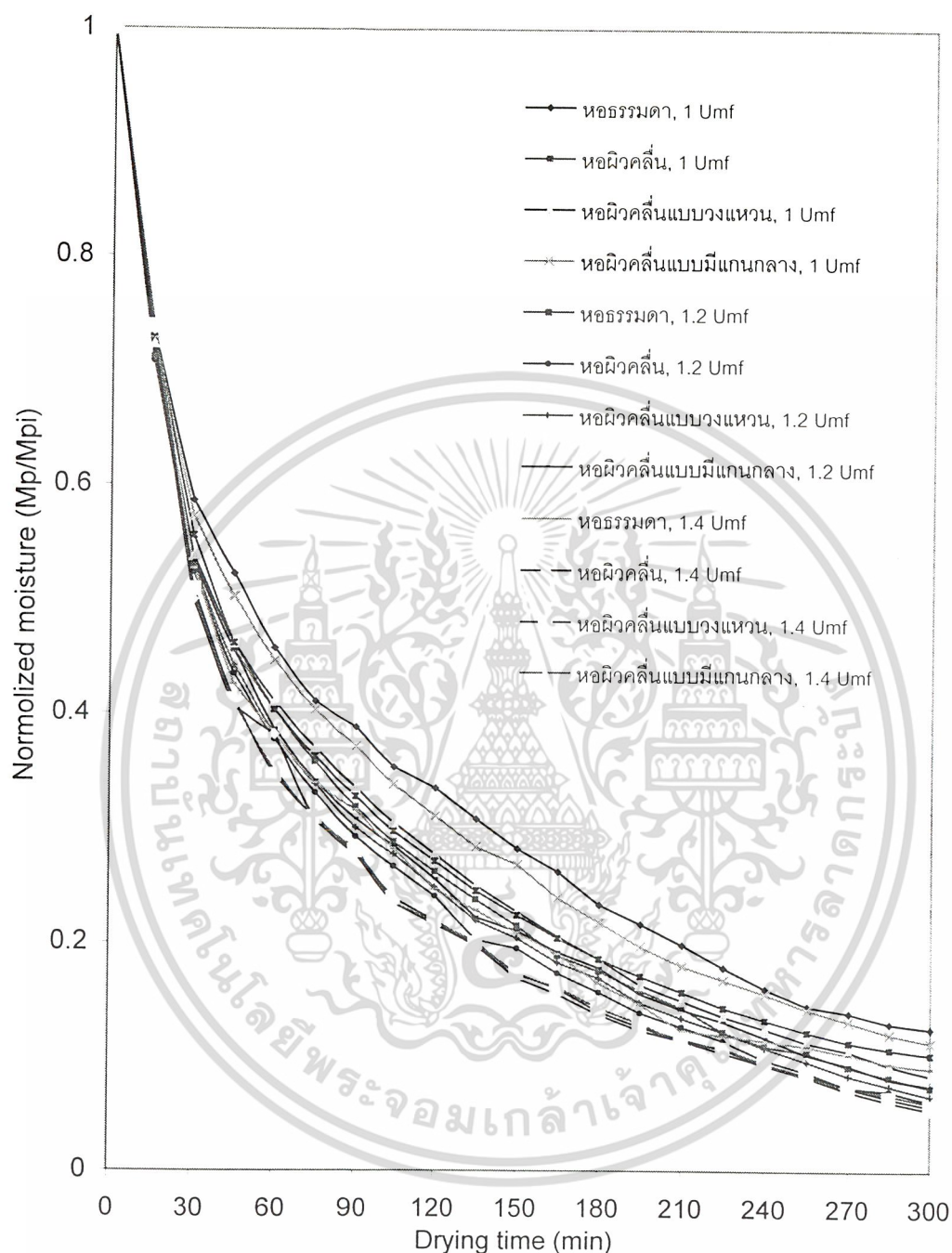


ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

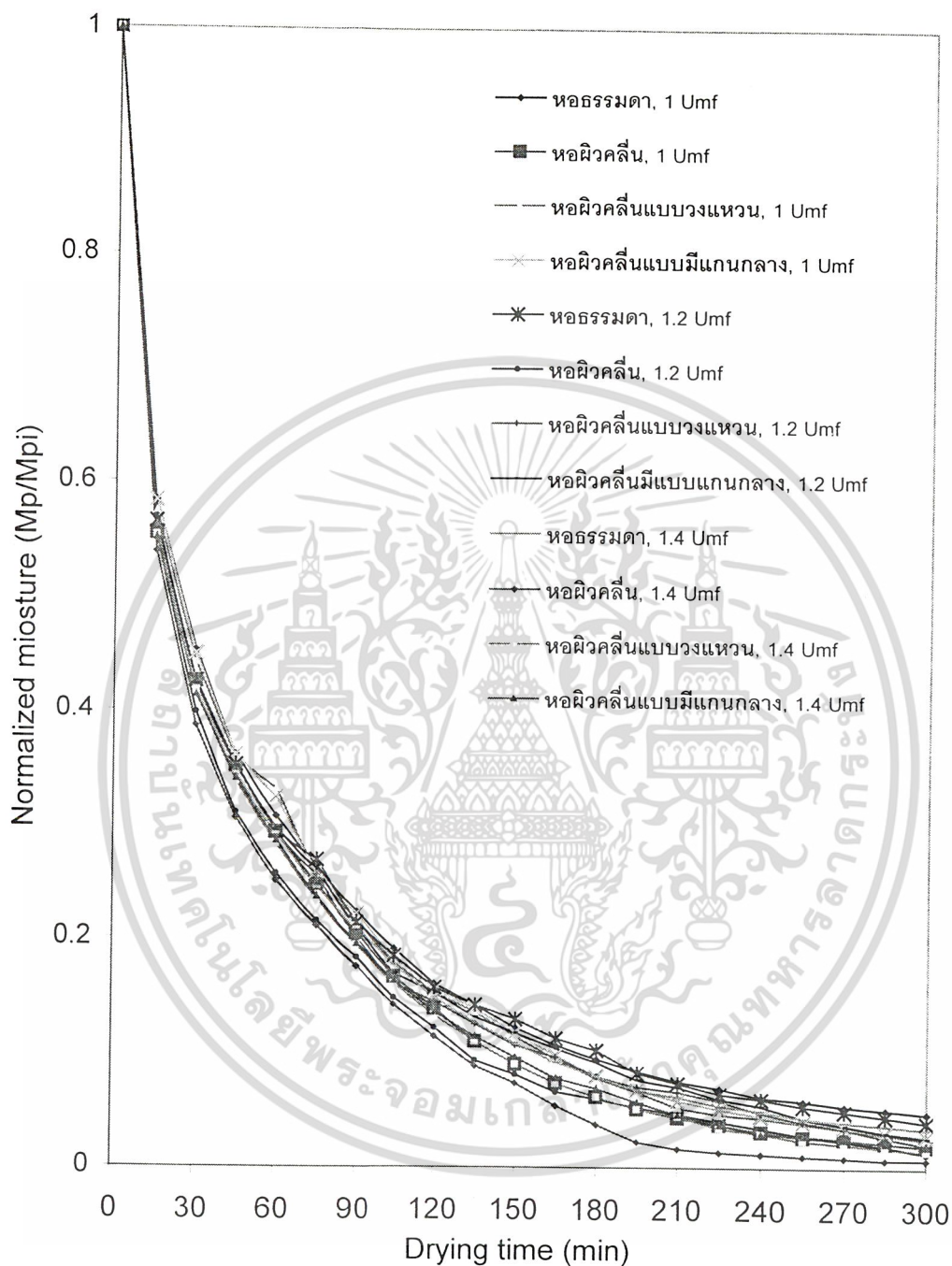
ที่ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลเฉพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 80 °C (ความชื้นเริ่มต้น 66% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิอากาศ 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

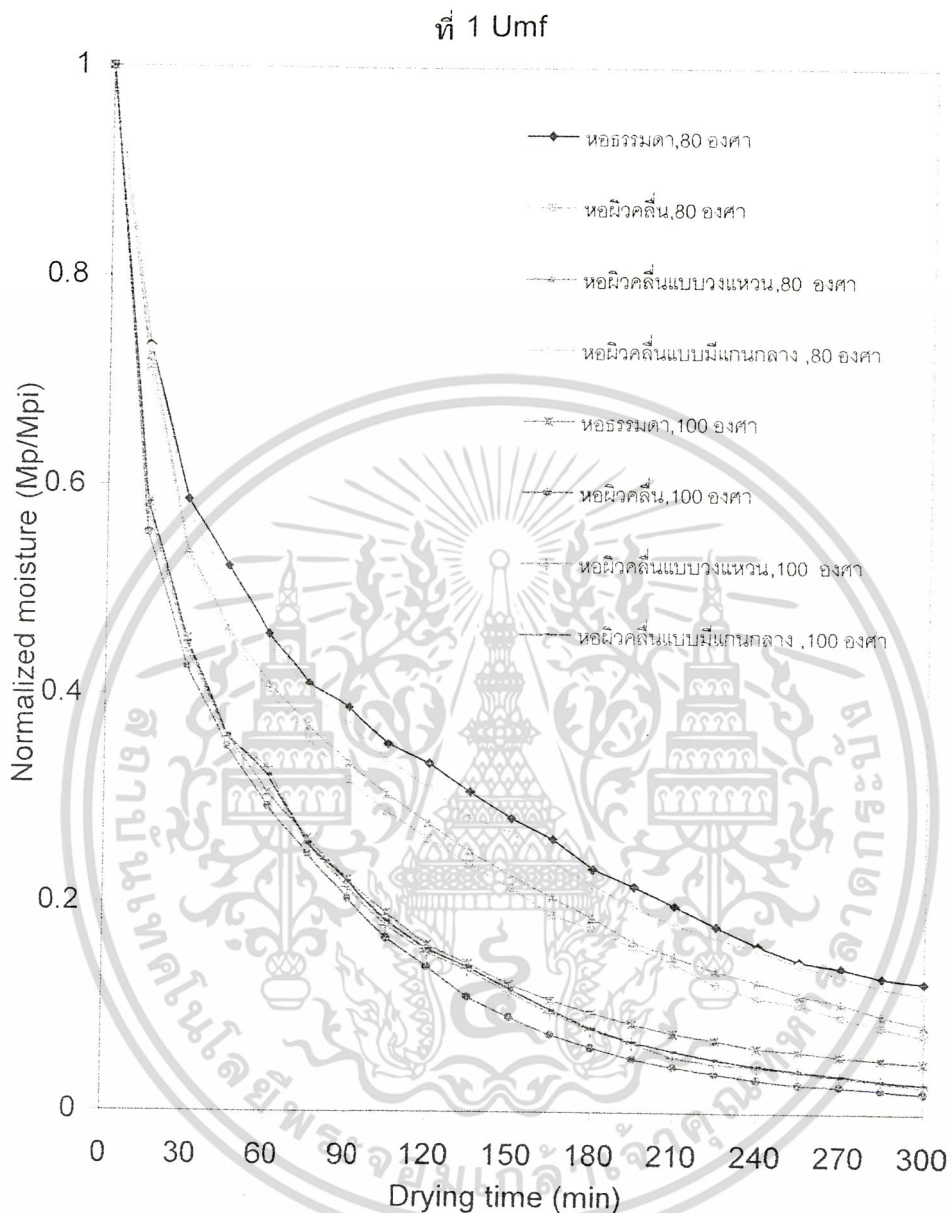
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อัตราการไหลเฉพาะของอากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 100 °C (ความชื้นเริ่มต้น 66% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิอากาศ 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

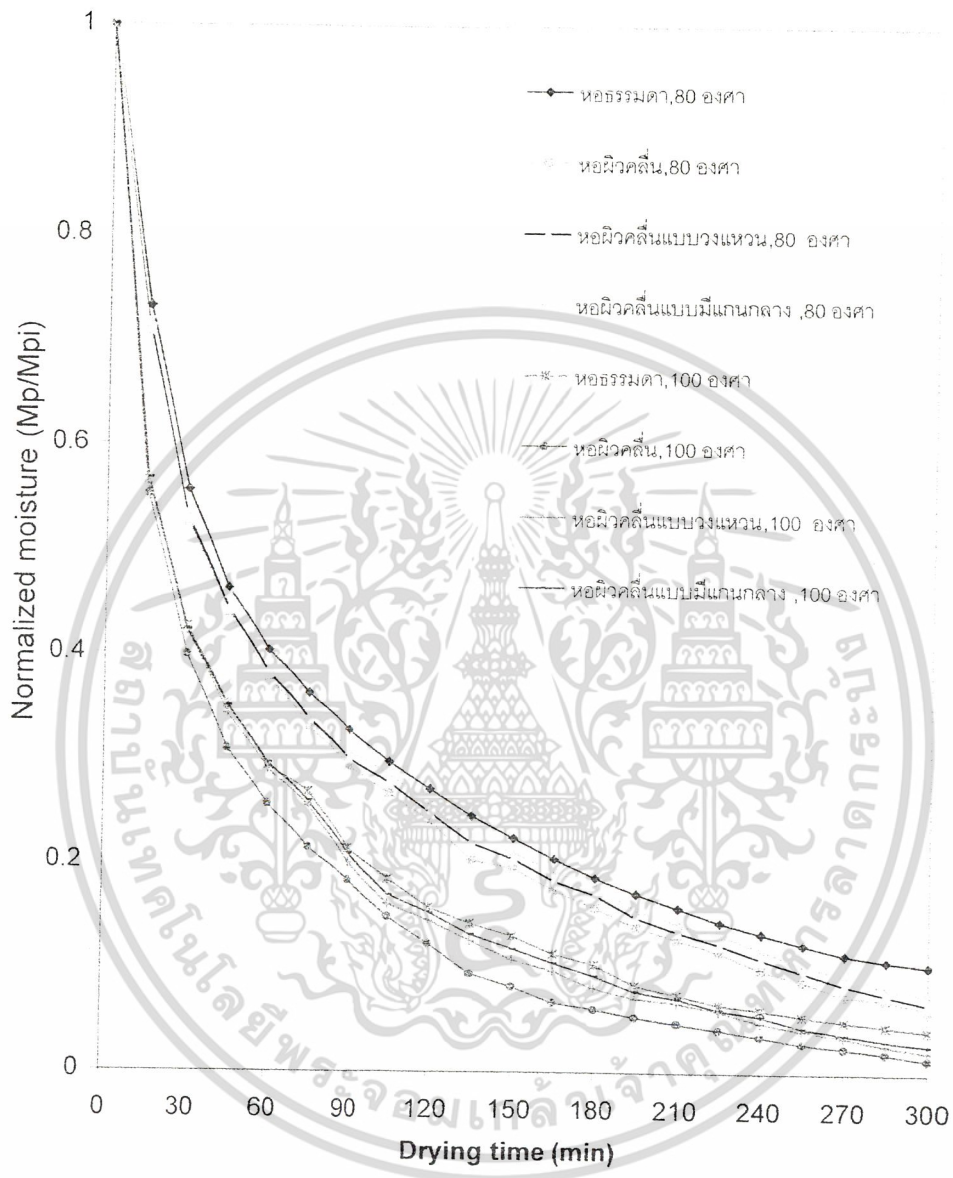
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าต่างๆ ที่อัตราการไหลจำเพาะ 0.114 kg/s-kg dry coffee (ความชื้นเริ่มต้น 66% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

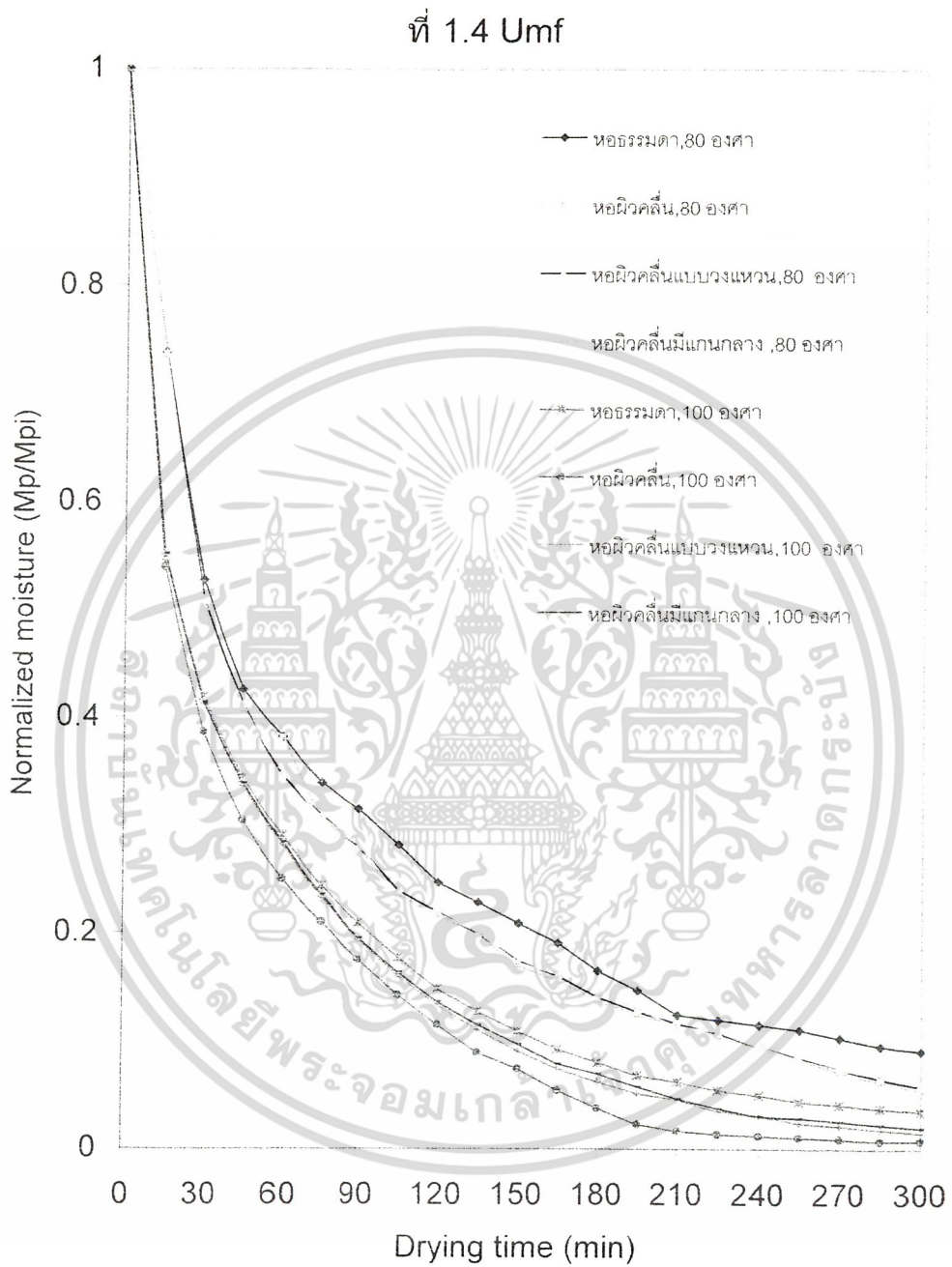
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 1.2 Umf



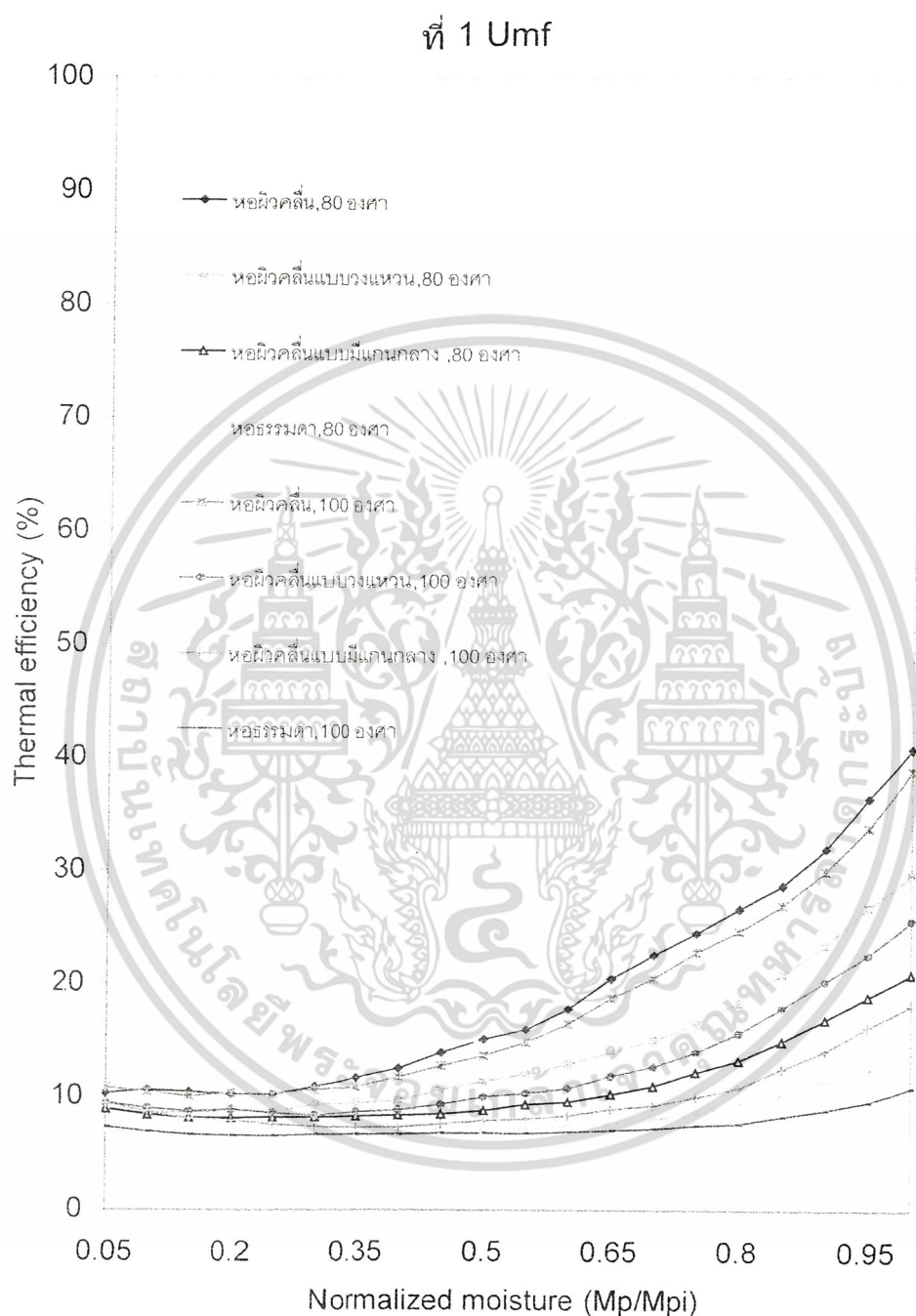
รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าต่างๆ ที่อัตราการไหลจำเพาะ 0.136 kg/s-kg dry coffee (ความชื้นเริ่มต้น 66% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



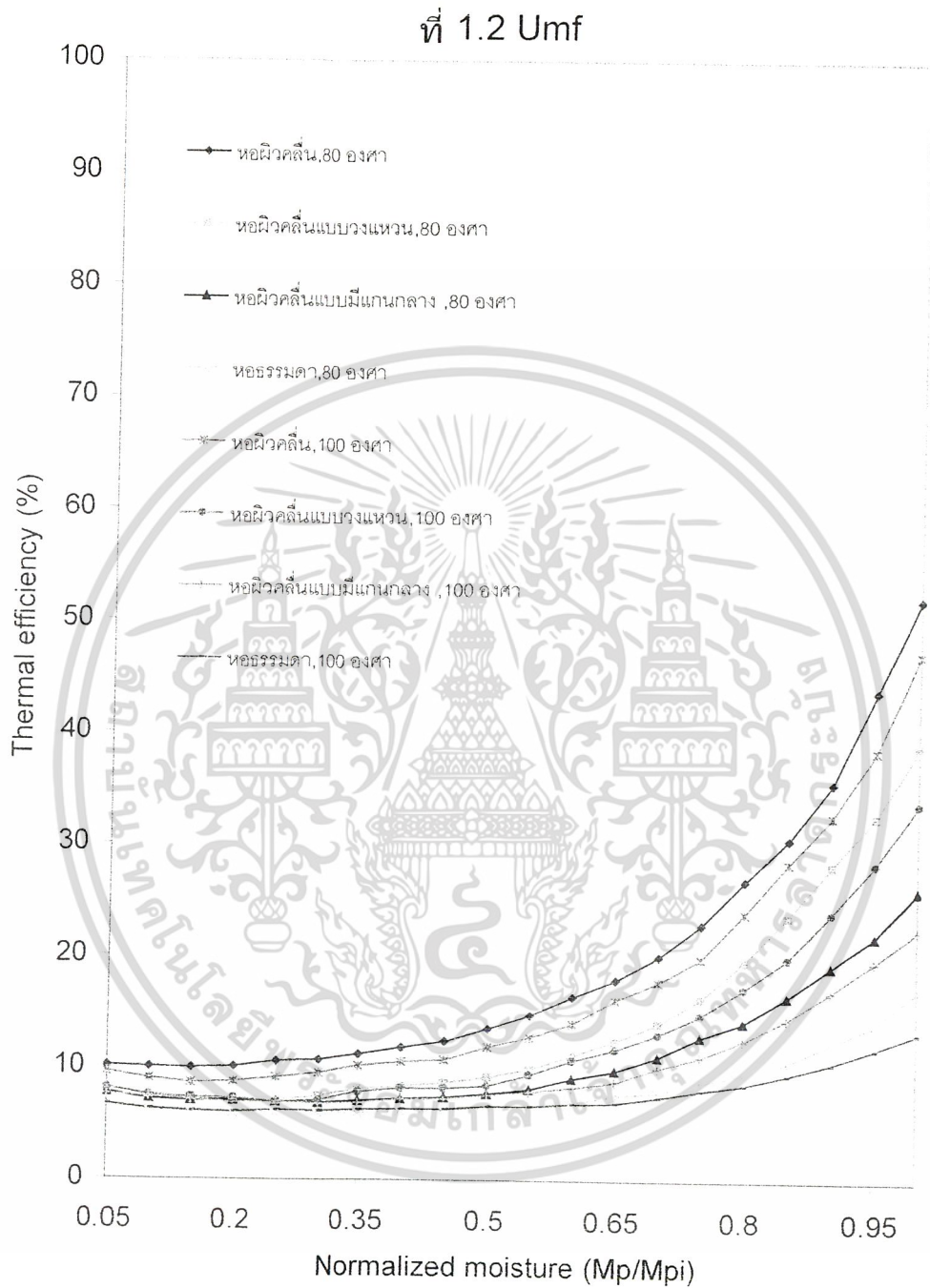
รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าต่างๆ ที่อัตราการไหลจำเพาะ 0.159 kg/s-kg dry coffee (ความชื้นเริ่มต้น 66% มาตรฐานเปียก, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 27°C, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 67%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 Thermal efficiency VS Normalized moisture โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้า หอทดลองและที่อัตราไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.114 kg/s-kg coffee

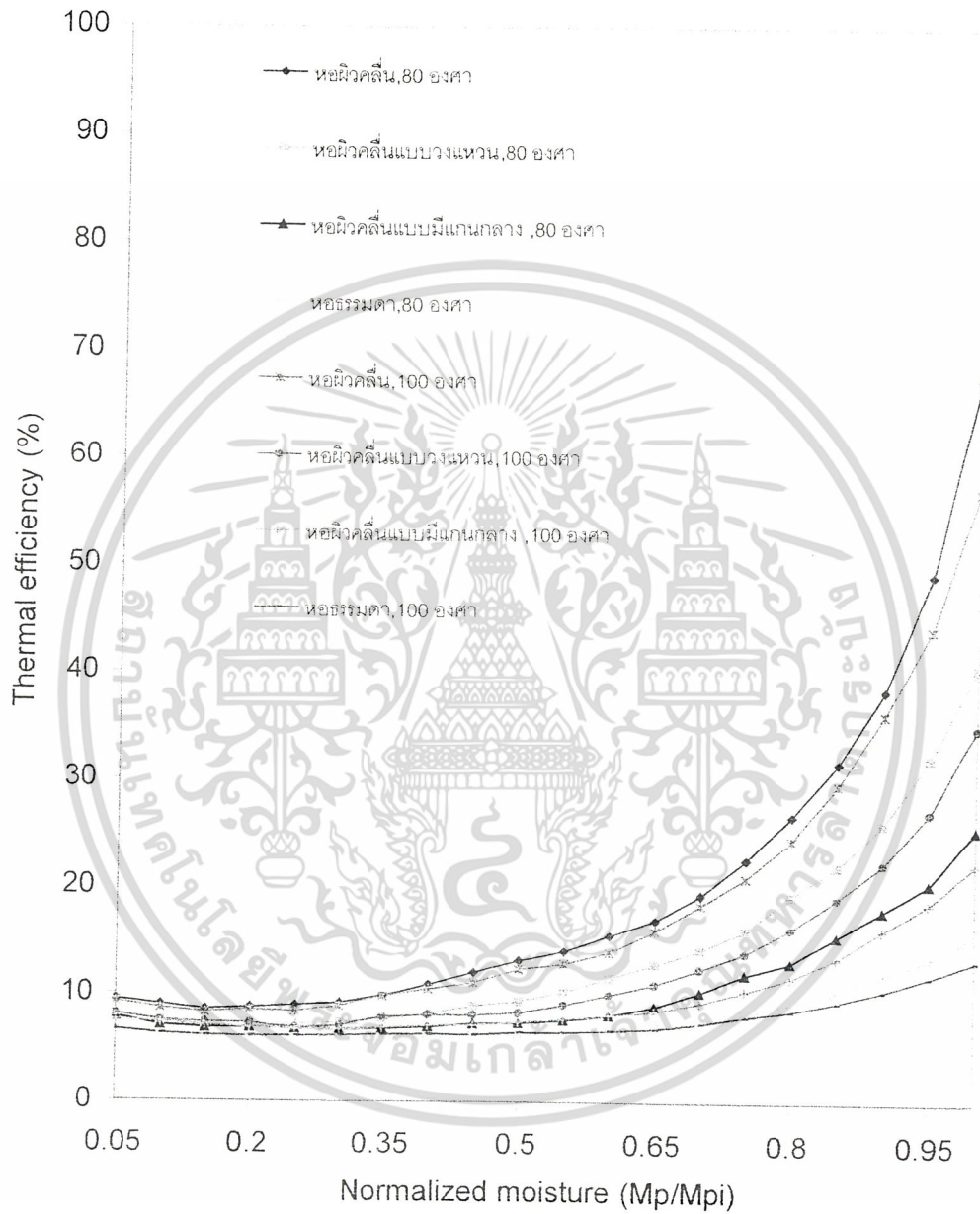
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 Thermal efficiency VS Normalized moisture โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้า หอทดลองและที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.136 kg/s-kg coffee

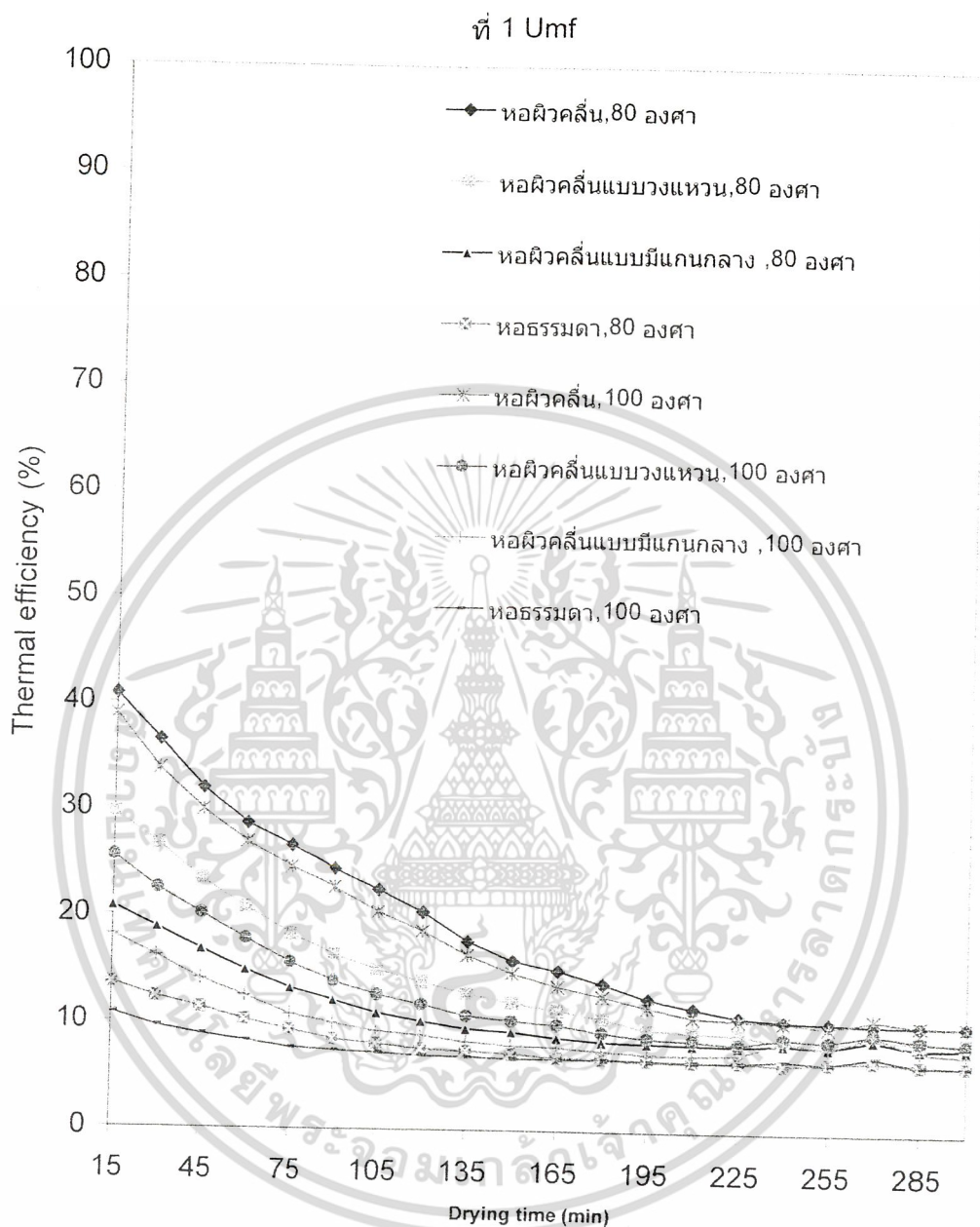
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 1.4 Umf



รูปที่ 8 Thermal efficiency VS Normalized moisture โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้า หอยทดลองและที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.159 kg/s-kg coffee

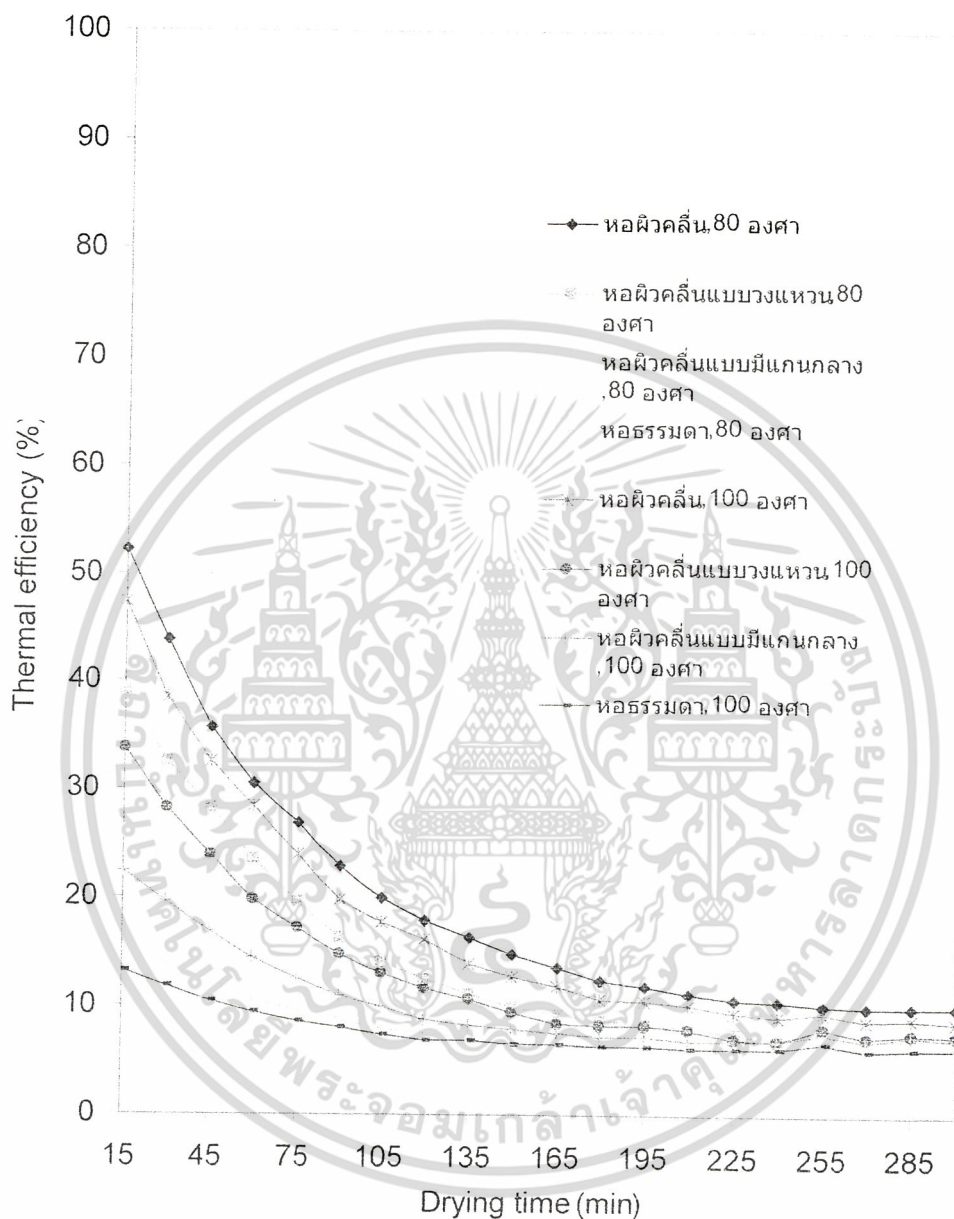
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.9 Thermal efficiency VS Drying rate โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอตลอด และที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.114 kg/s-kg coffee

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

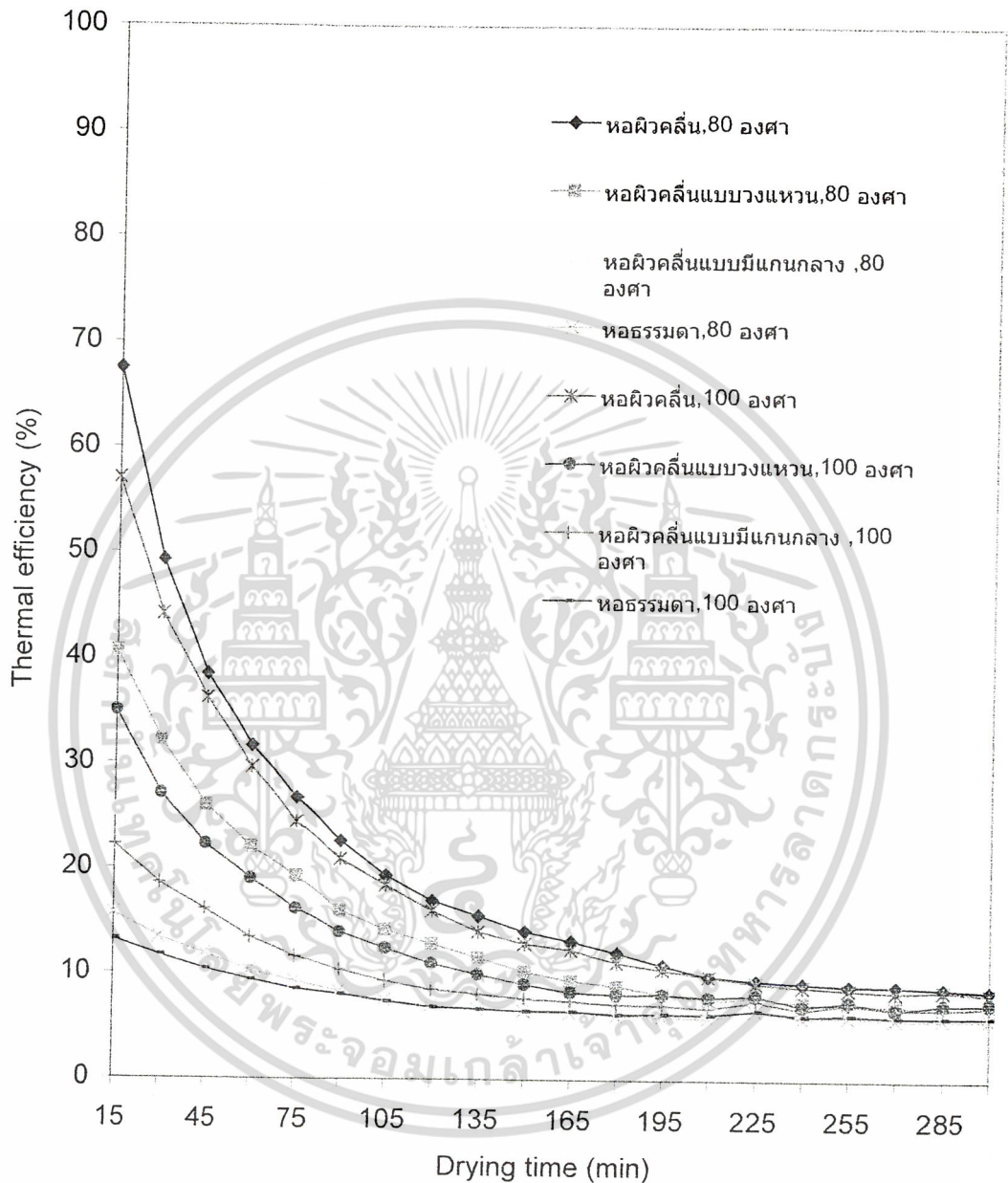
ที่ 1.2 Umf



รูปที่ ก.10 Thermal efficiency VS Drying rate โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง และที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่ 0.136 kg/s-kg coffee

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 1.4 Umf



รูปที่ ก.11 Thermal efficiency VS Drying rate โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง และที่อัตราการไหลเฉพาะของอากาศที่ 0.159 kg/s-kg coffee

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 1. ข้อมูลน้ำหนักของเมล็ดกาแฟในการอบแห้ง

อุณหภูมิในการทดลอง 80 องศาเซลเซียส ที่ 1 Umf เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 52 %
 อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส น้ำหนักกาแฟสด 1000 กรัม

เวลา (นาที)	หอบธรรมดา (กรัม)	หอบผิวคลีน (กรัม)	หอบผิวคลีนวงแหวน (กรัม)	หอบผิวคลีนแบบมี แกนกลาง (กรัม)
0	1000	1000	1000	1000
15	824	809	817	822
30	727	691	695	718
45	685	641	645	672
60	642	606	611	635
75	611	576	584	606
90	596	550	561	585
105	573	536	541	563
120	561	513	523	545
135	543	497	505	527
150	526	482	490	517
165	513	465	476	498
180	494	456	463	484
195	483	445	448	470
210	471	435	439	459
225	458	421	430	451
240	446	413	423	443
255	436	409	415	434
270	432	401	410	427
285	426	395	402	420
300	423	389	396	415

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิในการทดลอง 80 องศาเซลเซียส ที่ 1.2 Umf
อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 52 %
น้ำหนักกาแฟสุก 1000 กรัม

เวลา (นาที)	หอบธรรมดา (กรัม)	หอบผิวคลีน (กรัม)	หอบผิวคลีนวงแหวน (กรัม)	หอบผิวคลีนแบบมี แกนกลาง (กรัม)
0	1000	1000	1000	1000
15	823	807	809	813
30	707	686	689	692
45	645	627	632	641
60	606	589	592	595
75	579	558	563	565
90	556	533	538	543
105	536	516	523	528
120	519	499	504	509
135	502	474	485	487
150	488	469	475	479
165	475	455	461	467
180	463	444	452	458
195	453	432	438	443
210	444	424	429	434
225	435	416	421	427
240	428	415	412	418
255	421	398	404	408
270	415	389	396	402
285	411	387	390	394
300	408	381	384	390

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิในการทดลอง 80 องศาเซลเซียส ที่ 1.4 Umf
อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 52 %
น้ำหนักกาแฟสุทธิ 1000 กรัม

เวลา (นาท)	หอบบรรมดา (กรัม)	หอบบผิวคี่น (กรัม)	หอบบผิวคี่นวงแหวน (กรัม)	หอบบผิวคี่นแบบมี แกนกลาง (กรัม)
0	1000	1000	1000	1000
15	827	825	827	826
30	688	670	676	672
45	621	608	612	610
60	592	592	568	571
75	564	542	544	543
90	548	523	525	526
105	526	495	498	495
120	503	483	485	484
135	491	471	472	473
150	478	452	455	454
165	466	443	446	447
180	449	431	433	435
195	437	422	424	426
210	422	416	417	415
225	419	409	411	412
240	416	402	403	403
255	413	395	396	395
270	408	387	389	389
285	403	381	383	385
300	400	376	378	380

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิในการทดลอง 100 องศาเซลเซียส ที่ 1 Umf
อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 52 %
น้ำหนักกาแฟสุก 1000 กรัม

เวลา (นาที)	หอบบธรรมา (กรัม)	หอบบผิวคลีน (กรัม)	หอบบผิวคลีนวงแหวน (กรัม)	หอบบผิวคลีนแบบมี แกนกลาง (กรัม)
0	1000	1000	1000	1000
15	725	706	719	725
30	639	621	632	637
45	578	571	576	578
60	542	533	558	553
75	513	503	509	510
90	487	475	485	486
105	466	450	458	461
120	446	432	441	443
135	434	413	430	432
150	421	400	416	418
165	411	389	403	405
180	403	381	392	393
195	396	374	384	385
210	390	369	375	379
225	386	365	371	374
240	381	361	369	370
255	379	358	366	367
270	376	357	363	364
285	374	355	360	361
300	372	353	357	359

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิในการทดลอง 100 องศาเซลเซียส ที่ 1.2 Umf

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 52 %

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักกาแฟสุก 1000 กรัม

เวลา (นาที)	หอบบรรมดา (กรัม)	หอบบผิวคี่น (กรัม)	หอบบผิวคี่นวงแหวน (กรัม)	หอบบผิวคี่นแบบมี แกนกลาง (กรัม)
0	1000	1000	1000	1000
15	713	704	711	714
30	621	603	613	619
45	572	544	566	571
60	533	509	531	535
75	517	482	508	511
90	481	461	472	478
105	462	438	446	452
120	444	421	436	441
135	434	402	423	427
150	426	394	411	418
165	415	384	404	409
180	408	380	393	401
195	395	375	387	390
210	389	371	384	387
225	383	367	379	380
240	380	363	372	376
255	376	359	367	369
270	373	356	363	365
285	370	353	358	361
300	367	349	354	358

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิในการทดลอง 1000 องศาเซลเซียส ที่ 1.4 Umf

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 52 %

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักกาแฟสุทธิ 1000 กรัม

เวลา (นาที)	หอบบธรรมา (กรัม)	หอบบผิวคัส (กรัม)	หอบบผิวคัสวงแหวน (กรัม)	หอบบผิวคัสแบบมี แกนกลาง (กรัม)
0	1000	1000	1000	1000
15	702	696	705	704
30	617	591	615	613
45	567	541	562	564
60	532	505	526	528
75	501	479	494	496
90	478	456	468	469
105	457	434	446	448
120	438	416	428	430
135	424	399	413	416
150	412	389	400	404
165	401	376	389	392
180	393	365	381	386
195	385	355	374	378
210	381	351	370	371
225	376	349	363	365
240	373	348	360	360
255	369	347	356	359
270	367	346	354	357
285	365	345	352	355
300	363	345	350	353

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของเบดที่เป็นเมล็ดกาแฟ

1. พฤกษศาสตร์พืชกาแฟ



ชั้น (Class) ของกาแฟ คือ Dicotyledoneae

ชั้นย่อย (Subclass) ของกาแฟ คือ Sympetalae หรือ

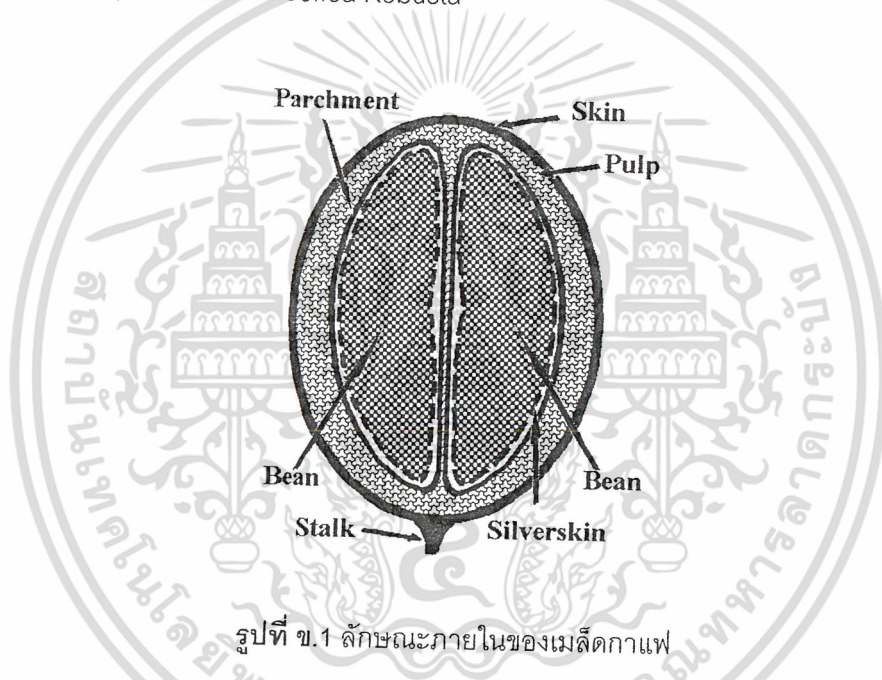
Metachlamydeae

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระบวนการตากแห้งเมล็ดกาแฟโดยวิธีธรรมชาติ (ตากแดด)

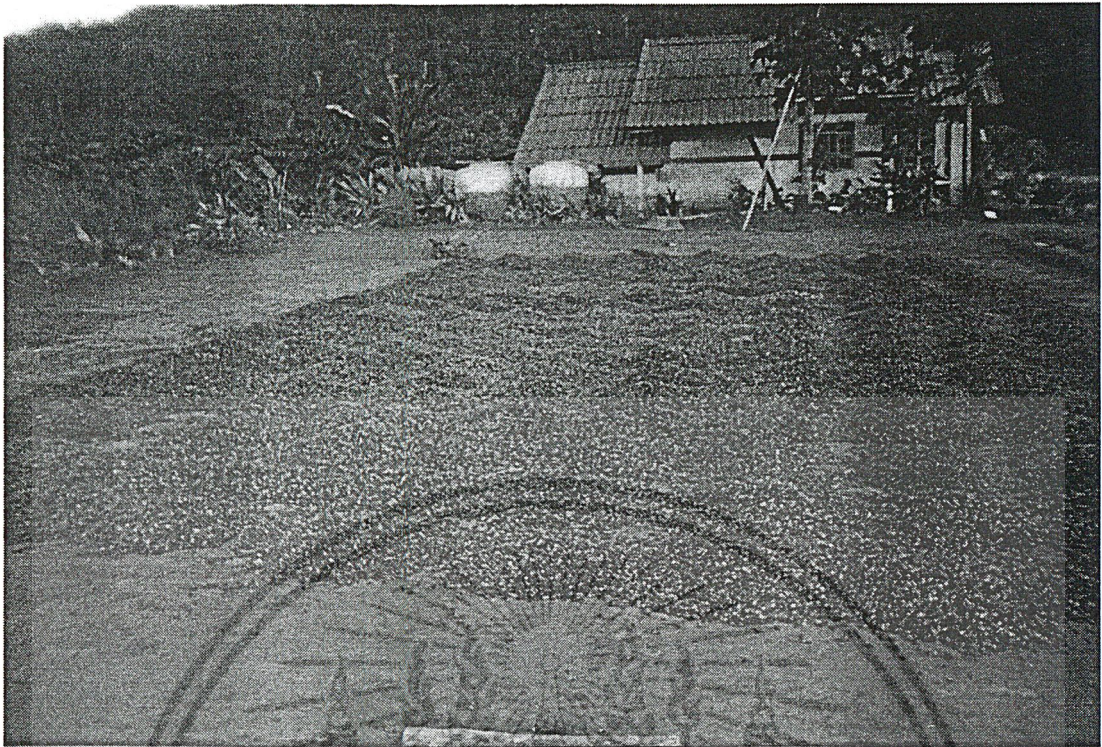


รูปที่ ข.2 ต้นกาแฟ

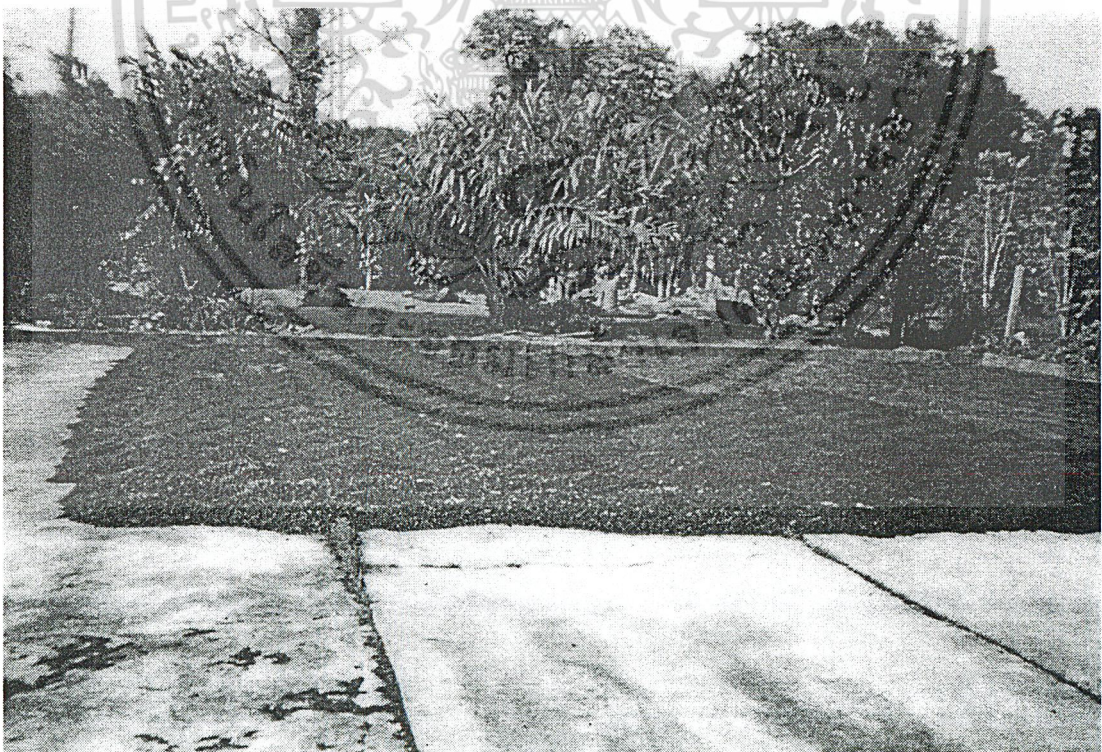


รูปที่ ข.3 เกษตรกรเก็บเมล็ดกาแฟสุกจากต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 เกษตรกรนำเมล็ดกาแฟสดมาตากแห้งบนลานดิน



รูปที่ ข.5 เกษตรกรนำเมล็ดกาแฟสดมาตากแห้งบนลานซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลมเทียบเท่าเมล็ดกาแฟ

ในการทดลองสมมติให้เมล็ดกาแฟเป็นทรงกลม โดยการหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมเทียบเท่าเมล็ดกาแฟทำได้โดยนำเมล็ดกาแฟสดมานับจำนวนเมล็ด แล้วใส่ในกระบอกตวง (Western Germany) ขนาด 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความละเอียด 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วอ่านค่าของเมล็ดกาแฟที่ถูกแทนที่ ในการทดลองจะได้ปริมาตรของเมล็ดกาแฟเท่ากับ 1327 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เมื่อนำไปแทนค่าในสมการของทรงกลม จะได้เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลมเทียบเท่าเมล็ดกาแฟมีค่าเท่ากับ 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 66 % มาตรฐานเปียก

6. สัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเมล็ดกาแฟเมื่อเกิดฟลูอิดไดเซชัน

จาก WEN และ YU ในสมการที่ 3.5 คือ

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

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

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

ดังนั้นค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของเมล็ดกาแฟคือ 2.5 m/s

8. ความเร็วตกอิสระของเมล็ดกาแฟ

จากสมการ 3.10 เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างลงไปจะได้

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

$$d_p^* = 411.1$$

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอาหารบนพื้นฐานของ Fick's law (ต่อ)

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

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	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{1135.7 + 0.048 Ar} - 33.7 \right)$
Baeyens and Geldart	$Ar = 1823 \text{Re}_{mf}^{1.07} + 21.27 \text{Re}_{mf}^2$
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
ไม่ว่ากรณีใดๆ 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	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{25.28^2 + 0.0571 Ar} - 25.28 \right)$
Babu et al.	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{25.25^2 + 0.0651 Ar} - 25.25 \right)$
Richardson and Da St. Jeromino	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{25.7^2 + 0.0365 Ar} - 25.7 \right)$
Doichev and Akhmakov	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(1.08 \times 10^{-3} Ar^{0.947} \right)$
Thonglimp	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{31.6^2 + 0.042 Ar} - 31.6 \right)$
Bourgeois and Grenier	$Re_{mf} = \sqrt{25.46^2 + 0.03824 Ar} - 25.46$
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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้