



การศึกษาเครื่องอบแห้งแบบพ่นลมชนิดออกโดยเทคนิคสเป้าท์เทดเบด
 STUDY OF DRYING OF PADDY BY SPOUTED BED TECHNIQUE



โดย
 นายศักดิ์ชาย พิพัฒน์ผล
 นายสมชาย เลียงรักษา
 นายสมคิด ชันนงเหลื่อม

29 ก.ย. 2541
วัน เดือน ปี.....
เลขทะเบียน..... 038077
เลขเรียกหนังสือ..... T 59097 ค 25 ก.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิศวกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

การศึกษาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาท์เต็ดเบด
(Study of Drying of Paddy by Spouted bed Technique)

โดย

นายศักดิ์ชาย พิพัฒน์ผล

นายสมชัย เลียงรักษา

นายสมคิด ชื่นงเหลื่อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สาทิป รัตนภาสกร

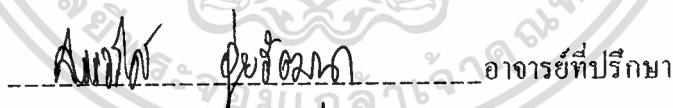
อาจารย์สรรรวิศ อุยวัฒนา

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2539
ภาควิชา วิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง การศึกษาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาท์เดคเบด
ผู้จัดทำ 1. นายศักดิ์ชาย พิพัฒน์ผล
2. นายสมชัย เลียงรักษา
3. นายสมคิด ชื่นงูเหลือม





(อาจารย์สาทิป รัตนสาคร) อาจารย์ที่ปรึกษา



(อาจารย์สรรวริศ อุยวัฒนา) อาจารย์ที่ปรึกษา

การศึกษาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาท์เตคเบด

นายศักดิ์ชาย พิพัฒน์ผล

นายสมชัย เลียงรักษา

นายสมคิด ชื่นงูเหลือม

อาจารย์สาทิป รัตนภาสกร อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สรรวริศ อยู่วัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งชนิดสเปาท์เตคเบดแบบมีท่อกราฟท์ ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้น มีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วน ดังนี้ ถังอบแห้ง ,พัดลม , เครื่องให้ความร้อน และ มอเตอร์ ถังอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร สูง 1 เมตร และมีท่อกราฟท์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร อยู่ภายใน

การทดสอบผลของปริมาณและอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้อบแห้งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งและคุณภาพข้าวโดยปริมาณลมร้อนที่ใช้มี 3 ระดับ คือ 5 เมตร/วินาที ,5.5 เมตร/วินาทีและ6.0 เมตร/วินาที และปริมาณอุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 80°C , 100°C และ120°C จากการทดลองพบว่าปริมาณและอุณหภูมิของลมร้อนที่เหมาะสมที่สุด คือที่ 5 เมตร/วินาที และ 100°C ตามลำดับคุณภาพการสี 87.7 %

Study of Drying of Paddy by Spouted bed Technique

Sakchai Pipatpon

Somchai Liangraksa

Somkid Chunnguleum

Satip Ratanapassakorn Advisor

Sanwarith Auiwattana Advisor

1996

Abstract

A spouted bed dryer with draft tube was designed and fabricated. The dryer consisted of 4 main parts: cylindrical bin, fan, heater and motor. The bin had 25 cm. dia. and 1 m. high with 10 cm. dia. draft tube being inside.

The test of air flow rates and air temperatures were conducted to obtain the best of drying and milling quality. The 3 levels of air flow rates were 5.0 m/s, 5.5 m/s and 6.0 m/s and 3 levels of air temperatures were 80 °C, 100 °C and 120 °C. The experiment shown that the best air flow rate and air temperature were 5.0 m/s and 100 °C respectively. At this combination, the milling quality was 87.8%.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูปภาพ	ง
สัญลักษณ์	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว	4
2.2 ความชื้นของเมล็ด	6
2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง	10
2.4 สเปาท์เตคเบด	17
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	39
3.1 การออกแบบอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying แบบมี Draft Tube	39
3.2 อุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying	46
3.3 วิธีการทดลอง	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	52
4.1 ลักษณะของการเกิดสเปาท์เตคเบดจากอุปกรณ์ทดลอง	52
4.2 ผลการทดลอง	52
4.3 ผลของอุณหภูมิต่อการอบแห้ง	54
4.4 ผลของความเร็วลมต่อการอบแห้ง	58
4.5 คุณภาพของข้าวกับการอบแห้ง	61
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	63
5.1 สรุปผลการทดลอง	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่จะทำการศึกษาต่อไป	64
ภาคผนวก ก	66
ภาคผนวก ข	70
ภาคผนวก ค	72
กิตติกรรมประกาศ	74
เอกสารอ้างอิง	75



สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ (% มาตรฐานเปียก) ของเมล็ดซึ่งสมมูลกับระดับต่างๆ ของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิ 25 °C	7
ตารางที่ 2.2	การประยุกต์ใช้งานของวิธีการอบแห้ง โดยเทคนิคสเปาท์เดคเบค	17
ตารางที่ 2.3	ผลการทดลองที่สนับสนุนสมการ 4.1	24
ตารางที่ 3.1	แสดงความสัมพันธ์ของความสูงของระดับของเหลวในบารอมิเตอร์กับความเร็วลม	48
ตารางที่ 4.1	ผลการทดลองที่ความเร็วลม 5.0 ม./วินาที	52
ตารางที่ 4.2	ผลการทดลองที่ความเร็วลม 5.5 ม./วินาที	53
ตารางที่ 4.3	ผลการทดลองที่ความเร็วลม 6.0 ม./วินาที	54
ตารางที่ ก-1	ผลการทดลองการวัดความชื้นที่เวลาต่างๆ ในขณะอบแห้ง	66
ตารางที่ ก-2	ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดที่เวลาต่างๆ ในการอบแห้ง	67
ตารางที่ ก-3	ผลการทดลองการวัดความชื้นเพื่อปรับค่าของเครื่องวัดความชื้นให้ถูกต้อง	68
ตารางที่ ก-4	คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ	69

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสมดุลระหว่างความชื้นของเมล็ดกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 30°C	8
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุกับเวลา	10
รูปที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	12
รูปที่ 2.4 อัตราส่วนความชื้นสมดุลสำหรับวัสดุประเภทต่างๆ (อุณหภูมิ 25°C)	13
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ความเร็วของการอบแห้งที่ลดลงกับอัตราส่วนความชื้น	15
รูปที่ 2.6 รายละเอียดการเกิดสเปาท์เตคเบค	19
รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมของความดันตกกับปริมาตรการไหลของของไหล สำหรับสเปาท์เตคเบค	21
รูปที่ 2.8 การกระจายของก๊าซในสเปาท์เตคเบค	27
รูปที่ 2.9 ความเร็วของอากาศที่ผ่านตรงสเปาท์และบริเวณรอบๆ	27
รูปที่ 2.10 แนวความเร็วตามแนวรัศมีในสเปาท์เตคเบค	28
รูปที่ 2.11 ความเร็วเม็ดของแข็งในสเปาท์	29
รูปที่ 2.12 สัดส่วนช่องว่างของสเปาท์กับความสูงเบค	30
รูปที่ 2.13 ภาพตัดขวางของ Spouted bed predryer	31
รูปที่ 2.14 การไหลวนของแก๊สในเครื่องอบแห้ง	32
รูปที่ 2.15 ส่วนที่มีการปะทะของอากาศของเครื่องอบแห้งแบบสเปาท์เตคเบคแบบมีท่อกราฟท์	33
รูปที่ 2.16 เครื่องอบแห้งแบบสเปาท์เตคเบคแบบอากาศเข้าและมีชุดสกรูลำเลียงที่ศูนย์กลาง	34

สารบัญรูปถ่าย (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.17	รูปแบบการไหลวนของเมล็ด	36
รูปที่ 2.18	การกระจายของอนุภาคบนสายพานลำเลียง	36
รูปที่ 2.19	การติดตั้งของการทดลองสำหรับการวัดการกระจายเวลาในการไหลวนของเมล็ด	37
รูปที่ 2.20	การกระจายของเวลาของเมล็ด	38
รูปที่ 3.1	ขนาดของอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying	41
รูปที่ 3.2	การวัดความเร็วของลมด้วยแผ่น Orifice	42
รูปที่ 3.3	ความสัมพันธ์ของ C กับ A_0/A_1	43
รูปที่ 3.4	ขนาดของแผ่น Orifice ที่ใช้ทดลอง	44
รูปที่ 3.5	อุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying (Drawing)	45
รูปที่ 3.6	อุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying (รูปถ่าย)	46
รูปที่ 3.7	การเกิดเบคที่รุนแรงในอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying	47
รูปที่ 3.8	การเกิดเบคที่ไม่รุนแรงในอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying	47
รูปที่ 3.9	พัดลมและ Heater	48
รูปที่ 3.10	ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความชื้นที่อ่านได้จากเครื่องวัดความชื้นกับค่าความชื้นที่ได้จากการทดลอง	49
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นที่ความเร็วลม 5.0 ม./วินาที	55
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์ที่ความเร็วลม 5.0 ม./วินาที	55
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นที่ความเร็วลม 5.5 ม./วินาที	56

ตารางรูปถ่าย (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์ที่ความเร็วลม 5.5 ม./วินาที	56
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความชื้นที่ความเร็วลม 6.0 ม./วินาที	57
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์ที่ความเร็วลม 6.0 ม./วินาที	57
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C	58
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 80°C	59
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C	59
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 100°C	60
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C	60
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 120°C	61
รูปที่ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ A_v/A_1	70
รูปที่ ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงจากการทดลองกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดความชื้น	71
รูปที่ ค-1 เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก	72
รูปที่ ค-2 เครื่องขัดขาวข้าวกล้อง	73
รูปที่ ค-3 การทดลองอบเพื่อปรับค่าของเครื่องวัดความชื้นให้ถูกต้อง	73

สัญลักษณ์

A	=	พื้นที่ , (m ²)
A _o	=	พื้นที่ตัดขวางของรูที่แผ่น Orifice , (m ²)
A ₁	=	พื้นที่ตัดขวางของท่อลม , (m ²)
a _s	=	รัศมีของสเปาท์ , (m)
C	=	ค่าคงที่ของแผ่น Orifice
C _p	=	ความร้อนจำเพาะของวัสดุแข็ง , (Kcal/Kg °C)
D _o	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ Orific , (m)
D ₁	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลม , (m)
d _s	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของสเปาท์ , (m)
F	=	ความชื้นอิสระ
F _o	=	อัตราส่วนความชื้นวิกฤต
g _o	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก , (m/s ²)
H _w	=	ความชื้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิ t _w , (Kg steam/Kg dry air)
H _{sm}	=	ความสูงต่ำสุดของเบด , (m)
h _o	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์ม , (Kcal/h. m ²)
K	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทรวม , (Kg/h. m ² Δh)
L	=	ความยาวของท่อกราฟท์ , (m)
m	=	มวลของข้าวเปลือก , (Kg)
P	=	ความดัน , (Pa)
P _i	=	ความดันไออิ่มตัว , (Pa)
Q	=	อัตราการไหลของของไหล , (m ³ /s)
R	=	อัตราการอบแห้ง , (Kg water/h. m ²)
R _o	=	ความเร็วของการอบแห้งที่คงที่ , (Kg/h. m ²)
R'	=	ความแตกต่างของระดับของเหลวในบารอมิเตอร์ , (m)
S _o	=	ความถ่วงจำเพาะของของเหลวในบารอมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

S_1	=	ความถี่จําเพาะของของไหลในท่อ
t	=	อุณหภูมิ , (°C)
t_w	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียก , (°C)
U_{ms}	=	ความเร็วต่ำสุดของสเป้าท์ , (m/s)
U_{mf}	=	ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดโคเบค , (m/s)
V_1	=	ความเร็วของของไหลในท่อ , (m/s)
W	=	มวลของวัสดุแห้ง , (Kg)
W_s	=	ความเร็วของการไหลของอนุภาค , (m/s)
W_o	=	อัตราส่วนความชื้นวิกฤต
W_d	=	อัตราส่วนความชื้น
W_c	=	อัตราส่วนความชื้นสมดุล
ρ_f	=	ความหนาแน่นของอากาศ , (Kg/m ³)
ρ_p	=	ความหนาแน่นของข้าวเปลือก , (Kg/m ³)
ρ_s	=	ความหนาแน่นของอนุภาค , (Kg/m ³)
θ	=	มุมของทรงกรวย , (degree)
Γ	=	เวลาในการไหลวนของอนุภาค , (second)
$\bar{\Gamma}$	=	เวลาเฉลี่ยในการไหลวนของอนุภาค , (second)
λ_w	=	ความร้อนแฝงของการระเหย , (Kcal/Kg)

บทที่ 1

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ผลิตข้าวเป็นสินค้าออกที่สำคัญมีรายได้เข้าประเทศเป็นอันดับหนึ่งมาช้านาน ปัญหาที่ประสบอยู่คือ เรื่องคุณภาพของข้าวยังไม่ได้มาตรฐาน และภาวะตลาดข้าวยังไม่แน่นอน อีกทั้งชาวนาไทยส่วนใหญ่ยังขาดความรู้ ด้านการปฏิบัติก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้ได้ข้าวเปลือกเกรดต่ำ

ในสถานการณ์ที่มีการแข่งขันกันอย่างรุนแรงเช่นนี้ ประเทศไทยในฐานะประเทศที่มีการส่งออกข้าวเป็นอันดับหนึ่งของโลก ย่อมได้รับผลกระทบอย่างแน่นอน ดังนั้นประเทศไทยควรจะต้องเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตข้าวในปัจจุบันให้สูงขึ้น เพื่อลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำที่สุด จะได้แข่งขันทางด้านราคาได้ แต่การแข่งขันโดยยี่ราคาเป็นหลักจะมีคู่แข่งมาก ดังนั้น ทางแก้ไขก็คือพยายามยกระดับคุณภาพให้สูงขึ้น วิธีการหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของข้าวก็คือ การลดความชื้นของข้าวหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อให้เหมาะกับการเก็บรักษา (เมธีจมาศ, 2526)

ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงเมล็ดจะอ่อนนุ่ม เมื่อนำไปสีเป็นข้าวสารจะหักป่นได้ง่าย โดยทั่วไปข้าวเปลือกที่เหมาะสมสำหรับการนำไปสี ควรมีความชื้นอยู่ระหว่าง 14-15% ในการซื้อขายจึงมีการตัดน้ำหนักข้าวที่มีความชื้นสูงกว่านี้ ข้าวนาปีต้นฤดูจะมีความชื้นประมาณ 16-30% ส่วนข้าวนาปรังจะมีความชื้นสูงถึง 23-30% การที่จะรอให้ความชื้นลดลง จนกระทั่งสามารถนำมาสีด้วยวิธีปกติได้ จะใช้เวลานานมากซึ่งข้าวจะขึ้นราเสียก่อน จึงไม่สมควรที่จะทำเช่นนั้น (อัมมาร, 2533)

กรรมวิธีในการลดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกมีหลายวิธี อาทิเช่น ถ้าเป็นวิธีแบบชาวบ้านจะใช้การตากแดดในลานกว้างๆ วิธีนี้มีข้อเสียคือ ขึ้นอยู่กับลักษณะลมฟ้าอากาศ ผลผลิตมักอาจเกิดความเสียหายจากลม ฝน หรือ ถูกรบกวนจากแมลง นก และหนู นอกจากนี้ยังไม่สามารถควบคุมสถานการณ์ตากแห้งและความชื้นในผลิตภัณฑ์ได้ อีกทั้งค่าใช้จ่ายด้านแรงงานสูง ความจำเป็นในการใช้เครื่องอบจึงมีสูงขึ้น การอบแห้งอย่างเหมาะสมจะช่วยถนอมรักษา ผลผลิตแก่จากการเน่าเสียจากจุลินทรีย์ ลดปริมาณและน้ำหนัก ทำให้ลดต้นทุนในการเก็บรักษา และการขนส่ง อีกทั้งช่วยให้อายุการผลิติดีขึ้น ในกรณีของเมล็ดพืช เกษตรกรสามารถที่จะเก็บเกี่ยวเมื่อพืชยังมีปริมาณความชื้นสูงอยู่ ทำให้ลดการสูญเสียของเมล็ดพืช อันเนื่องจากการร่วงหล่นระหว่างเก็บเกี่ยว แต่เครื่องอบโดยส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิในการอบต่ำ จึงทำให้เวลาในการอบแห้งนาน ดัง

นั่นวิธีการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลาในการอบสั้นลง คือการใช้อุณหภูมิและความเร็วลมสูง แบบวิธีสเปาท์เดคมเบค จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

ดังนั้นการศึกษาวิธีการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาท์เดคมเบค จะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะพัฒนาวิธีการอบแห้ง ข้าวเปลือกอีกวิธีที่ควรได้มีการศึกษาต่อไป



1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

วัตถุประสงค์ทั่วไปเพื่อศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกและคุณภาพการสีของข้าวเปลือกที่ได้ โดยวิธีการอบแห้งแบบ Spouted Bed Technique แบบมี Draft Tube โดยมีวัตถุประสงค์หลักของโครงการมีดังนี้

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งโดยวิธี Spouted Bed Technique โดยมีปัจจัยดังนี้

1.1 อุณหภูมิลมร้อนในช่วง 80°C , 100°C , 120°C

1.2 ความเร็วลม 5 ม./วินาที , 5.5 ม./วินาที , 6 ม./วินาที

2. เพื่อศึกษาผลกระทบของการอบแห้งโดยวิธี Spouted Bed Technique ที่มีผลต่อคุณภาพของการสีข้าว



บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว

ข้าวเป็นพืชสกุลเดียวกับหญ้า โดยธรรมชาติแล้ว ถ้าพื้นดินอุดมสมบูรณ์ ภูมิอากาศพอเหมาะ ข้าวก็จะเจริญงอกงามให้ผลผลิตดีมาก โดยที่ไม่ต้องทำอะไรเลย ถ้าหากไม่มีโรค แมลงหรือวัชพืชรบกวน ซึ่งอาจจะแบ่งแยกข้าวเพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณา คัดเลือกข้าวเปลือกไปแปรสภาพตามความต้องการของตลาด ได้ ดังนี้คือ (เบ็ญจมาศ, 2526)

1. ข้าวเปลือกชั้นพิเศษ คือ ข้าวเปลือกที่นำมาแปรสภาพแล้วได้ข้าวสารเจ้าชนิด 100%
2. ข้าวเปลือกชั้น 1 คือ ข้าวเปลือกที่นำมาแปรสภาพแล้วได้ข้าวสารเจ้าชนิด 5%
3. ข้าวเปลือกชั้น 2 คือ ข้าวเปลือกที่นำมาแปรสภาพแล้วได้ข้าวสารเจ้าชนิด 10-15%
4. ข้าวเปลือกชั้น 3 คือ ข้าวเปลือกที่นำมาแปรสภาพแล้วได้ข้าวสารเจ้าชนิด 25%
5. ข้าวเปลือกคุณภาพต่ำ คือ ข้าวเปลือกที่นำมาแปรสภาพแล้วได้คุณภาพต่ำกว่า 25% และข้าวเปลือกชนิดนี้มักจะนิยมนำเอาไปทำเป็นข้าวหนึ่ง

เนื่องจากข้าวเปลือกยังไม่สามารถที่จะนำไปบริโภคได้ ยังคงต้องไปแปรสภาพโดยผ่านกระบวนการสีข้าว กระบวนการขัดขาว ฯ ซึ่งข้าวสารเป็นผลผลิตที่ได้จากการแปรสภาพของข้าวเปลือกแล้ว และในการที่ข้าวเปลือกผ่านกระบวนการสีข้าวและได้เป็นข้าวสารออกมานั้น ข้าวสารที่ได้จากการสีนั้นอาจมีคุณภาพไม่ดี จึงได้มีการตั้งมาตรฐานกำหนดคุณภาพข้าว โดยได้มีการประกาศเป็น ประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่องกำหนดมาตรฐานข้าว ดังนั้นถ้าต้องการให้การสีข้าวเปลือกแล้วได้ข้าวสารที่มีคุณภาพดี มีเมล็ดขาวสมบูรณ์ ก็จำเป็นต้องคัดเลือกข้าวเปลือกที่ดีมีความแข็งแรงเพื่อนำไปสีแปรสภาพ

ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวเป็นผลจากการสีข้าว ดังนั้นข้าวเปลือกที่มีคุณภาพการสีที่ดีสีแล้วได้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวสูงก็จะมีราคาสูงด้วย คุณภาพการสีข้าวเปลือกจะเปลี่ยนแปลงอย่างกว้างขวางตามลักษณะของพันธุ์ สภาพแวดล้อมและการดูแลปฏิบัติรักษาทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว โดยปกติพันธุ์ข้าวที่ข้าวที่มีเมล็ดขาวหรืออ่อนและเป็นท้องไข่มากจะปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวต่ำ พันธุ์ข้าวที่มีขนาดเมล็ดค่อนข้างยาวเรียวยาวและใสจะให้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวสูงที่สุด เมล็ดข้าวที่มีรูปร่างผิดปกติ ปลายแหลมมาก มี EMBRYO ใหญ่เกินไป จะหักได้ง่ายเมื่อผ่านการขัดสี พันธุ์ข้าวที่มีเปลือกบางหรือมีปริมาณเปลือกน้อย เมื่อขัดสีแล้วจะ

ให้ปริมาณข้าวสารสูง ข้าวต่างชนิดกัน ซึ่งมีสภาพการปลูกแตกต่างกัน คุณภาพการสีก็จะแตกต่างกันไปด้วย พันธุ์ข้าวขึ้นน้ำซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นท้องไร่มากกว่าข้าวนาค้ำและเมื่อรวงข้าวแก่มักจะโน้มรวงลง ทำให้รวงข้าวบางส่วนแช่อยู่ในน้ำ เมื่อนำไปตากแห้ง จะมีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักสูง และมีปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและคันข้าวต่ำกว่าข้าวนาค้ำ การเก็บเกี่ยวขณะที่เมล็ดยังไม่แก่เต็มที่ ความชื้นในเมล็ดจะสูง หรือการเก็บเกี่ยวเมื่อเมล็ดแห้งเกินไป ความชื้นในเมล็ดต่ำ จะทำให้ปริมาณข้าวหักสูง คุณภาพการสีต่ำ จากการทดลองพบว่า พันธุ์ข้าวส่วนใหญ่จะให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด, คันข้าว และเปอร์เซ็นต์ข้าวสารสูง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวหลังข้าวออกดอก 30-40 วันหรือขณะเมล็ดข้าวมีความชื้น 24-18% นอกจากนี้วิธีการปฏิบัติรักษาอื่นๆ เช่น การระบายน้ำ การตาก การนวด การเก็บรักษา สภาพขุ้งฉาง ตลอดจนสภาพการสีก็มีผลกระทบต่อคุณภาพการสีเช่นกัน การตากข้าวมีความสำคัญคือ ต้องตากให้ข้าวแห้งสม่ำเสมอ ไม่ตากให้แห้งเกินไปจนข้าวเปราะซึ่งเมื่อสีแล้วข้าวจะหักมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพการตากข้าวของชาวนาด้วย ปกติหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วชาวนาไทยมักจะกองรวงข้าวซ้อนๆกันบนคันนาหรือตอซัง เป็นเหตุให้ข้าวทั้งกองได้รับแสงแดดไม่เท่ากันหรือไม่ทั่วถึง สภาพเช่นนี้หลายวัน เมล็ดข้าวตอนบนจะแห้งส่วนตอนล่างเปียกหรือชื้น เมื่อนวดรวมกันเมล็ดข้าวเหล่านี้จะปนกันหมดลำบากต่อการทำให้แห้งอย่างสม่ำเสมอ เมื่อนำไปสีข้าวจะหักมาก คุณภาพการสีต่ำ นอกจากนี้สภาพขุ้งฉางที่เก็บรักษาข้าวเปลือกต้องดี อากาศถ่ายเทสะดวก ไม่มีแมลงและเชื้อราทำลายเมล็ดข้าว ทำให้เมล็ดข้าวคงสภาพปกติมีคุณภาพคือใช้ได้ นาน คุณภาพการสีก็ดีด้วย ความชื้นในเมล็ดก่อนเก็บรักษาต้องต่ำ (ไม่เกิน 14%) เพื่อป้องกันเชื้อราที่จะเกิดขึ้นทำลายเมล็ดขณะเก็บรักษา ในขณะเดียวกันเครื่องสีข้าวก็ต้องปรับให้พอเหมาะกับขนาดของเมล็ดข้าวเปลือกที่จะสีด้วย จึงจะได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและคันข้าวสูง แต่ทั้งนี้ต้องอยู่กับคุณภาพของเมล็ดข้าวเปลือกดังที่ได้กล่าวมาแล้วด้วย

2.2 ความชื้นของเมล็ด

เมล็ดพืชที่เห็นโดยทั่วไปไม่ได้อยู่ในสภาพที่แห้งอย่างสมบูรณ์ เมล็ดจะมีความชื้นอยู่มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ความชื้นของเมล็ดนี้มีความสำคัญต่อการเก็บรักษาอย่างมาก เพราะการเก็บรักษาเมล็ดที่มีความชื้นสูง จะทำให้แมลงและเชื้อราตลอดจนแบคทีเรียเจริญเติบโต และขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เมล็ดเสื่อมคุณภาพลง นับว่าเป็นการสูญเสียทั้งเมล็ดพันธุ์และอาหาร

2.2.1 ความชื้นภายในเมล็ด

ความชื้นที่อยู่ภายในเมล็ดแบ่งออกได้ 3 รูป ดังต่อไปนี้ (เบ็ญจมาศ ,2526)

1. ความชื้นซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ (Bound water) ดังนั้นความชื้นชนิดนี้จึงมีความสำคัญต่อ metabolism ของเมล็ด ถ้าเมล็ดสูญเสียความชื้นดังกล่าวอาจทำให้เมล็ดตายได้ และเป็นความชื้นที่เป็นอิสระจากสิ่งแวดล้อมนั่นคือไม่ว่าสิ่งแวดล้อมจะมีความชื้นสัมพัทธ์ (relative-humidity) ของอากาศเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตามจะไม่มีผลต่อปริมาณของ bound water

2. ความชื้นซึ่งอยู่ในโครงสร้างของเซลล์ (Adsorbed water) ถูกยึดไว้ด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต

3. ความชื้นซึ่งอยู่ตามช่องว่างต่างๆภายในเซลล์ (Absorbed water) และถูกยึดไว้อย่างหลวมๆ ความชื้นชนิดนี้อาจอยู่ในรูปของของเหลวหรือไอ และสามารถแลกเปลี่ยนกับความชื้นของอากาศได้ นั่นคือปริมาณของความชื้นซึ่งอยู่ตามช่องว่างต่างๆ ภายในเซลล์ จะเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ และลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ลดลง

2.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและความชื้นของเมล็ด

ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) หมายถึง สัดส่วนระหว่างความดันไอของไอน้ำในอากาศกับความดันไอของไอน้ำในอากาศที่อิ่มตัว ที่อุณหภูมิและความดันอากาศ (atmospheric pressure) เดียวกัน ค่าของความชื้นสัมพัทธ์นี้มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ช่วงของความชื้นสัมพัทธ์จะเริ่มตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในระหว่างการเก็บรักษาหรือภายหลังจากการตากเมล็ด จะทำให้ความชื้นของเมล็ดนั้นอาจเปลี่ยนแปลงได้อีก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ นั่นคือถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในขณะใดขณะหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ความชื้นของเมล็ดภายในสภาพอากาศดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้ามความชื้นของเมล็ดจะลดลงถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในขณะนั้นมีค่าลดลงไปจากเดิม คุณสมบัติดังกล่าวของเมล็ดเรียกว่า

hygroscopic จุดที่ความชื้นของเมล็ด ไม่เพิ่มขึ้นและไม่ลดลงนี้เรียกว่า ความชื้นของเมล็ดสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ที่จุดสมดุลนี้สามารถแสดงให้เห็นดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้น (% มาตรฐานเปียก) ของเมล็ดซึ่งสมดุลกับระดับต่างๆ ของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิ 25 °C (เบ็ญจมาศ ,2526)

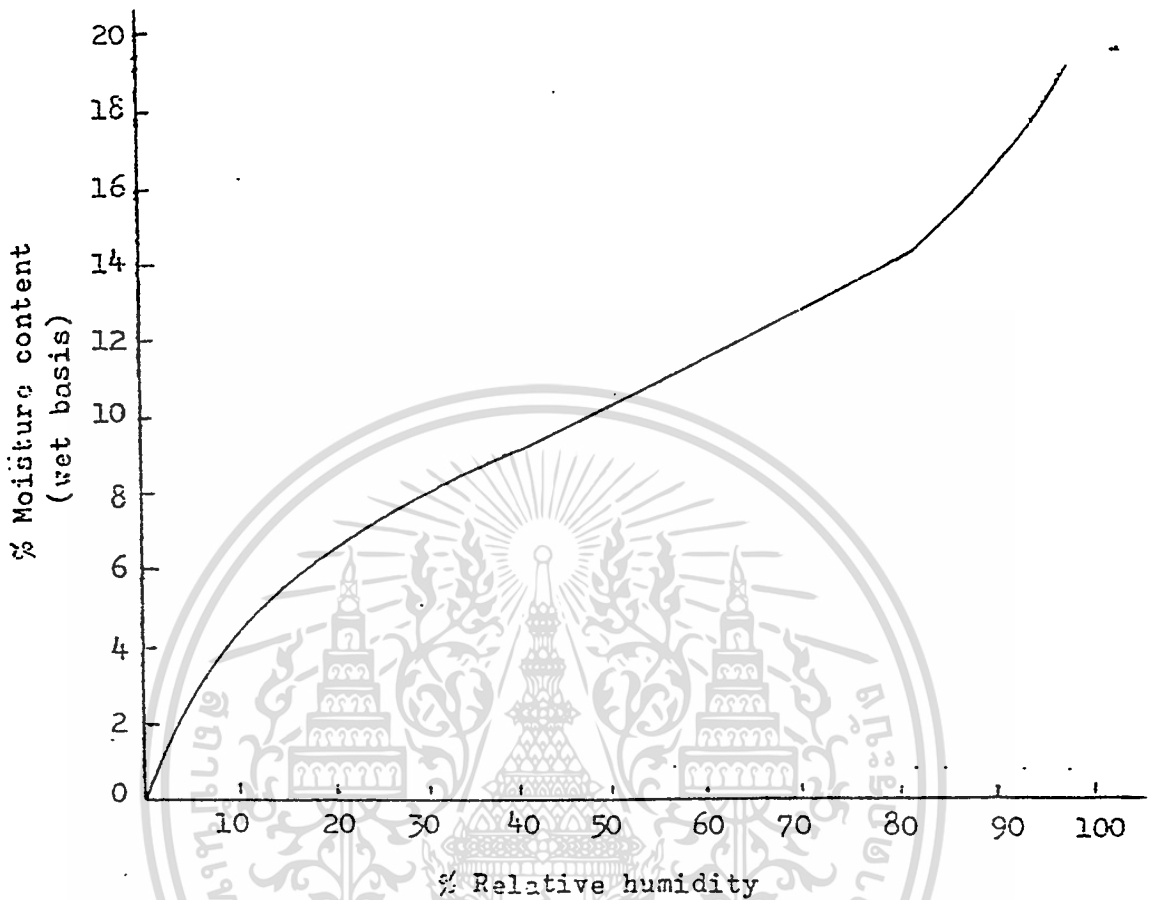
ชนิดพืช	% ความชื้นสัมพัทธ์									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ข้าวเปลือก	5.2	7.6	8.7	9.9	10.9	12.2	13.5	15.7	20.6	-
ข้าวโพด	5.1	7.0	8.3	9.8	11.2	12.9	14.0	15.6	19.6	23.8
ข้าวฟ่าง	4.4	7.3	8.6	9.8	11.0	12.0	13.8	15.8	18.8	21.9
ถั่วเหลือง	-	5.5	6.5	7.1	8.0	9.3	11.5	14.8	18.8	-
เมล็ดป่าน	3.3	4.9	5.6	6.1	6.8	7.9	9.3	11.4	15.2	21.4
ข้าวสาลี	5.1	7.6	9.0	10.3	11.5	12.6	12.8	14.4	18.1	23.6
ข้าวสาลี	5.8	7.6	9.1	10.7	11.6	13.0	14.5	16.8	20.6	-

2.2.3 กลไกการเคลื่อนที่ความชื้นของเมล็ด

สิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการเคลื่อนที่ความชื้นของเมล็ดมี 2 ประการ

1. ภาวะสมดุลระหว่างความชื้นของเมล็ดกับสภาพของอากาศ (อุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์) ความชื้นของเมล็ดมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับสภาพอากาศ ความชื้นของเมล็ดจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งจะสามารถพิจารณาได้จากจุดสมดุลระหว่างความชื้นของเมล็ดกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิในขณะนั้น ความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 2.1

2. การเคลื่อนที่ของความชื้น ชีววัสดุที่มีความชื้นจะมีความดันไอ (vapor pressure) อยู่ด้วย ผลของความแตกต่างระหว่างความดันไอของชีววัสดุกับของอากาศก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของความชื้น ความชื้นจะเคลื่อนที่จากที่ที่มีความดันไอสูง ไปยังที่ที่มีความดันไอต่ำกว่า ลักษณะเช่นนี้เป็นลักษณะเดียวกับกับการไหลของความร้อน ความร้อนจะไหลจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เช่นถ้าเอามือจับวัตถุซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิร่างกาย ครั้งแรกที่สัมผัสซึ่งจะรู้สึกว่วัตถุนั้นร้อน เมื่อจับโดยไม่ปล่อยมือออก ในที่สุดวัตถุนั้นก็จะไม่ร้อน นี้ข้อม



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของเมล็ดกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 30 °C (เบ็ญจมาศ, 2526)

แสดงให้เห็นว่าความร้อนได้เคลื่อนที่จากวัดอุณหภูมิ และการที่ไม่รู้สึกร้อนก็เพราะว่าอุณหภูมิระหว่างมือและวัตถุสมดุลกันแล้ว ลักษณะการเคลื่อนที่ของความชื้นในชีวิตประจำวันเป็นไปในทำนองเดียวกัน เช่นที่ 30 °C อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ 75% อากาศจะมีความดันไอน้ำ 0.461 psia สภาพอากาศดังกล่าวถ้านำมาเมล็ดชนิดหนึ่งซึ่งมีความดันไอน้ำ 0.444 psia ให้อยู่ในสภาพเช่นนี้ เมล็ดจะมีความชื้นจากอากาศเคลื่อนที่เข้าไปภายในเมล็ด ทำให้เมล็ดมีความชื้นเพิ่มขึ้น

2.2.4 ความชื้นของเมล็ดกับอายุของเมล็ด

สภาพอากาศร้อนชื้นนับว่าเป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อเมล็ดพันธุ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นปัญหาต่อการเก็บรักษาเมล็ด เมล็ดที่มีความชื้นสูงจะมีชีวิตอยู่ได้ไม่นาน ดังนั้นความชื้นของเมล็ด

พันธุ์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรระมัดระวังอยู่เสมอ และต้องหาทางป้องกันไม่ให้ความชื้นสูงเกินกว่าระดับปลอดภัยต่อการเก็บรักษา ต่อไปนี้จะเป็นการแสดงผลของระดับความชื้นต่างๆ ของเมล็ดซึ่งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ (เบ็ญจมาศ ,2526)

1. เมล็ดที่มีความชื้นระหว่าง 10 ถึง 15 % enzyme activity จะเพิ่มขึ้น ซึ่งแทนที่จะถูกใช้เพื่อการงอก กลับถูกใช้ไปโดยไม่มีประโยชน์ ทำให้ enzyme ต่างๆถูกใช้หมดไป ในที่สุดเมล็ดจะสูญเสียความมีชีวิต เมื่อนำไปเพาะเมล็ดก็ไม่งอก นอกจากการเปลี่ยนแปลงของ enzyme แล้ว ปรากฏการณ์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นในขณะที่เมล็ดมีความชื้นเพิ่มขึ้น เช่น อัตราการหายใจเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงสภาพของสารเคมีหรืออาหารสำรอง เป็นต้น สิ่งเหล่านี้จะช่วยทำให้อายุของเมล็ดนั้นสั้นลงทั้งสิ้น นอกจากปรากฏการณ์ทางชีวเคมีและสรีระวิทยาแล้วปรากฏการณ์อื่นๆที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับความชื้นของเมล็ดที่เพิ่มขึ้น

2. เมล็ดที่มีความชื้นระหว่าง 8 ถึง 9 % เมล็ดสามารถเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้ดี

3. เมล็ดที่มีความชื้นระหว่าง 12 ถึง 14 % เชื้อราและจุลินทรีย์อื่นๆ เจริญเติบโตได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสิ่งมีชีวิตดังกล่าวจะมีอัตราการหายใจสูงด้วย จึงทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น ความร้อนนี้จะทำลายเมล็ดโดยตรง นอกจากนี้เชื้อรายังใช้อาหารสำรองของเมล็ดและผลิตสารพิษ ซึ่งเป็นอันตรายทั้งเมล็ดและผู้บริโภค เชื้อราสำคัญที่พบเสมอได้แก่ *Aspergillus* และ *Penicillium*

4. เมล็ดที่มีความชื้นระหว่าง 14 ถึง 18 % จะมีความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เป็นความร้อนที่เกิดจากตัวของเมล็ดเอง จากเชื้อรา จากแบคทีเรีย และแมลง ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้อาจทำให้เกิดไฟไหม้ได้

5. เมล็ดที่มีความชื้นระหว่าง 40 ถึง 60 % เมล็ดจะงอก

2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง

การอบแห้งคือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย (Realso, 2529)

ปริมาณความชื้น (moisture) ของวัสดุมักจะถูกให้นิยามในรูปของอัตราส่วนของน้ำต่อมวลทั้งหมด แต่เนื่องจากกระบวนการอบแห้งมวลทั้งหมดของวัสดุจะเปลี่ยนค่าอยู่ตลอดเวลา เพราะมีน้ำระเหยออกไป เพื่อความสะดวกจึงใช้มวลของวัสดุแห้งเป็นมาตรฐานคือ จะอยู่ในรูปของอัตราส่วนของมวลน้ำต่อมวลของวัสดุแห้งซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนความชื้น (moisture content)

$$W_d = W_w(1-W_w) \quad (3.1)$$

$$W_w = W_d(1+W_d) \quad (3.2)$$

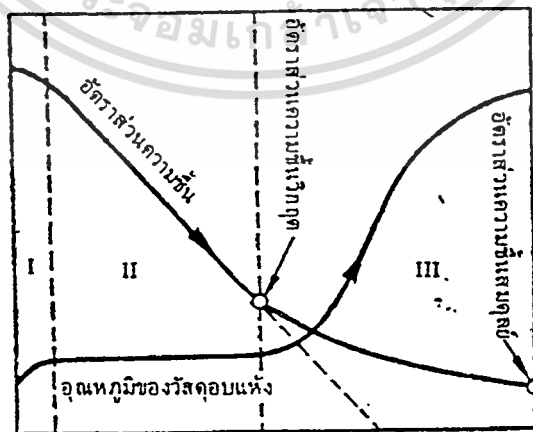
เมื่อ

W_d : อัตราส่วนความชื้น (Moisture Content)

W_w : ปริมาณความชื้น (Moisture)

2.3.1 เส้นกราฟลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

จะกล่าวถึงการอบแห้งวัสดุที่เปียกชื้นอย่างมาก ภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งคงที่ คือ วัสดุเปียกชื้นภายในกระแสนลมปริมาณมากที่อุณหภูมิ ความชื้น (humidity) ของอากาศ และความเร็วมคงที่ กราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลาเป็นดังรูป



เวลา →

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุกับเวลา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ คือ

I. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ

เป็นช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิให้แก่วัสดุ ความชื้นที่ผิวของวัสดุจะอยู่ในรูปของน้ำซึ่ง ความร้อนที่ให้ในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยน้ำบางส่วนออกไปและความร้อนส่วนใหญ่จะใช้ในการทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature) t_w ของลมร้อน

II. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่

ในช่วงนี้วัสดุจะมีอุณหภูมิกึ่งที่ ประมาณ t_w ซึ่งความร้อนที่ให้แก่วัสดุในช่วงนี้จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำที่มีอยู่บริเวณผิวของวัสดุเท่านั้น อุณหภูมิของวัสดุจึงคงที่ ซึ่งในช่วงนี้ อัตราส่วนความชื้นของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลา ดังนั้นความเร็วของการระเหยจะมีค่าคงที่ (constant drying rate)

III. ช่วงอบแห้งที่ความเร็วลดลง

ในช่วงนี้อุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นเนื่องจากน้ำที่ผิวของวัสดุระเหยไปหมดแล้วเพราะ การถ่ายเทความร้อนในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยไปของน้ำที่ผิว อุณหภูมิของวัสดุจึงสูงขึ้น ดังนั้นที่ผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพแห้ง และความเร็วของการอบแห้งจะ ค่อยๆ ลดลง

การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุลย์ W_e (equilibrium moisture content) ค่าของอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่จุดต่อระหว่างช่วง II และ III เรียกว่า อัตราส่วนความชื้นวิกฤต W_c (critical moisture constant) ผลต่าง ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย W ใดๆ กับ W_e มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นอิสระ F (Free Moisture Content) F คือ ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไปได้โดยการอบแห้ง ในกรณีของวัสดุที่มี ช่วง II และ III ชานานมาก จะไม่คำนึงถึงช่วง I ก็ได้ อาจมีบางกรณีถ้าวัสดุไม่เปียกชื้นหรือ วัสดุที่มีลักษณะเฉพาะบางชนิด อาจไม่มีช่วง II เลยก็ได้

เงื่อนไขการอบแห้งอาจแบ่งได้ 2 ประเภท คือ เงื่อนไขภายนอกวัสดุที่ก่อให้เกิดการอบแห้งและเงื่อนไขภายในตัววัสดุเอง เงื่อนไขภายนอกจะเกี่ยวกับวิธีการถ่ายเทความร้อนไปยัง วัสดุและการกำจัดไอน้ำที่ระเหยออกมา ส่วนเงื่อนไขภายในได้แก่ องค์ประกอบและรูปร่าง , อัตรา ส่วนความชื้น , อัตราส่วนความชื้นสมดุลย์ของวัสดุอบแห้ง เป็นต้น

กำหนดให้สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความร้อนของการอบแห้งมีดังนี้

$$R = R_w (W/A) \quad (3.3)$$

เมื่อ

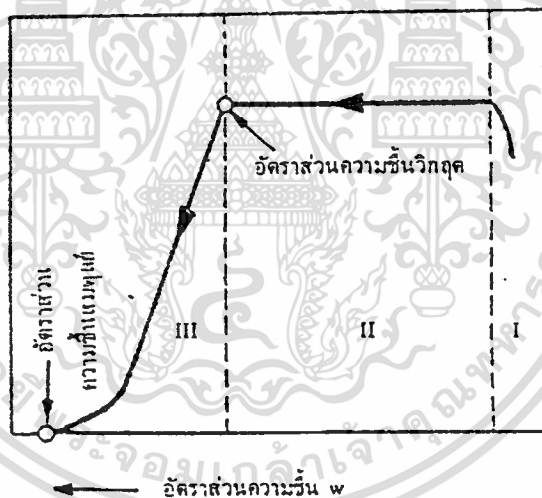
R (กก. water / ชม. ม. drying area)

R_w (กก. water / ชม. กก. dry solid)

W : มวล (กก.) ของวัสดุแห้ง

A : พื้นที่ (ม.) ของการอบแห้ง

เส้นกราฟที่ได้จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการอบแห้ง และ W มีชื่อเรียกว่า เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยกับเวลา ดังรูปที่ 2.2 คือ R_w นั่นเอง ถ้าเขียนกราฟของ R_w (หรือ R) กับ W จะได้รูปที่ 2.3 (ในกรณีที่ไม่นำนึ่งถึงการหดตัวของพื้นผิววัสดุ บางทีจะหาช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ไม่พบ)



รูป 2.3 เส้นกราฟแสดงลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

2.3.2 อัตราส่วนความชื้นวิกฤต W_c

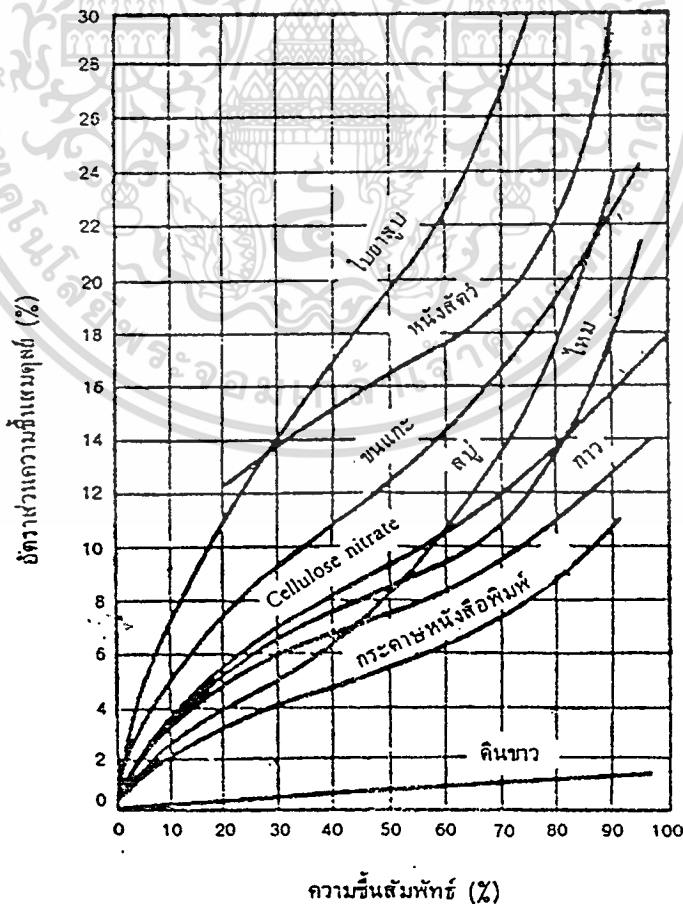
W_c คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของวัสดุ ที่จุดต่อระหว่างช่วงของการอบแห้งที่ความเร็วคงที่กับช่วงของการอบแห้งที่ความเร็วลดลง ค่าของ W_c มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบอุปกรณ์อบแห้ง เนื่องจาก W เป็นค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความชื้นของวัสดุอบแห้ง ถ้าให้ C เป็นอัตราส่วนความชื้นเฉพาะจุดภายในชั้นของวัสดุหนา L ที่มีกระจายของความชื้น ซึ่งสามารถคำนวณ W_c ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_c = (1/L) \int_0^L C dx \tag{3.4}$$

ถึงแม้จะเป็นวัสดุประเภทเดียวกัน ค่า W_c ของมันอาจจะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเงื่อนไขของการอบแห้ง ขกตัวอย่างกรณีที่อุณหภูมิของวัสดุแบบเม็ด ($W_c = 0.08-0.12$) กับกรณีที่กระจายเป็นเม็ดๆ แยกกัน ($W_c = 0.01$)

นอกจากวัสดุอบแห้งจะถูกอบแห้งที่ความเร็วสูงสุด จนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นมีค่าเท่ากับ W_c แล้วอุณหภูมิของวัสดุก็สามารถถูกรักษาให้ต่ำในขณะเดียวกันได้ด้วย เมื่อมองในแง่เทคนิคการอบแห้ง การลดเวลาที่ต้องใช้อบแห้งให้สั้นและการป้องกันการเสื่อมคุณภาพของสินค้า โดยการลดค่าของ W_c ให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เป็นสิ่งพึงปรารถนาอย่างยิ่ง แม้ว่า W_c จะเป็นค่าเฉพาะของวัสดุอบแห้งด้วย ซึ่งยังสามารถเปลี่ยนค่าของมันได้คงที่อธิบายไว้ข้างต้น ในแง่เทคนิคการอบแห้ง การให้ความสนใจต่อ W_c เป็นสิ่งสำคัญมาก



รูปที่ 2.4 เส้นกราฟแสดงอัตราส่วนความชื้นสมดุลสำหรับวัสดุประเภทต่างๆ (อุณหภูมิ 25 °C)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 อัตราส่วนความชื้นสมมูล W_c

W_c เป็นค่าเฉพาะอย่างหนึ่งของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุประเภทเซลล์ (cell) จะมีค่า W_c มาก โดยทั่วไปแล้ว ค่าของ W_c จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ = $100 P/P_s$ (%) ดังรูปที่ 2.4 (ในที่นี้ P คือ ความดันพาร์เชียล (partial pressure) ของไอน้ำในอากาศ ส่วน P_s คือ ความดันไออิ่มตัว (saturation vapor pressure) ที่อุณหภูมิเดียวกัน) ยิ่งความชื้นสูง ยิ่งและยิ่งอุณหภูมิต่ำลง ค่าของ W_c จะยิ่งสูงขึ้นแต่จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิเท่าใดนัก สำหรับวัสดุ เส้นใยที่ความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน ค่าของ W_c ที่อุณหภูมิต่างกัน 10°C จะผิดกันประมาณ 1% เท่านั้น

2.3.4 ความเร็วของการอบแห้งที่คงที่ R_c

ส่วนใหญ่แล้ว R_c จะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขของการอบแห้งภายนอกวัสดุ ในกรณีที่วัสดุได้รับความร้อนจากลมร้อนเท่านั้น อุณหภูมิของวัสดุจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก t_w ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ได้รับต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยจะเท่ากับ $h_c(t - t_w)$ และคำนวณ R_c ได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_c = h_c (t - t_w) / \lambda_w \quad (3.5)$$

หรือ

$$R_c = k (H_w - H) \quad (3.6)$$

เมื่อ

R_c : ความเร็วของการอบแห้งที่คงที่ (กก./ชม. ม.²)

h_c : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์ม (กิโลแคลอรี/ชม. ม.²°C)

t : อุณหภูมิของลมร้อน (°C)

t_w : อุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน (°C)

λ_w : ความร้อนแฝงของการระเหย (กิโลแคลอรี/กก.)

k : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (กก./ชม. ม.² ΔH)

H : ความชื้นของลมร้อน (กก. steam / กก. dry air)

H_w : ความชื้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิ t_w (กก. steam / กก. dry air)

จากสมการของลูอิส (Lewis) ที่ว่า

$$h_c / k = C_H$$

เมื่อ

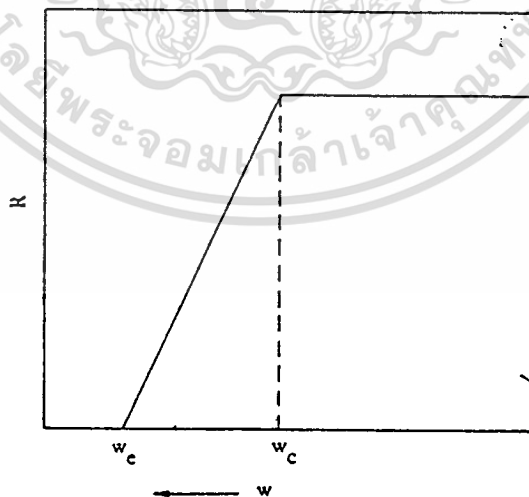
C_H : ความร้อนจำเพาะชื้น (humid heat) ของลมร้อน (กิโลแคลอรี/กก. dry air °C)
ดังนั้น

$$R_o = h_c (H_w - H) / H_o \quad (3.7)$$

2.3.5 ความเร็วของการอบแห้งที่ลดลง R_d

R_d ขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุและวิธีการทำแห้งอย่างมาก สภาพของความชื้นที่อยู่ในวัสดุก็มีลักษณะต่างๆ กัน ลักษณะการลดค่าของความชื้นในวัสดุระหว่างการอบแห้งนั้นคือการกระจายของความชื้นภายในวัสดุจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้น R_d ก็เช่นเดียวกัน หนึ่งในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ ความเร็วของการระเหยที่ผิวของวัสดุจะเท่ากับความเร็วคงที่ของการอบแห้ง ดังนั้น จึงสามารถคำนวณความเร็วคงที่ได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงการกระจายของความชื้นภายในวัสดุ

วิธีประมาณเวลาในช่วงที่ความเร็วของการอบแห้งลดลง สำหรับวัสดุที่เป็นเม็ด และผง หรือ หยกของเหลว หรือ ชิ้นวัสดุบางๆ ซึ่งความเร็วของการอบแห้งที่ลดลงมักจะลดลงเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนความชื้นคงรูป



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วของการอบแห้งที่ลดลงกับอัตราส่วนความชื้น

ถ้าให้

$$F = W - W_c$$

เป็นอัตราส่วนความขึ้นอิสระ

จะได้

$$R_d = \{ (W/A) (-dw/d\theta_d) \} = R_c (F/F_c) \quad (3.8)$$

เมื่อ

$$F_c = W_c - W_c$$

F_c : อัตราส่วนความขึ้นอิสระวิกฤต

W_c : อัตราส่วนความขึ้นวิกฤต

W_c : อัตราส่วนความขึ้นสมดุล

เนื่องจาก $dF = dW$ เวลา θ_d (ชม.) ที่ต้องใช้ในการรอบแหว่งจาก $W = W_c$ ถึง $W = W_2$

คือ

$$\begin{aligned} \theta_d &= (WF_c/AR_c) \int_{F_c}^{F_2} (-1/F) dF \\ &= (WF_c/AR_c) \ln (F_c/F_2) \end{aligned} \quad (3.9)$$

เวลาที่ต้องใช้ในการรอบแหว่งในช่วงความเร็วคงที่จาก $W = W_1$ ถึง $W = W_c$ คือ

$$\begin{aligned} \theta_c &= (W/AR_c) (F_1 - F_c) \\ &= (W/AR_c) (W_1 - W_c) \end{aligned} \quad (3.10)$$

ดังนั้น คำนวณเวลาทั้งหมดที่ต้องใช้ในการรอบแหว่งจาก W_1 ผ่าน W_c ถึง W_2 ได้จาก

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_c + \theta_d \\ &= (W/AR_c) \{ (F_1 - F_c) + F_c \ln (F_c/F_2) \} \end{aligned} \quad (3.11)$$

สรุปแล้วในกรณีที่เส้นกราฟแสดงการรอบแหว่งในช่วงความเร็วลดลงสามารถแทนค่าโดยคร่าวๆ ได้ ด้วยเส้นตรงดังกล่าวข้างต้น การประเมินเวลาที่จำเป็นสำหรับการรอบแหว่งภายใต้เงื่อนไขการรอบแหว่งใดๆ R_c จากสมการ หรือ จากการทดลองเมื่อรู้ค่าอัตราส่วนความขึ้นวิกฤต ยิ่งกว่านั้นในกรณีของการรอบแหว่งโดยใช้กระแสลม ซึ่งสามารถประเมินอุณหภูมิของวัสดุ t_m ที่อัตราส่วนความขึ้นอิสระ F ในช่วงการรอบแหว่งที่ความเร็วลดลงได้จาก

$$(t - t_{\infty}) = (t - t_{\infty}) \left\{ \lambda_w F - C_s (t - t_{\infty}) / F_c \lambda_w - C_s (t - t_{\infty}) \right\} (F/F_c)^{F_c \lambda_w / C_s (t - t_{\infty})} \quad (3.12)$$

เมื่อ

C_s : ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้งส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 0.3 (กิโลแคลอรี/กก. °C)

2.4 สเปาท์เตดเบด (สมศักดิ์, 2528)

เมื่อก๊าซแห้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีรูปร่างแปลกๆ แตกต่างกันไป โดยจะนำมาผ่าน ขบวนการของฟลูอิด ไคเซชั่นธรรมดากระทำไต่ยาก ก๊าซมักจะผ่านขึ้นมาบนเบดเป็นช่อง (Channelling) หรือถ้าเกิดก็มักไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งเบด ตัวอย่างที่ซึ่งพบกันทั้งในและต่างประเทศก็คือ ข้าวทุกชนิดที่มีรูปร่างรีๆ ขาวๆ ถ้าจะนำมาทำให้แห้งด้วยฟลูอิด ไคเบดธรรมดา มักจะเกิดปัญหา อยู่เสมอ หรือการเคลือบเมล็ดพืชที่มีรูปร่างแปลกๆ เป็นต้น

ดังนั้น สเปาท์เตดเบดจึงเป็นเทคนิคอีกอันหนึ่งที่จะใช้ได้ดีกับวัตถุที่มีรูปร่างแปลกๆ วัตถุจะ เคลื่อนที่ขึ้นลงภายในเบด อย่างรุนแรงเสมือนกับมีเครื่องกววนอยู่ในเบดด้วย แรกเริ่มทีเดียว สเปาท์เตดเบดนี้พัฒนามาจากวิธีที่จะทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างเม็ดของแห้งกับก๊าซ โดยผ่านก๊าซ ที่มีความเร็วสูงในลักษณะของเจ็ตขึ้นมาในแนวตั้ง มาชนกับเม็ดของแห้งทำให้เม็ดของแห้งยับและ ลอยตัวไปตามกระแสของเจ็ตอย่างรวดเร็ว เมื่อขึ้นมาในระยะหนึ่งก็จะตกไปตามขอบข้างผนังของ หอทดลอง วัตถุดิบที่จะนำมาอบแห้ง อาทิเช่น เมล็ดข้าวเปลือก การอบแห้งโดย Spouted bed dryer (SBD) จะได้เปรียบกว่าการอบโดยวิธีอื่นเพราะจะใช้เวลาอบสั้นกว่า สามารถจะอบของแห้ง ที่มีความไวต่อความร้อน เช่น อาหาร, พลาสติกเครื่องอบนี้มีโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงได้ง่าย การ ออกแบบสามารถทำให้การผสมดี, ควบคุมเวลาและอื่นๆ ในลักษณะที่ต้องการ SBD สามารถใช้กับ ของแห้งที่มีช่วง falling rate drying คงที่ SBD ยังประสบผลสำเร็จในการอบแห้งแป้งเหนียวและ Slurries

การทำงานโดยใช้เทคนิคของสเปาท์เตดเบดในปัจจุบัน ได้รับความสนใจไม่น้อยทีเดียวดังจะ เห็นได้จากการนำไปประยุกต์ใช้งานดังรายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 การประยุกต์ใช้งานของวิธีการอบแห้งโดยเทคนิคสเปาท์เตดเบด

งานที่นำไปใช้	ลักษณะของงาน	ระยะในการพัฒนา
1) การตากแห้งของวัตถุที่เป็นเม็ดทั้งพืชและสารเคมี	เหมาะอย่างยิ่งสำหรับวัตถุที่เป็นพวกไวต่อความร้อน (หรือพวกที่ถูกความร้อนทำลายได้ง่ายๆ) เช่น ธัญพืช, โพลีเมอร์	ใช้ในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

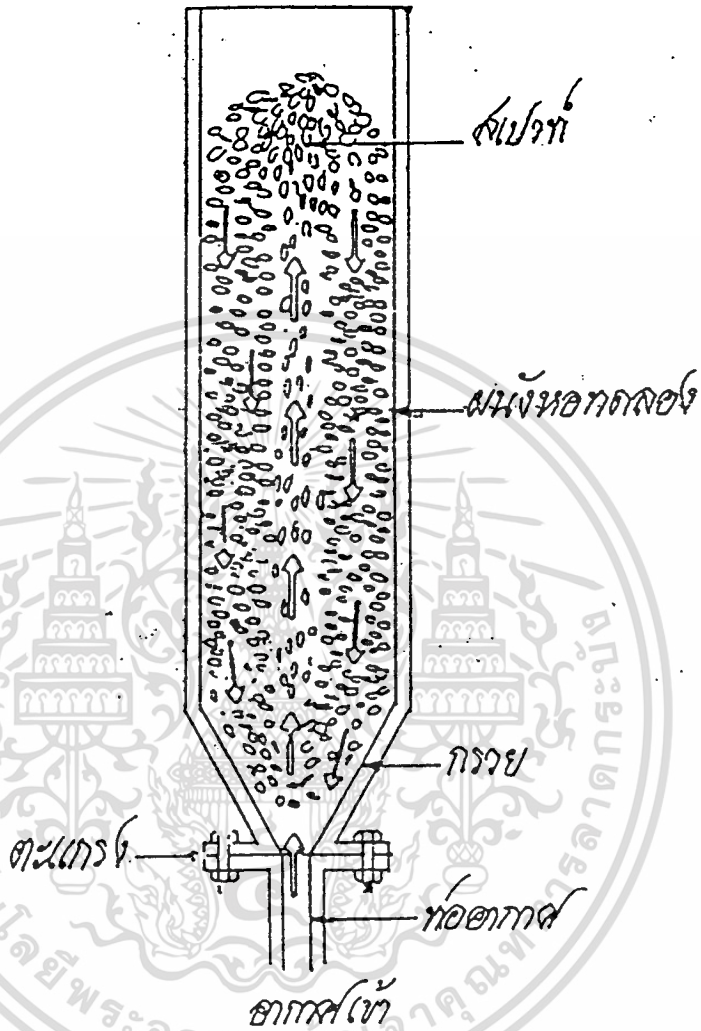
2) การทำสารให้เป็นเม็ด	สารที่อยู่ในรูปของสารละลายหรือ หลอมละลายถูกฉีดพ่นเข้าไปใน เบดที่มีเม็ดของแข็งที่มีขนาดเล็ก อยู่ สารละลายก็จะไปพอกเป็น ชั้นๆ ได้เป็นเม็ดใหญ่ขึ้น	ใช้ในอุตสาหกรรม
3) ปฏิบัติการและการเกิดเม็ด ของสาร	ขบวนการผสมการทำนุด้วยการ ทำสะเทินเม็ดนุด้วยการรด แล้วไล่ ก๊าซแอมโมเนียออกไป	งานเริ่มในห้องปฏิบัติ การ

2.4.1 ลักษณะของสเปาท์เตคเบด

สเปาท์เตคเบดก่อตัวขึ้นจากกระแสเจ็ตของไหลผ่านเข้ามาในเบด กระแสของไหลนี้มี
ความเร็วสูง โมเมนตัมมากจะดันเม็ดของแข็งให้ลอยขึ้นเป็นแนวตามแกนของหอทดลอง เมื่อพื้น
เบดแล้วเม็ดของแข็งก็ตกกลับลงมาใหม่ดังในตารางที่ 2.2 ของไหลนี้ใช้ได้ทั้งก๊าซและของเหลว

ซึ่งจะเห็นเบดประกอบด้วยโซนสองโซน คือ โซนที่เป็นเบดเบาบางที่ซึ่งเรียกว่า
สเปาท์ บริเวณนี้เม็ดของแข็งจะเคลื่อนที่ขึ้น กับอีกโซนที่เป็นเบดหนาแน่น บริเวณนี้อยู่รอบผนัง
ของหอทดลองเม็ดของแข็งบริเวณนี้ เคลื่อนลงด้านล่าง ตรงด้านล่างของเบดจะเป็นรูปกรวยเพื่อให้
เม็ดของแข็งเคลื่อนที่เข้าหากระแสเจ็ตได้ง่าย บางครั้งซึ่งอาจจะคิดว่าเป็นเบดที่เกิดการไหลเป็นช่อง
ทาง แต่การเกิดเบดชนิดหลังนี้ เม็ดของแข็งมิได้ขยับเคลื่อนที่เลยของไหลหลังจากผ่านพื้นที่ขึ้น
มาแล้วส่วนใหญ่ก็จะอยู่ตรงบริเวณแกน มีบางส่วนไหลซึมผ่านไปทางด้านรอบๆ ของเบด ยิ่งสูง
การซึมผ่านของก๊าซยิ่งมาก ทั้งนี้เกิดจากแรงขับที่มาก ผลต่างของปริมาณของไหลตรงกลางมาก
กว่าด้านข้าง สิ่งที่แตกต่างเห็นได้ชัดตรงบริเวณผิวหน้าของเบดก็คือความเร็วของเม็ดของแข็ง ที่
บริเวณตรงสเปาท์จะมีความเร็วมากกว่าบริเวณรอบ ๆ มากทีเดียว เม็ดของแข็งที่ลอยมาตามกระ
แสของเจ็ตมักจะชนกับเม็ดของแข็งที่เคลื่อนที่ลงมาตรงบริเวณใกล้แกน ดังนั้นตรงบริเวณที่ใกล้ๆ
กับท่อเจ็ตจะมีปริมาณของแข็งน้อยกว่าที่ระดับสูงๆ ขึ้นไป

ด้วยคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกับฟลูอิดไดเซชันธรรมดา ดังกล่าวแล้ว ภายในเบดยังมี
ส่วนที่แตกต่างออกไปอีกได้แก่ ความดันต่างภายในเบดจะไม่เท่ากันตลอดทั้งหมด โดยจะมีค่า



รูปที่ 2.6 แสดงรายละเอียดการเกิดสเปอร์ทเดบด

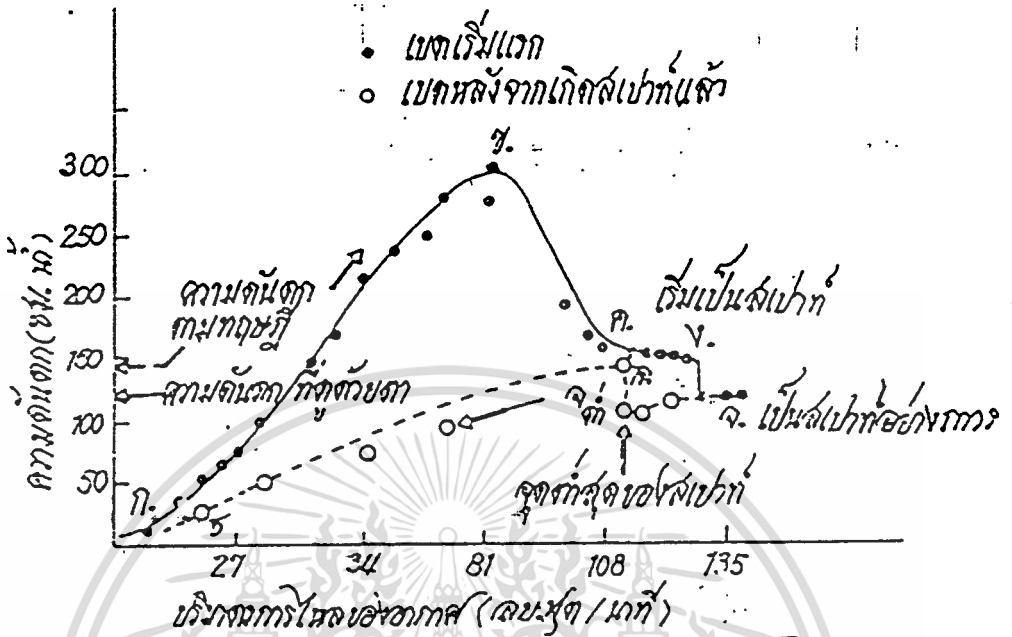
ความดันต่ำที่ใกล้บริเวณเจ็ตและค่อยๆ เพิ่มมากจนสูงสุดอยู่ที่ผิวหน้าของเบด ส่วนความดันตกนั้นสองส่วนที่ขนานกันส่วนแรกเป็นส่วนบริเวณสเปอร์ทที่มีบริเวณของแข็งอยู่น้อย กับบริเวณที่เบดหนาแน่นที่เม็ดของแข็งเคลื่อนที่ลงสวนทางกับของไหล ความดันตกที่ระดับต่างๆ ของเบดมักจะอยู่ในสมดุลย์ ยกเว้นบริเวณที่อยู่ใกล้กับทางเข้าของไหลที่ความดันตกจะมาก กรณีที่ก๊าซออกจากบริเวณสเปอร์ทเข้าไปในบริเวณวงแหวนรอบๆ สเปอร์ทมากพอจนเกิดเป็นฟลูอิดไดเซชันได้ สเปอร์ทเดบดในขณะนี้จะเป็นลิมิตที่เบดมีเสถียรภาพมากที่สุด ความสูงของเบดที่วัดได้ในขณะนี้

ซึ่งเรียกว่าความสูงสูงสุดของเบดที่สามารถทำให้เป็นสเปาท์เตคเบดได้ (maximum spoutable bed depth) เพราะถ้าความเร็วของไหลมากกว่านี้ เม็ดของแข็งจะหลุดลอยออกไปกลายเป็นการขนส่งไปในที่สุด

การที่เบดสามารถเกิดสเปาท์คิงได้อย่างถาวรนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะมากมายที่จะทำให้การเคลื่อนที่ของเม็ดเป็นอย่างสุ่มๆ การเคลื่อนที่นี้สามารถเข้าไปสู่สภาวะฟลูอิดไดเซชันแบบเดือดพล่าน หรือแบบสลักกิ่งได้เมื่อความเร็วของไหลเพิ่มขึ้น ตัวแปรที่สำคัญๆ ในเรื่องนี้ได้แก่ ขนาดของเม็ดของแข็ง ขนาดของท่อที่ให้ของไหลไหลเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอทดลอง มุมของกรวย อัตราการไหลของก๊าซและความสูงของเบดซึ่งตัวแปรเหล่านี้สัมพันธ์ซึ่งกันและกันด้วย คังผลการทดลองของ Mathur และ Gishler เขาใช้ทรายขนาด 0.6 มม. บรรจุในเบดขนาด 15 ซม. เขาทำอย่างไรก็ไม่เกิดเป็นสเปาท์เตคเบด เมื่อเขาใช้ท่อก๊าซขนาด 1.5 ซม. แล้วเขาเพิ่มความเร็วก๊าซ เบดเปลี่ยนจากเบดบรรจุเป็นฟลูอิดไดซ์เบดเลย แต่เมื่อเขาลดขนาดของท่อส่งก๊าซให้เล็กลงเหลือ 1.24 ซม. เขาก็ได้สเปาท์เตคเบดที่สมบูรณ์ โดยความสูงของเบดจะต้องต่ำกว่า 68 ซม.

2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกและอัตราการไหลของของไหล

เริ่มต้นปล่อยก๊าซที่ความเร็วค่าเข้าไปในหอทดลอง เบดยังคงอยู่นิ่งเหมือนกับเบดนิ่งในฟลูอิดไดเซชัน ความดันตกในเบดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซสูงขึ้น ความสัมพันธ์นี้เป็นแบบเส้นตรงตามเส้น กข ในรูปที่ 2.8 ถัดจากจุด ข ความดันตกลงมาตามเส้น ขค เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเพราะตรงบริเวณทางเข้าของก๊าซหรือบริเวณส่วนล่างของเบดขยายตัวขึ้น เกิดเป็นช่องเล็กๆ หรือเกิดเป็นสเปาท์เล็กๆ ขึ้น เม็ดของแข็งในสเปาท์เล็กๆ ปริมาณน้อยกว่าส่วนอื่น เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นอีก ความสูงของสเปาท์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ความดันตกของเบดลดต่ำลงเรื่อยๆ จนถึงจุด ค ความสูงของเบดค่อยๆ เพิ่มขึ้นแล้ว และมีเม็ดจากบริเวณสเปาท์เข้าไปอยู่ในส่วนวงแหวนรอบนอก ดังนั้นความเร็วที่เพิ่มขึ้นของก๊าซไม่ทำให้ความดันตกเปลี่ยนแปลงต่อไปเพราะเกิดเสมือนกับฟลูอิดไดซ์เบดทั่วๆ ไป จนถึงจุด ง ถึงจุดนี้สเปาท์ที่เกิดขึ้นอยู่ภายในบริเวณของเบดยังไม่ถึงผิวหน้าของเบด เพิ่มความเร็วของก๊าซอีกเพียงเล็กน้อยสเปาท์ก็ทะลุถึงผิวหน้าความดันตกลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนถึงจุด จ ปริมาณของเม็ดในบริเวณสเปาท์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งตอนบนของเบดที่จุด จ สเปาท์เตคเบดเกิดอย่างสม่ำเสมอ ความดันตกหลังจากจุด จ ไปแล้ว อาจมีการขึ้นลงอีกเล็กน้อย และจะไม่ขึ้นกับปริมาณการไหลของก๊าซอีกแล้ว



รูปที่ 2.7 โค้ดแกรมของความดันตกกับปริมาตรการไหลของของไหล สำหรับสเป้าแตกเบด

การวีนีกลองลดความเร็วของก๊าซลง สเป้าที่ก็ยังคงเหมือนเดิมจนลดถึงจุด $จ_{ค}$ แล้วตก ความดันตกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถึงจากจุด $จ_{ค}$ ไปยังจุด $จ$ สเป้าที่ก็จะเกิดอยู่ภายในเบดเหมือนดังกับสเป้าที่บริเวณ $ข$ ถึง $ก$ ดังนั้นที่จุด $จ_{ค}$ จึงเป็นจุดที่เบดอยู่ในสภาวะของสเป้าต่ำสุด ความดันตกที่เพิ่มจากจุด $จ_{ค}$ ถึง $จ$ มีขนาดเท่ากับ $ง$ ถึง $จ$ พอดี หลังจากจุด $จ$ แล้วสเป้าเบดหมดสภาพไปทันทีกลายเป็นเบดหนึ่งใหม่ ความดันก็จะลดลงเรื่อยๆ ตามเส้น $ฉข$ การที่เกิดขึ้นเป็นวง $ง$ $จ$ $จ_{ค}$ และ $ฉ$ เพราะเหตุที่ว่า เบดต้องการพลังงานบางส่วนไปทำให้เบดเกิดการเกาะตัวของเม็ดอย่างหลวมๆ และการที่ความดันตกที่เดินตามเส้น $ฉข$ ต่ำกว่าเส้น $กข$ ก็เพราะว่าเบดในตอนนีเกาะตัวกันอย่างหลวมๆ แล้ว

2.4.3 ความเร็วต่ำสุดสำหรับสเป้าแตกเบด

ความเร็วของไหลที่จะทำให้เบดเกิดเป็นสเป้าแตกเบดได้นั้นต้องมีขนาดปริมาณมาก จะมากน้อยขนาดใดก็แล้วแต่คุณสมบัติทางกายภาพของไหลเอง หรือคุณสมบัติของเบด หรือรูปร่างลักษณะของกรวย ตามธรรมชาติความเร็วสเป้าที่ต่ำสุดแปรตามความสูงของเบด แต่มีค่าน้อยลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดโตขึ้น ความสูงของเบดมีขีดจำกัดเหมือนกัน เพราะถ้าสูงมากเกินไปอย่างไรก็ไม่เกิดสเป้าแตกเบดได้เลย ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

Mathur และ Gishler ได้ทดลองกับหอคดลองทรงกระบอกมีกรวยตื้นๆ แล้วเขาได้สรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีอยู่ในเบคกับความเร็วต่ำสุดของสเปาท์เดคเบค ดังสมการ 4.1

$$U_{ms} = (d_p/D_c)(D_i/D_c)^{1/3} \sqrt{\{2g_c H(\rho_s - \rho_f)/\rho_f\}} \quad (4.1)$$

เมื่อ

D_i : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งก๊าซตรงกรวย

ต่อมาได้มีนักวิทยาศาสตร์ศึกษาถึงเรื่องนี้เช่นกัน และได้ผลการทดลองสนับสนุนข้อเสนอของ Mathur และ Gishler เป็นอย่างดี ดังในตารางที่ 2.3

ส่วน Leva ได้เสนอแนะว่า ความเร็วต่ำสุดที่จะทำให้เกิดเป็นสเปาท์เดคเบคนั้นควรอยู่ในรูป

$$U_{ms} = (d_p/D_c)(D_i/D_c)^n \sqrt{\{2g_c H(\rho_s - \rho_f)/\rho_f\}} \quad (4.2)$$

โดยที่

ค่า n นี้แปรตามขนาดของท่อส่งก๊าซ และมุมตรงกรวย ดังนี้

$n = 0.23$ เมื่อ D_i มีขนาด 5 ซม. ถึง 10 ซม. มุมตรงกรวย 45°

$n = 0.13$ เมื่อ D_i มีขนาด 5 ซม. ถึง 10 ซม. มุมตรงกรวย 65°

$n = 1/3$ เมื่อ D_i มีขนาด 15 ซม. มุมตรงกรวย ตั้งแต่ 45° ถึง 85°

และถ้า D_i มีขนาด 60 ซม. ขึ้นไป ค่าของ n ไม่แปรเปลี่ยน ถึงแม้ว่ามุมของกรวยจะเปลี่ยนไปก็ตาม

พิจารณาจากสมการที่ 4.1 แล้วพบว่า นอกจากคุณสมบัติของเครื่องมือมีอิทธิพลต่อความเร็วสเปาท์ตั้งต่ำสุด แล้วยังมีความหนาแน่นของก๊าซหรือของเหลว ซึ่ง Charton และผู้ร่วมงานได้กล่าวไว้ว่า ผลกระทบของความหนาแน่นนั้นก็เนื่องมาจากความหนืด แต่ก็ยังไม่มียกนักวิทยาศาสตร์ท่านใดได้ศึกษาถึงเรื่องนี้อย่างจริงจังเลย

การศึกษาถึงสเปาท์เดคเบคนี้ มีนักวิทยาศาสตร์บางท่านได้ทดลองใช้หอคดลองรูปกรวยแทนทรงกระบอก ได้เสนอความสัมพันธ์ของความเร็วสเปาท์ตั้งต่ำสุดในเทอมของค่าเรโนลด์

$$Re_{ms} = K (Ar)^a (\tan \theta)^b (H/D_i)^c \quad (4.3)$$

เมื่อ

Ar : ค่าอาคิมิติส

θ : มุมด้านล่างของกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเรโนลด์นี้ คำนวณจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง ความเร็วของก๊าซเป็น ความเร็วที่ออกจากท่อส่งก๊าซตรงฐานของกรวย

a, b และ c เป็นค่ากำลังซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วงที่กว้างมากจนสรุปไม่ได้ในขณะนี้

2.4.4 ความลึกสูงสุดของเบดที่สามารถทำให้เป็นสเปาท์แตกเบด

ความสูงหรือความลึกของเบดมีส่วนที่สเปาท์แตกเบดเปลี่ยนเป็นฟลูอิดไลซ์เบดธรรมดาได้เมื่อความลึกของเบดสูงกว่าค่าสูงสุดที่เกิดสเปาท์แตกเบดดังรายละเอียดในตารางที่ 2.3 ดังนั้นเมื่อทราบค่าความเร็วฟลูอิดไลซ์ชั้นที่ความลึกสูงมาก ๆ นั้น ความเร็วทั้งสองเป็นความเร็วอันเดียวกัน สำหรับค่า U_{mf} ซึ่งอาจใช้ประยุกต์สมการของ Ergun ที่ใช้กับเบดบรรจุได้ โดยให้

$$\Delta P/H = f\{\rho_s(1 - \epsilon_0)g/g_c\} \quad (4.4)$$

สมการของ U_{mf} เป็น

$$1.75\rho_s d_p U_{mf}^2 + 150\mu_s(1 - \epsilon_0) U_{mf} = d_p^2 \epsilon_0^3 \rho_s g \quad (4.5)$$

$$= 0$$

โดยวิธีการดังกล่าวข้างบนนี้ Becker พบว่า ความเร็วสเปาท์ตั้งต่ำสุดที่ความสูง H_{sm} มีค่าสูงกว่าความเร็วฟลูอิดไลซ์ชั้นต่ำสุดอยู่ 25 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นแทนที่เขาใช้สมการของ Ergun เขากลับมาใช้ทอมสัมประสิทธิ์การเสียดทาน และค่าเรโนลแทนก็ได้ค่าของ U_{mf} ที่ H_{sm} ตรงตามผลการทดลอง

Malek และ Lu ได้นำผลการทดลองของทั้ง Becker กับ Mathur และ Gishler รวมกับผลการทดลองของเขาเอง ซึ่งใช้ข้าวสาลี เมล็ดพืช และเม็ดพลาสติก มาผูกเป็นความสัมพันธ์ใหม่ คือ

$$H_{sm}/D_c = \{15(D_s/d_p)^{0.75} (D_s/D_i)^{0.40} \lambda^2\} / \rho_s^{1.2} \quad (4.6)$$

เมื่อ

λ : พื้นที่ผิวของเม็ดของแข็ง/พื้นที่ผิวเทียบเท่าทรงกลม

$$\lambda = 0.25 S_p / V_p^{2/3}$$

*Reddy และผู้ร่วมงาน มีความเห็นขัดแย้งกับความคิดของ Malek และ Lu ที่ว่าขนาดของเม็ดของแข็งมีส่วนทำให้ความเร็ว U_{mf} สูงขึ้น เมื่อขนาดเฉลี่ยของเม็ดของแข็งเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งและต่อจากนั้นก็ลดลงตรงบริเวณที่ค่าเรโนลประมาณ 70 โดยเขาได้กล่าวว่า

$$U_{mf} = ad_p^n \quad (4.7)$$

ในขณะที่

$$U_{ms} = bd_p H^m \quad (4.8)$$

ที่ความสูง H_{sm} ความเร็ว $U_{ms} = U_{mf}$ จากสมการทั้งสองข้างบนดังกล่าวซึ่งก็จะได้

$$H_{sm} = K(d_p)^{(n-1)/m} \quad (4.9)$$

ต่อมาได้มีนักวิทยาศาสตร์อีกหลายท่านได้พยายามศึกษาค่า H_{sm} กับตัวแปรต่างๆ โดยอาศัยหลักการสมดุลของแรงบนเม็ดของแข็งที่รอบๆ สเปาท์ (Spout-annulus) สมดุลย์ของโมเมนต์ของเม็ดของแข็งและของไหล การชนของเม็ดของแข็งระหว่างสเปาท์โซนกับโซนรอบตารางที่ 2.3 ผลการทดลองที่สนับสนุนสมการ 4.1

ผู้วิจัย	ขนาด หอ ทดลอง D_o (ซ.ม.)	มุมของ กรวย	วัสดุที่ใช้เป็น เบด	ขนาดของ เม็ดของ แข็ง d_p (มม.)	ขนาด ของ Orifice (มม.)	ความสูง เบด (ซม.)	U_{ms} ซม./ วินาที
Mathur และ Gishler	15	85	ข้าวสาลี เม็ด อ่อน ถั่ว	0.6-3.2	12-50	20-75	35-107
	22.5	88	ข้าวสาลี	3.2	12-50	62.5-150	70-115
	30	85	ข้าวสาลี	3.2	12-75	62.5-187	60-97.5
Thorley และ ผู้ร่วมงาน	60	45,60	ข้าวสาลี	3.6	46-100	92.5- 182.5	50-75.5
Manurang	15	60	ถ่านหินกลม ถ่านหินต่างๆ ไป	0.9-2.5 1.0-2.6	12.5 9-15	22.5-100 20-100	23-98 17-72.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S m i t h และ Reddy	15	60	อะถันคัม	0.3	0.25	32.5- 57.5	14.3-18
K u g o และ ผู้ร่วมงาน	10	60	ถ่านโค้ก ข้าวสาลี	1.2-40 3.1	10 7.5-15	10-28 10-22.5	30.7- 153 57.2- 117

และการถ่ายเทโมเมนตัมของของไหลตรงท่อทางเข้า เมื่อลองหาความสัมพันธ์ดูแล้วมีความยุ่งสลับซับซ้อนเป็นอย่างมาก จนไม่สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ง่ายแต่ก็ทำให้เข้าใจในกลไกของสเปาท์เจตเบคได้ดีขึ้น

2.4.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสเปาท์

ความแปลกของสเปาท์เจตเบคอยู่ที่ตรงกลางที่ก๊าซหรือของเหลวพุ่งขึ้นมาเป็นลำ จนทะลุผ่านผิวเบคได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านพยายามที่จะวัดขนาดของลำก๊าซที่มีเม็คของแข็งปนเข้ามาด้วยนี้ด้วยการสร้างแบบของสเปาท์เจตเบคแบบ 2 ทิศทาง หรือคล้ายๆ ผ่าเอาตรงกลางของหลอดทดลองออกมา เบคแบบ 2 ทิศทางทำด้วยพลาสติกใสแล้วเปรียบเทียบกับเบคแบบสมบูรณ์ด้วยเทคนิคการวัดความดันไฟฟ้า

Malek และผู้ร่วมงานได้ลองกับวัสดุหลายๆ แบบ ขนาดของหลอดทดลองตั้งแต่ 10 ซม. ถึง 60 ซม. ส่วน Orifice และความลึกมิได้เปลี่ยนมาก เขาพบว่า ขนาดของสเปาท์ที่เกิดขึ้นเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้คือ

$$d_s = (0.115 \log D_c - 0.31) \sqrt{G} \quad (4.10)$$

เมื่อ

d_s และ D มีหน่วยเป็นนิ้ว

G มีหน่วยเป็นปอนด์/ชม.ฟุต²

Mikhailik ได้ให้ความเห็นว่าสมการที่ 4.10 นี้ใช้เหมาะกับวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.5 และ เขายังเสนอแนะต่อไปว่าถ้าวัสดุมีความถ่วงจำเพาะมากๆ ขนาดของสเปาท์คำนวณได้จาก

$$d_c = 14.5 \{ (0.115 \log D_c - 0.192) \sqrt{G/\rho_c} \} \quad (4.11)$$

เมื่อ

d_c มีหน่วยเป็น มม.

D_c มีหน่วยเป็น มม.

G มีหน่วยเป็น กก./ชม.-ม.²

ρ_c มีหน่วยเป็น กก./ชม.³

ขนาดของสเปาท์ในเบคเปลี่ยนไปตลอดความสูง แต่เปลี่ยนไม่มากนัก นักวิทยาศาสตร์บางท่านกล่าวว่าขนาดสเปาท์เพิ่มขึ้นตลอดความสูง บางท่านกล่าวว่าขนาดสเปาท์แคบตอนโคนใหญ่ตอนกลาง แล้วเล็กลงตรงปลายเบคคล้ายๆ กับเปลวของเทียนไข ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.10 และ 4.11 เป็นขนาดเฉลี่ยของตลอดทั้งเบค

2.4.6 การไหลของก๊าซในเบค

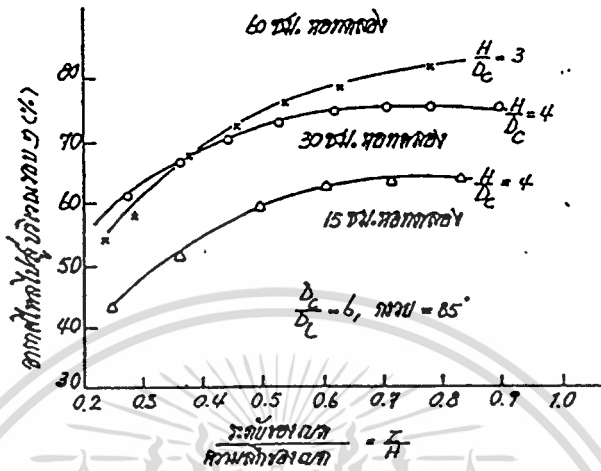
ก๊าซที่ไหลในเบคแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่มีความเร็วสูงเป็นสเปาท์ ส่วนรอบๆ สเปาท์หรือส่วนใกล้ผนังหอททดลองที่ขนาดความเร็วต่ำพอที่จะทำให้เบคอยู่ในลักษณะหลวมๆ

ความเร็วของก๊าซอาจวัดได้จากความดันต่าง โดยสมมติว่าเบคบริเวณรอบๆ มีความเร็วก๊าซใกล้เคียงความเร็วฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด หรือใช้วัดด้วยปิโตรคัทว โดยตรง

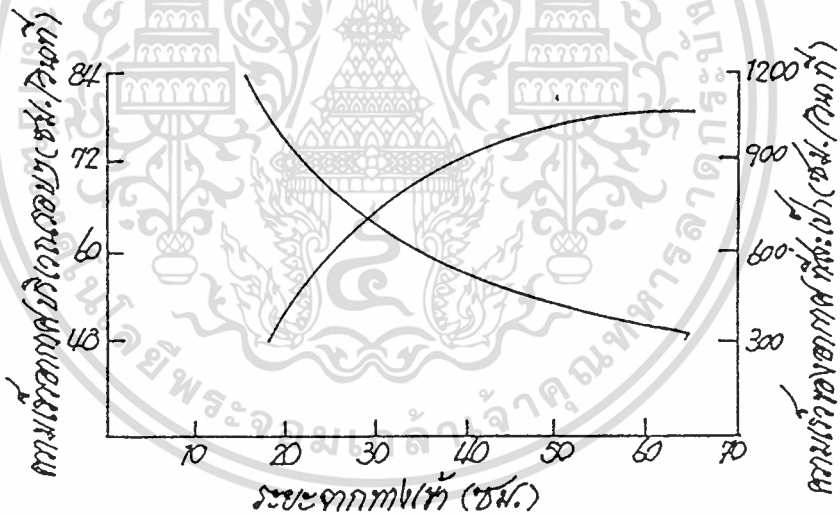
อากาศที่ออกจาก orifice มีความเร็วสูงมากส่วนใหญ่อยู่ตรงบริเวณสเปาท์ อีกส่วนแยกเข้าไปในส่วนรอบๆ สักส่วนที่แยกไปมีมากขึ้นทุกทีตามความสูงของเบค ดังการทดลองของ Thorley และผู้ร่วมงานในรูปที่ 2.8 ซึ่งผู้ทำวิจัยได้สรุปไว้ว่า ถ้ามุมของกรวยยังเล็ก สักส่วนของก๊าซที่เข้าไปในส่วนรอบๆ มากขึ้น

ส่วน Leva ได้วัดความเร็วของก๊าซทั้งสองส่วน เขาพบว่าความเร็วของก๊าซในสเปาท์ลดลงตามความสูงของเบคในบริเวณรอบๆ จะมีความเร็วตรงข้ามกับบริเวณสเปาท์กล่าวคือความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น ตามความสูงของเบคที่เพิ่มขึ้นดังในรูปที่ 2.9

Momuri และ Hattori ได้พยายามหาแนวเส้นของความเร็วในเบคที่ความสูงต่างๆ กัน เบคที่ใช้ประกอบด้วยข้าวสาลี หอททดลองขนาด 15 ซม. orifice ขนาด 1.4 ซม. มุมที่กรวย 60° ความลึกของเบค 33 ซม. เส้นแนวความเร็วที่วัดได้มีขนาดดังในรูปที่ 2.10 ซึ่งเห็นว่าสนับสนุนผลการทดลองของ Leva ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.8 เส้นกราฟแสดงการกระจายของก๊าซในสเปาท์เตดเบด



รูปที่ 2.9 เส้นกราฟแสดงความเร็วของอากาศที่ผ่านตรงสเปาท์และบริเวณรอบๆ

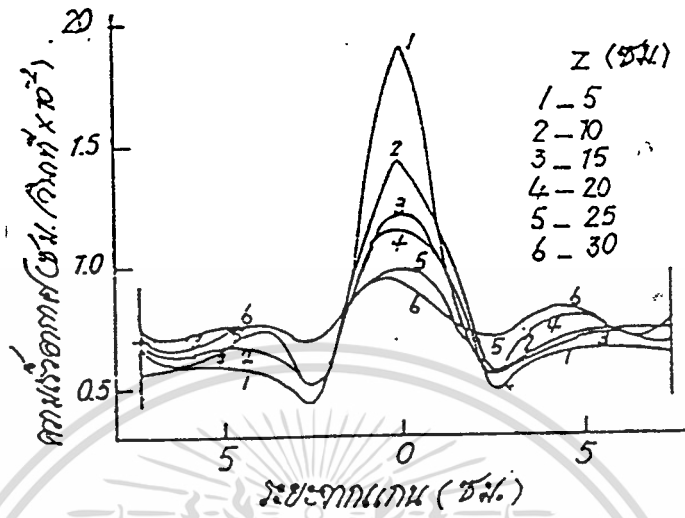
นอกจากนี้ Mamuri และ Hattori ยังได้เสนอแนะว่า ความเร็วตามตำแหน่งต่างๆ ในเบดที่ทำงานด้วยความลึกสูงสุดที่เกิดเป็นสเปาท์เตดเบดได้ คำนวณได้จาก

$$(U_A)_Z / U_{mf} = 1 - \{(1 - Z) / H_{sm}\} \tag{4.12}$$

เมื่อ

$(U_A)_Z$: เป็นความเร็วของก๊าซในส่วนรอบๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 เส้นกราฟแสดงแนวความเร็วตามแนวรัศมีในสเปาท์แตกเบด

ถ้าเป็นเบดที่ความลึกไม่มากนัก ความเร็วนั้นคำนวณจาก

$$(U_A)_z = 1 - \{(1 - Z)/A\}^3 \quad (4.13)$$

สมการที่เสนอมาทั้งสองนี้ ยังไม่มีผลงานมาสนับสนุนเป็นเพียงข้อเสนอแนะเท่านั้น
 ฉะนั้นเพื่อใช้คาดคะเนล่วงหน้าซึ่งอาจใช้สมการที่ 4.12 และ 4.13 บอกขนาดในขั้นต้นก่อนถ้าต้อง
 การค่าที่ถูกต้องแล้วควรวัดโดยตรงจากเบดจะดีกว่า

2.4.7 ลักษณะการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งในสเปาท์แตกเบด

การเคลื่อนที่เม็ดของแข็งในสเปาท์แตกเบดต่างจากฟลูอิดไดเซชันธรรมดา ทั้งนี้เพราะ
 เม็ดของแข็งเคลื่อนที่ขึ้นจากด้านล่างไปยังผิวของเบดด้วยความเร็วที่สูงมาก แล้วเคลื่อนที่ขึ้นจาก
 ด้านบนลงมาส่วนล่างตรงบริเวณรอบนอก

รายละเอียดการเดินทางแยกพิจารณาเป็น

2.4.7.1 บริเวณสเปาท์

ที่บริเวณนี้เม็ดของแข็งเคลื่อนที่จากส่วนรอบนอกแล้วลอยไปตามกระแสเจ็ตของ
 ก๊าซด้วยความเร็วที่สูงมาก การวัดความเร็วจึงต้องใช้กล้องถ่ายภาพยนตร์ที่มีความเร็วสูงๆ ขนาด
 1000 ภาพต่อวินาที ผนักของเบดเป็นวัสดุโปร่งใส (Mathur และ Gishler Thorley และผู้ร่วมงาน กับ
 Lefroy และ Davidson) เม็ดของแข็งมีอัตราเร่งสูงมากตรงบริเวณกรวยแล้วค่อยๆ ซ้ำลงจนถึงผิว

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีแห่งชาติ โดยผู้ยืมที่เห็นใบเซอร์ขอขึ้นด้านการค้า
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสเปาท์จึงกระทำได้อย่างมาก Thorley และผู้ร่วมงาน ได้พยายามคิดเป็นความเร็วเฉลี่ย เขาสร้าง ความสัมพันธ์จากการสมมูลย์ของแรง แต่เขาลืมคิดว่าเม็คของแข็งที่เคลื่อนที่ขึ้นมาในนั้นมีโอกาส กระแทกกับเม็คของแข็งตรงบริเวณติดกับสเปาท์ ฉะนั้นสัมประสิทธิ์การเสียดทานจึงสูงกว่าที่นัก วิทยาศาสตร์ทั้งสองได้คิดไว้

Mikhailik และ Antanishin ได้พบว่าความเร็วของเม็คของแข็งในสเปาท์ มี ความสัมพันธ์อยู่กับความเร็วของอากาศตรงทางเข้า ความลึกของเบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ หอทดลอง คุณสมบัติของแข็งและระยะจากอากาศเข้า แต่ก็ผูกความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวไม่ ได้

Gorshtein และ Mukhlenov ได้ศึกษาหาความเร็วของเม็คของแข็งตรง ตำแหน่งต่างๆ ในแนวรัศมี โดยเทียบกับความเร็วสูงสุดตรงแกนกลางได้ความสัมพันธ์เป็น

$$v_r = v_{\text{axis}} \left\{ (1 - r^2/a_s^2) \right\} \quad (4.14)$$

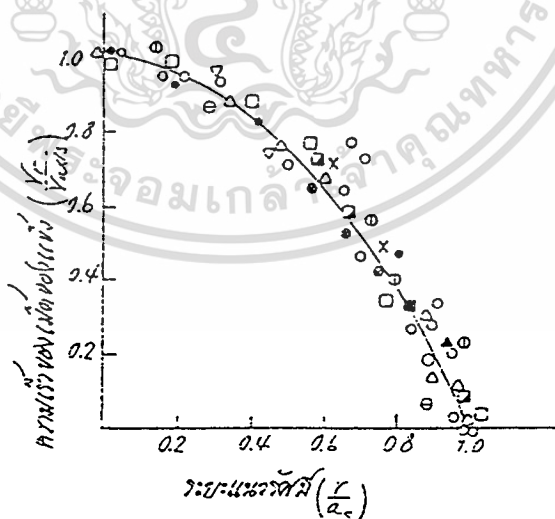
เมื่อ

a_s

: รัศมีของสเปาท์

และการทดลองของเขาที่สนับสนุนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่

2.11



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความเร็วเม็คของแข็งในสเปาท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.7.2 บริเวณรอบนอก

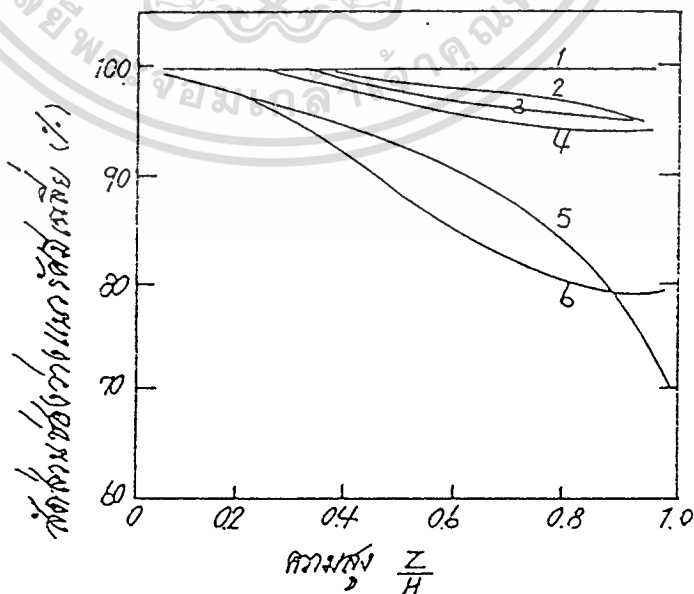
เม็คของแข็งเคลื่อนที่ลงตรงบริเวณรอบนอก ความเร็วตรงส่วนบนเร็วกว่าตรงส่วนล่างประมาณ 2 เท่าเพราะเกิดจากน้ำหนักของเม็คของแข็ง ความเร็วของเม็คของแข็งบริเวณใกล้ผนัง มีความเร็วใกล้เคียงกับเม็คของแข็งใกล้กับสเปาท์เพราะความเร็วของก๊าซที่สวนทางขึ้นมา ส่วนความเร็วตรงกลางจะเร็วกว่า สรุปความเร็วของเม็คของแข็งในบริเวณรอบนอกมีของไหลในท่อที่สวนกันอยู่

ในหอตลอดขนาดใหญ่ แนวเส้นความเร็วของเม็คของแข็งย่อมต่อจากหอตลอดขนาดเล็ก ความเร็วในระดับเดียวกันควรมีความเร็วเท่ากัน คังการไหลของไหลๆ ในท่อขนาดใหญ่

2.4.8 สักส่วนช่องว่างในสเปาท์เตดเบด

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของเม็คของแข็งแตกต่างกันในสเปาท์กับรอบข้าง สักส่วนช่องว่างจึงแตกต่างกันมาก ตรงบริเวณสเปาท์ สักส่วนช่องว่างมีมาก ส่วนตรงบริเวณรอบข้างมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับสักส่วนต่ำสุดในฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา การวัดหาสักส่วนช่องว่างในเบดใช้เทคนิคของ piezo-electric (ความดันทางไฟฟ้า) ซึ่งให้ค่าที่แม่นยำเชื่อถือได้

รูปที่ 2.12 ได้รวบรวมผลการทดลองของนักวิทยาศาสตร์หลายท่าน ซึ่งจะเห็นอย่างชัดเจนว่าสักส่วนช่องว่าง ส่วนบนของเบดมีค่าต่ำที่สุดในสเปาท์แต่สักส่วนช่องว่างนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของแข็งที่เป็นเบดด้วย



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงสักส่วนช่องว่างของสเปาท์กับความสูงเบด

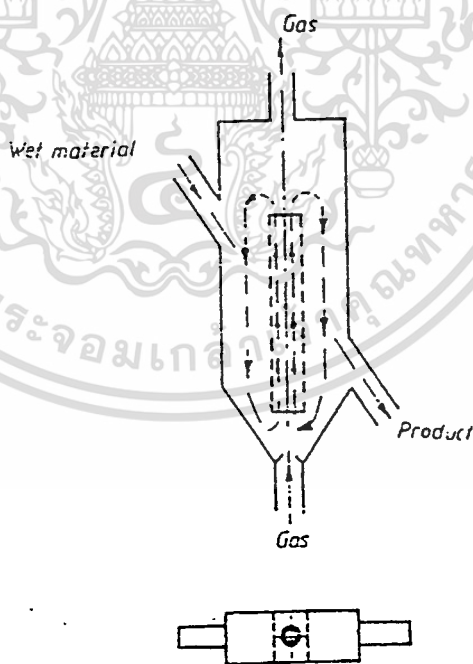
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

1. ข้าวฟ่าง
2. ข้าวสาลี
3. ข้าวสาลี
4. ซิลิกาเจล
5. ข้าวสาลี
6. ซิลิกาเจล

2.4.9 อุปกรณ์และการทดลอง

Classic or conventional spouted bed (CSB) ประกอบด้วยภาชนะทรงกระบอกกับทรงกรวยด้านล่างและมี nozzle สำหรับฉีดอากาศ (drying medium) อุปกรณ์นี้มีขีดความสามารถในการอบสูง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร และมีท่อในแนวตั้ง (draft tube) สูงจาก nozzle ในระยะจำกัด Solid จะไหลเป็นวงกลม



รูปที่ 2.13 แสดงภาพตัดขวางของ Spouted bed predryer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงขนาดของ Spouted bed Predryer

ขนาดความยาวสูงสุด (มม.)	ขนาดความสั้นเล็กสุด (มม.)	ความสูง (มม.)	ขนาดของ Nozzle (มม.)	ภาพตัดขวางของท่อ (ม. ²)	ความเร็วของการไหลเฉลี่ย (ม./วินาที)
350	40	1000	20-40	0.0124	0.01

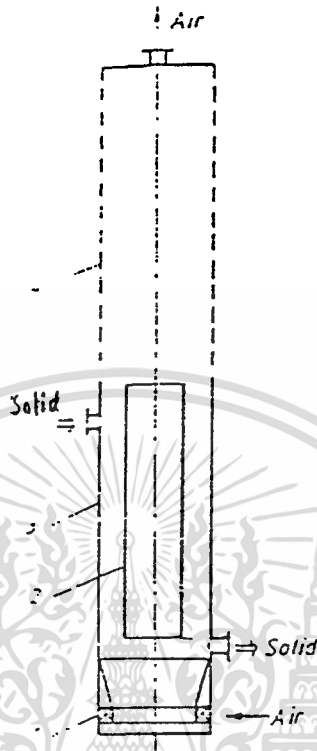
SBD คังตาราง มีอัตราการอบ 80 กก./ชม. สำหรับอบแห้งข้าวโพดที่ 150 °C air flow rate 200 ม.³/ชม. สามารถลดความชื้นได้ 5% ในช่วง falling rate

เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีความพยายามที่จะลด High Pressure lose ของ air ที่มีผลมาจาก Central nozzle ปัญหานี้แก้ไขได้โดยการ feed air ในลักษณะ Tangential กับใช้ slits ในแนวนอน และเรียกว่า "Swirling rings"



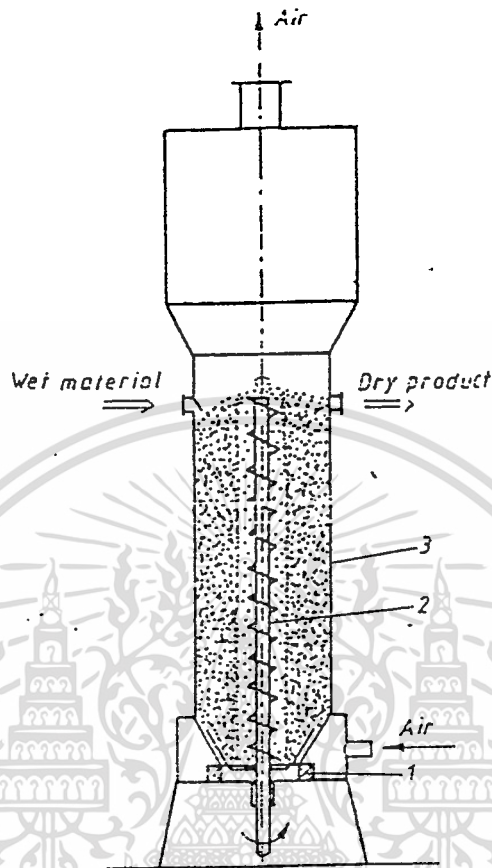
รูปที่ 2.14 แสดงการไหลวนของแก๊สในเครื่องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงส่วนที่มีการปะทะของอากาศของเครื่องอบแห้งแบบสเปาท์เดคเบคแบบมีท่อ
คราฟท์ : (1) ส่วนที่อากาศเข้า , (2) ท่อคราฟท์ , (3) ตัวเครื่องอบ , (4) ส่วนที่อากาศ
ปะทะโดยตรง

ต่อมาได้มีการติดตั้ง Conveyer Screw ตามแนวตั้ง บริเวณกึ่งกลางอุปกรณ์



รูปที่ 2.16 แสดงเครื่องอบแห้งแบบสเปาท์เทคเบดแบบอากาศเข้าและมีชุดสกรูลำเลียงที่ศูนย์กลาง : (1) ทางเข้าของอากาศ , (2) ชุดสกรูลำเลียง , (3) ตัวเครื่องอบแห้ง

การเปิด conveyer screw ไม่ขึ้นกับ air flow rate Spouted bed แบบนี้จะมีการวนอย่างสม่ำเสมอ เมื่อขนาดของ diameter of dryer (D_d) เทียบกับ ขนาดของ Material (D_p) คือ

$$D_d/D_p > 500$$

การเลือก draft tube ที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการศึกษาการไหลอย่างมีแบบแผน ซึ่งอาจจะวัดความเร็วของอนุภาคได้โดยการ mark อนุภาคทำให้สามารถรู้ mean residence time ของอนุภาคได้จาก

$$\bar{\Gamma} = H/W_a$$

เมื่อ

$\bar{\Gamma}$: เวลาเฉลี่ยของการไหลวนของอนุภาค

H : ความลึกของข้าวเปลือก

W_a : ความเร็วของการไหลของอนุภาค

ในการศึกษา Sliding velocity of particle นี้ซึ่งอาจใช้พลาสติกเป็นตัวแทนของอนุภาค และสามารถหา sliding velocity ของอนุภาคได้จากสูตร ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วของอากาศทางเข้า, ความสูงของถังและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด

$$W_a' = W_a'' (V'/V'')^{2/3}$$

และ

$$W_{aH} = W_{aHmax} (H/H_{max})^{1/3}$$

และ

$$W_a' = W_a'' (D_i'/D_i'')^{2/3}$$

เมื่อ

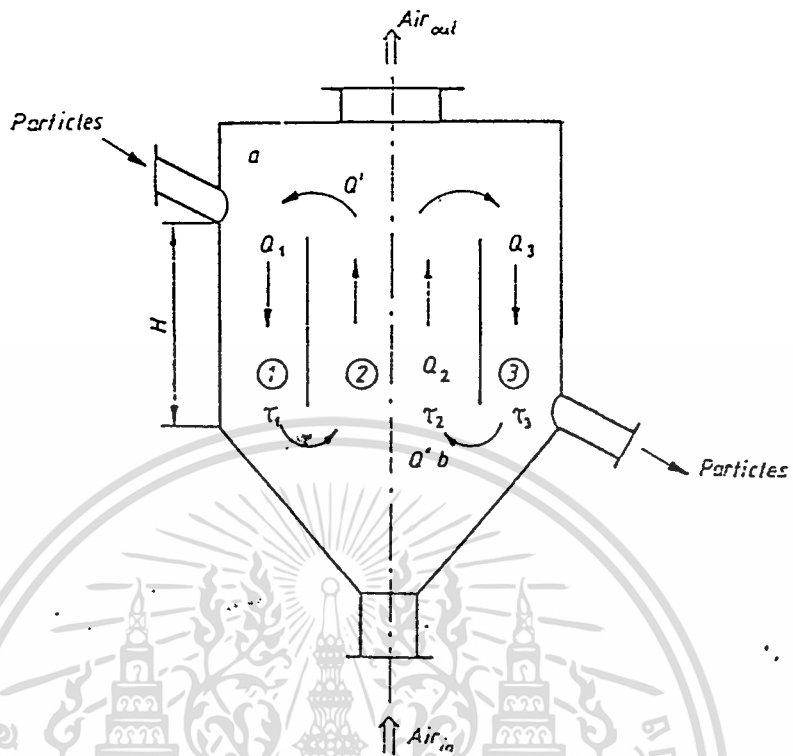
W_a' : Sliding Velocity ของอนุภาคใน annulus ที่ inlet air velocity V' และ air inlet nozzle D_i'

W_a'' : Sliding Velocity ของอนุภาคใน annulus ที่ inlet air velocity V'' และ air inlet nozzle D_i''

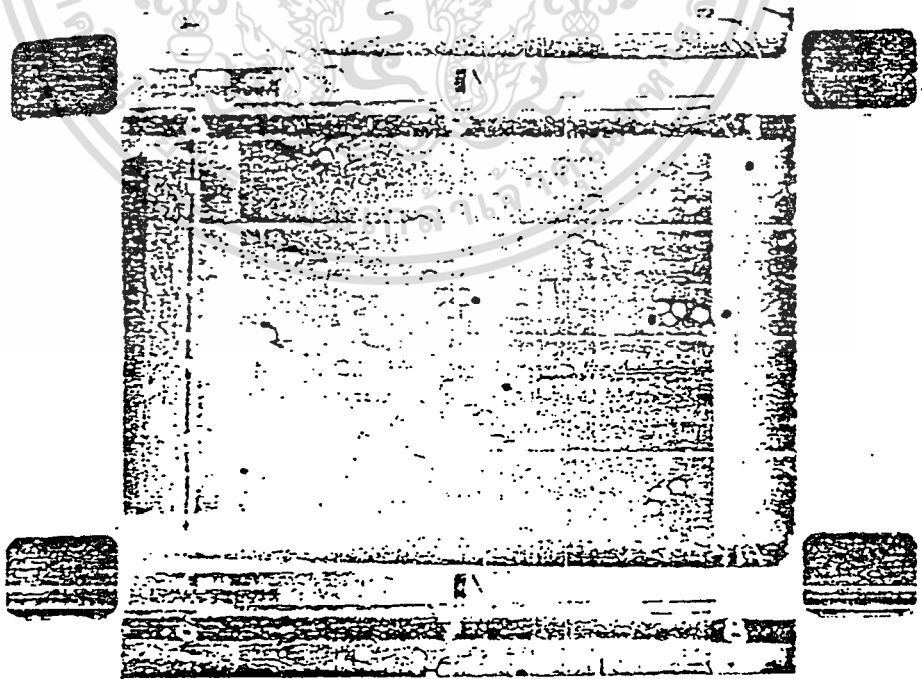
W_{aH} : Sliding Velocity ของอนุภาคใน annulus ที่ความสูง H

W_{aHmax} : Sliding Velocity ของอนุภาคใน annulus ที่ความสูง H_{max}

อย่างไรก็ตามการอบแห้งไม่ได้ขึ้นกับ residence time เท่านั้นแต่จะขึ้นกับการกระจายของ residence time ของอนุภาค อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาเป็นดังรูป

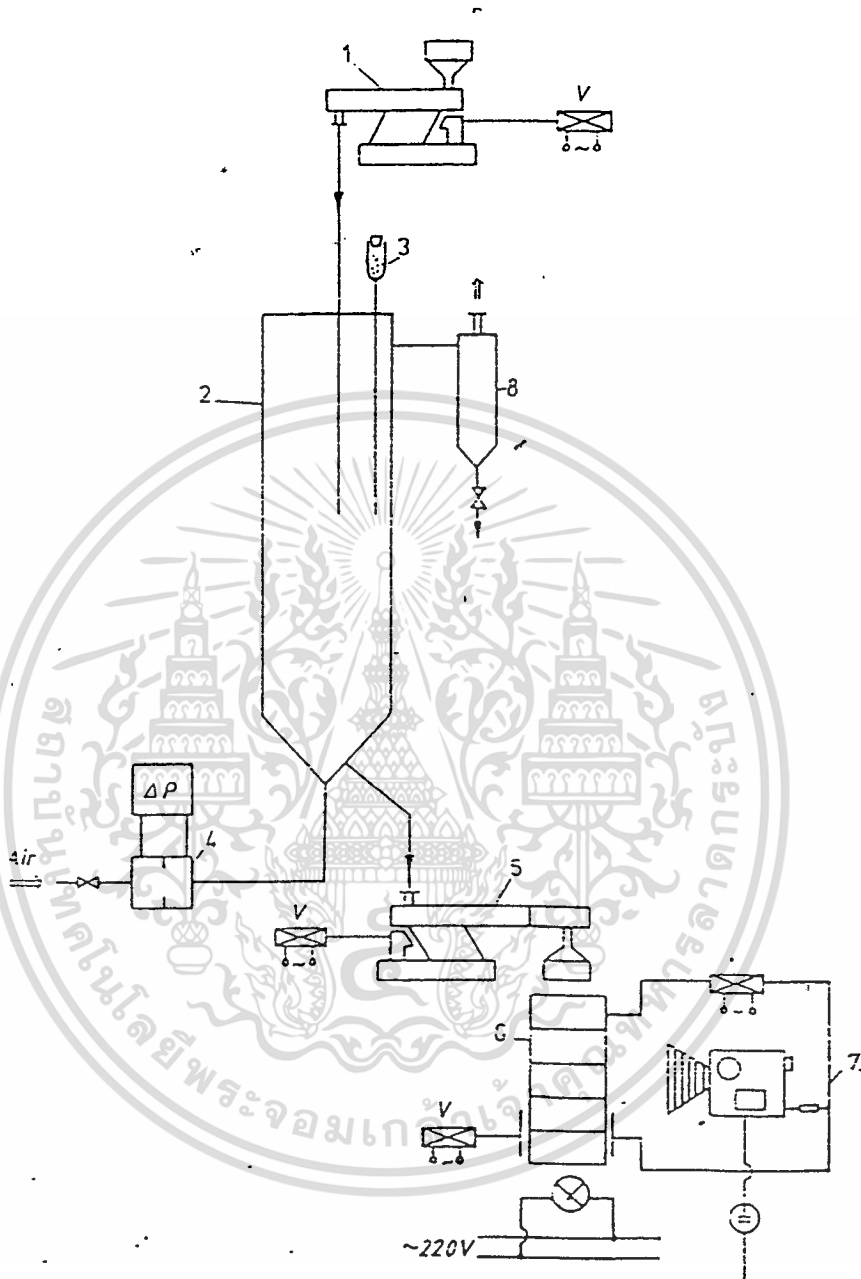


รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบการไหลวนของเมล็ด



รูปที่ 2.18 แสดงการกระจายของอนุภาคบนสายพานลำเลียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

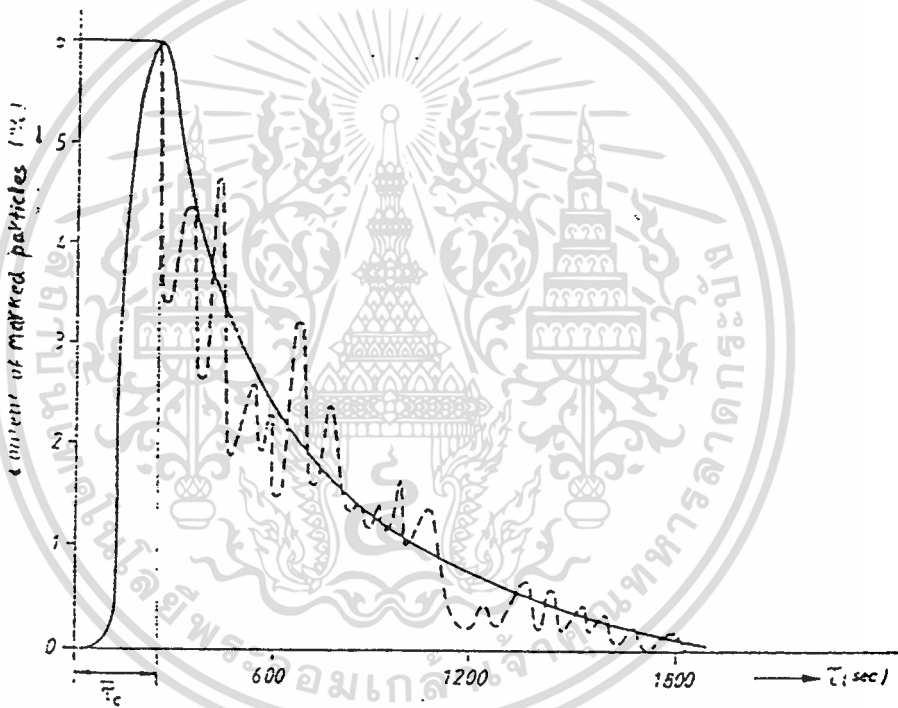


รูปที่ 2.19 แสดงการติดตั้งของการทดลองสำหรับการวัดการกระจายเวลาในการไหลวนของแม่เหล็ก : (1) ตัวป้อน , (2) สเปอร์ทเดคเบค . (3) ตัวป้อนของแม่เหล็กที่ทำสัญลักษณ์ . (4) เครื่องวัดอัตราการไหล , (5) เครื่องทำให้แม่เหล็กสั้นสะเทือน , (6) สายพานลำเลียง , (7) กล้องโทรทัศน์ , (8) ตัวค้ำฝุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Polyvinyl chloride (PVC) สีต่างๆ ถูกนำมาใช้ในการทดลองโดยจะใช้ PVC สีขาว และสีดำ ซึ่งจะป้อน PVC สีขาวอย่างต่อเนื่องและจะป้อน PVC สีดำเป็นจังหวะๆ ที่ด้านบนของ annulus ทางขวามือซึ่งจะทำให้เกิดการผสมกันขึ้น ที่ทางออกของอุปกรณ์จะมี conveyor belt และกล้องวิดีโอ

สีของอนุภาคที่มีความแตกต่างกันจะถูกบันทึกเป็นช่วงๆ 3-5 วินาที ต่อช่วงและ จะได้การกระจายของ residence time ดังรูป



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงการกระจายของเวลาของเม็ดสี $\Gamma_c = 2\bar{\Gamma}_1 + \bar{\Gamma}_2$

ที่ เส้นปะ (broken line) แสดงค่าที่วัดได้และ เส้นทึบ (solid line) แสดงค่าเฉลี่ยของการกระจายจุดยอดของค่าที่วัดได้จะขึ้นๆ ลงๆ ตามความหนาแน่น กราฟจะแสดงการกระจายของอนุภาคที่หมุนวนอยู่ต่อระยะเวลา ณ จุดทางออกของอนุภาค ซึ่งจะเห็นว่าการกระจายหนาแน่นในช่วงเวลาอันสั้น (short dimensionless times $\theta = \bar{\Gamma}/\Gamma$) ในช่วงต้นของกราฟ

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 การออกแบบอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying แบบมี Draft Tube

ในการศึกษาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคสเปาท์เดคเบด จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying เพื่อจำลองขนาดเครื่องอบแห้งให้มีขนาดเล็กลง โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying นี้จะต้องมีความสามารถในการอบข้าวเปลือกครั้งละประมาณ 6 กก. และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ซม. ซึ่งมีวิธีการออกแบบดังนี้

วิธีการออกแบบ

1. ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

- | | |
|---|----------------------------|
| 1.1 อุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying บรรจุข้าวเปลือก (m) | : 6 กก. |
| 1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying (D_c) | : 25 ซม. |
| 1.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Draft tube | : 10 ซม. |
| 1.4 มุมตรงกรวย | : 65° |
| 1.5 ความหนาแน่นของข้าวเปลือกที่ความชื้น 30% (ρ_p) | : 730 กก./ม. ³ |
| 1.6 เส้นผ่านศูนย์กลางข้าวเปลือก (d_p) | : 0.35 ซม. |
| 1.7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้าลมส่วนที่เป็น Nozzle (D_i) | : 8 ซม. |
| 1.8 ความหนาของข้าวเปลือกบริเวณปาก Nozzle | : 7 ซม. |
| 1.9 ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 80°C (ρ_a) | : 0.96 กก./ม. ³ |
| 1.10 ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 100°C (ρ_a) | : 0.91 กก./ม. ³ |
| 1.11 ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 120°C (ρ_a) | : 0.87 กก./ม. ³ |

2. กำหนดหาขนาดต่างๆ ของอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying

จากการกำหนดลักษณะของอุปกรณ์ทดลอง สามารถคำนวณค่าต่างๆ ในการสร้างอุปกรณ์ทดลองได้ดังนี้

จากที่ได้กำหนดความจุของอุปกรณ์ทดลองที่ได้ประมาณ 6 กก.

$$\text{ปริมาตรข้าวเปลือก (V)} = m/\rho_p$$

เมื่อ

m : มวลข้าวเปลือก

 ρ_p : ความหนาแน่นของข้าวเปลือก

$$\begin{aligned}
 V &= 6/730 \\
 &= 0.008219 \text{ ม.}^3 \\
 &= 8219 \text{ ซม.}^3
 \end{aligned}$$

ปริมาตรบรรจุของอุปกรณ์ทดลองในส่วนที่ 1

$$\begin{aligned}
 &= \{(\pi(25^2 - 8^2)(17))/12\} - \{(\pi(10^2)(10))/4\} \\
 &= 1711 \text{ ซม.}^3
 \end{aligned}$$

ปริมาตรบรรจุของอุปกรณ์ทดลองในส่วนที่ 2

$$\begin{aligned}
 &= \{(\pi(25)^2 h)/4\} - \{(\pi(10)^2 (10))/4\} \\
 &= 412h \text{ ซม.}^3
 \end{aligned}$$

เนื่องจาก

ปริมาตรของข้าวเปลือก 6 กก. = ปริมาตรบรรจุของอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying

$$8019 = 412h - 1711 \text{ ซม.}^3$$

$$h = 15.79 \text{ ซม.}$$

ดังนั้น

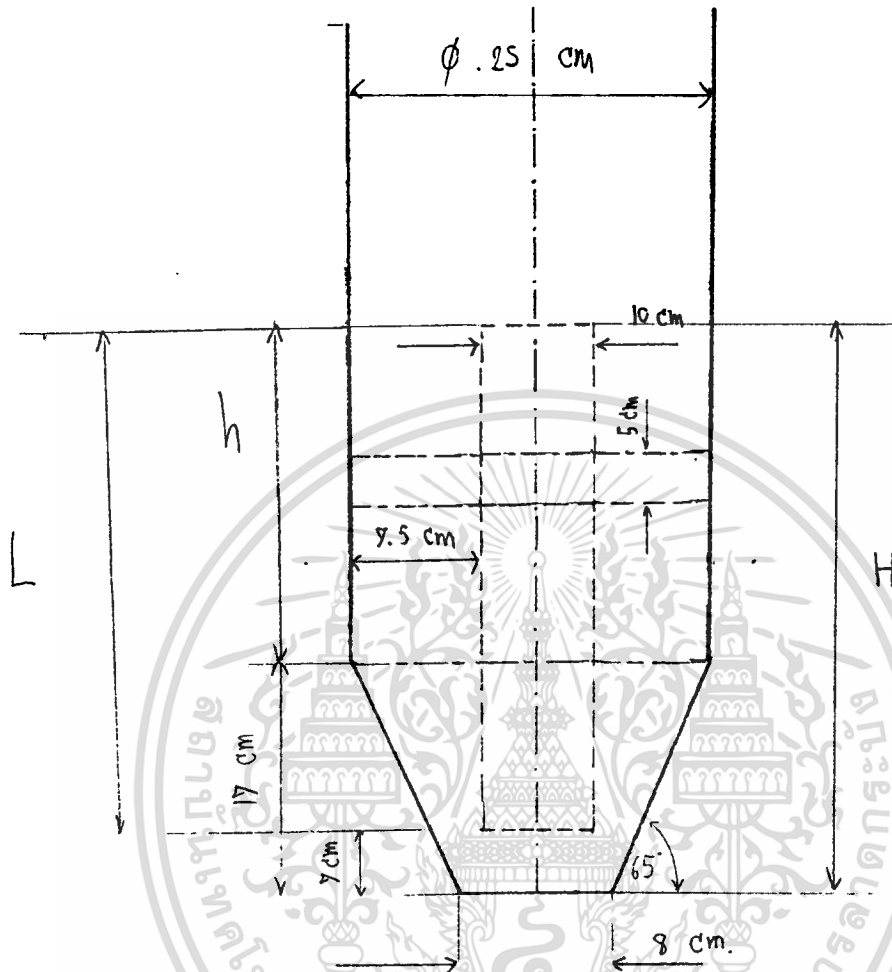
$$L = 15.79 + 10$$

$$= 25.79 \text{ ซม.}$$

ดังนั้นจึงกำหนดความยาวของ Draft tube (L) = 30 ซม.

ความสูงทั้งหมด (H) = 30 - 7 = 37 ซม.

จากการกำหนดลักษณะและคำนวณค่าของอุปกรณ์ จะได้อุปกรณ์ทดลองดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขนาดของอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying

3. กำหนดหาความเร็วลมต่ำสุด

เนื่องจากขนาดต่างๆ ของอุปกรณ์ทดลอง จะมีผลกับความเร็วลมต่ำสุดที่ใช้ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสเป้าต์เดคเบด และความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นไปตามสมการที่ 4.2 ของ Lera ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4

สมการที่ 4.2 ของ Lera

$$U_{ms} = (d_p/D_s)(D_s/D_p)^2 \sqrt{2gH(\rho_p - \rho_f/\rho_f)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

- n : ตัวแปรซึ่งมีค่าตามขนาดท่อส่งอากาศ (D_1) และมุมตรงกรวย ดังนี้
- $n = 0.23$ เมื่อ D_1 มีขนาด 5 ซม. ถึง 10 ซม. มุมตรงกรวย 45°
- $n = 0.13$ เมื่อ D_1 มีขนาด 5 ซม. ถึง 10 ซม. มุมตรงกรวย 65°
- $n = 1/3$ เมื่อ D_1 มีขนาด 15 ซม. มุมตรงกรวย ตั้งแต่ 45° ถึง 85°
- จากการกำหนด Nozzle 8 ซม. และมุมกรวย 65° ดังนั้น $n = 0.13$

แทนค่า

$$U_{ms} = (0.35/25)(8/25)^{0.13} \sqrt{\{2(9.81)(0.37)(730 - 0.91)/(0.91)\}}$$

$$= 0.92 \text{ ม./วินาที}$$

$$\approx 1 \text{ ม./วินาที}$$

$$\text{อัตราการไหลของอากาศ} = (1)\{\pi(0.08)^2\}/4$$

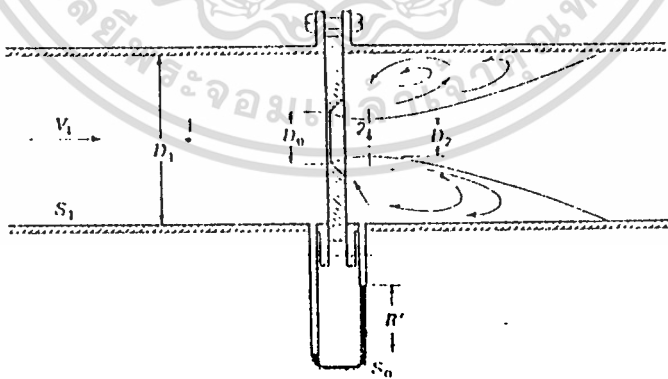
$$= 0.00502 \text{ ม.}^3/\text{วินาที}$$

$$= 0.30 \text{ ม.}^3/\text{นาที}$$

4. การวัดความเร็วของลมทางเข้าของ Nozzle

โดยจะอาศัยความแตกต่างของความดันในช่วงก่อนและหลังผ่านแผ่น Orifice ดังรูปที่

3.1



รูปที่ 3.2 แสดงการวัดความเร็วของลมด้วยแผ่น Orifice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$Q = CA_0 \sqrt{2\Delta P/\rho}$$

และ

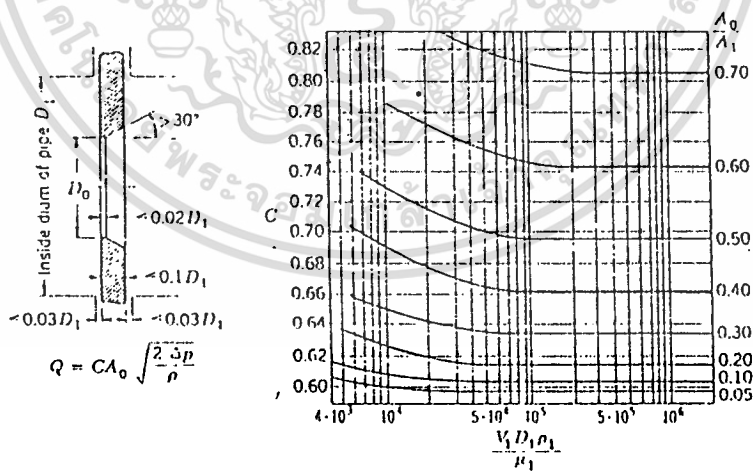
$$Q = VA$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} V &= (CA_0/A_1) \sqrt{2\Delta P/\rho} \\ &= \{C(D_0/D_1)^2\} \sqrt{2\Delta P/\rho} \\ &= CA_0 \sqrt{2gR \{(S_0/S_1) - 1\}} \end{aligned}$$

เมื่อ

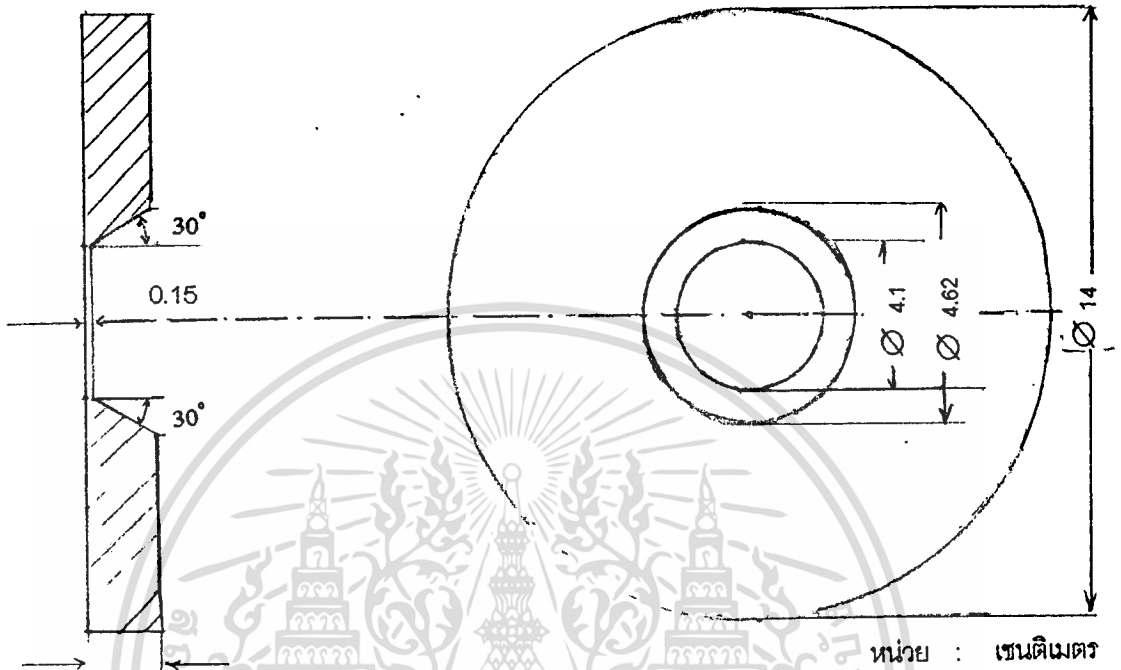
- S₀ : ความกว้างจำเพาะของช่องเหลว
 S₁ : ความกว้างจำเพาะของอากาศ
 R : ความสูงของระดับของเหลว
 C : ค่าสัมประสิทธิ์ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ C กับ A₀/A₁

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะใช้แผ่น Orifice ที่มีลักษณะดังนี้



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของแผ่น Orifice ที่ใช้ทดลอง

ดังนั้นจะได้ค่า $A_0/A_1 = 0.25$ และ $C = 0.63$ (ท่อลมมีความหนา = 8.2 ซม.)

5. ใช้พัดลมแบบแรงเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 ซม. มีมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเป็นค้ำกำลังและใช้ Inverter ในการปรับความเร็วรอบของพัดลม เพื่อให้ได้ความเร็วรอบตามที่ต้องการ
6. Heater จะใช้แก๊สเผาอากาศก่อนเข้าพัดลม

3.2 อุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Dying

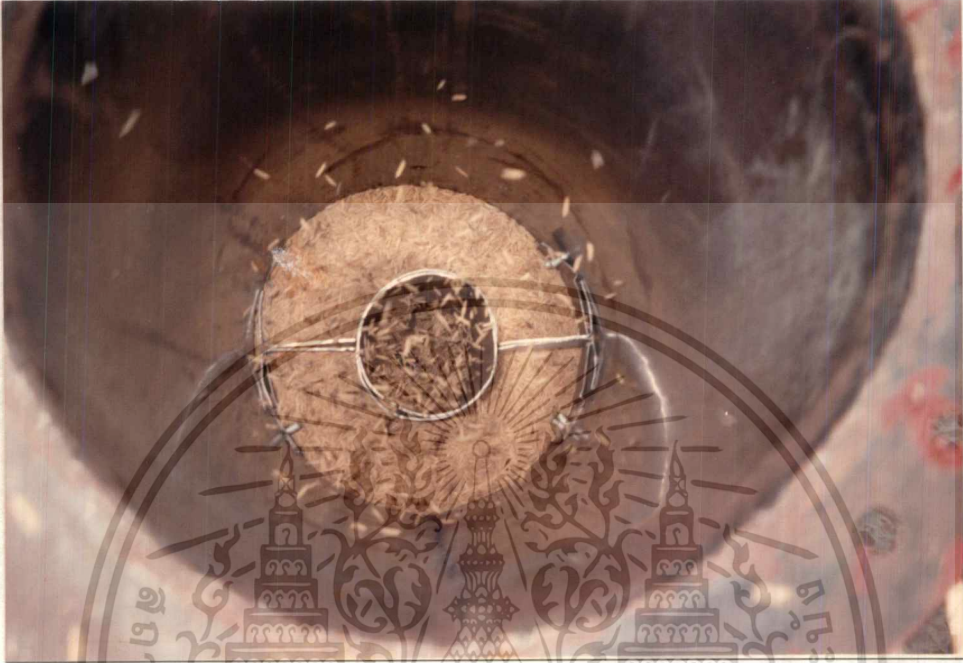
หลังจากสร้างอุปกรณ์ทดลองตามที่ออกแบบไว้ อุปกรณ์ทดลองมีลักษณะและมีรายละเอียดดังนี้

- ความจุ : 6 กก.
- ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสเปาเตคเบค : 2.02 ม./วินาที
- ความดันที่ใช้ : 588 นิวตัน/ม.²

เนื่องจากเมื่อใส่เข้าเปลือก 6 กก. และใช้ความเร็วต่ำสุด จะทำให้อัตราการหมุนวนช้ามากไม่เหมาะกับการทดลอง จึงกำหนดในการทดลองจะอบข้าวเปลือก 4 กก. และใช้ความเร็วเป็น 5 ม./วินาที, 5.5 ม./วินาที และ 6 ม./วินาที ซึ่งจะมีอัตราการหมุนวนแปรเปลี่ยนเป็น 8 นาที/รอบ, 5 นาที/รอบ และ 3 นาที/รอบ ตามลำดับ



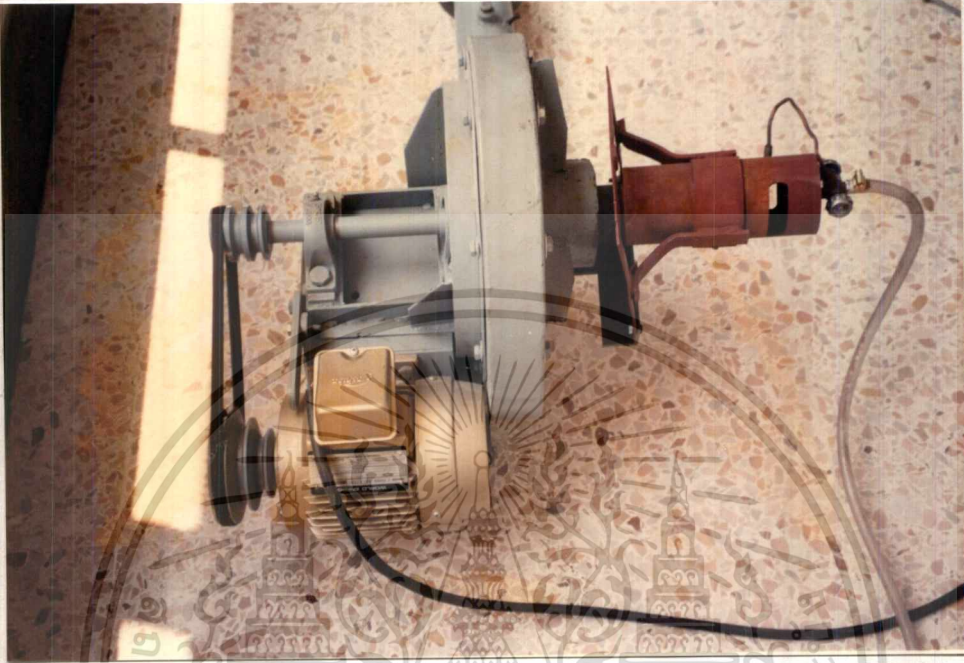
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.6 แสดงอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงการเกิดเบดที่รุนแรงในอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.8 แสดงการเกิดเบดที่ไม่รุนแรงในอุปกรณ์ทดลอง Spouted bed Drying
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงพัดลม และ Heater

จากการคำนวณจะ ได้ความสัมพันธ์ของความสูงของระดับของเหลวในบารอมิเตอร์กับความเร็วลม ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของความสูงของระดับของเหลวในบารอมิเตอร์กับความเร็วลม

ความเร็วลม (ม./วินาที)	ความสูงของระดับของเหลวในบารอมิเตอร์ (ซม.)		
	80°C	100°C	120°C
5.0	5.0	4.7	4.5
5.5	6.0	5.7	5.4
6.0	7.0	6.8	6.4

8. การวัดความชื้น

ใช้เครื่องวัดความชื้น โดยมีการทดลองเพื่อปรับค่าให้ถูกต้องซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่

3.10

สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟการปรับแต่งเครื่องวัดความชื้น



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่อ่านได้จากเครื่องวัดความชื้นกับค่าความชื้นที่ได้ออกมาจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างข้าว

ข้าวเปลือกส่วนใหญ่แล้วเมื่อขณะทำการเก็บเกี่ยวจะมีความชื้นประมาณ 18-24% มาตรฐานเปียก ซึ่งหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วความชื้นของข้าวเปลือกจะเปลี่ยนแปลงไป ขึ้นอยู่กับการดูแลรักษา แต่สำหรับการทดลองศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกนี้จะทดลองอบแห้งกับข้าวที่มีความชื้นเริ่มต้น 30% มาตรฐานเปียก ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงต้องนำข้าวเปลือกที่จะใช้ทดลองมาเพิ่มความชื้น โดยการนำข้าวเปลือกมาแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผึ่งในที่ร่มเพื่อให้ความชื้นกระจายอย่างสม่ำเสมอและเป็นการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วย เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้น 30% มาตรฐานเปียก ตามต้องการแล้ว ในระหว่างรอการทดลองต้องนำข้าวเปลือกที่ได้ใส่ถุงพลาสติกปิดให้มิดชิดเพื่อป้องกันการถ่ายเทความชื้นของข้าวเปลือกกับอากาศ หลังจากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 10°C (เก็บไว้ในตู้เย็น) เพื่อลดการหายใจของข้าวเปลือก เนื่องจากการหายใจของข้าวเปลือกจะทำให้อุณหภูมิและความชื้นสูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้

เมื่อจะทำการทดลองจะต้องนำข้าวเปลือกมาผึ่งที่อุณหภูมิห้อง แต่ยังไม่ต้องนำออกจากถุงพลาสติก รอจนข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงเริ่มการทดลอง

3.3.2 วิธีการทดลองการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบ Spouted bed Drying

อุปกรณ์การอบแห้งที่สร้างขึ้นมาเพื่อศึกษา อัตราการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งอันได้แก่

ตัวแปร

1. อุณหภูมิลมร้อน : 80°C , 100°C และ 120°C
2. ความเร็วลม : 5.0 ม./วินาที, 5.5 ม./วินาที, 6.0 ม./วินาที
3. เวลา : 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, ... นาที

ค่าคงตัว

1. อุปกรณ์อบแห้ง : เครื่องอบแห้งแบบสเปาท์เดคเบด
2. ปริมาณของข้าวตัวอย่าง : 4 กก.
3. ความชื้นเริ่มต้นของข้าวตัวอย่าง : 30% มาตรฐานเปียก
4. อุณหภูมิเริ่มต้นของข้าวตัวอย่าง : อุณหภูมิห้อง (25°C)

3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. เปิดพัดลมและติดไฟที่หัวแก๊ส ปรับอุณหภูมิเป็น 80°C
2. ปรับ Inverter จนระดับของเหลวในบารอมิเตอร์มีความต่างกัน 5 ซม.
3. นำข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 30% มาตรฐานเปียก จำนวน 4 กก. ใสลงใน

Spouted bed Drying

4. เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกประมาณ 100 กรัม ที่ช่องเก็บตัวอย่างตามเวลาดังนี้ 5 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 40 ... นาที และวัดความชื้นจนกว่าข้าวเปลือกจะมีความชื้น 14% มาตรฐานเปียก
5. นำข้าวเปลือกที่ได้จากข้อ 4 ไปตรวจสอบคุณภาพ
6. ทำการทดลองใหม่จากข้อ 1-5 แต่ปรับค่าในข้อ 2 ให้มีค่า 5.5 ซม. และ 6 ซม.
7. ทำการทดลองใหม่จากข้อ 1-6 แต่ปรับค่าในข้อ 1 ให้มีค่า 100°C และ 120°C
8. นำค่าที่ได้จากการทดลองไปเขียนกราฟ

3.3.4 วิธีการวัดคุณภาพของข้าวเปลือก

1. นำข้าวเปลือกตัวอย่างฝั่งให้ความชื้นเป็น 14% มาตรฐานเปียก
2. นำข้าวเปลือกตัวอย่างจำนวน 100 กรัม ไปกะเทาะเปลือกออก
3. นำข้าวกล้องที่ได้จากข้อ 2 ไปชั่งข้าว
4. นำข้าวสารที่ได้ชั่งน้ำหนัก
5. นำข้าวสารไปแยกเป็นข้าวเต็มเมล็ดและปลายข้าวหักโดยใช้ตะแกรง No. 10
6. ชั่งน้ำหนักของข้าวเต็มเมล็ดที่ได้ และคำนวณ

$$\% \text{ ข้าวเต็มเมล็ด} = \{ \text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด} \times 100 \} / \text{น้ำหนักข้าวเปลือก}$$

$$\% \text{ ข้าวหัก} = \{ (\text{น้ำหนักข้าวสาร} - \text{น้ำหนักข้าวสารเต็มเมล็ด}) \times 100 \} / \text{น้ำหนักข้าวเปลือก}$$

$$\% \text{ ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์} = \% \text{ ข้าวเต็มเมล็ด} / \% \text{ ข้าวเต็มเมล็ดอ้างอิง}$$

ข้าวเปลือกอ้างอิง คือ ข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 30% มาตรฐานเปียก และใช้อุณหภูมิอากาศแวดล้อมลดความชื้นให้เหลือ 16% มาตรฐานเปียก

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ลักษณะของการเกิดสเปกที่แตกเบคจากอุปกรณ์ทดลอง

ข้าวเปลือกจะถูกป้อนเข้าเครื่องอบแห้งทางด้านบนตรงบริเวณช่องด้านข้างท่อกราฟท์กับตัวเครื่องอบแห้ง เมื่อข้าวเปลือกไหลไปอยู่บริเวณทางเข้าของลม ลมก็จะพัดให้ข้าวเปลือกลอยขึ้นผ่านเข้าไปในท่อกราฟท์ และลอยตกลงมาบริเวณช่องด้านข้างท่อกราฟท์กับตัวเครื่องอบแห้ง แล้วข้าวเปลือกก็จะไหลไปบริเวณทางเข้าของลม ทำให้ข้าวเปลือกจะวนอยู่อย่างนี้จนอบแห้งเสร็จ โดยที่ในช่วงที่ข้าวเปลือกถูกพัดขึ้นมาจากทางเข้าลมจะมีความเร็วมากและใช้เวลาในการผ่านท่อกราฟท์ประมาณ 2 วินาที ซึ่งในช่วงนี้ข้าวเปลือกจะสัมผัสกับลมร้อนทำให้เกิดการอบแห้งอย่างมาก ดังนั้นการอบแห้งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงนี้ เมื่อข้าวเปลือกตกลงมาอยู่ในบริเวณช่องด้านข้างท่อกราฟท์กับตัวเครื่องอบแห้ง ข้าวเปลือกในช่วงนี้ยังเป็นการอบแห้งอยู่แต่จะช้ากว่าในช่วงที่ผ่านท่อกราฟท์ และความเร็วในการไหลวนของข้าวเปลือกจะขึ้นอยู่กับความเร็วของลมร้อนที่ทางเข้าของลม

4.2 ผลการทดลอง

จากการทดลองทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 80°C , 100°C , 120°C และที่ความเร็วลม 5.0 , 5.5 , 6.0 m/s ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้ (ผลจากการทดลองที่เป็นข้อมูลดิบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก-1 และ ตารางที่ ก-2)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 5.0 ม./วินาที

เวลา (นาท)		80°C	100°C	120°C
5	% ความชื้น	26.6	24.0	23.6
	% ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์	84.5	87.7	83.1
10	% ความชื้น	25.3	23.5	21.9
	% ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์	80.0	65.4	70.8
15	% ความชื้น	23.5	21.6	19.3
	% ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์	81.5	78.5	64.6
20	% ความชื้น	22.8	20.2	15.8
	% ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์	78.5	73.8	67.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)		80°C	100°C	120°C
25	% ความชื้น	19.4	17.0	14.0
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	78.5	64.6	60.0
30	% ความชื้น	19.3	14.9	-
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	68.2	67.7	-
40	% ความชื้น	15.6	13.8	-
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	66.2	55.2	-
50	% ความชื้น	13.6	-	-
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	63.1	-	-

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 5.5 ม./วินาที

เวลา (นาที)		80°C	100°C	120°C
5	% ความชื้น	25.0	24.0	22.3
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	86.1	83.1	84.6
10	% ความชื้น	23.0	22.1	20.4
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	78.5	76.9	80.0
15	% ความชื้น	22.1	21.4	18.3
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	80.0	72.0	78.0
20	% ความชื้น	21.4	20.0	15.8
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	76.9	69.2	69.2
25	% ความชื้น	19.1	16.6	13.8
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	70.8	66.2	61.5
30	% ความชื้น	18.7	15.2	13.2
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	73.8	61.5	64.6
40	% ความชื้น	16.0	14.4	-
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	63.1	63.1	-
50	% ความชื้น	13.5	13.4	-
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	64.6	58.5	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

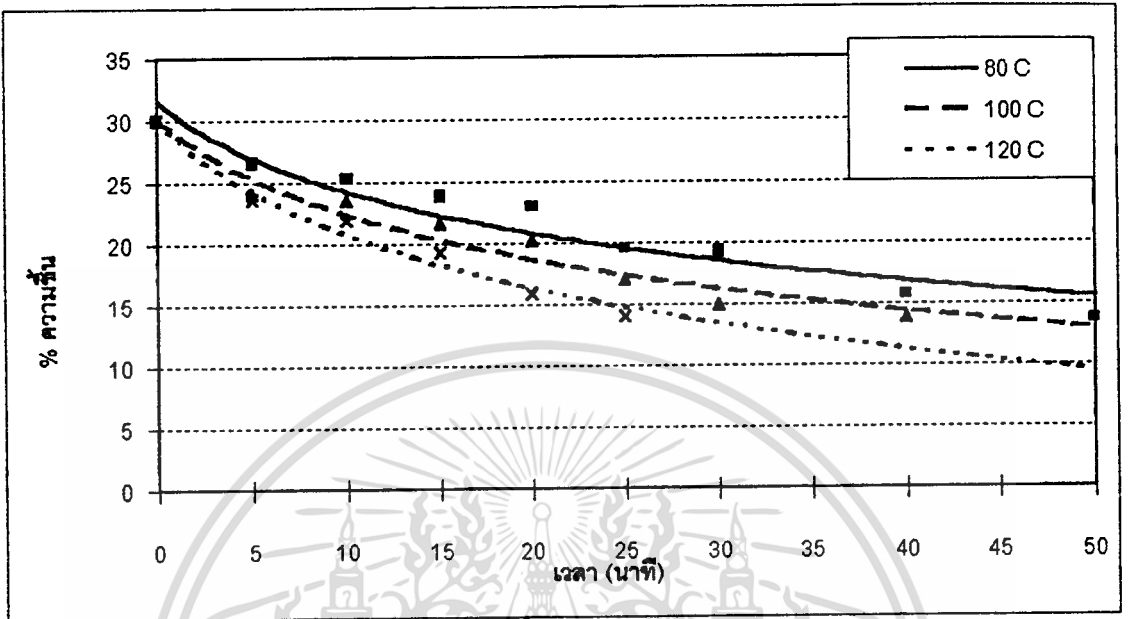
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 6.0 ม./วินาที

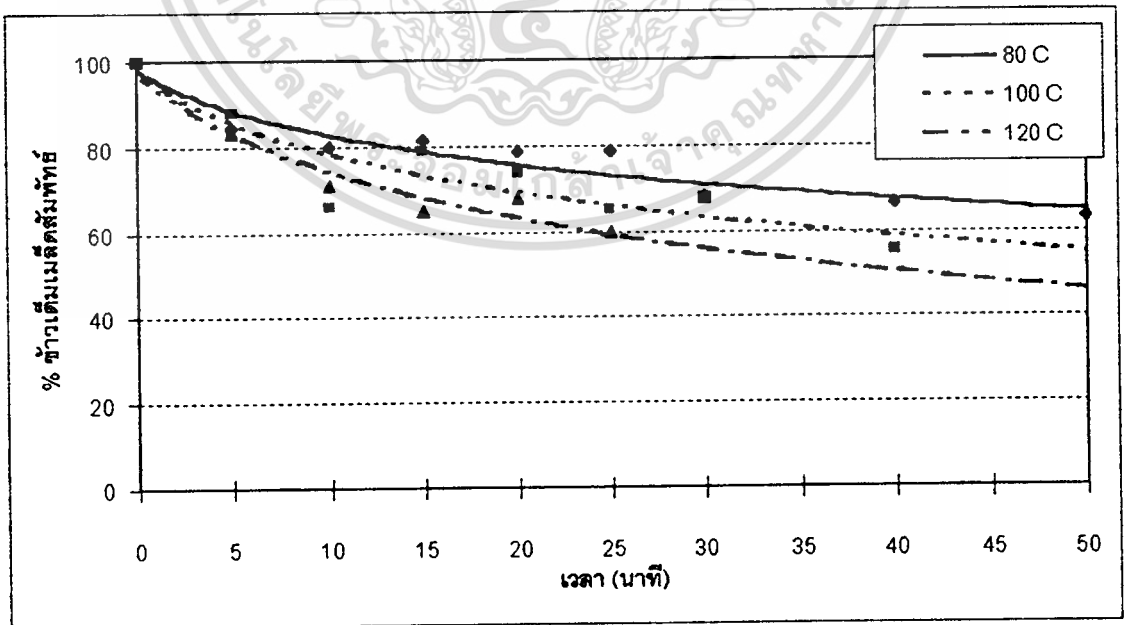
เวลา (นาที)		80°C	100°C	120°C
5	% ความชื้น	24.4	22.2	21.9
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	83.1	81.5	80.0
10	% ความชื้น	22.2	21.5	19.7
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	76.9	79.4	67.7
15	% ความชื้น	21.2	18.7	17.1
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	72.3	67.7	69.2
20	% ความชื้น	20.7	15.9	15.6
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	73.8	66.2	63.1
25	% ความชื้น	18.8	15.0	13.8
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	63.1	63.1	58.5
30	% ความชื้น	16.2	13.9	-
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	60.0	58.5	-
40	% ความชื้น	13.9	-	-
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	61.5	-	-
50	% ความชื้น	-	-	-
	% ข้าวเต็มเมล็ดต้มพัทธ์	-	-	-

4.3 ผลของอุณหภูมิต่อการอบแห้ง

จากผลการทดลองสามารถนำมาเขียนกราฟระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์ความชื้นและกราฟระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดที่ความเร็วลม 5.0, 5.5, 6.0 m/s ได้ดังนี้

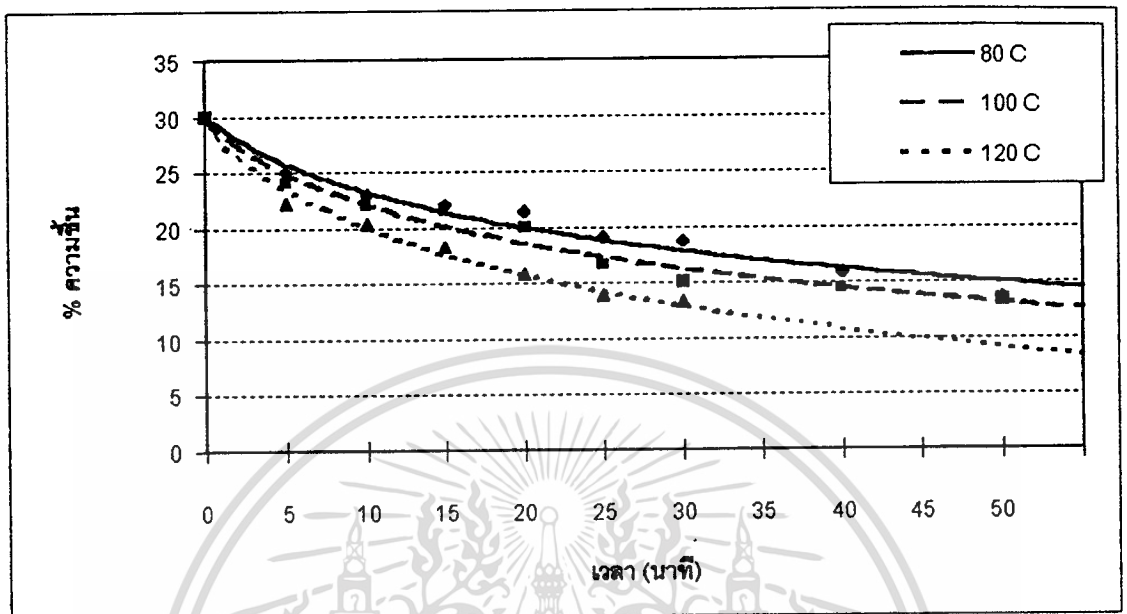


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นที่ ความเร็วลม 5.0 m/s

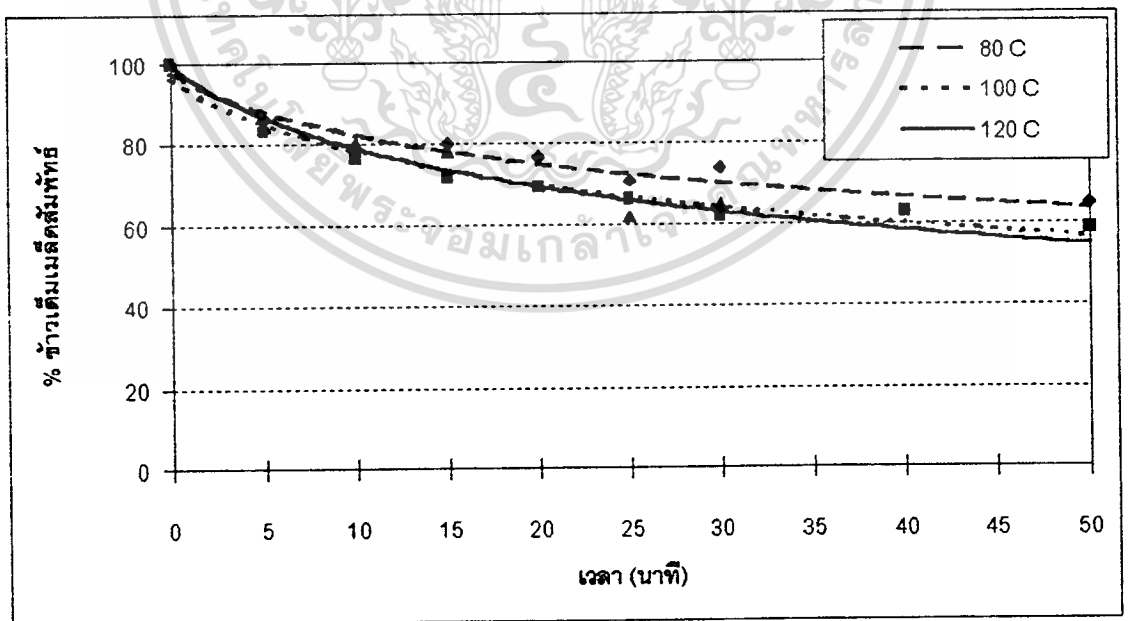


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์ ที่ความเร็วลม 5.0 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

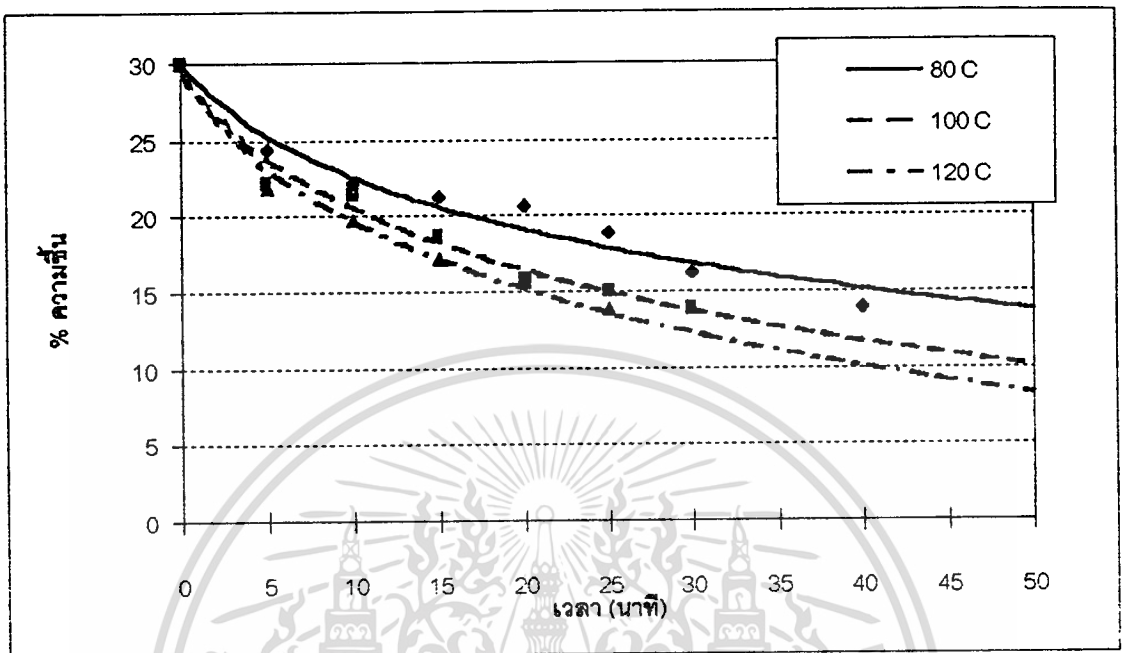


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นที่ ความเร็วลม 5.5 m/s

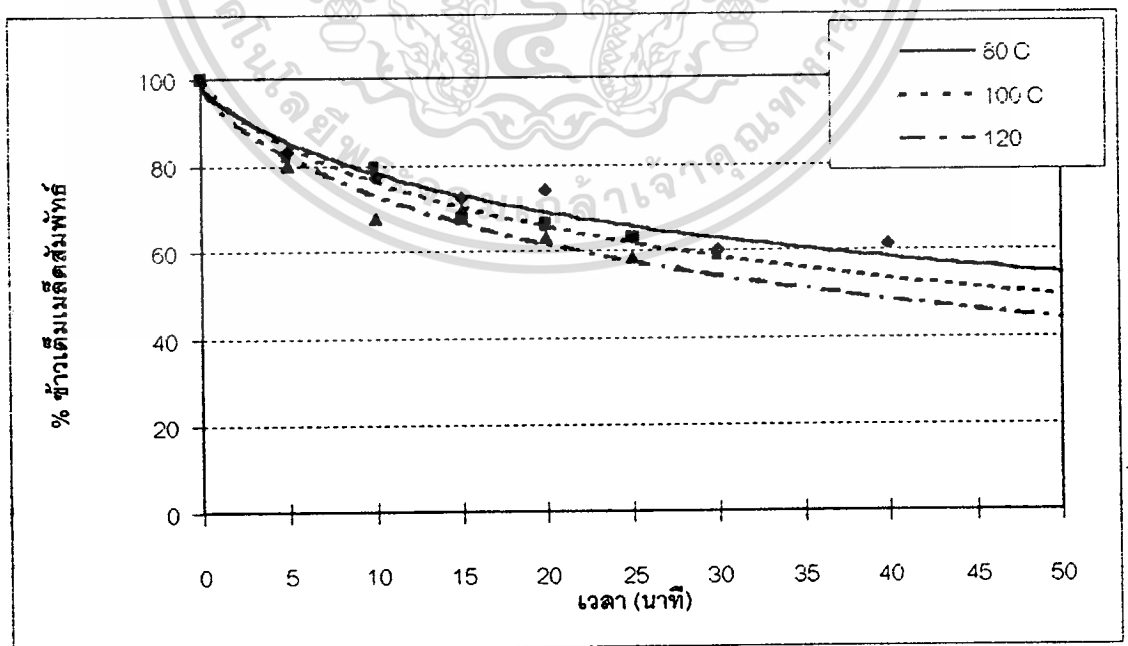


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์ทั่วเต็มเมลิคัสสัมพัทธ์ ที่ความเร็วลม 5.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นที่ ความเร็วลม 6.0 m/s



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสั้พท์ ที่ความเร็วลม 6.0 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

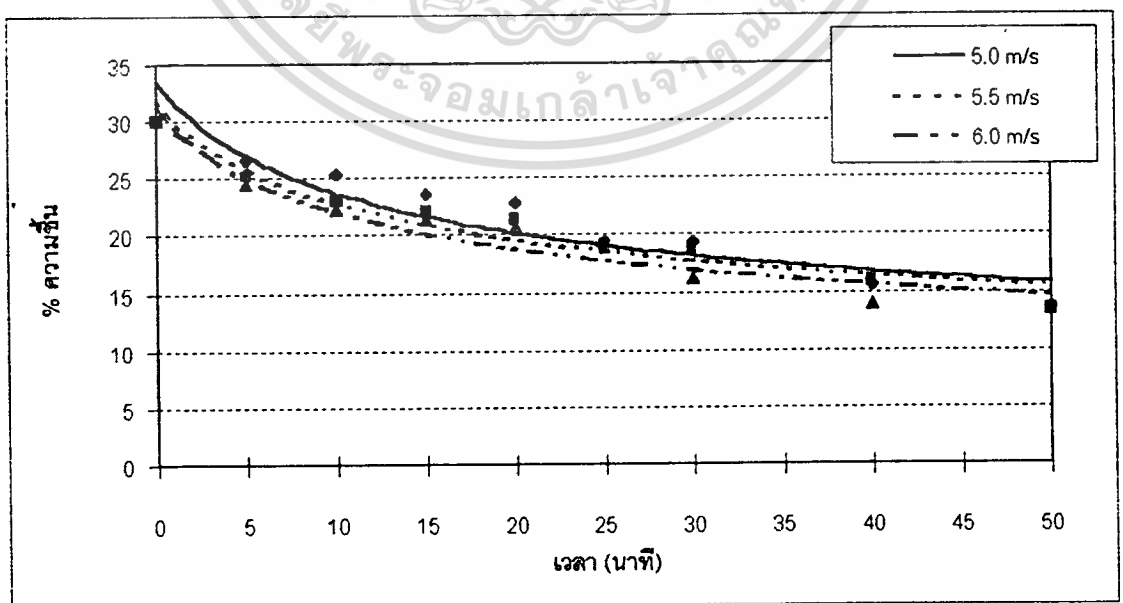
จากผลการทดลองจะเห็นว่าลักษณะของกราฟอัตราการอบแห้งทั้ง 3 อุณหภูมิจะมีลักษณะเหมือนกัน คือ ในช่วงแรกความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วและในช่วงหลังค่อยๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าในช่วงแรกอัตราการสูงและในช่วงหลังอัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่ ซึ่งพิจารณาจากความชันของกราฟ และจุดที่อัตราการอบแห้งเริ่มคงที่นั่นคือจุด อัตราส่วนความชื้นวิกฤต

จากกราฟทั้ง 3 รูป จะเห็นว่าผลของอุณหภูมิมีร้อนจะทำให้การอบแห้งเร็วขึ้น คือ ที่อุณหภูมิสูงจะถึงจุด อัตราส่วนความชื้นวิกฤตเร็ว กว่าที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะทำให้อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ

การที่ความชื้นในช่วงแรกลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากช่วงนั้นเป็นการระเหยน้ำในบริเวณผิวของเมล็ดจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อผ่านจุดอัตราส่วนความชื้นวิกฤต น้ำที่ผิวของเมล็ดถูกระเหยจนหมด ความเร็วในการระเหยน้ำจะขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของน้ำในเมล็ดออกสู่ผิวของเมล็ด จะเห็นว่ายิ่งอุณหภูมิสูงคุณภาพของข้าวจะต่ำลง เนื่องจากมีการระเหยน้ำที่ผิวของเมล็ดออกอย่างรวดเร็วจะทำให้ผิวเมล็ดแห้ง ขนาดที่บริเวณผิวของเมล็ดจะลดลง ในขณะที่ภายในเมล็ดยังมีขนาดเท่าเดิม จึงเกิดการแตกร้าวขึ้น ทำให้คุณภาพข้าวต่ำลง

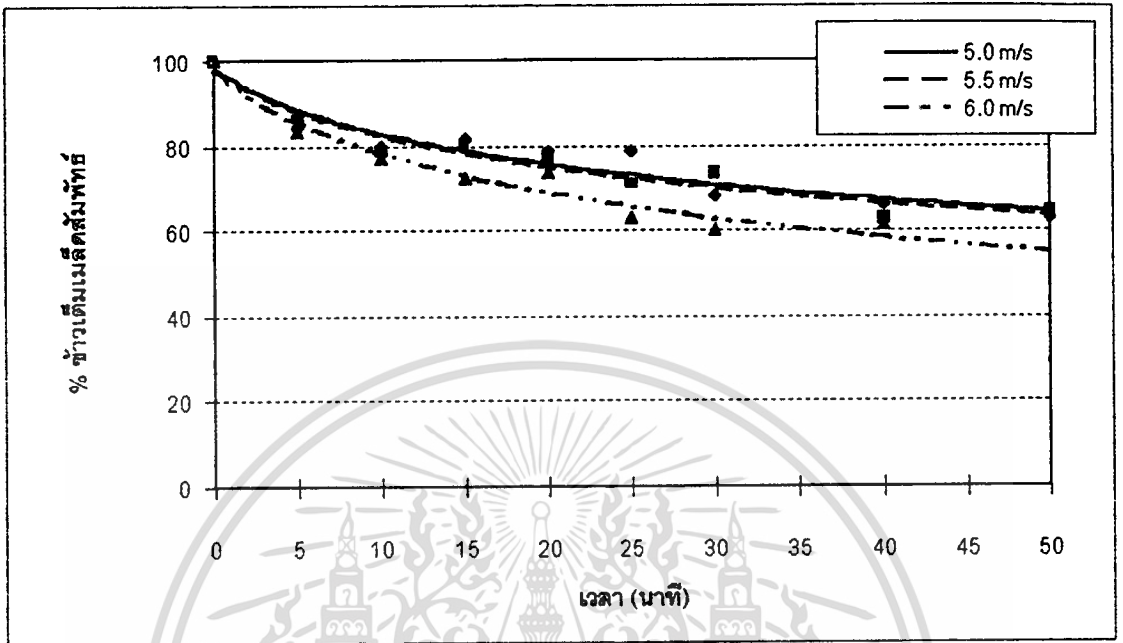
4.4 ผลของความเร็วมอเตอร์การอบแห้ง

จากผลการทดลองสามารถนำมาเขียนกราฟระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์ความชื้นและกราฟระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพันธ์ที่อุณหภูมิ 80°C , 100°C , 120°C ได้ดังนี้

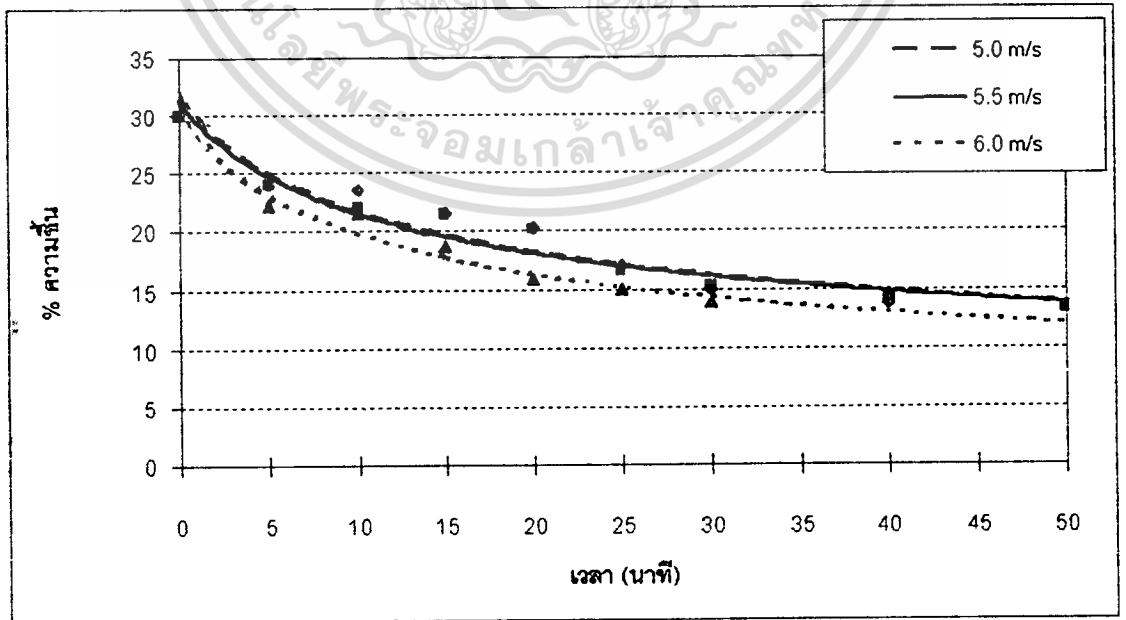


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับความรู้เท่านั้นขอสงวนสิทธิ์ในวงเล็บจุดให้ผู้ใช้ไปประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

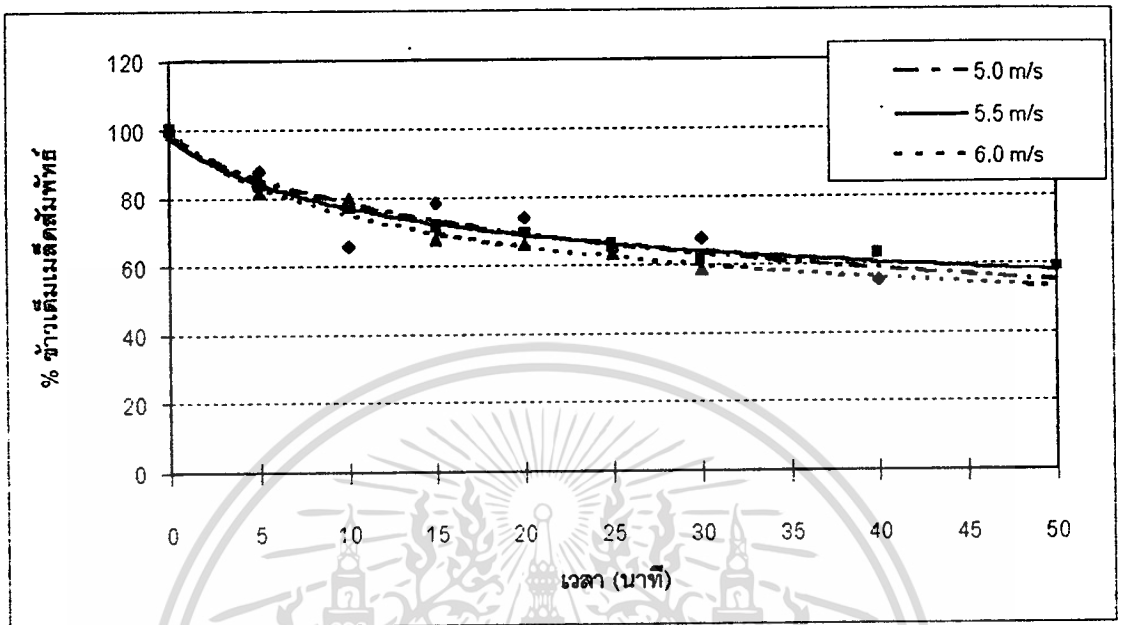


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์ขี้เถ้าเต็มเมล็ดสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 80 C

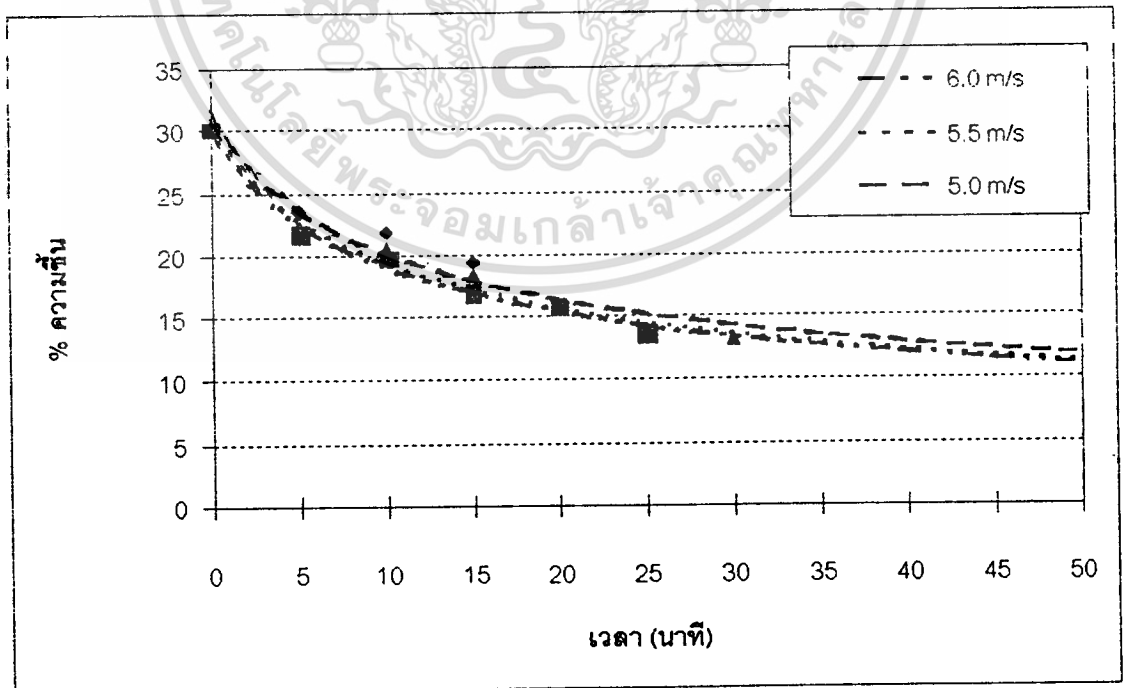


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นที่อุณหภูมิ 100 C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

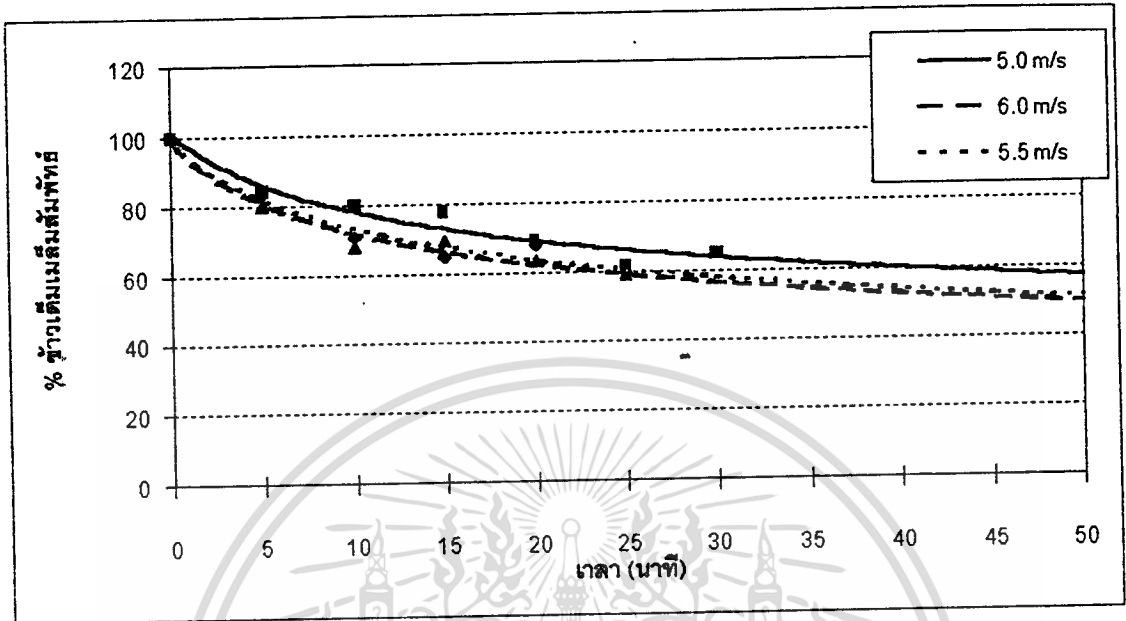


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์ขี้วเต็มเม็ดดำที่อุณหภูมิ 100 C



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นที่อุณหภูมิ 120 C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์ซ้ำวเติมเมิลต์สัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 120 C

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลมจะทำให้ อัตราการอบแห้งสูงขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อถึงจุด อัตราส่วนความชื้นวิกฤต อัตราการอบแห้งจะมีค่าเท่ากันทั้ง 3 ความเร็วลม เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วลมซ้ำวเปลือกจะมีการหมุนวนเร็วขึ้นและทำให้ซ้ำวเปลือกมีโอกาสสัมผัสกับลมร้อนมากขึ้น การอบแห้งในช่วงแรกเป็นการระเหยน้ำที่ผิวของเมิลต์ ซึ่งการของระเหยน้ำที่ผิวจะขึ้นกับความเร็วลมที่สัมผัสบริเวณผิวของเมิลต์ ดังนั้นอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลมสูงจะสูงกว่าอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลมต่ำ แต่หลังจากที่ถึงจุด อัตราส่วนความชื้นวิกฤต การอบแห้งในช่วงนี้เป็นการระเหยน้ำที่อยู่ภายในเมิลต์ ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะไม่ขึ้นกับความเร็วลมแต่จะขึ้นกับอุณหภูมิของลม เท่านั้น

คุณภาพของซ้ำวที่ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากัน ซ้ำวเปลือกที่อบที่ความเร็วลมต่ำกว่าจะมีคุณภาพดีกว่า เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วลมจะทำให้เกิดเบคที่รุนแรงเมิลต์ซ้ำวเปลือกที่ถูกเป่าผ่านท่อระบายไฟจะมีความเร็วสูง ทำให้การกระทบกันเองและกระแทกกับผนังเครื่องอบแห้งแรงมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้คุณภาพของซ้ำวลดลง

4.5 คุณภาพของซ้ำวกับการอบแห้ง

จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการอบแห้งนานคุณภาพซ้ำวจะยิ่งลดลง ซึ่งเป็นผลมา

จากการระเหยน้ำที่ผิวของเมิลต์ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและการกระทบกันของเมิลต์ซ้ำวเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้
เมื่อใช้ความเร็วลม 5.0 m/s จุดที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง คือ ที่อุณหภูมิ 100 C เวลา 5
ไม่ทำการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาที่ ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 30.0 % มาตรฐานเปียก ให้เหลือ 24.0 % มาตรฐานเปียก และเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์เป็น 87.7 เมื่อเพิ่มความเร็วลมเป็น 5.5 m/s จุดที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง คือ ที่อุณหภูมิ 120 °C เวลา 5 นาที ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 30.0 % มาตรฐานเปียก ให้เหลือ 22.3 % มาตรฐานเปียก และเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์เป็น 84.6 และเมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 6.0 m/s จุดที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง คือ ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 5 นาที ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 30.0 % มาตรฐานเปียก ให้เหลือ 24.4 % มาตรฐานเปียก และเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์เป็น 83.1

ดังนั้นจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้ง คือ ที่ความเร็วลม 5.0 m/s อุณหภูมิ 100 °C เวลา 5 นาที ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 30.0 % มาตรฐานเปียก ให้เหลือ 24.0 % มาตรฐานเปียก และมีคุณภาพข้าวดีที่สุดในแง่การลดความชื้นให้ต่ำกว่านี้ จะต้องยอมให้คุณภาพข้าวลดลงบ้าง ซึ่งจุดที่เหมาะสม คือ ที่ความเร็วลม 5.5 m/s อุณหภูมิ 120 °C เวลา 5 นาที ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 30.0 % มาตรฐานเปียก ให้เหลือ 22.3 % มาตรฐานเปียก

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. อัตราการอบแห้งเป็นไปตามทฤษฎีคือ ในช่วงแรกความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงจุดอัตราส่วนความชื้นวิกฤต ความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ

2. อุณหภูมิของลม จะมีผลเป็นอย่างมากต่ออัตราการอบแห้งโดยที่การอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนสูง จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ แต่คุณภาพของข้าวเปลือกจะลดต่ำ ถ้าใช้อุณหภูมิของลมสูงเนื่องจาก การระเหยของน้ำที่ผิวของเมล็ดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

3. ความเร็วลมจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงแรกคือ ในช่วงที่ความชื้นสูงกว่าจุดอัตราส่วนความชื้นวิกฤต โดยที่อัตราการอบแห้งจะสูงเมื่อใช้ความเร็วลมสูง แต่เมื่อความชื้นต่ำกว่าจุดอัตราส่วนความชื้นวิกฤต ความเร็วลมเกือบจะไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งคุณภาพของข้าวเปลือกจะต่ำลงเมื่อเพิ่มความเร็วลม เนื่องจากการเพิ่มความเร็วลมจะทำให้เกิดเบครุนแรง ทำให้ข้าวเปลือกกระแทกกับผนังเครื่องรูนแรงขึ้น

4. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาท์เดคเบดจะสามารถลดความชื้นในช่วงแรกไปอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อความชื้นต่ำกว่าจุดอัตราส่วนความชื้นวิกฤตแล้วการลดความชื้นก็จะลดความชื้นได้ไม่เร็วเหมือนช่วงแรก และคุณภาพข้าวเปลือกยังลดลงอีกด้วย เมื่อใช้เวลาอบแห้งนานๆ ดังนั้นการอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีนี้จึงเหมาะที่จะใช้ลดความชื้นของข้าวเปลือกมีความชื้นสูงให้ต่ำลงจนถึงจุดอัตราส่วนความชื้นวิกฤต จากการทดลองจุดอัตราส่วนความชื้นวิกฤตจะอยู่ที่ประมาณ 21% มาตรฐานเปียก

5. สภาวะที่เหมาะสมกับอุปกรณ์การทดลอง Spouted bed Drying นี้ คือ อุณหภูมิลมร้อน 100°C ความเร็วลม 5.0 m/s สามารถความชื้นจาก 30 % มาตรฐานเปียก เหลือ 24.0 % มาตรฐานเปียก โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 5 นาที และเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์เป็น 87.7 แต่ถ้าขอมให้คุณภาพข้าวต่ำลงบ้าง เพื่อที่จะลดความชื้นให้ต่ำกว่านี้ จุดที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งคือ ที่อุณหภูมิลมร้อน 120°C ความเร็วลม 5.5 m/s สามารถความชื้นจาก 30 % มาตรฐานเปียก เหลือ 22.3 % มาตรฐานเปียก โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 5 นาที และเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์เป็น 84.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่จะทำการศึกษาต่อไป

1. การเกิดเบคของอุปกรณ์ทดลองนี้ยังไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ ปริมาณข้าวเปลือกที่ถูกเป่าผ่านท่อกราฟท์บางครั้งมากบางครั้งน้อย เนื่องจากการไหลของข้าวเปลือกไปยัง Nozzle ไม่ต่อเนื่อง จึงควรใส่ก้อนวัสดุลงไปเพื่อรบกวนข้าวเปลือกบริเวณข้างๆ Nozzle เพื่อให้เกิดการไหลอย่างต่อเนื่องจะทำให้การเกิดเบคอย่างสม่ำเสมอการอบแห้งจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. ควรจะขยายขนาดเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม
3. ควรจะทำการทดลองซ้ำหลายๆครั้ง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แน่นอนยิ่งขึ้น





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองการวัดความชื้นที่เวลาต่างๆ ในขณะอบแห้ง

ความเร็ว ลม (ม./วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)							
		5	10	15	20	25	30	40	50
5.0	80	26.6	25.3	23.5	22.8	19.4	19.3	15.6	13.6
	100	24.0	23.5	21.6	20.2	17.0	14.9	13.8	-
	120	23.6	21.9	19.3	15.8	14.0	-	-	-
5.5	80	25.0	23.0	22.1	21.4	19.1	18.7	16.0	13.5
	100	24.0	22.1	21.4	20.0	16.6	15.2	14.4	13.4
	120	22.3	20.4	18.3	15.8	13.8	13.2	-	-
6.0	80	24.4	22.2	21.2	20.7	18.8	16.2	13.9	-
	100	22.2	21.5	18.7	15.9	15.0	13.9	-	-
	120	21.9	19.7	17.1	15.6	13.8	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดที่เวลาต่างๆ ในการอบแห้ง

ความเร็ว ลม (ม./วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)							
		5	10	15	20	25	30	40	50
5.0	80	49.1	46.4	47.3	45.5	45.5	39.6	38.4	36.6
	100	50.9	37.9	45.5	42.8	37.5	39.3	38.4	-
	120	48.2	41.1	37.5	39.3	34.8	-	-	-
5.5	80	49.9	45.5	46.4	44.6	41.1	42.8	36.6	37.2
	100	48.2	44.6	41.8	40.1	38.4	35.7	36.6	33.9
	120	49.1	46.4	45.2	40.1	35.7	37.5	-	-
6.0	80	48.2	44.6	41.9	42.8	36.6	34.8	35.7	-
	100	47.3	44.9	39.3	38.4	36.6	33.9	-	-
	120	46.4	39.3	40.1	36.6	33.9	-	-	-

เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดของข้าวเปลือกอ้างอิง = 58 %

ตัวบ่งชี้	% ความชื้นจากเครื่องวัด					การทดลองที่ 1 (น้ำหนักเป็นกรัม)					การทดลองที่ 2 (น้ำหนักเป็นกรัม)					
	1	2	3	เฉลี่ย	ก	ข	ค	ง	จ	%ความชื้น	ก	ข	ค	ง	จ	%ความชื้น
1	30.4	30.2	30.7	30.4333	13.481	24.5035	20.9835	3.51094	11.0225	31.934156	13.413	24.9208	21.2784	3.64241	11.5078	31.651557
2	20.3	20.1	30	20.4667	13.5026	27.7603	23.7732	3.98714	14.1977	28.083067	13.4583	26.9393	23.1608	3.77849	13.481	28.028264
3	24.2	24.6	23.8	24.2	13.3857	33.2489	28.0597	5.18918	19.8631	26.124686	13.5173	32.7046	27.656	5.04857	19.1873	26.312057
4	20.2	20.2	20.8	20.4	13.3494	28.917	25.1113	3.8057	15.5676	24.446387	13.3948	30.4819	26.3542	4.12776	17.0871	24.157154
5	19.7	19.3	19.6	19.5333	13.5127	33.5346	28.9533	4.58136	20.0219	22.88174	13.3313	32.514	28.1005	4.41353	19.1827	23.007803
6	17.1	17.7	17.2	17.3333	13.54	27.5834	24.5715	3.0119	14.0435	21.447028	13.3857	29.416	26.0094	3.40654	16.0302	21.250707
7	16.3	16.6	17	16.6333	13.4538	26.3995	23.9728	2.42676	12.9457	18.74562	13.413	27.6741	24.9934	2.68078	14.2612	18.79771
8	14.7	15	14.9	14.8667	13.4447	29.4659	29.4659	2.61727	16.0212	16.336353	13.3404	28.3182	25.8053	2.51294	14.9779	16.77771
9	12.7	12.2	12.1	12.3333	13.3177	32.1829	32.1829	2.62181	18.7458	13.988383	13.5762	29.3751	27.1661	2.20903	15.7989	13.982199
10	10.8	10.4	10.7	10.6333	13.3313	31.6613	31.6613	2.10017	18.33	11.45756	13.3449	31.2304	29.1756	2.05481	17.8854	11.488714

ตัวบ่งชี้ 3 (น้ำหนักเป็นกรัม)

ตัวบ่งชี้	การทดลองที่ 3 (น้ำหนักเป็นกรัม)					เฉลี่ย
	ก	ข	ค	ง	จ	
1	13.35584	26.31787	22.08125	4.236624	12.98203	32.07341
2	13.589856	20.1937	24.7847	4.408992	15.60384	28.12238
3	13.3812	31.54334	26.77601	4.767336	18.16214	26.2285
4	13.499136	31.9289	27.46548	4.463424	18.42977	24.27403
5	13.236048	31.42087	27.25682	4.164048	18.18482	22.92934
6	13.372128	28.51783	25.2882	3.229632	15.1457	21.3405
7	13.51728	33.07651	29.35699	3.71952	19.55923	18.85334
8	13.390272	30.62254	27.35699	2.853144	17.23226	16.55702
9	13.42656	30.87202	28.44072	2.431296	17.44546	13.96905
10	13.417488	29.94214	28.10959	1.832544	16.52465	11.34535

ก : น้ำหนักกระป๋อง

ข : น้ำหนักกระป๋อง + ข้าวเปียก

ค : น้ำหนักกระป๋อง + ข้าวแห้ง

ง : น้ำหนักน้ำที่ระเหยไป

จ : น้ำหนักข้าวเปียก

ตารางที่ ก-3

ผลการทดลองการวัดความชื้นเพื่อปรับค่าของเครื่องวัดความชื้นให้ถูกต้อง

ตารางที่ ก-4 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ

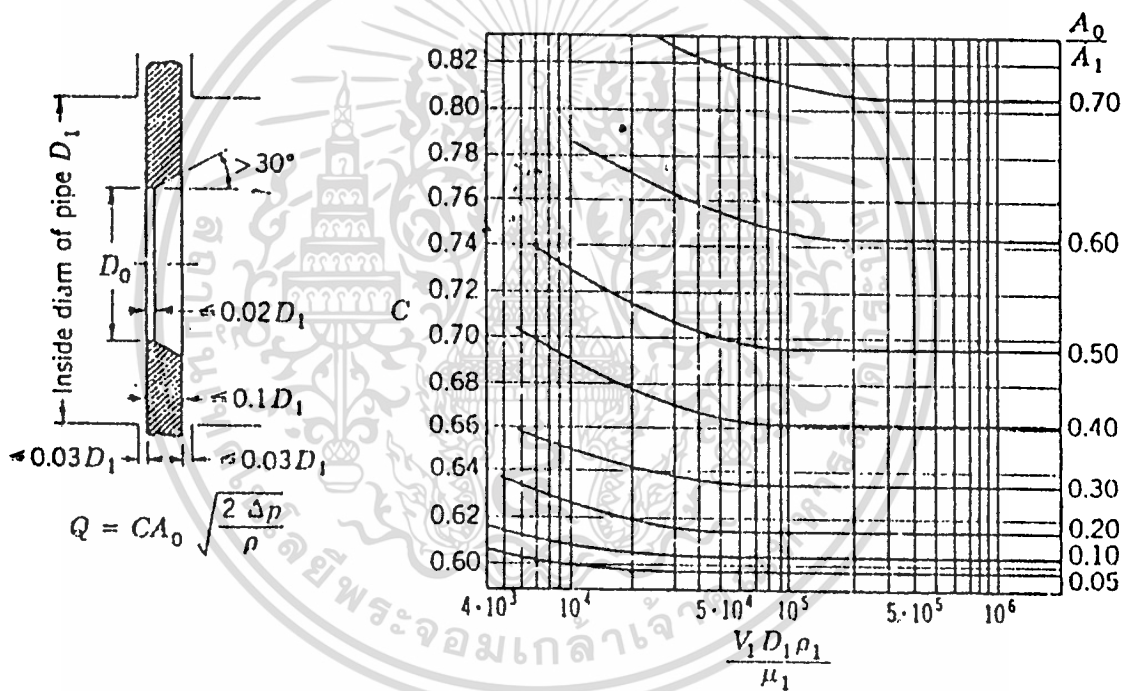
Temperature		Density	Volumetric coefficient of expansion	Specific heat	Thermal conductivity	Thermal diffusivity	Viscosity	Kinematic viscosity	Prandtl number
t	T	ρ	$\beta \times 10^3$	c_p	k	$\alpha \times 10^6$	$\mu \times 10^6$	$\nu \times 10^6$	Pr
C	K	kg/m ³	1/K	kJ/kg K	W/m K	m ² /s	Ns/m ²	m ² /s	
-20	253.15	1.365	3.97	1.005	0.0226	16.8	16.279	12.0	0.71
0	273.15	1.252	3.65	1.011	0.0237	19.2	17.456	13.9	0.71
10	283.15	1.206	3.53	1.010	0.0244	20.7	17.848	14.66	0.71
20	293.15	1.164	3.41	1.012	0.0251	22.0	18.240	15.7	0.71
30	303.15	1.127	3.30	1.013	0.0258	23.4	18.682	16.58	0.71
40	313.15	1.092	3.20	1.014	0.0265	24.8	19.123	17.6	0.71
50	323.15	1.057	3.10	1.016	0.0272	26.2	19.515	18.58	0.71
60	333.15	1.025	3.00	1.017	0.0279	27.6	19.907	19.4	0.71
70	343.15	0.996	2.91	1.018	0.0286	29.2	20.398	20.65	0.71
80	353.15	0.968	2.83	1.019	0.0293	30.6	20.790	21.5	0.71
90	363.15	0.942	2.76	1.021	0.0300	32.2	21.231	22.82	0.71
100	373.15	0.916	2.69	1.022	0.0307	33.6	21.673	23.6	0.71
120	393.15	0.870	2.55	1.025	0.0320	37.0	22.555	25.9	0.71
140	413.15	0.827	2.43	1.027	0.0333	40.0	23.340	28.2	0.71
150	423.15	0.810	2.37	1.028	0.0336	41.2	23.732	29.4	0.71
160	433.15	0.789	2.31	1.030	0.0344	43.3	24.124	30.6	0.71
180	453.15	0.755	2.20	1.032	0.0357	47.0	24.909	33.00	0.71
200	473.15	0.723	2.11	1.035	0.0370	49.7	25.693	35.5	0.71
250	523.15	0.653	1.89	1.043	0.0400	60.0	27.557	42.2	0.71

Adapted from: Raziqovic, K. 1978. Handbook of Thermodynamic Tables and Charts. Hemisphere Publishing Corporation, Washington.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

$$Q = CA_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$



รูปที่ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C กับ A_0/A_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าจริงจากการทดลอง



รูปที่ ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงจากการทดลองกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดความชื้น
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปเผยแพร่บนด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก



รูปที่ ก-1 เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-2 เครื่องขัดขาวข้าวกลิ้ง



รูปที่ ก-3 การทดลองอบเพื่อปรับค่าของเครื่องวัดความชื้นให้ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น... ึ่งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จขึ้นมาได้ด้วยความอนุเคราะห์ของหลายๆ ท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทางผู้จัดทำขอขอบคุณ

อาจารย์สาทิป รัตนภาสกร และ อาจารย์สรรวริศ อุยวัฒนา ที่ได้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือต่างๆ

โรงสีศรีกรุง ลาดกระบังที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องวัดคุณภาพข้าวเปลือก
พีตัม พีโด่ง พีแมน และพีออด ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการสร้างเครื่อง
พีตัก พีแปล ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. เบ็ญจมาศ ศิริภัทร, 2526, การตรวจสอบและเก็บรักษาคุณภาพข้าว , สถาบันฝึกอบรมสหกรณ์การเกษตรแห่งชาติ, หน้า 1-6
2. วิวัฒน์ ตัฒพะพานิชกุล, 2529, อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม, โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรมสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), หน้า 1-15
3. สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, 2528, ฟลูอิดไดเซชัน, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 225-244
4. อารมย์ ศรีพิจิตต์, 2524, วิทยาการเมล็ดพืชเบื้องต้น, ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ, หน้า 61-66
5. อรอนงค์ ศรีพวาทกุล, 2536, การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไดเซชันแบบต่อเนื่อง , วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-10
6. Heldman D.R., and R.P. Singh, 1977, Food Process Engineering, AVI Publishing, ING, Westport, Connecticut, 261-323 P.
7. McCabe W. L., J.C. Smith, and P. Harriott, 1993, Unit Operations of Chemical Engineering, McGraw-Hill, 768-770 P.
8. Streeter V.L., and E.B. Wylie, 1988, Fluid Mechanics, McGraw-Hill, 347-349 P.