

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบกรอบงาโดยเทคนิคสเปาท์เทคเบด
**Design and Development of Sesame Roaster Using Spouted-Bed
Technique**



เชิดศักดิ์ พิศวาส
ภัทรพันธุ์ ทองยศ
อภิสิทธิ์ โกวิทวยากรณ์

247
57557
2547

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **61452**
วัน,เดือน,ปี **17 ก.ค. 2549**

b. 11596399
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบกรอบงาโดยเทคนิคสเปาท์เทคเบด

Design and Development of Sesame Roaster Using Spouted-Bed Technique

ผู้จัดทำ

นายเชิดศักดิ์ พิศवास
นายภัทรพันธุ์ ทองยศ
นายเอกสิทธิ์ โกวิทยากรณ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์เอกสิทธิ์ ศรีธรรม)

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบกรอบงาโดยเทคนิคสเปาท์เตคเบค		
นักศึกษา	นายเชิดศักดิ์ พิศวาส		รหัส 45015723
	นายภัทรพันธุ์ ทองยศ		รหัส 45015737
	นายอภิสิทธิ์ โกวิทวาทกรณ์		รหัส 45015754
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์เอกสิทธิ์ ศรีธรรม		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร		
ปีการศึกษา	2547		

บทคัดย่อ

สเปาท์เตคเบคเป็นเทคนิคที่สามารถทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างของไหลและอนุภาควัสดุในเบคเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ในโครงการนี้จึงมีการนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบเครื่องอบกรอบงา จากผลการอบกรอบงาที่มีความชื้นเริ่มต้น 25%, 30% และ 35%w.b. ด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 160°C, 180°C และ 220°C ในช่วงเวลา 2, 3 และ 4 นาที พบว่าปัจจัยการผลิตทั้งสามมีผลต่อคุณลักษณะส่วนใหญ่ของงาอบ โดยเวลาในการอบเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุดรองลงมาได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน และความชื้นเริ่มต้นของงา ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นเริ่มต้น 35%w.b. ที่อบด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 4 นาที จะมีคุณลักษณะต่าง ๆ คล้ายงาคั่วจากโรงงานมากที่สุด

Project Title	Design and Development of Sesame Roaster Using Spouted-Bed Technique		
students	Mr.Cheadsak	Pissawas	ID 45015723
	Mr.Patarapan	Tongyole	ID 45015737
	Mr.Apsit	Kovitwayakorn	ID 45015754
Project Advisor	Mr.Eakasit Sritham		
Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Pimpen Pornchalermpong		
Programme	Bachelor of Engineering		
Field of Study	Food Engineering		
Academic Year	2004		

Abstract

Spouted-bed is a technique that can provide a very high rate and very good uniformity of heat and mass transfer between fluid and solid particles in the bed. In this project, the spouted-bed technique was utilized in the design of a sesame roaster. From the results of roasting experiments using sesame samples of 25%, 30% and 35% MC w.b. with hot air at the temperature of 160°C, 180°C and 220°C for a period of 2, 3 and 4 min., it was found that all of three factors had significant effects on most of roasted sesame properties. Among those factors, roasting time had the greatest effect as compared to air temperature and initial moisture content of sesame seeds, respectively. It was also found that the sesame sample of 35% MC. w.b. roasted with hot air at temperature of 180°C for 4 min. had properties that similar to those of pan-roasted sesame, obtained from a factory, the most.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จขึ้นมาได้ด้วยความอนุเคราะห์จากหลาย ๆ ท่าน ดังนี้

ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และอาจารย์เอกสิทธิ์ ศรีธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำแนะนำ, คำปรึกษา, ความช่วยเหลือต่างๆ รวมไปถึงความห่วงใย คำเตือน คำสอน ทั้งในเวลาราชการและนอกราชการ

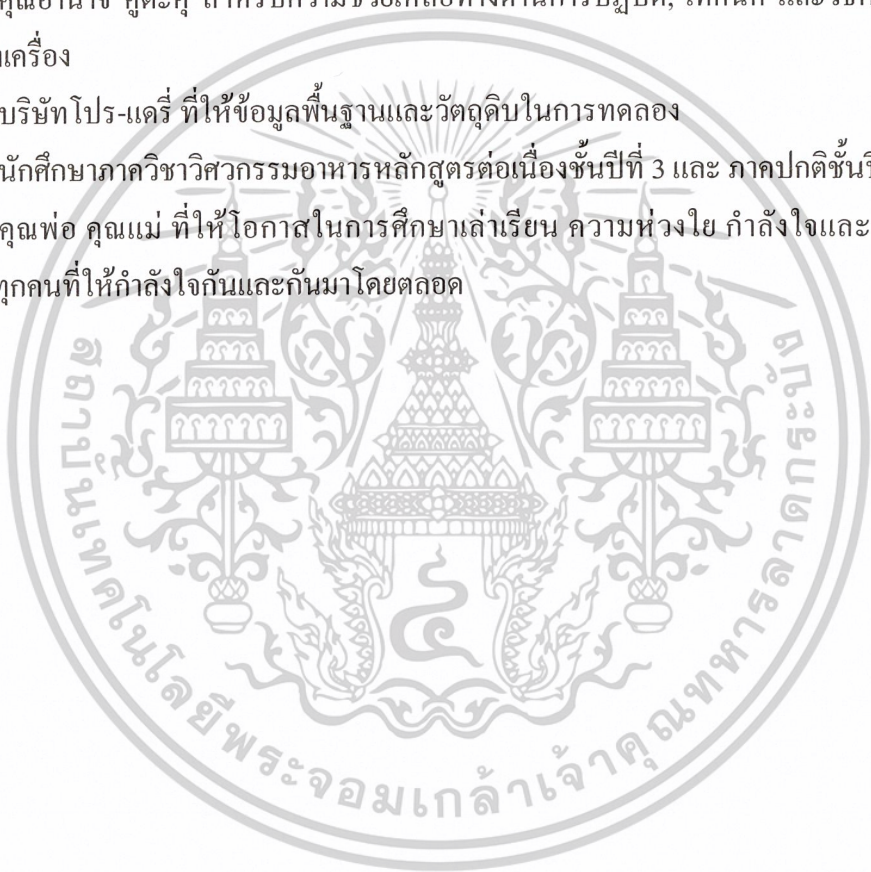
คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่าน สำหรับคำแนะนำ ดิชม ต่างๆ

คุณอำนาจ คุณตะคุ สำหรับความช่วยเหลือทางด้านการปฏิบัติ, เทคนิค และวิธีการต่าง ๆ ในการสร้างเครื่อง

บริษัทโปร-แคร์ ที่ให้ข้อมูลพื้นฐานและวัตถุดิบในการทดลอง

นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมอาหารหลักสูตรต่อเนื่องชั้นปีที่ 3 และ ภาคปกติชั้นปีที่ 4 ทุกคน

คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้โอกาสในการศึกษาเล่าเรียน ความห่วงใย กำลังใจและกำลังใจที่พร้อมเพื่อกันๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจกันและกันมาโดยตลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
รายการรูปประกอบ	ช
รายการตาราง	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการงาน	2
1.3 ขอบเขตของโครงการงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 สํารวจเอกสาร	
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับงาน	4
2.1.1 ลักษณะของงาน	4
2.1.2 ประโยชน์และคุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดงา	4
2.1.3 มาตรฐานในด้านคุณภาพเมล็ดงา	5
2.1.4 มาตรฐานอุตสาหกรรมเมล็ดงา	5
2.2 ความชื้น	6
2.2.1 การกำหนดค่าความชื้น	6
2.2.2 การหาค่าความชื้นของเมล็ดพืช	7
2.3 ความหนาแน่น	9
2.3.1 ความหนาแน่นเนื้อ	9
2.3.2 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)	10
2.4 กลไกการอบแห้ง	10
2.5 สเป่าที่แตกเบด	11
2.5.1 คุณลักษณะทางการไหลของสเป่าที่แตกเบด	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.5.2 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดสเปาท์เบด (U_{ms})	14
2.5.3 ความเร็วของวัสดุ และเวลาของการหมุนเวียนวัสดุ (Cycle time)	15
2.5.4 ความลึกของเบด (Bed depth)	16
2.5.5 ความลึกสูงสุดของสเปาท์ (Maximum spoutable bed depth)	16
2.5.6 ความดันลด (Pressure drop)	16
2.5.7 อัตราหมุนเวียนวัสดุ	18
2.6 การทดสอบแบบคืบ (Creep test)	18
บทที่ 3 การออกแบบชุดเครื่องมือและการทดลอง	
3.1 การออกแบบชุดเครื่องมือออบกรอบงา	21
3.1.1 การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบ	21
3.1.2 แนวทางการออกแบบเครื่องออบกรอบงาต้นแบบ	21
3.1.3 การออกแบบ และสร้างเครื่องออบกรอบงาต้นแบบ	22
3.2 การทดลอง	28
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง	28
3.2.2 การออกแบบการทดลอง	29
3.2.3 การทดลองออบกรอบงา	29
3.2.4 การทดสอบคุณสมบัติของงาออบกรอบ	30
3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 อิทธิพลของปัจจัยการผลิตต่อคุณภาพของงาออบกรอบ	35
4.1.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของงาอบ	35
4.1.2 ความชื้นของงาอบ	38
4.1.3 ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)	41
4.1.4 คุณสมบัติเชิงกลของงาอบ	44
4.1.4.1 ค่า Stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 1 (E_1)	44
4.1.4.2 ค่า Stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 2 (E_2)	48
4.1.4.3 ค่า Viscous damping coefficient ของแบบจำลองแดชพอดตัวที่ 1 (η_1)	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4.4 ค่า Viscous damping coefficient ของแบบจำลองแดชพอตตัวที่ 2 (η_1)	54
4.2 การเปรียบเทียบงาอบกรอบ โดยพิจารณาจากคุณภาพด้านต่าง	57
4.3 คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของงาอบกรอบ (Sensory test)	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
บรรณานุกรม	65
ภาคผนวก	68
ก	69
ข	73
ค	83



รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของคอกผลและต้นงา	4
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดและความเร็วอากาศเข้าเบด	13
2.3 การรับความเค้นคงที่	19
2.4 ผลที่ได้จากการทดสอบแบบคืบ	19
2.5 แบบจำลองเชิงกลแบบ 4-Element Buger Model	20
3.1 ห้องอบรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	23
3.2 ห้องส่งลมร้อน	24
3.3 ช่องระบายงาหลังอบ	25
3.4 ไซโคลนแบบ Stirmand high efficiency	26
3.5 เครื่องอบกรอบงาดັນแบบ	27
3.6 ชุดเครื่องมืออบกรอบงาดันแบบ	28
3.7 เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA XT Plus	33
3.8 ชุดอุปกรณ์สำหรับการบรรจุงา	33
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบกับความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของงา ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25%, 30% และ 35% w.b. ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	36
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบกับความชื้นหลังอบเฉลี่ยของงา ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25%, 30% และ 35% w.b. ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	39
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบปริมาณน้ำอิสระเฉลี่ยของงา ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25%, 30% และ 35% w.b. ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	42
4.4 ฟังก์ชันของแรงที่ใช้ในการทดสอบเมื่อดงาแบบคืบ	45
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบกับค่า E_1 เฉลี่ยของงา ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25%, 30% และ 35% w.b. ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบค่า E_2 เฉลี่ยของงา ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25%, 30% และ 35%w.b. ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	49
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบค่า η_1 เฉลี่ยของงา ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25%, 30% และ 35%w.b. ที่อุณหภูมิ	52
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบค่า η_2 เฉลี่ยของงา ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25% ,30% และ 35%w.b. ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	55
4.9 ลักษณะทางกายภาพของงาอบกรอบทั้ง 6 สภาวะการทดลอง	59
4.10 ลักษณะทางกายภาพของงาคั่วจากโรงงาน	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ลำดับสภาวะการทดลอง	31
4.1 ผลของปัจจัยการผลิตต่อความหนาแน่นรวม	37
4.2 ค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของงาอบกรอบจากการทดลอง และจากโรงงาน	37
4.3 ผลของปัจจัยการผลิตต่อความชื้นหลังอบกรอบ	40
4.4 ค่าความชื้นหลังอบเฉลี่ยของงาอบกรอบจากการทดลอง และจากโรงงาน	40
4.5 ผลของปัจจัยการผลิตต่อปริมาณน้ำอิสระ	43
4.6 ค่าปริมาณน้ำอิสระเฉลี่ยของงาอบกรอบจากการทดลอง และจากโรงงาน	43
4.7 ผลของปัจจัยการผลิตต่อค่า E_1	47
4.8 ค่า E_1 เฉลี่ยของงาอบกรอบจากการทดลองและจากโรงงาน	47
4.9 ผลของปัจจัยการผลิตต่อค่า E_2	50
4.10 ค่า E_2 เฉลี่ยของงาอบกรอบจากการทดลองและจากโรงงาน	50
4.11 ผลของปัจจัยการผลิตต่อค่า τ_1	53
4.12 ค่า τ_1 เฉลี่ยของงาอบกรอบจากการทดลองและจากโรงงาน	53
4.13 ผลของปัจจัยการผลิตต่อค่า τ_2	56
4.14 ค่า τ_2 เฉลี่ยของงาอบกรอบจากการทดลองและจากโรงงาน	56
4.15 การจัดกลุ่มสภาวะการทดลองที่ทำให้งาอบกรอบมีคุณภาพ ไม่แตกต่างจากงาคั่วจากโรงงาน	58
4.16 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางด้านความกรอบ	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางด้านความสูก	62
4.18 การเปรียบเทียบคุณลักษณะด้านระดับความขม	62
ก.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาแน่นรวม	69
ก.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความชื้นหลังอบ	69
ก.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณน้ำอิสระ	70
ก.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 1 (E_1)	70
ก.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 1 (E_2)	71
ก.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Viscous Damping Coefficient ของแบบจำลองแดชพอตตัวที่ 1 (η_1)	71
ก.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Viscous Damping Coefficient ของแบบจำลองแดชพอตตัวที่ 1 (η_2)	72
ข.1 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นรวม	73
ข.2 ผลของเวลาต่อความหนาแน่นรวม	73
ข.3 ผลของความชื้นเริ่มต้นต่อความหนาแน่นรวม	74
ข.4 ผลของอุณหภูมิต่อความชื้นหลังอบ	74
ข.5 ผลของเวลาต่อความชื้นหลังอบ	75
ข.6 ผลของความชื้นเริ่มต้นต่อความชื้นหลังอบ	75
ข.7 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำอิสระ	76
ข.8 ผลของเวลาต่อปริมาณน้ำอิสระ	86
ข.9 ผลของความชื้นเริ่มต้นต่อปริมาณน้ำอิสระ	77
ข.10 ผลของเวลาต่อค่าคงที่ E_1	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.11 ผลของความชันเริ่มต้นต่อค่าคงที่ E_1	78
ข.12 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ E_2	78
ข.13 ผลของเวลาต่อค่าคงที่ E_2	79
ข.14 ผลของความชันเริ่มต้นต่อค่าคงที่ E_2	79
ข.15 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ η_1	80
ข.16 ผลของเวลาต่อค่าคงที่ η_1	80
ข.17 ผลของความชันเริ่มต้นต่อค่าคงที่ η_1	81
ข.18 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ η_2	81
ข.19 ผลของเวลาต่อค่าคงที่ η_2	82
ข.20 ผลของความชันเริ่มต้นต่อค่าคงที่ η_2	82
ค. แบบบันทึกผลการทดสอบการประเมินความกรอบของงาอบกรอบ	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (ทศนิยม)
M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก (ทศนิยม)
W_w	=	มวลของของแข็ง (g)
W_d	=	มวลของน้ำ (g)
ρ	=	ความหนาแน่น (kg/m^3)
m	=	มวลของวัสดุ (kg)
v	=	ปริมาตรของวัสดุ (m^3)
U_{ms}	=	ความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดสเปาท์ (m/s)
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)
d_c	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของหอทดลอง (m)
d_i	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าของอากาศเข้า (m)
H_o	=	ความสูงของเบดนิ่ง (m)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
ρ_g	=	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
ρ_s	=	ความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3)
U_m	=	ความเร็ว (m/s)
$\tan\gamma$	=	สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานภายใน
Re_{msn}	=	ตัวเลขเรย์โนลด์
Ar	=	ตัวเลขอาคิมิติส
U_{msn}	=	ความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดสเปาท์ (m/s)
\emptyset	=	มุมกอง (องศา)
D_s	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของสเปาท์ (m)
D_c	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
H_m	=	ความสูงมากที่สุดของเบด (m)
ΔP_m	=	ความดันลดคร่อมเบดสูงเบด (kPa)
Ψ	=	แฟคเตอร์รูปร่างของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

ΔP_s	=	ความดันลดคร่อมเบดขณะที่เบดมีเสถียรภาพ (kPa)
E_1	=	ค่า Stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 1 (N/m)
E_2	=	ค่า Stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 2 (N/m)
η_1	=	ค่า Viscous Damping Coefficient ตัวที่ 1 (N.s/m)
η_2	=	ค่า Viscous Damping Coefficient ตัวที่ 2 (N.s/m)
M_w	=	มวลน้ำกลั่น (kg)
M_i	=	มวลเริ่มต้นของงา (kg)
m_f	=	ความชื้นสุดท้าย (%w.b.)
m_i	=	ความชื้นเริ่มต้นของงา (%w.b.)
ρ_b	=	ความหนาแน่นรวม (kg/m ³)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

งานปศุสัตว์ที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของไทย สามารถปลูกได้ง่ายทนทานต่อสภาพแห้งแล้งและเหมาะสมกับสภาพดินฟ้าอากาศของประเทศไทย สามารถบริโภคได้ทุกเพศ วัย และศาสนา ปัจจุบันความต้องการและตลาดของเมล็ดงาขึ้นเปิดกว้างทั้งในและต่างประเทศ ในอนาคตคาดว่าปริมาณการผลิตและการส่งออกเมล็ดงาจะเพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยสร้างรายได้เป็นอย่างมากให้แก่ประเทศ ผลผลิตงาของโลกโดยรวมมีประมาณปีละ 2.2-2.4 ล้านตัน ประเทศผู้ผลิตงาที่สำคัญ ได้แก่ ไทย อินเดีย ชูแดน และพม่า ในปี พ.ศ.2545 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกงาประมาณ 380,000 ไร่ ได้ผลผลิตรวม 360,00 ตัน ผลผลิตส่วนใหญ่ส่งออกไปยังต่างประเทศคิดเป็นมูลค่า 700 ล้านบาท ตลาดส่งออกที่สำคัญ ได้แก่ ประเทศญี่ปุ่น ไต้หวัน มาเลเซีย อิสราเอล ซาอุดีอาระเบีย สิงคโปร์ ประชาคมยุโรป และตะวันออกกลางรวมทั้งหมดมีความต้องการงาปีละ 300,000 ตัน เพื่อการบริโภคโดยตรง และสกัดเป็นน้ำมันงา ในปี พ.ศ.2546 กรมส่งเสริมการเกษตร ได้สำรวจพื้นที่ที่ใช่ปลูกงาพบว่าเพิ่มขึ้นเป็น 389,000 ไร่ ผลผลิตรวม 370,00 ตัน ผลิตได้ 100 กิโลกรัมต่อไร่ ราคา กิโลกรัมละ 25-29 บาท สร้างรายได้สุทธิเฉลี่ย 1,200 - 1,500 บาทต่อไร่ ตลาดต่างประเทศสนใจนำเข้ามากขึ้น คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 800 ล้านบาท และคาดว่าในปี พ.ศ.2548 เกษตรกรจะปลูกงามากขึ้น แต่ผลผลิตของงาก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากมีการบริโภคมากขึ้น

เมล็ดงามีค่าทางโภชนาการสูง ประกอบด้วย กรดไขมันไม่อิ่มตัวประมาณ 85% โดยมวลของปริมาณน้ำมันทั้งหมด มีโปรตีน 17% -18% โดยมวล มีสารต้านอนุมูลอิสระในปริมาณที่สูงสามารถป้องกันการเหม็นหืน และเป็นส่วนที่ช่วยปรับปรุงรสชาติและกลิ่นของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ยารักษาโรค และเครื่องสำอาง จากคุณค่าทางโภชนาการดังกล่าวจึงทำให้มีการแปรรูปงาเกิดขึ้นหลายรูปแบบ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

ในปัจจุบันมีผู้ผลิตบางรายทำการแปรรูปงาในรูปของงาอบกรอบปรุงรส ซึ่งกำลังได้รับความนิยมจากผู้บริโภคเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มที่จะสามารถส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศได้อีกด้วย กระบวนการผลิตงาอบกรอบในปัจจุบันมีการใช้แรงงานคนในการผลิตทุกขั้นตอนการผลิต เริ่มจากการล้างทำความสะอาดเป็นเวลาประมาณครึ่งชั่วโมง ซึ่งในช่วงนี้ความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเมล็ดงาจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก จากนั้นทำการคั่วในกระทะโดยใช้ความร้อนจากแก๊สหุงต้ม ควบคุมอุณหภูมิการคั่วจากการปรับระดับการเปิด-ปิดวาล์วโดยผู้ปฏิบัติงาน ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 15 นาที แล้วนำงาคั่วที่ได้ไปผสมสารละลายเกลือ และน้ำตาลในกระทะสเตนเลสเกรดพิเศษซึ่งใช้เวลาประมาณ 25-30 นาที งามที่ได้จากขั้นตอนนี้จะยังคงมีความชื้นสูงพอประมาณ จึงต้องนำไปอบไล่ความชื้นในเตาอบไฟฟ้าประมาณ 10 นาที แล้วจึงทำการบรรจุหีบห่อ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกระบวนการผลิตงาอบกรอบที่กล่าวมามีการใช้แรงงานคนในทุกๆ ขั้นตอน การควบคุมมาตรฐานการผลิตจึงเป็นไปได้ยากลำบาก นอกจากนี้แล้วอัตราค่าจ้างแรงงานในการผลิตก็อยู่ในเกณฑ์ที่สูงมาก เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการผลิตทั้งหมด ดังนั้นคณะผู้จัดทำโครงการจึงมีแนวคิดที่จะทำการพัฒนาชุดเครื่องมือแปรรูปงาอบกรอบเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

วัตถุประสงค์ทั่วไปของโครงการนี้คือ เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมืออบกรอบงาดิบแบบด้วยเทคนิคสเปาท์เตดเบค โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะดังนี้

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบกรอบงาแบบสเปาท์เตดเบคต้นแบบ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการผลิตงาอบกรอบ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นเริ่มต้นของงา และเวลา ต่อคุณลักษณะด้านต่างๆ ของงาอบ
- 1.2.3 เพื่อหาสภาวะการอบกรอบที่ทำให้งาอบมีคุณลักษณะด้านต่างๆ ใกล้เคียงหรือเหมือนกับงาคั่วในกระทะจากโรงงาน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องอบกรอบแบบสเปาท์เตดเบคต้นแบบ สำหรับอบกรอบงาประมาณ 0.3 kg. ต่อครั้ง
- 1.3.2 ทำการอบกรอบโดยกำหนดสภาวะการทดลองดังนี้
 - อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 160°C, 180°C และ 220°C
 - ความชื้นเริ่มต้นของงา 3 ระดับ คือ 25%, 30% และ 35 %w.b.
 - เวลาในการอบ 3 ระดับ คือ 2, 3 และ 4 นาที
- 1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการผลิตต่อคุณลักษณะต่างๆ ของงาอบ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม ความชื้นหลังอบ ปริมาณน้ำอิสระ คุณสมบัติเชิงกล และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เครื่องอบกรอบงาแบบสเปาท์เตคเบดต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถผลิตงาอบกรอบได้รวดเร็วและสะอาดถูกสุขลักษณะ

1.4.2 สถานะที่เหมาะสมสำหรับการอบกรอบงาด้วยเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตำราเอกสาร

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับงา

2.1.1 ลักษณะของงา

งาเป็นพืชล้มลุก สูงประมาณ 30-100 ซม. ลำต้นเป็นเหลี่ยม มีร่องตามยาวของลำต้น มีขนปกคลุม ใบเป็นใบเดี่ยวเรียงตรงข้ามหรือสลับ ลักษณะใบเป็นรูปไข่ หรือรูปใบหอก กว้างประมาณ 2-5 ซม. ยาวประมาณ 6-10 ซม. ดอกเป็นดอกเดี่ยว ออกที่ซอกใบ กลีบดอกสีขาวหรือชมพู ผลเป็นผลแห้ง เมล็ดแบน รูปไข่ สีดำ น้ำตาลหรือสีขาว (นิรนาม1, 2547)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของดอก ผล และต้นงา

2.1.2 ประโยชน์และคุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดงา

เมล็ดงานอกจากจะใช้ประกอบอาหารบริโภคโดยตรงแล้ว ยังสามารถใช้ประโยชน์ในลักษณะอื่นๆ ได้อีกมากดังรายละเอียดต่อไปนี้

- เพื่อเป็นอาหาร เมล็ดงาสามารถใช้ประกอบอาหารได้มากมายหลายชนิด เมล็ดงาที่คั่วหรืออบให้สุกจะมีกลิ่นหอมเฉพาะตัว ใช้โรยหน้าขนมปังหรือคุกกี้ต่างๆ ทำให้มีกลิ่นหอมน่ารับประทาน นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารและขนมหลายชนิด เช่น กระจายสารงาแผ่น ใช้โรยน้ำจิ้มต่าง ๆ เช่น น้ำจิ้มสุกี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้สกัดน้ำมัน น้ำมันที่สกัดจากเมล็ดงา เป็นน้ำมันพืชที่มีคุณภาพดีมาก ใช้เพื่อปรุงอาหารหรือเป็นส่วนประกอบของน้ำสลัด

- กากงา กากที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน สามารถใช้เป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ได้อย่างดี เพราะมีปริมาณโปรตีนสูง และไขมันต่ำ โปรตีนในกากงาประกอบด้วย กรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายโดยเฉพาะมีกรดเมทไธโอนีนสูง

- เป็นสมุนไพรและยารักษาโรค โดยในทางการแพทย์แผนปัจจุบัน ใช้น้ำมันงาเป็นส่วนผสมในยาลดปริมาณโคเลสเตอรอลในเลือด เพราะงามีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง ช่วยควบคุมระดับโคเลสเตอรอลไม่ให้มีมากเกินไปป้องกันโรคหัวใจและโรคเกี่ยวกับหลอดเลือดบางชนิด

- การใช้ประโยชน์ด้านอื่น นอกจากที่กล่าวมาแล้วยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกคือ น้ำมันงาถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ สี เครื่องสำอางน้ำมันหล่อลื่น นอกจากนี้ยังมีการนำส่วนต่างๆ ของต้นงาไปใช้ประโยชน์ เช่น ในประเทศอุกันดาและบริเวณแอฟริกาตะวันตก ใช้ใบงาเป็นส่วนประกอบในการทำดอกไม้เพลิง คนอาฟริกันใช้ลำต้นและใบงาถูลำตัวของวัวและควายเพื่อให้เมือกหรือน้ำที่ไหลออกมาไปจับไล่แมลงพวก เทสซีฟลาย (tsetse fly) ที่เป็นพาหะนำโรคเหงาหลับ (sleeping sickness) ชาวพม่าใช้ขี้เถ้าของงาทำเป็นสบู่สำหรับซักเสื้อผ้า (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

2.1.3 มาตรฐานในด้านคุณภาพเมล็ดงา

- 1) เมล็ดงาควรเป็นสีเดียวกันมีขนาดเล็กเท่าเทียมกัน มีสิ่งเจือปนได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์
- 2) งาขาวควรมีความขาวระดับ 95-98 เปอร์เซ็นต์
- 3) งาดำควรมีลักษณะ ดับเบิล ฮัส (double husk)
- 4) ความชื้นไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์
- 5) เมล็ดที่นำมาสกัดน้ำมันควรมี acid value ไม่เกิน 3 หน่วย (unit) ปราศจากสารอะฟลาทอกซิน (aflatoxin) (นิรนาม3, 2547)

2.1.4 มาตรฐานอุตสาหกรรมเมล็ดงา

- 1) เมล็ดงา หมายถึง เมล็ดที่ได้จากพืช มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Sesamum indicum* Linn.
 - 1.1) งาดำ หมายถึง เมล็ดงาที่เปลือกมีสีดำตามธรรมชาติ
 - 1.2) งาขาว หมายถึง เมล็ดงาที่เปลือกมีสีขาว หรือสีขาวอมเหลือง หรือสีขาวอมน้ำ

ตาล ตามธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) งาขัด หมายถึง เมล็ดงาที่ขัดจนเหลือแต่เนื้อใน แล้วฟอกขาว
- 3) งาต่างชนิด หมายถึง งาคำ งาขาว งาขัด ชนิดใดชนิดหนึ่งที่ปะปนอยู่ในเมล็ดงาชนิดที่ระบุไว้ที่ฉลาก
- 4) สิ่งแปลกปลอม หมายถึง สิ่งที่ไม่ใช่ส่วนของเมล็ดงา เช่น กิ่ง ก้าน ใบ ฝัก ผง ดิน หิน ทราย

คุณลักษณะที่เป็นที่ต้องการของเมล็ดงาต้องไม่มีกลิ่นอับ หืน และมีสีตามของเมล็ดงานั้นๆ การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

2.2 ความชื้น (Moisture content)

ความชื้นหรือน้ำในเมล็ดพืชมี 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นน้ำที่อยู่ในเซลล์ของเมล็ดพืช และส่วนที่สองคือน้ำที่อยู่รอบหรือระหว่างเซลล์พืช น้ำทั้ง 2 ส่วนมีผลต่อความชื้นในอาหาร โดยเฉพาะน้ำที่อยู่รอบเซลล์ เนื่องจากน้ำส่วนนี้มีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษาเมล็ดพืช (Bala, 1997)

2.2.1 การกำหนดค่าความชื้น

การกำหนดค่าความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้ 2 วิธี คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก และความชื้นมาตรฐานแห้ง

1) ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis, w.b.) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในเมล็ดพืช กับน้ำหนักทั้งหมดของเมล็ดพืช โดยทั่วไปค่าความชื้นนี้มักแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์และนิยมใช้ในการค้า สำหรับการบอกค่าความชื้นของเมล็ดพืช

สมการสำหรับความชื้นมาตรฐานเปียก คือ

$$M_w = \frac{W_w}{W_w + W_d} \quad (2.1)$$

2) ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis, d.b.) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในเมล็ดพืช กับน้ำหนักแห้งของเมล็ดพืช ค่าน้ำหนักแห้งของเมล็ดพืชจะมีค่าคงที่เสมอ

สมการสำหรับความชื้นมาตรฐานแห้ง คือ

$$M_d = \frac{W_w}{W_d} \quad (2.2)$$

ในการเปลี่ยนค่าความชื้นมาตรฐานเปียกเป็นความชื้นมาตรฐานแห้ง สามารถกระทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1 - M_w = 1 - \frac{W_w}{W_w + W_d} \quad (2.3)$$

หรือ

$$M_d = \frac{W_w}{1 - M_w} \quad (2.4)$$

ส่วนการเปลี่ยนค่าความชื้นมาตรฐานแห้งเป็นความชื้นมาตรฐานเปียก สามารถกระทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$1 + M_d = 1 + \frac{W_w}{W_d} \quad (2.5)$$

หรือ

$$M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \quad (2.6)$$

เมื่อ M_d = ความชื้นมาตรฐานแห้ง, ทศนิยม

M_w = ความชื้นมาตรฐานเปียก, ทศนิยม

W_w = มวลของของแข็ง

W_d = มวลของน้ำ

ค่าความชื้นในเมล็ดพืชอาจบอกเป็นค่า %w.b. หรือสามารถกระทำได้โดยนำ M_w หรือ M_d คูณด้วย 100

2.2.2 การหาค่าความชื้นของเมล็ดพืช

การหาค่าความชื้นของเมล็ดพืช แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีทางตรง และวิธีทางอ้อม วิธีทางตรงเป็นวิธีหาค่าความชื้นโดยนำตัวอย่างเมล็ดพืชจำนวนหนึ่งมาชั่งน้ำหนัก แล้วนำไประเหยน้ำออกจนได้เมล็ดพืชแห้ง ชั่งน้ำหนักเมล็ดพืชแห้งที่ได้แล้วนำไปหาความชื้น (Brooker et al., 2000) วิธีการที่ใช้กันทั่วไปมีดังนี้

- การหาค่าความชื้นตามมาตรฐานของ Association of Official Agricultural Chemists

(AOAC)

โดยนำวัสดุไปอบในตู้อบจนน้ำระเหยหมด ซึ่งระดับของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้จะขึ้นกับ

ประเภทของเมล็ดพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การวัดค่าความชื้น โดยตรงโดยวิธีอินฟราเรด (Infla-red lamp Method)

เป็นวิธีระเหยน้ำโดยใช้แสงไฟฟ้าจากหลอดอินฟราเรดส่องไปยังเมล็ดพืชที่จะหาความชื้น ระยะเวลาที่ใช้ในการวัดค่าความชื้นค่อนข้างสั้น และไม่จำเป็นต้องอบเมล็ดพืช (Brooker et al., 1974) ส่วนประกอบของเครื่องประกอบด้วย เครื่องชั่งแบบแขวนซึ่งมีถาด 2 ชั้น โดยข้างหนึ่งใช้สำหรับใส่ค้อนน้ำหนัก อีกด้านหนึ่งเป็นถาดใส่ตัวอย่าง ด้านบนมีหลอดอินฟราเรดสำหรับส่องลงมาบนถาด ระดับของความร้อนที่ได้จากหลอดอินฟราเรดสามารถปรับได้จากระยะความสูงต่ำของหลอดอินฟราเรด ที่ด้านล่างของเครื่องมีสเกลสำหรับปรับสมดุลของแขนเครื่องชั่งเพื่อค่าน้ำหนักที่ลดลงของตัวอย่างเป็นค่าความชื้น (Brooker et al., 1992)

- การวัดค่าความชื้น โดยตรงด้วยวิธีการถนแบบ Brown-Dovel Method

ทำได้โดยนำตัวอย่างวัสดุที่จะหาความชื้นมาใส่ในภาชนะที่บรรจุน้ำมัน แล้วให้ความร้อนแก่น้ำมันจนกระทั่งน้ำในวัสดุระเหยออกมา แต่อุณหภูมิจะต้องไม่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำมัน ไขมันที่ได้จะถูกรวบรวมและนำมาควั่นเป็นหยดน้ำ ปริมาณน้ำที่ได้จะนำมาคำนวณเป็นความชื้นของวัสดุ โดยทั่วไปใช้ปริมาณตัวอย่างมวล 100 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ (flask) ที่บรรจุน้ำมัน เช่น ทูโลอิน 100 mm อุณหภูมิ 190 °C ระยะเวลาในการให้ความร้อนประมาณ 1 ชั่วโมง (Brooker et al., 1992)

สำหรับตัวอย่างของวิธีการหาความชื้นโดยอ้อมมีดังนี้

-วิธีความต้านทานไฟฟ้า (Resistance Method)

วิธีนี้อาศัยหลักการที่ค่าความต้านทานหรือการนำไฟฟ้าของวัสดุแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นภายในวัสดุ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำมาสร้างอุปกรณ์วัดความชื้น (Wimberly, 1983) โดยให้วัสดุที่จะวัดความชื้นอยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโตร (electro) 2 แผ่น กัดแผ่นอิเล็กโตรให้แน่นและวัดค่าการนำไฟฟ้าที่ได้ นำมาเปรียบเทียบกับหรือปรับค่าสเกลที่วัดค่าเป็นความชื้น อย่างไรก็ตามการนำไฟฟ้ามีการแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิด้วย ดังนั้นในการวัดค่าจำเป็นต้องมีการปรับแก้ อุณหภูมิขณะวัด (Chakravert, 1981)

-วิธีวัดค่าประจุไฟฟ้า (Capacitance Method)

หลักการคือคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric) ของวัสดุขึ้นอยู่กับความชื้นภายใน โดยวัสดุที่มีความชื้นสูงจะมีค่าไดอิเล็กตริกสูง ส่วนวัสดุที่มีความชื้นต่ำก็จะค่าดังกล่าวต่ำ สำหรับน้ำที่ 20 °C มีค่าไดอิเล็กตริกคงที่ 80 (Bala, 1997) และเมล็ดพืชมีค่าไดอิเล็กตริกต่ำกว่า 5 (Brooker et al., 1992) การวัดด้วยวิธีนี้ทำได้โดยใส่วัสดุที่ต้องการหาความชื้นลงในช่องของวัด ซึ่งที่ด้านข้างของช่องจะติดแผ่นสำหรับปล่อยกระแสไฟฟ้าความถี่สูงให้ผ่านวัสดุประจุไฟฟ้าที่วัดได้จะนำมาเทียบกับความชื้นของวัสดุ ค่าที่วัดได้จะมีช่วงกว้างมากกว่าเครื่องวัดแบบความต้านทานไฟฟ้า คือ

สามารถวัดได้ในช่วงความชื้น 8% - 40% นอกจากนี้เครื่องวัดชนิดนี้ยังมีข้อดีในแง่การวัดที่ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างจำนวนมากพอสมควรใส่ลงในช่อง ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดจากการวัดในกรณีที่มีความชื้นภายในวัสดุไม่สม่ำเสมอ (Wimberly, 1983)

-วิธีทางเคมี (Chemical Method)

สารเคมีบางชนิดเมื่อนำมาคลุกรวมกับเมล็ดพืชจะสามารถดูดความชื้นจากเมล็ดพืช และทำปฏิกิริยากับความชื้นเกิดเป็นก๊าซได้ ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวม และวัดความดันเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าเป็นปริมาณความชื้นในวัสดุ ตัวอย่างสารเคมีที่นำมาใช้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์ไบด์ โดยก๊าซที่ได้คือ ก๊าซอะเซทิลีน (acetylene) ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาประมาณ 15 - 20 นาที และใช้ตัวอย่างวัสดุประมาณ 30 g (Teter, 1981)

2.3 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวล (m) ต่อปริมาตรของวัสดุ (V) มักใช้สัญลักษณ์ แทน คือ

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.9)$$

หน่วยของความหนาแน่นในระบบ SI เป็น kg/m^3 ความหนาแน่น แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ความหนาแน่นเนื้อ (solid density) และความหนาแน่นรวม (bulk density) (ปานมนัส สิริสมบูรณ์ และคณะ, 2532)

2.3.1 ความหนาแน่นเนื้อ

คำนวณได้จากเนื้อวัสดุล้วนๆ เป็นค่าชี้ให้เห็นถึงความหนาแน่นของเนื้อวัสดุเอง อาจเรียกว่า ความหนาแน่นจริง (true density) นอกจากจะมีความหนาแน่นเนื้อ แล้วยังมีความหนาแน่นรวมปริมาตรรูพรุนของวัสดุด้วย เรียกว่า ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ความหนาแน่นปรากฏคำนวณจาก น้ำหนักของวัสดุหารด้วยปริมาตรของรวมกับช่องว่างระหว่างของแข็งนั้น ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นไปตามปริมาตร เช่น เมล็ดถั่ว เมื่อแช่น้ำระยะหนึ่งจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่ในช่องว่าง

ในกรณีที่วัสดุเป็นผงละเอียด เช่น นมผง แบ่งความหนาแน่นของวัสดุประเภทนี้เรียกว่า ความหนาแน่นอนุภาค (particle density) ความหนาแน่นเหล่านี้มีผลต่อการแยกทำความสะอาดหรือ กระบวนการอื่นๆ เช่น กรณีความหนาแน่นจริงของเมล็ด และเนื้อในเมล็ดไม่ต่างกันมากทำให้ยากต่อการทำความสะอาดด้วยวิธีที่ใช้การแยกด้วยความแตกต่างของความหนาแน่น เช่น การเป่าแยกด้วยลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแยกเมล็ดออกจากเนื้อในเมล็ดด้วยการใส่ลงในน้ำถ้าเมล็ดมีความแน่นปรากฏน้อยกว่า น้ำ ส่วนในเมล็ดมีความหนาแน่นปรากฏมากกว่าน้ำ เมล็ดจะลอยขึ้น ส่วนเนื้อในเมล็ดจะจม กรณีเช่นนี้ต้องการแยกในเวลารวดเร็ว เพราะถ้าหากเมล็ดดูดซับน้ำเข้าไปเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นปรากฏสูงกว่าน้ำ หรือเท่ากับน้ำ จะทำให้แยกไม่ได้ (ปานมนัส ศิริสมบุญ และคณะ, 2532)

ค่าความหนาแน่นเนื้อของวัสดุเกษตร และอาหารมีค่าต่างๆ กันไป ถึงแม้จะเป็นชนิดเดียวกัน เช่น ความหนาแน่นของเมล็ดแป้งสตาร์ชมีค่าเกือบเท่ากับเจลของเมล็ดแป้งสตาร์ชชนิดเดียวกัน หรือ ความหนาแน่นเนื้อของเมล็ดข้าวโพดแตกๆ มีค่ากว่าความหนาแน่นของเมล็ดข้าวโพดเต็มเมล็ด (Lewis, 1992)

2.3.2 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

ความหนาแน่นรวมของวัสดุคืออัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรของวัสดุปริมาณมวล โดยที่ปริมาตรดังกล่าวจะหมายถึงปริมาณของช่องว่างระหว่างเมล็ดหรืออนุภาคของวัสดุ เครื่องมือที่ใช้หาความหนาแน่นรวมของวัสดุโดยตรงได้แก่ hectoliter ความหนาแน่นรวมอาจคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \frac{\text{มวลรวมของวัสดุ}}{\text{ปริมาตรของภาชนะบรรจุ}} \quad (2.10)$$

2.4 กลไกการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งส่วนมากใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์และการถ่ายเทความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศ ความร้อนจากอากาศที่ผลิตภัณฑ์ได้รับส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการระเหยน้ำ อัตราการระเหยน้ำหรืออัตราการอบแห้งจะคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจะลดลงโดยทั่วไปอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์หนึ่งๆ จะสัมพันธ์กับการอบแห้งในรูปของการอบแห้งชั้นบาง (Brooker et al., 1992) โดยทั่วไปกลไกการอบแห้งอาจได้เป็น 3 ช่วง (Wimberly, 1983) ดังนี้

- ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ ช่วงนี้สภาพที่ผิวหน้าวัสดุจะเปียกชื้นมากทำให้อากาศร้อนได้สัมผัสกับผิวน้ำอย่างเต็มที่ อัตราการอบแห้งเริ่มมีค่าสูงมากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำและวัสดุเริ่มสูงขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีแล้วอุณหภูมิของวัสดุในช่วงนี้จะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วงอัตราการอบแห้งที่คงที่ ช่วงนี้อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ตลอด ซึ่งทำให้ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับถูกใช้ไปในการระเหยออกจากวัสดุเท่านั้นการกระจายความชื้นที่ผิวหน้าวัสดุจะมีค่าคงที่นั่น คืออัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวหน้าจะมีค่าเท่ากับอัตราการระเหยความชื้นจากผิวหน้าวัสดุออกไป ดังนั้นอัตราการอบแห้งวัสดุในช่วงนี้จึงมีค่าคงที่และขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าวัสดุเท่านั้น

- ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงนี้ความชื้นภายในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไปเนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวหน้าวัสดุเพราะถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่ของน้ำจากภายในมาสู่ภายนอก ค่าความชื้นที่เริ่มเปลี่ยนจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ไปเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เรียกว่าความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture) และค่าความชื้นสุดท้ายที่ทำให้อัตราการอบแห้งเป็นศูนย์ เรียกว่า ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture) ซึ่งค่านี้เป็นค่าความชื้นของวัสดุที่คงเหลืออยู่ได้ภายหลังผ่านการอบแห้งภายใต้สภาวะอากาศที่หนึ่ง ๆ

2.5 สเตปัทเตคเบด

สเตปัทเตคเบดจัดเป็นฟลูอิด ไคซ์เบคประเภทหนึ่ง ภายในระบบนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความร้อนและมวลสารอย่างรวดเร็ว (Mathur and Gishler, 1955) วัสดุจะมีการเคลื่อนที่หมุนเวียน โดยจะเคลื่อนที่ขึ้นเป็นพวยพุ่งในส่วนของลำอากาศ และเคลื่อนที่ลงในส่วนรอบๆ ลำอากาศ หรือ แอนนูลัส (annulus) การเคลื่อนที่จะเป็น ไปอย่างหนาแน่นในเบด ประโยชน์ที่นำสนใจของสเตปัทเตคเบดเมื่อเปรียบเทียบกับฟลูอิด ไคซ์เบคทั่วไป คือ สามารถใช้อบแห้งวัสดุที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 5 mm ซึ่งถ้าใช้ฟลูอิด ไคซ์เบคจะเกิด สลัดกิสซ์ (sluggish) การใช้สเตปัทเตคเบดจะช่วยให้วัสดุมีการผสมกันอย่างดี และมีการสัมผัสกันระหว่างอากาศกับวัสดุได้เป็นอย่างดีด้วย นอกจากนี้สเตปัทเตคเบดยังสามารถใช้กับวัสดุที่มีขนาดต่างกัน ซึ่งถ้าใช้ฟลูอิด ไคซ์เบคจะทำให้วัสดุหลังการอบแห้งมีความชื้นต่างกัน (Manurung, 1964)

สเตปัทเตคเบดมีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมในการอบกรอบวัสดุที่ไวต่อความร้อน เช่น ผลผลิตทางการเกษตรพวก ถั่ว ข้าวสาลี เป็นต้น เนื่องจากมีช่วงเวลาที่อยู่ในลำอากาศสั้น ดังนั้นจึงควบคุมการผสมกันของวัสดุได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถใช้อุณหภูมิสูงกว่าการอบแห้งทั่วไป (Robins and Fryer, 2003) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของวัสดุจะขึ้นกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่บริเวณส่วนล่างของสเตปัทเตคเบด อุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากมีอัตราการหมุนเวียนของวัสดุสูง ส่วนใหญ่การแพร่ของความชื้นในการอบกรอบจะเกิดขึ้นในส่วนของแอนนูลัส ในขณะที่วัสดุเคลื่อนที่ลง (Pallai and Nemeth, 1969)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปาท์แตกเบดกับฟลูอิดไดซ์เบด แล้วพบว่าค่าความดันที่ลดคร่อมเบดวัสดุ (pressure drop) ระหว่างการปฏิบัติงานของสเปาท์แตกเบดจะมีค่าต่ำกว่าประมาณ 1/3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ ฟลูอิดไดซ์เบด เนื่องจากผนังของห้องอบจะช่วยพยุงน้ำหนักของวัสดุบางส่วนไว้ (Nagaraju et al., 1997) อย่างไรก็ตามค่าความดันลด (pressure drop) ในช่วงเริ่มต้นของการเกิดสเปาท์จะสูงกว่า ซึ่งจะต้องนำมาพิจารณาเมื่อมีการออกแบบพัดลมเป่าอากาศ (Marcowski, 1983)

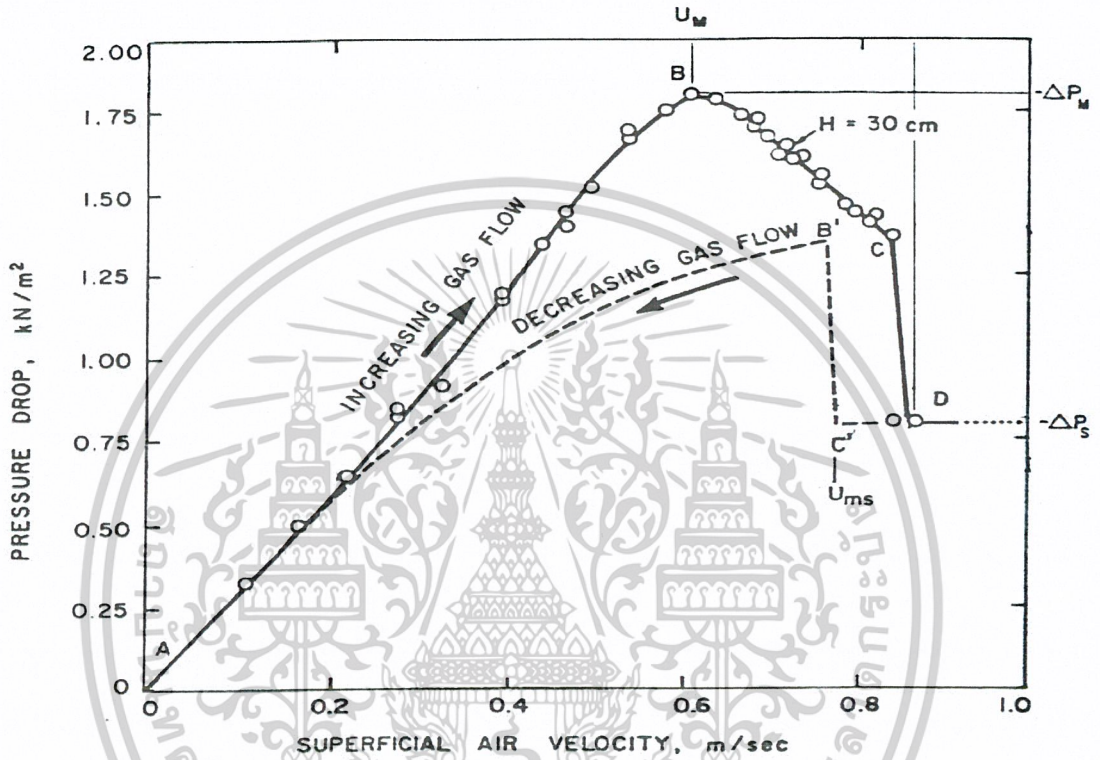
ข้อดีของสเปาท์แตกเบดต่างๆ ไป คือ วัสดุมีรูปแบบการเคลื่อนที่ที่แน่นอน วัสดุผสมกันได้ อย่งดี ป้องกันให้ความร้อนมากเกินไปในบางส่วน สามารถมั่นใจได้ว่าวัสดุหลังอบกรอบจะมีค่าความชื้นใกล้เคียงกัน (Manurung, 1964)

2.5.1 คุณลักษณะทางการไหลของสเปาท์แตกเบด

คุณลักษณะทางการไหลของสเปาท์แตกเบด เป็นการแสดงถึงความต้านทานของอนุภาคของแข็งที่มีต่อของไหลซึ่งเป็นตัวกลางในการสเปาท์ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มจากเบดนิ่งจนกระทั่งเกิดเป็นสเปาท์แตกเบดเมื่อความเร็วอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น โดยปกติคุณลักษณะทางการไหลจะแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดกับความเร็วอากาศเข้าเบด ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้นี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและการเดินเครื่องทำแห้งในกระบวนการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกันจะมีคุณลักษณะทางการไหลที่แตกต่างกัน

สำหรับความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาได้โดยเริ่มต้นจากการปล่อยอากาศที่ความเร็วต่ำเข้าไปในหอทดลอง ในช่วงแรกเบดยังคงอยู่นิ่งเหมือนกับเบดนิ่งในฟลูอิดไดซ์เบดแต่ความดันลดคร่อมเบดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความเร็วอากาศมีค่าสูงขึ้น ความสัมพันธ์ของ 2 ปริมาณดังกล่าวในช่วงนี้จะเกือบเป็นเส้นตรงตามเส้น AB ในรูปที่ 2.2 สำหรับค่าความดันลดคร่อมเบดที่จุด B นี้จะมีค่ามากที่สุด เรียกว่า ความดันลดคร่อมเบดสูงสุด (maximum pressure drop, ΔP_{max}) ถัดจากจุด B ความดันจะลดลงตามเส้น BC เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นเพราะตรงบริเวณทางเข้าของอากาศหรือบริเวณส่วนล่างของเบดเกิดการขยายตัวขึ้น เกิดเป็นช่องว่างเล็กๆ หรือเกิดเป็นสเปาท์เล็กๆ ขึ้น เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นอีก ความสูงของ สเปาท์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ความดันลดคร่อมเบดจะลดต่ำลงเรื่อยๆ จนถึงจุด D ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มเกิดการเป็นสเปาท์แตกเบด (onset of spouting) ค่าความดันลดคร่อมเบดที่จุดนี้ เรียกว่า ความดันลดคร่อมเบดขณะที่เบดมีเสถียรภาพ (steady spouting pressure drop, ΔP_s) เบดทั้งหมดจะมีการเคลื่อนที่และมีความคงตัว ถ้าเพิ่มความเร็วอากาศให้สูงกว่าจุด D ความดันลดจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

เมื่อความเร็วอากาศมีค่าลดลง ค่าความดันลดคร่อมเบดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเส้น C'B' ค่าความเร็วอากาศ ณ จุด B' นี้คือ ค่าความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดสปาท (minimum spouting velocity, U_{ms}) และเมื่อความเร็วอากาศลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ ความดันลดคร่อมเบดจะมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ โดยที่เบดจะค่อยๆ ยุบตัวลงจนมีลักษณะเป็นเบดนิ่ง (Mathur and Epstein, 1974)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดและความเร็วอากาศเข้าเบด

(Mathur and Epstein , 1974)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายๆ กลุ่มได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดสปาท (U_{ms}) ความดันลดคร่อมเบดสูงสุด (ΔP_{max}) และความดันลดคร่อมเบดขณะมีเสถียรภาพ (ΔP_s) กับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะทางการไหล ดังจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.5.2 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดสเปาท์เบด (U_{ms})

ความเร็วของของไหลต่ำสุดที่ทำให้เกิดสเปาท์จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของเบด ขนาดและรูปร่างของอนุภาค Mathur และ Epstein (1974) ได้ทำการศึกษาโดยวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีต่อความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดสเปาท์ในรูปเทอมไร้หน่วย ผลการวิเคราะห์แสดงดังสมการ (2.11)

$$U_{ms} = \left(\frac{d_p}{d_c} \right) \left(\frac{D_i}{d_c} \right)^{1/3} \left(\frac{2gH_o(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

เมื่อ	U_{ms}	= ความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดการสเปาท์ (m/s)
	d_p	= เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)
	d_c	= เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทดลอง (m)
	D_i	= เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าของอากาศเข้า (m)
	H_o	= ความสูงเบดนิ่ง (m)
	g	= ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
	ρ_g	= ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
	ρ_s	= ความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3)

Manurung (1964) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดสเปาท์กับเทอมไร้หน่วยต่างๆ ดังนี้

$$U_{ms} = 7.73 (\tan \gamma)^{0.72} \left(\frac{d_p}{D_c} \right)^{0.62} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0.155 \tan \gamma} (HU_m g)^{1/3} \quad (2.12)$$

$$\text{โดยที่ } 1.75 \rho_f d_p U_m^2 + 150 \mu (1 - \varepsilon_0) U_m - d_p^2 \varepsilon_0^3 (\rho_s - \rho_f) g = 0 \quad (2.13)$$

เมื่อ	U_{ms}	= ความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดการสเปาท์ (m/s)
	U_m	= ความเร็ว (m/s) คำนวณจากสมการที่ (2.13)
	$\tan \gamma$	= สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานภายใน
	d_p	= เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)
	D_c	= เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทดลอง (m)
	D_i	= เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศเข้าเบด (m)
	H	= ความสูงเบดนิ่ง (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Marcowski และ Kaminski (1983) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดสเปาท์กับเทอมไร้น้ำหนัก ดังนี้

$$\text{Re}_{msn} = 2.8 \times 10^{-2} Ar^{0.57} \left(\frac{H_0}{D_i} \right)^{0.78} \left(\frac{d_c}{D_i} \right)^{1.27} \quad (2.14)$$

เมื่อ $\text{Re}_{msn} =$ ตัวเลขเรย์โนลด์ $= \frac{\rho_g d_p U_{ms}}{\mu_g}$

$Ar =$ ตัวเลขอาคิมิตีส $= \frac{g d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{\mu_g^2}$

$U_{ms} =$ ความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดการสเปาท์ (m/s)

$D_i =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศขาเข้าเบด (c.m.)

$d_c =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของหอยทง (c.m.)

$H_0 =$ ความสูงของเบดนิ่ง (c.m.)

โดยที่อัตราส่วนระหว่างความสูงเบดนิ่งกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางเข้าอากาศตอนล่าง (H_0/D_c) อยู่ในช่วง 0.6 ถึง 2.3 อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอยทงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศขาเข้าเบด (D_c/D_i) อยู่ในช่วง 3.78 ถึง 7.75 และค่าตัวเลขอาคิมิตีส (Ar) อยู่ในช่วง 3×10^6 ถึง 8.5×10^7

2.5.3 ความเร็วของวัสดุ และเวลาของการหมุนเวียนวัสดุ (Cycle time)

ความเร็วของวัสดุขึ้นอยู่กับรูปร่างของเบด, ลักษณะของวัสดุ และปัจจัยต่างในการปฏิบัติงาน เช่น ความกว้างของสล๊อต (slot) อัตรา และเวลา การหมุนเวียนวัสดุส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงการตกของเบด (falling bed) ในแอนนูลัส ซึ่งบางครั้งการคำนวณ cycle time จะไม่คิดเวลาที่อยู่ในสเปาท์ เนื่องจากน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในแอนนูลัส จะเห็นได้ว่า cycle time จะขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศที่ cycle time มากที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศต่ำสุด เมื่อปัจจัยอื่นๆ คงที่ (Pallai and Nemeth, 1969)

2.5.4 ความลึกของเบด (Bed depth)

ความลึกของเบดสูงสุดจะลดลง เมื่อขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้น ที่อัตราการไหลของอากาศเท่าเดิม เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่มีเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างอนุภาคมากขึ้น รวมไปถึงการไหลของอากาศ และความดันลด ซึ่งทำให้เกิดสเปาท์ เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มความลึกของเบด (Zahed and Epstein, 1993)

2.5.5 ความลึกสูงสุดของสเปาท์ (Maximum spoutable bed depth)

ความลึกของเบดในการทำงาน ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจะต่ำกว่าค่าความลึกสูงสุดของสเปาท์ อย่างไรก็ตามอัตราส่วน H/H_m จะเป็นปัจจัยที่ใช้การขยายขนาด เนื่องจากพฤติกรรมการไหลภายในเบดขนาดต่างๆ ที่มีอัตราส่วน H/H_m เท่ากันจะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน Mukhlenov และ Gorshtein (1965) ได้เสนอสมการสำหรับทำนายค่าความลึกสูงสุดของสเปาท์ดังต่อไปนี้

$$\left[D_c^2 - D_s^2 \right] \tan \phi / D_s H_m = 0.9 \quad (2.15)$$

เมื่อ

- ϕ = มุมกอง (Angle of repose) (องศา)
 D_s = เส้นผ่านศูนย์กลางของสเปาท์ (c.m.)
 D_c = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (c.m.)
 H = ความสูงของเบด (c.m.)
 H_m = ความสูงมากที่สุดของเบด (High maximum of Bed) (c.m.)

2.5.6 ความดันลด (Pressure drop)

โดยส่วนใหญ่แล้วค่าความดันลดที่เราสนใจ และต้องการหาในขณะปฏิบัติงาน คือ ความดันลดที่เกิดขึ้นในช่วงการเกิดสเปาท์ อย่างคงที่ (Madonna and Lama, 1960) ค่าความดันลดอื่นๆที่น่าสนใจมีดังนี้

- ความดันลดคร่อมเบดสูงสุด (ΔP_{max}) ค่าสูงสุดของความดันลดคร่อมเบดเป็นพลังงานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างของเบดหนึ่ง เพื่อที่จะให้เกิดสเปาท์ขึ้นภายในส่วนด้านล่างของเบดในช่วงแรกของการเกิดสเปาท์ ค่าความดันนี้เป็นค่าความดันต่ำสุดที่ต้องใช้ในการเลือกขนาดพัดลมสำหรับสเปาท์เตคเบดชุดหนึ่งๆ (Jumah and Mujumdar, 1996)

Manurung (1964) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดสูงสุดในการเกิดสเปาท์กับเทอมไร้หน่วย ซึ่งประกอบด้วย ความดันลดที่เกิดจากการทำลายโครงสร้างของเบดและความดันลดที่เกิดจากแรงเสียดทาน ซึ่งในส่วนแรกจะวัดจากพลังงานของอากาศในการทำลายโครงสร้างของเบดและการเกิดสเปาท์ สำหรับส่วนหลังเป็นความดันลดอย่างง่ายของเบดหนึ่ง แสดงในสมการดังนี้

$$\frac{-\Delta P_M}{H\rho_b g} = \left[\frac{6.8}{\tan \gamma} \left(\frac{D_i}{D_c} \right) + 0.80 \right] - 34.4 \left(\frac{d_p}{H} \right) \quad (2.16)$$

เมื่อ ΔP_M = ความดันลดคร่อมเบดสูงสุด (kPa)

- ความดันลดคร่อมเบดขณะที่เบดมีเสถียรภาพ (ΔP_s) ค่าความดันลดคร่อมเบดขณะที่เบดมีเสถียรภาพนั้นเป็นค่าความดันต่ำสุดที่ต้องใช้ในการเดินเครื่องพัดลม เพื่อให้ได้อนุภาคภายในเบดเกิดการสเปาท์ ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าความดันลดคร่อมเบดสูงสุด (Jumah and Mujumdar, 1996)

จากงานวิจัยของ Manurung (1964) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดขณะที่เบดมีเสถียรภาพกับเทอมไร้หน่วย สามารถแสดงในรูปของสมการต่อไปนี้

$$\frac{-\Delta P_s}{H\rho_b g} = \frac{1}{1 + \left(\frac{0.81(\tan \gamma)^{1.5}}{\psi^2} \right) \left(\frac{D_c d_p}{D_i^2} \right)^{0.78} \left(\frac{D_c}{H} \right)} \quad (2.17)$$

เมื่อ ΔP_s = ความดันลดคร่อมเบดขณะที่เบดมีเสถียรภาพ, kPa

ψ = แฟคเตอร์รูปร่างของอนุภาค

จากผลการทดลองของ Markowski และ Kaminski (1983) พบว่าเครื่องทำแห้งแบบสเปาท์เตดเบด ที่ความสูงเบดมีค่าน้อยเบดจะมีความเสถียรน้อยด้วย โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนระหว่างความสูงเบดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางเข้าอากาศตอนล่างเบดมีค่าน้อยกว่า 1 เมื่อนำข้อมูลของผลการทดลองมาวิเคราะห์ในรูปแบบของสมการไร้หน่วย จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\Delta P_s}{\rho_g U_{ms}^2} = 0.19 \left(\frac{d_c}{H_0} \right)^{0.56} \left(\frac{D_i}{H_0} \right)^{2.39} \left(\frac{H_0}{d_p} \right)^{2.35} \quad (2.18)$$

เมื่อ ΔP_s = ความดันลดคร่อมเบดขณะที่มีเสถียรภาพ (kPa)

โดยที่อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอยท่ดลงกับความสูงเบดหนึ่ง (d_p/H_o) อยู่ในช่วง 1.47 ถึง 4.83 อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางเข้าอากาศตอนล่างเบดกับความสูงเบดหนึ่ง (D/H_o) อยู่ในช่วง 0.43 ถึง 1.66 และอัตราส่วนระหว่างความสูงเบดหนึ่งกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (H_o/d_p) อยู่ในช่วง 3.57 ถึง 16.66

2.5.7 อัตราการหมุนเวียนวัสดุ

ค่าอัตราการหมุนเวียนวัสดุ สามารถประมาณได้จากความเร็วของวัสดุที่ได้ ระหว่างด้านบนของเบดและเหนือพื้นเตียงด้านล่างและปริมาณวัสดุที่บรรจุอยู่ภายในห้องอบ ค่าอัตราการหมุนเวียนวัสดุนี้จะขึ้นอยู่กับความสูงเริ่มต้นของเบด และค่ามุมเอียง โดยอัตราการหมุนเวียนวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความสูงเริ่มต้นของเบดสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มค่าความสูงเริ่มต้นของเบด เป็นการเพิ่มความกว้างของสล็อต ทำให้วัสดุเคลื่อนที่ลงได้เร็วขึ้น ส่วนการเพิ่มค่ามุมเอียงก็สามารถเพิ่มค่าอัตราการหมุนเวียนวัสดุได้เช่นกัน เนื่องจากการลดแรงเสียดทานในการต้านเคลื่อนที่ลงของวัสดุ (Jumah and Mujumdar, 1996)

2.6 การทดสอบแบบคืบ (Creep test)

การทดสอบการคืบแบบคืบ เป็นการกดชิ้นวัสดุโดยใช้แรงหรือความเค้น (stress; σ) คงที่ อย่างทันทีทันใดแล้วคงไว้ ในช่วงเวลาหนึ่งจากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระยะยวบตัวหรือความเครียด (strain; ϵ) ของวัสดุ ณ เวลาต่างๆ กราฟลักษณะของความเค้นที่ใช้และความเครียดที่ได้แสดงในรูป 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

โดยทั่วไปผลการทดสอบแบบคืบกับวัสดุอาหาร สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองเชิงกลที่เรียกว่า 4-element Burger model ประกอบไปด้วยแบบจำลองสปริง 2 ตัว มีค่าความแข็ง (stiffness) เป็น E_1 และ E_2 และแบบจำลองแดชพอต (dashpot) 2 ตัว มีค่า viscous damping coefficient เป็น η_1 และ η_2 โดยลักษณะของแบบจำลองเชิงกลดังกล่าว แสดงไว้ในรูป 2.5

ผลการทดสอบแบบคืบกับแบบจำลองเชิงกลดังกล่าว สามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 2.19 (Mohsenin, 1989)

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} \cdot t + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{tE_1}{\eta_1}\right) \right) \quad (2.19)$$

โดยที่ $\epsilon(t)$ = ความเครียด ณ เวลาใดๆ

σ_0 = ความเค้นคงที่ (N/m^2)

E_1 = ค่า stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 1 (N/m)

E_2 = ค่า stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 2 (N/m)

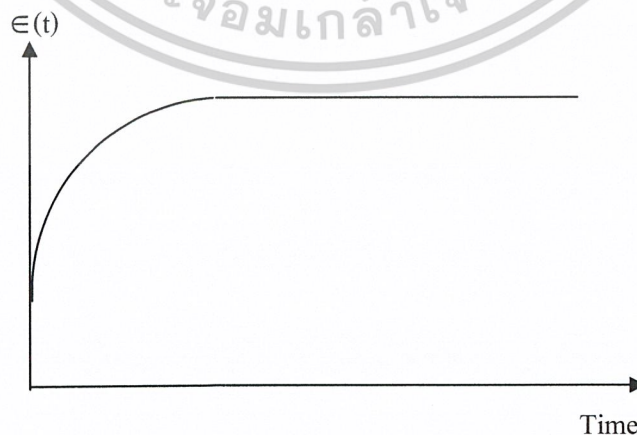
η_1 = ค่า viscous damping coefficient ของแบบจำลองแดชพอตตัวที่ 1 (N.s/m)

η_2 = ค่า viscous damping coefficient ของแบบจำลองแดชพอตตัวที่ 2 (N.s/m)

t = เวลา (s)

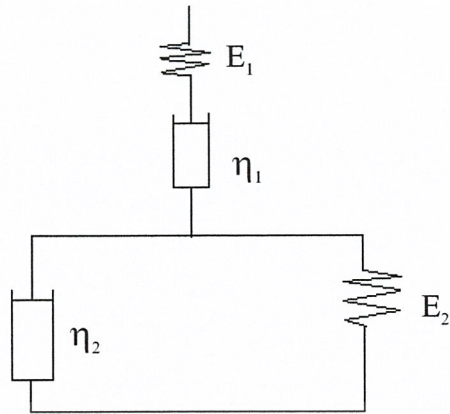


รูปที่ 2.3 ฟังก์ชันของความเค้นที่ใช้ทดสอบวัสดุแบบคืบ



รูปที่ 2.4 ฟังก์ชันของความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบคืบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แบบจำลองเชิงกลแบบ 4- element Burger model



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบชุดเครื่องมือและการทดลอง

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพของงานที่จำเป็นต่อการออกแบบ รวมถึงการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องอบ แล้วดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ จากนั้นก็ทำการทดลองอบกรอบงาด้วยเครื่องอบต้นแบบที่สร้างขึ้นแล้วเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆของผลิตภัณฑ์งาอบกรอบกับงาคั่วจากโรงงาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบชุดเครื่องมืออบกรอบงา

3.1.1 การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบ

ทำการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องจากบริษัท โปร-แคร์ จำกัด เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา และออกแบบ ได้แก่ ขั้นตอนการผลิต ความชื้นเริ่มต้นของงา อุณหภูมิ เวลาในการคั่ว รวมทั้งคุณลักษณะต่างๆ ของงาหลังการคั่วในกระทะซึ่งประกอบด้วย การพองตัว เนื้อสัมผัส ความชื้น ความหนาแน่น ความกรอบและกลิ่นรส

3.1.2 แนวทางการออกแบบเครื่องอบกรอบงาต้นแบบ

โรงงานนี้ได้เลือกใช้เทคนิคการให้ความร้อนแบบสเปาที่เตอบสำหรับการอบกรอบงา โดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับลมจากโบลอเออร์ (Blower) เพื่อไปถ่ายเทความร้อนให้แก่เมล็ดงาที่อยู่ในห้องอบ ควบคุมอุณหภูมิลมร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบเปิด-ปิด [on/off controller] ลมที่ผ่านออกมาจากห้องอบจะไหลผ่านไซโคลน เพื่อทำการแยกฝุ่นผงออกจากลม ซึ่งจะช่วยป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นผงในบริเวณที่เครื่องอบกรอบงาทำงาน นอกจากนี้หลังจากการแยกฝุ่นผงออกแล้ว ลมดังกล่าวยังสามารถเวียนกลับมาใช้ใหม่ในระบบได้อีกครั้งหากต้องการ เพราะเมื่อผ่านช่วงแรกของการอบกรอบน้ำจะถูกระเหยออกจากเมล็ดงาเกือบหมด ดังนั้นลมที่ออกจากห้องอบจึงยังคงมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงอยู่ซึ่งหากมีการเวียนกลับมาใช้ใหม่แล้ว น่าจะช่วยประหยัดพลังงานได้เป็นอย่างมาก

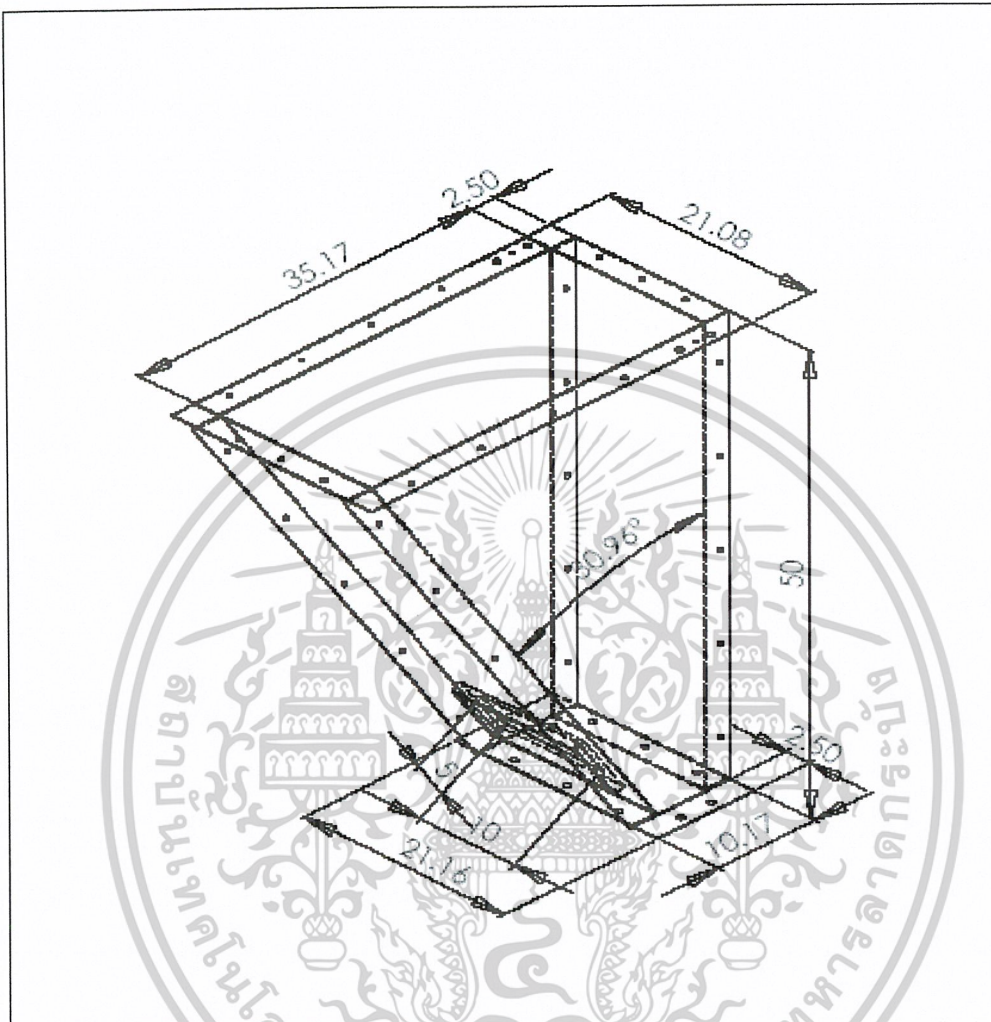
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การออกแบบ และสร้างเครื่องอบกรอบงาต้นแบบ

สำหรับเกณฑ์ในการออกแบบได้กำหนดให้เครื่องต้นแบบเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมขนาดย่อมหรือโรงงานขนาดเล็กที่มีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาได้ตามท้องตลาด หลักการไม่ยุ่งยากซับซ้อนใช้ผู้ควบคุมเพียง 1 คน และสามารถซ่อมแซมบำรุงรักษาได้ง่าย

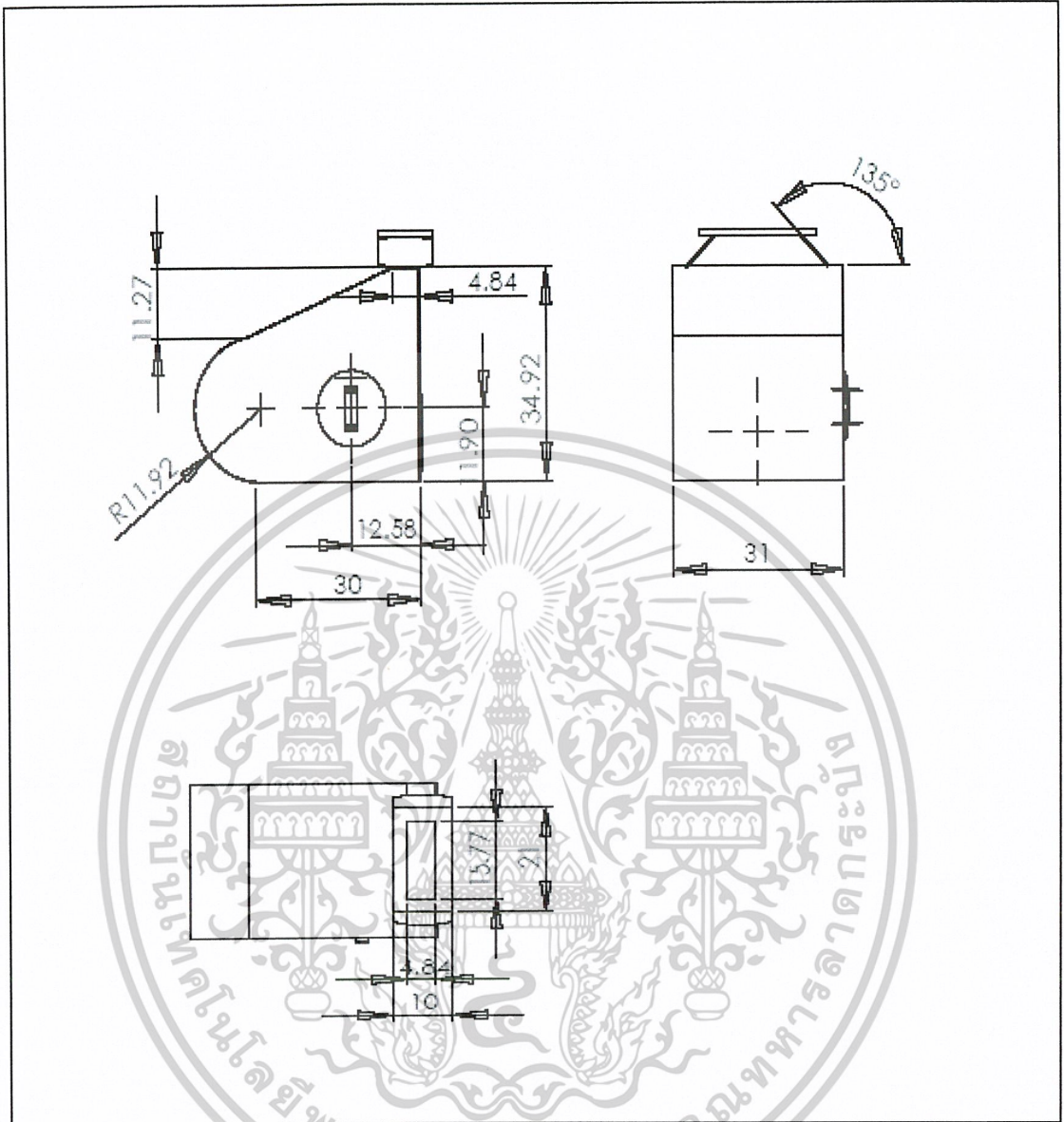
การออกแบบประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักๆ ที่สำคัญดังนี้

- 1) ห้องอบรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งถูกติดตั้งตะแกรงไว้ที่ส่วนฐานบริเวณลมร้อนเข้า และมีช่องกระจก 2 ช่อง สำหรับสังเกตลักษณะการไหลของเมล็ดงา (รูปที่ 3.1)
 - 2) ห้องส่งลมร้อน ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการไหลของลมร้อนจากฮีตเตอร์ให้พุ่งเข้าสู่ส่วนฐานของห้องอบผ่านตะแกรง ด้านข้างมีการเจาะรูสำหรับสอดเครื่องมือวัดความเร็วลมแบบปิดทิวปี (Pitot Tube) (รูปที่ 3.2)
 - 3) ช่องระบายอากาศหลังอบ ประตูช่องระบายงามีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถเลื่อน เปิด-ปิดช่องระบายได้ด้วยการหมุนแกนกลาง เนื่องจากความดันลมภายในห้องอบสูงกว่าบรรยากาศรอบนอก ประตูดังกล่าวจึงต้องออกแบบเป็นอย่างดีเพื่อป้องกันการรั่วไหลของลมร้อนจากห้องอบ โดยบริเวณขอบประตู และช่องระบายถูกออกแบบให้มีมุมเอียงประมาณ 45 องศา ทำให้สามารถปิดได้อย่างสนิทด้วยแรงกดในแนวตั้งฉากกับประตู บริเวณถัดจากขอบประตูถูกเจาะโดยรอบแล้ว ใส่แผ่นซีลีโคนทนความร้อนเพื่อป้องกันการรั่วไหลของลมร้อนอีกชั้นหนึ่ง (รูปที่ 3.3)
 - 4) ไซโคลนสำหรับแยกฝุ่นผงออกจากลมจากห้องอบ ในโครงการนี้เลือกใช้ไซโคลนแบบ Stairmand High Efficiency เนื่องจากคำนึงถึงประสิทธิภาพการแยกเป็นสำคัญ (รูปที่ 3.4)
- นอกจากนี้ระบบที่ออกแบบยังประกอบด้วยช่องบรรจุงาแบบประตู 2 ชั้นบริเวณส่วนบนห้องอบ ฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบขดลวดพันรอบแกนฉนวนขนาด 9 kW. ซึ่งบรรจุในท่อนำลมร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 cm. พร้อมด้วยมอเตอร์ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 2 HP. (380V) สำหรับชุดเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบและประกอบเข้าด้วยกันทั้งหมดแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ส่วนภาพถ่ายของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นแสดงไว้ในรูปที่ 3.6



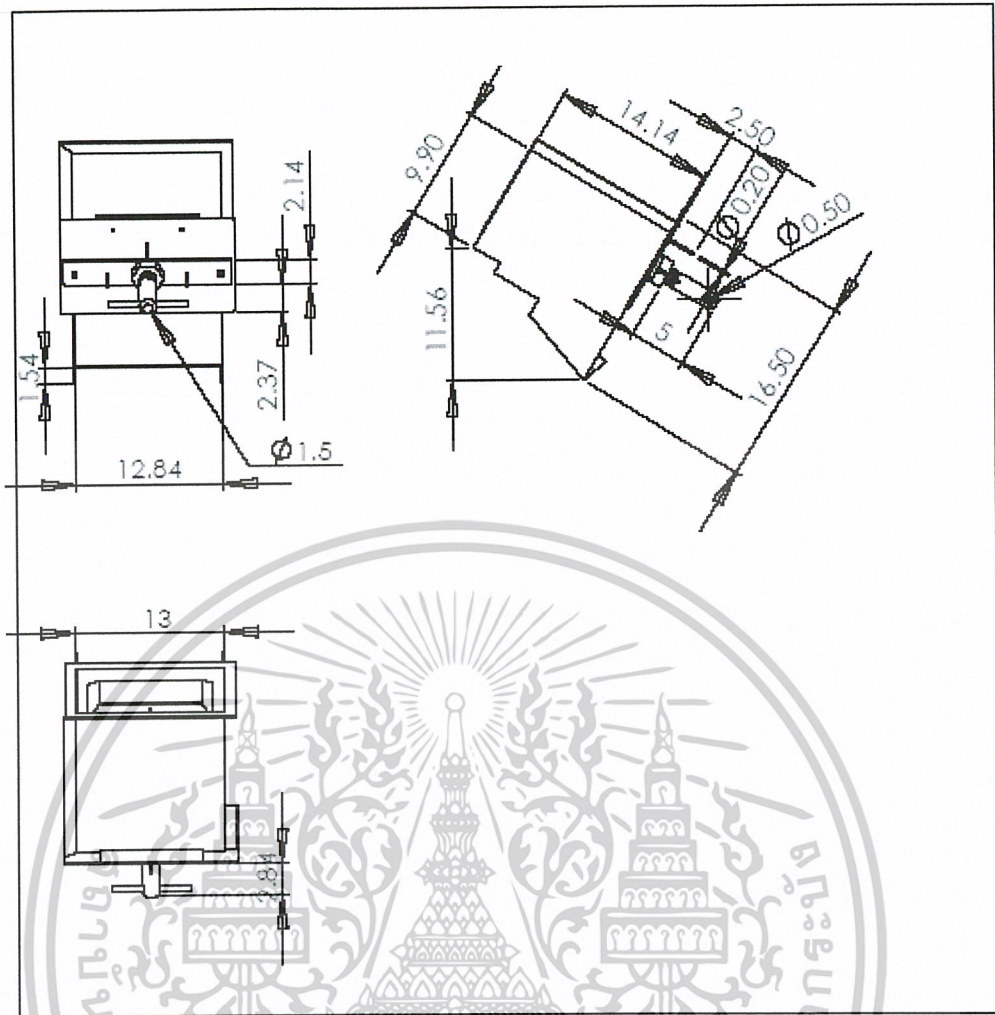
รูปที่ 3.1 ห้องอบรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



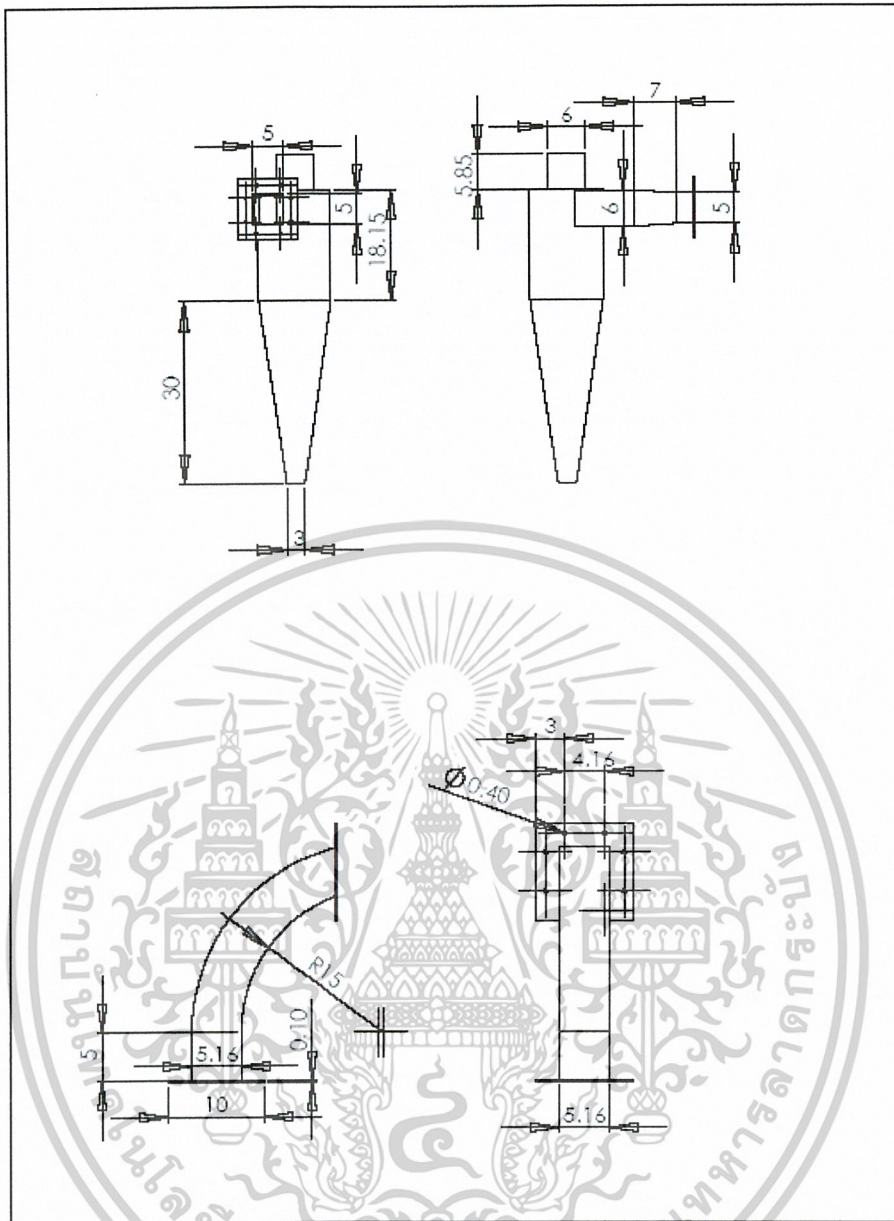
รูปที่ 3.2 ห้องส่งลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



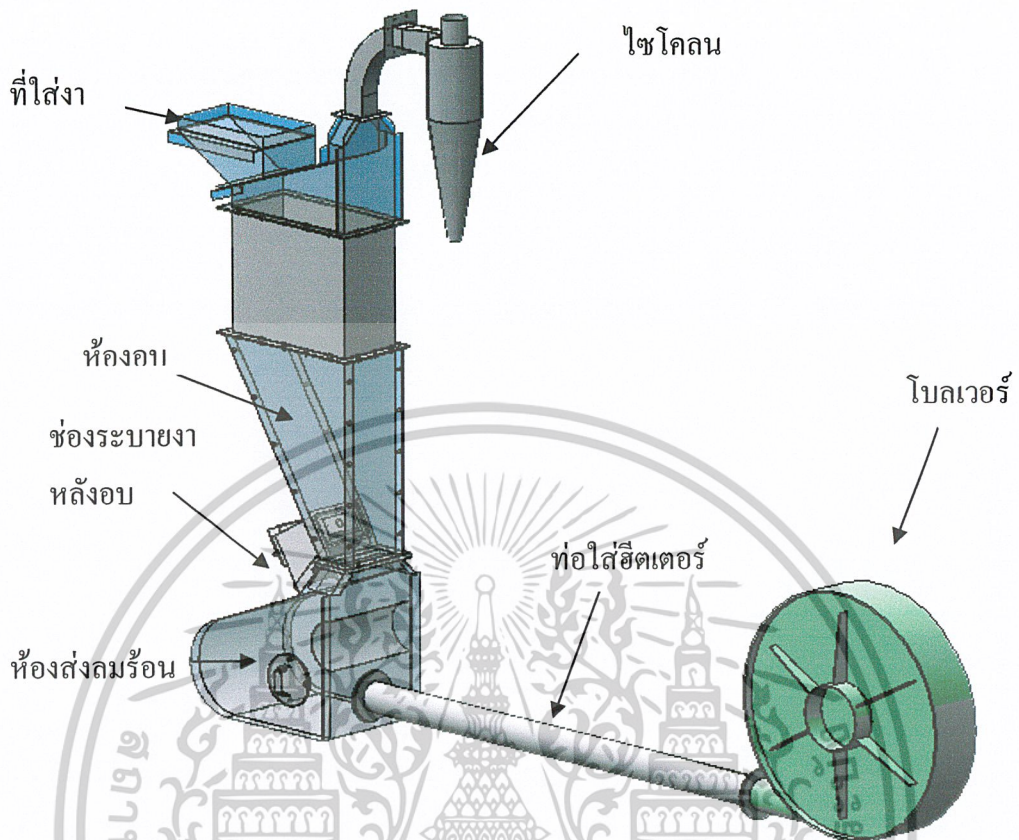
รูปที่ 3.3 ช่องระบายน้ำหลังอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



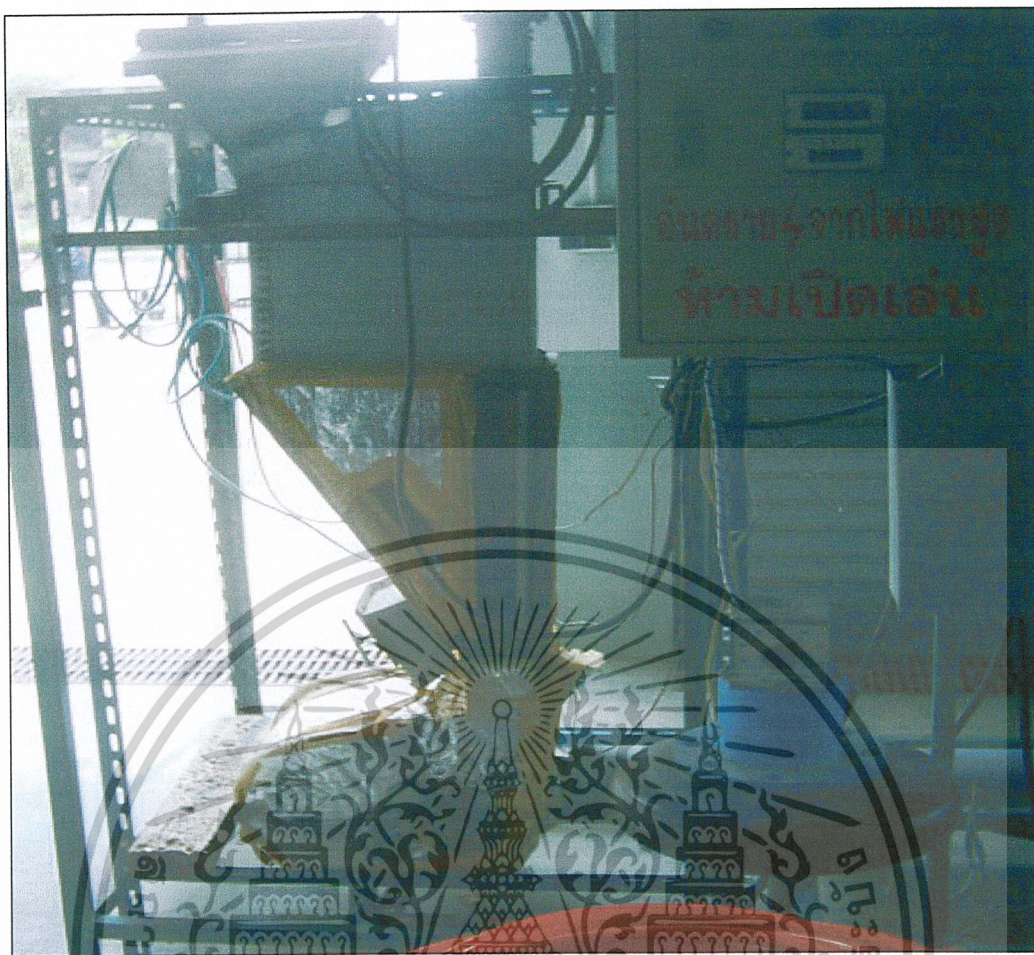
รูปที่ 3.4 ไซโคลนแบบ Stirmand High Efficiency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ชุดเครื่องมืออบกรอบงาที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ชุดเครื่องมืออบกรอบงาดำแบบ

3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

งาที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท โปรร-แคร์ จำกัด ซึ่งรับซื้อมาจากเกษตรกร โดยตรงจึงยังมีความสกปรกอยู่มาก ดังนั้นในเบื้องต้นจึงต้องทำการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ เช่น กรวด ทราย ดิน เศษกิ่งไม้ และใบไม้รวมทั้งเมล็ดงาดิบ โดยการร่อนในตะแกรง ร่วมกับการใช้ไซโคลนขนาดเล็ก จากนั้นสุ่มตัวอย่างงาเล็กน้อยเพื่อนำไปหาความชื้นเริ่มต้นตามวิธีของ AOAC ซึ่งพบว่าความชื้นเริ่มต้นของงาดิบมีค่าประมาณ 5% w.b. แล้วนำงาส่วนใหญ่ที่เหลือไปปรับความชื้นให้ได้เป็น 25%, 30% และ 35% w.b. แต่หลังจากที่ได้ทำการปรับระดับความชื้นเริ่มต้นทำให้ได้ผลของความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยที่ได้จริงสำหรับการทดลองประกอบไปด้วย 26%, 31% และ 34% w.b.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยนำเมล็ดงาที่จะปรับค่าความชื้นเริ่มต้นไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลยี่ห้อ Yamato รุ่น HB-120 (ค่าความละเอียด = 0.0001 g) นำมาที่ชั่งไว้แล้วตัวอย่างละ 300 g มาเติมน้ำกลั่นให้ได้ความชื้นที่ต้องการตามสมการ (3.1) คลุกเคล้าให้ทั่ว ต่อจากนั้นบรรจุในถุงพลาสติกโพลีเอททิลีน (P.E.) 2 ชั้นพร้อมทั้งไล่อากาศในถุงออก ปิดผนึกปากถุงด้วยเครื่องปิดผนึกถุง ยี่ห้อ DAKO รุ่น SK-210 แล้วนำไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 7 วัน โดยในช่วงของการเก็บจะนำงาแต่ละถุงออกมาคลุกเคล้ากันทุกวันเพื่อให้ความชื้นกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น (Robins and Fryer, 2003)

$$M_w = \frac{M_i (m_f - m_i)}{100 - m_f} \quad (3.1)$$

โดยที่ M_w = มวลน้ำกลั่นที่ใช้เติม (kg)
 M_i = มวลเริ่มต้นของงา (kg)
 m_f = ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ (%w.b.)
 m_i = ความชื้นเริ่มต้นของงา (%w.b.)

3.2.2 การออกแบบการทดลอง

เนื่องจากตัวอย่างงาดิบที่นำมาทดลองเป็นงาชุดเดียวกันจึงเลือกใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized Design, CRD) โดยมีปัจจัยการผลิตหลักที่จะทำการศึกษา 3 ปัจจัยๆ ละ 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิที่ระดับ 160 °C, 180 °C และ 220 °C ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดงาที่ระดับ 25%, 30% และ 35% w.b. และเวลาในการอบที่ 2, 3 และ 4 นาที จัดการทดลองแบบ Full Factorial ทำให้มีสถานะการทดลองทั้งหมด 27 สถานะการทดลอง ทำการทดลองอบสถานะละ 3 ซ้ำ รวมการทดลองทั้งหมด 81 การทดลอง

3.2.3 การทดลองอบกรอบงา

สุ่มตัวอย่างงาบรรจุที่ปรับความชื้นไว้แล้ว ตีรหัสกำกับที่ถุงโดยที่รหัสจะมีการระบุ ค่าความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิการอบ เวลาในการอบ และลำดับของซ้ำในการทดลอง แล้วทำการเดินเครื่องมอเตอร์ขับเคลื่อนโดยปรับความเร็วรอบจากอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ยี่ห้อ Sumitomo รุ่น NoAF 502 - 2A2 ตั้งค่าอุณหภูมิในเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบเปิด-ปิด (on/off) แล้วเปิดสวิตช์เพื่อให้ฮีตเตอร์ทำงาน ในระหว่างการเดินเครื่องจะตรวจสอบการทำงานของฮีตเตอร์เป็นระยะด้วย Clamp-on meter ยี่ห้อ Sunyo รุ่น AF-302 ก่อนการทดลองในแต่ละระดับอุณหภูมิจะปล่อยให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบทำงานเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของลมร้อนมีความเสถียร หลังจากนั้นเริ่มทำการทดลองตามลำดับดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 จนครบ 3 ซ้ำ โดยก่อนการทดลองอบแต่ละครั้งจะเก็บตัวอย่างงาประมาณ 10 g ต่อถุงเพื่อนำไปวิเคราะห์ว่าขึ้นเริ่มต้นที่แน่นอนอีกครั้ง หลังจากการอบจะปล่อยให้งาอบมีอุณหภูมิตกลงเป็นเวลาประมาณ 5 นาที แล้วบรรจุในถุงโพลีเอททิลีน (P.E.) 2 ชั้น ปิดผนึกด้วยเครื่องพร้อมติดรหัสกำกับ แล้วเก็บรวบรวมไว้เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป

3.2.4 การทดสอบคุณสมบัติของงาอบกรอบ

1) หาคความหนาแน่นรวม (Bulk Density; ρ_B)

ทำโดยเทเมล็ดงาที่อบกรอบแล้วในภาชนะบรรจุที่ทราบปริมาตร และน้ำหนักที่แน่นอนซึ่งทำการเทที่ระดับความสูง 15 cm. จนเต็มภาชนะบรรจุแล้วทำการเกลี่ยด้านบนของภาชนะบรรจุให้สม่ำเสมอให้นำไปชั่งน้ำหนัก (Lewis, 1992) โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง ในแต่ละความขึ้น แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณ ตามสมการนี้

$$\rho_B = \frac{\text{น้ำหนักเมล็ดงาในภาชนะบรรจุ (kg)}}{\text{ปริมาตรภาชนะบรรจุ (m}^3\text{)}} \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.1 การกำหนดรหัสสำหรับสภาวะการทดลอง

การทดลองที่	ปัจจัยหลักในการผลิต			รหัส
	อุณหภูมิ(°C)	ความชื้นหลังอบ(%w.b.)	เวลา(นาที)	
1	160	25	2	T ₁ M ₁ t ₁
2	160	25	3	T ₁ M ₁ t ₂
3	160	25	4	T ₁ M ₁ t ₃
4	160	30	2	T ₁ M ₂ t ₁
5	160	30	3	T ₁ M ₂ t ₂
6	160	30	4	T ₁ M ₂ t ₃
7	160	35	2	T ₁ M ₃ t ₁
8	160	35	3	T ₁ M ₃ t ₂
9	160	35	4	T ₁ M ₃ t ₃
10	185	25	2	T ₂ M ₁ t ₁
11	185	25	3	T ₂ M ₁ t ₂
12	185	25	4	T ₂ M ₁ t ₃
13	185	30	2	T ₂ M ₂ t ₁
14	185	30	3	T ₂ M ₂ t ₂
15	185	30	4	T ₂ M ₂ t ₃
16	185	35	2	T ₂ M ₃ t ₁
17	185	35	3	T ₂ M ₃ t ₂
18	185	35	4	T ₂ M ₃ t ₃
19	220	25	2	T ₃ M ₁ t ₁
20	220	25	3	T ₃ M ₁ t ₂
21	220	25	4	T ₃ M ₁ t ₃
22	220	30	2	T ₃ M ₂ t ₁
23	220	30	3	T ₃ M ₂ t ₂
24	220	30	4	T ₃ M ₂ t ₃
25	220	35	2	T ₃ M ₃ t ₁
26	220	35	3	T ₃ M ₃ t ₂
27	220	35	4	T ₃ M ₃ t ₃

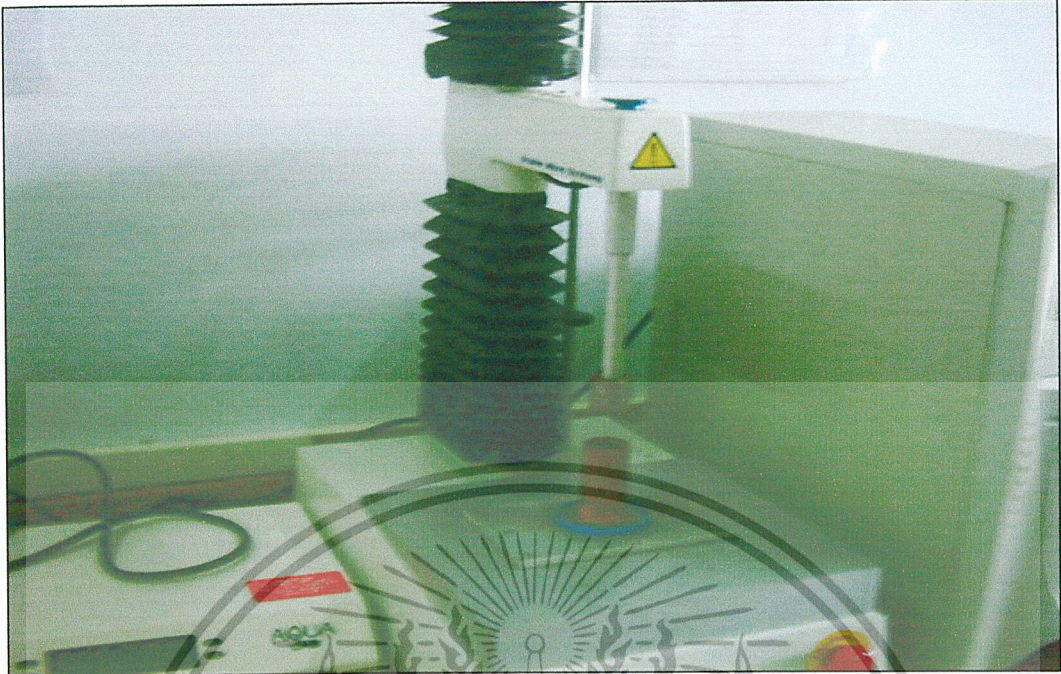
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

จากการทดลองเบื้องต้นโดยการนำที่ผ่านการอบกรอบแล้วมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสกับหัวกด 2 แบบ คือ แบบใบมีด และแบบทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าความกว้างของเมล็ดงา โดยใช้เพิ่มมาตัดแปลง พบว่าเส้นกราฟของผลลัพธ์จากการทดลองกดงาแต่ละเมล็ดจากสภาวะการอบเดียวกันมีความแปรปรวนอย่างมาก นอกจากนี้ยังไม่สามารถนำไปใช้แยกแยะระหว่างเมล็ดงาอบกรอบจากสภาวะการอบกรอบต่างๆได้ ด้วยเหตุนี้คณะผู้จัดทำโครงการจึงได้ทำการทดสอบเมล็ดงาอบกรอบในเชิงปริมาณมวล (Bulk Mass) โดยเลือกการทดสอบแบบคืบ (Creep Test) เพราะสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงรีโอโลยี (Rheology) จากผลลัพธ์ได้มากกว่าการทดสอบแบบกดแนวเดียว (Simple Axial Compression Test) และนอกจากนี้ยังพบว่าผลลัพธ์จากการทดสอบงาอบกรอบที่สภาวะเดียวกันใกล้เคียงกันมาก ในแต่ละซ้ำในการทดลองอีกทั้งผลลัพธ์ดังกล่าวก็มีความแตกต่างกันเมื่อทดสอบกับเมล็ดงาอบกรอบจากสภาวะการอบกรอบต่างกัน

สำหรับการทดสอบแบบคืบในโครงการนี้ใช้เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสแบบ Texture Analyzer รุ่น TA XT Plus (รูปที่ 3.7) ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยบรรจุตัวอย่างในทรงกระบอกปลายปิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm. สูง 6 cm. เนื่องจากระดับความหนาแน่นเมล็ดงาในทรงกระบอกอาจมีผลต่อการทดสอบ ดังนั้นผู้จัดทำโครงการจึงทำการตัดแปลงชุดอุปกรณ์สำหรับการบรรจุขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.8 เพื่อให้งาที่บรรจุแต่ละครั้งมีระดับการอัดตัวใกล้เคียงกันมากที่สุด นอกจากนี้ยังได้มีการจัดทำหัวกดทรงกระบอกขึ้นมาเป็นพิเศษ โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 2.34 cm. ซึ่งจะเห็นได้ว่าเล็กกว่าทรงกระบอกที่บรรจุตัวอย่างงาเล็กน้อยทั้งนี้เพื่อป้องกันการสัมผัสกันของหัวกดกับผิวในของทรงกระบอกซึ่งจะก่อให้เกิดแรงเสียดทานและส่งผลกับความถูกต้องของการทดสอบ

ในโปรแกรมการทดสอบมีการกำหนดความเร็วของหัวกดก่อนสัมผัสกับวัสดุ (Pre-Test Speed) เป็น 10 mm/s ใช้แรงกดคงที่ขนาด 200 N และคงไว้เป็นเวลา 60 s จากนั้นนำผลการทดสอบไปทำการวิเคราะห์หาค่าคงที่โดยใช้สมการ (2.19) เพื่อหาค่าคงที่ E_1 , E_2 , η_1 และ η_2 ต่อไป



รูปที่ 3.7 เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT Plus



รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์สำหรับการบรรจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การทดสอบคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส (Sensory Test)

ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ (Quantitative Descriptive Analysis, QDA) โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 15 คน ให้คะแนนตัวอย่างงาอบกรอบรวมทั้งตัวอย่างงาคั่วจากโรงงานโดยพิจารณา ระดับความกรอบ และความขมเป็นเกณฑ์ จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

3.3 การวิเคราะห์การทดลอง

ทำการวิเคราะห์ผลความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของค่าคุณลักษณะต่างๆ ของงาอบกรอบอันได้แก่ ความชื้นหลังอบ ปริมาณน้ำอิสระ ความหนาแน่นรวม และคุณสมบัติเชิงกล (E_1 , E_2 , η_1 และ η_2) หากพบว่าค่าคุณลักษณะใดๆ ของงาอบจาก 27 สภาวะการทดลองและงาคั่วจากโรงงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ก็ดำเนินการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยต่อไปด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากนั้นนำตัวอย่างงาอบจากสภาวะการทดลองที่ทำให้งาอบมีคุณลักษณะเหมือนหรือใกล้เคียงกับงาโรงงานมากที่สุด ไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสดังที่กล่าวไปแล้ว และนำผลจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พร้อมทั้งเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการทดลองและการวิเคราะห์คุณสมบัติของงาอบกรอบ จากการทดลองอบกรอบงาโดยเทคนิคสเปาท์เตดเบด ที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ระดับ คือ 160°C, 180°C และ 220°C ความชื้นเริ่มต้น 3 ระดับ 25%, 30% และ 35%w.b. โดยใช้เวลาอบกรอบที่ 2, 3 และ 4 นาที ที่ใช้ในการทดลองอบกรอบแต่ละครั้งจำนวน 0.3 kg ซึ่งมีความสูงเบตหนึ่งในห้องอบประมาณ 8 cm

4.1 อิทธิพลของปัจจัยการผลิตต่อคุณภาพของงาอบกรอบ

4.1.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

จากผลการทดลองอบกรอบงา ช่วงเวลา 2 - 4 นาที พบว่าความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ สำหรับทุกๆ ระดับอุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นในการอบกรอบ แต่อัตราการลดลงของความหนาแน่นรวมในช่วงเวลา 2 - 3 นาที จะมีค่ามากกว่าอัตราการลดลงในช่วงเวลา 3-4 นาที เล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าทุกๆ ระดับความชื้นเริ่มต้นหลังจากการอบกรอบเป็นเวลา 4 นาที ความหนาแน่นรวมจะมีค่าใกล้เคียงจนเกือบจะมีค่าเท่ากันที่ทุกระดับอุณหภูมิการอบกรอบ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าการใช้เวลาในการอบกรอบนานขึ้นทำให้น้ำในเมล็ดงาระเหยออกเกือบหมดจนทำให้มีส่งผลความหนาแน่นรวมของงาหลังอบกรอบมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นรวมของงาอบแสดงไว้ในที่รูป 4.1 (ก) - (ค)

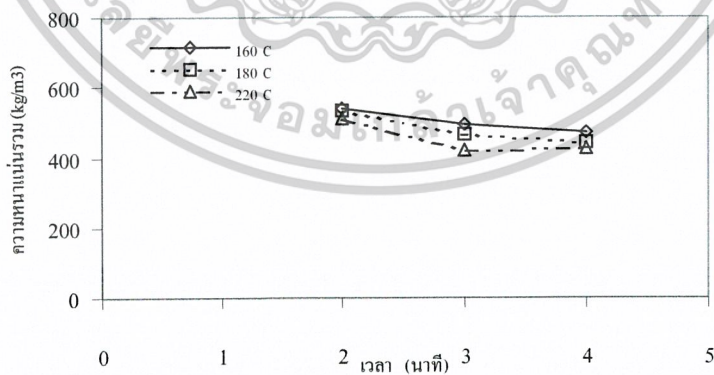
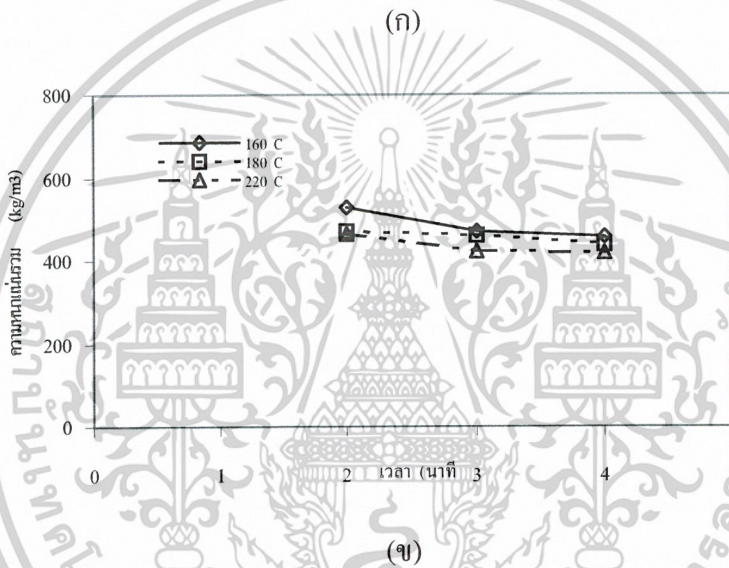
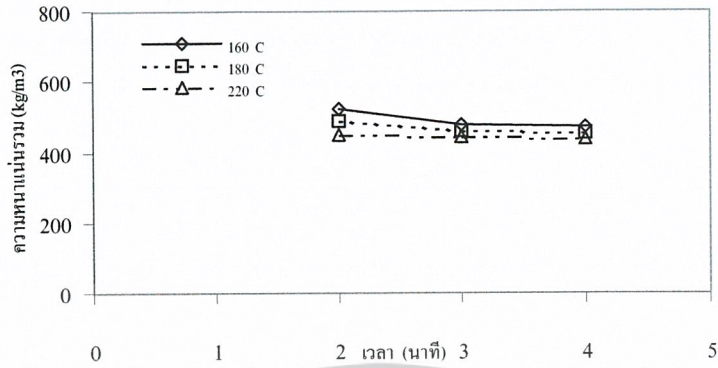
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นปัจจัยการผลิตหลักทั้งสาม ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิ, เวลา และความชื้นเริ่มต้น มีผลต่อความหนาแน่นรวมของงาอบกรอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อพิจารณาจากค่า F-ratios แล้วพบว่าเวลาในการอบกรอบเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุดรองลงมาคือ อุณหภูมิ และความชื้นเริ่มต้นตามลำดับผลของปัจจัยการผลิตต่อความหนาแน่นรวมของงา แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

จากตาราง 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการอบจะทำให้ความหนาแน่นรวมเฉลี่ยหลังการอบกรอบลดลง ส่วนผลของระดับความชื้นเริ่มต้นต่อความหนาแน่นรวมเฉลี่ยไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน นอกจากนี้ยังพบผลของปัจจัยร่วมระหว่างเวลา×ความชื้นเริ่มต้น และเวลา×ความชื้นเริ่มต้น×อุณหภูมิ

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของงาอบกรอบจากการทดลองทั้ง 27

สภาวะการทดลอง และของงาที่คว่ำจากโรงงานแล้วพบว่า มีสภาวะการทดลองทั้งหมด 14 สภาวะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ทำให้งาอบกรอบมีความหนาแน่นรวมไม่แตกต่างจากค่าดังกล่าวของงาจากโรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบกับความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของงา ความชื้นเริ่มต้น 25%(ก), 30%(ข) และ35%(ค) w.b. ที่ระดับอุณหภูมิการอบกรอบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลของปัจจัยต่างๆ ต่อความหนาแน่นรวมของงาอบ

ปัจจัยการผลิต	ระดับของปัจจัย	ความหนาแน่นรวมเฉลี่ย
เวลา (นาที)	2	499.69 ^a
	3	456.61 ^b
	4	446.28 ^b
อุณหภูมิ (°C)	160	491.05 ^a
	180	467.88 ^b
	220	443.64 ^c
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	25	466.08 ^b
	30	458.50 ^a
	35	477.99 ^c

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของงาอบจากการทดลองและจาก โรงงาน

ความชื้นเริ่มต้น (%w.b.)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิกวกรอบ (°C)		
		160	180	220
25	2	519.8667 ^{jk}	488.9867 ^{hi}	448.2667 ^{cdef}
	3	476.1267 ^{gh}	459.0067 ^{defg}	443.0500 ^{bcde}
	4	469.2767 ^{fgh}	452.3467 ^{def}	437.8500 ^{abcd}
30	2	528.2433 ^{jk}	468.9533 ^{fgh}	462.5600 ^{efg}
	3	469.1200 ^{fgh}	460.0133 ^{defg}	422.5333 ^{ab}
	4	457.9333 ^{defg}	437.4800 ^{abcd}	419.6733 ^a
35	2	536.2033 ^k	534.5200 ^k	509.6733 ^{ij}
	3	491.9500 ^{hi}	465.7500 ^{efg}	421.9000 ^{ab}
	4	470.8000 ^{fgh}	443.8967 ^{bcde}	427.2867 ^{abc}
คั่วจากโรงงาน		469.7533 ^{fgh}		

หมายเหตุ ค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

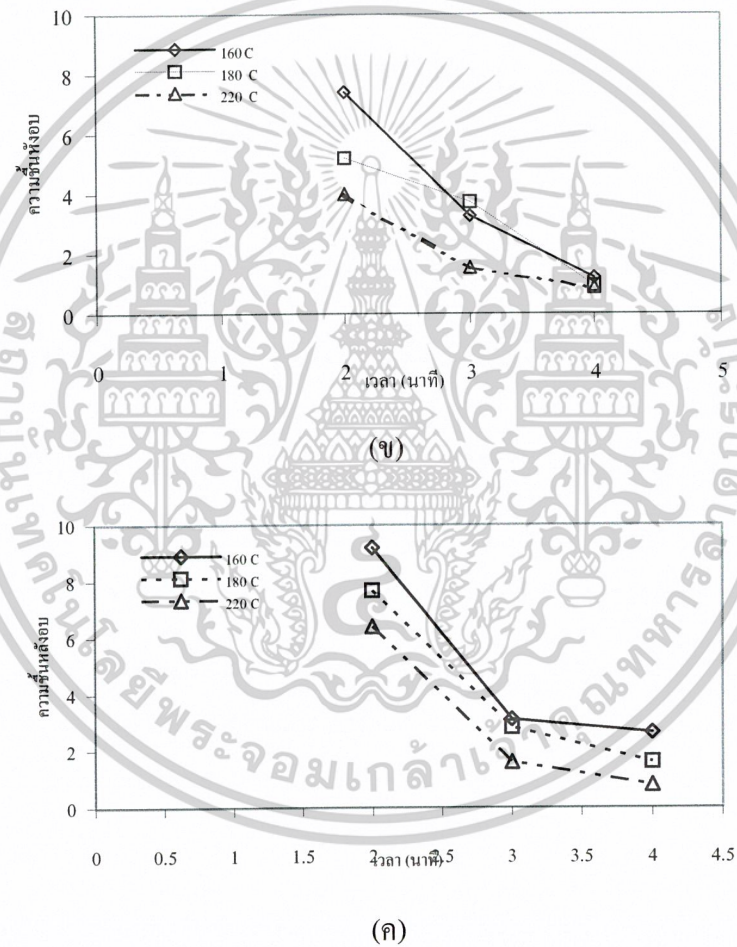
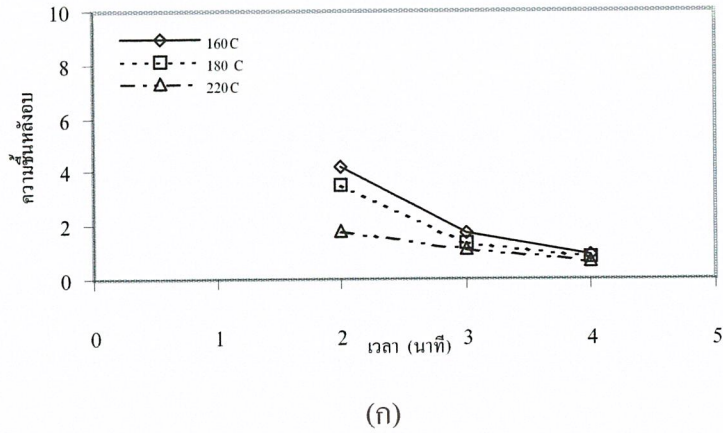
4.1.2 ความชื้นหลังอบ

จากรูป 4.2 (ก)-(ค) จะเห็นได้ว่าโดยทั่วไปความชื้นของเมล็ดงาจะลดลงก่อนค้างรวดเร็วในช่วงเวลาอบกรอบ 2-3 นาที โดยอัตราการลดลงจะเร็วขึ้นเมื่อความชื้นเริ่มต้นของงาสูงขึ้น หลังจากการอบผ่านไป 4 นาที จะเห็นได้ว่างาที่มีความชื้นเริ่มต้น 25% และ 30% จะมีความชื้นสุดท้ายใกล้เคียงกันมากในทุกๆ ระดับอุณหภูมิการอบ ซึ่งน่าจะเป็นเพราะว่าที่สภาวะดังกล่าวนี้ในเมล็ดงาเหลืออยู่น้อยมาก ประมาณ 1% ทำให้การระเหยเป็นไปได้อย่างยาก จนความชื้นที่ได้แทบจะไม่มี ความแตกต่างแม้ว่าระดับอุณหภูมิจะต่างกัน อย่างไรก็ตามงาที่มีความชื้นเริ่มต้น 35% จะมีความชื้นสุดท้ายแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อระดับอุณหภูมิในการอบต่างกัน โดยที่อุณหภูมิการอบ 160°C งาจะมีความชื้นเหลืออยู่มากที่สุดคือประมาณ 3%wb ลองลงมาคืองาที่อบด้วยอุณหภูมิ 180°C จะเหลือความชื้นประมาณ 2% wb ส่วนงาที่อบด้วยอุณหภูมิ 220°C ความชื้นสุดท้ายจะใกล้เคียงกับงาที่มีความชื้นเริ่มต้น 25%wb และ 35% wb นั่นคือเหลือประมาณ 1%wb

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยการผลิตหลักทั้งสาม ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิ, เวลา และความชื้นเริ่มต้น มีผลต่อความชื้นหลังอบของงาอบกรอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อพิจารณาจากค่า F-ratios แล้วพบว่าเวลาในการอบกรอบเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุด รองลงมาคือ ความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิตามลำดับ รายละเอียดที่แสดงให้เห็นถึงผลของปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวได้แสดงดังตารางที่ 4.3

จากตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการอบจะทำให้ความชื้นหลังการอบกรอบลดลง ส่วนความชื้นหลังการอบจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบผลของปัจจัยร่วมระหว่าง อุณหภูมิ \times เวลา, อุณหภูมิ \times ความชื้นเริ่มต้น, เวลา \times ความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิ \times เวลา \times ความชื้นเริ่มต้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความชื้นหลังของงาอบกรอบจากการทดลองทั้ง 27 สภาวะการทดลอง และงาที่คั่วจากโรงงานแล้วพบว่ามี 6 สภาวะการทดลองที่ทำให้งาอบกรอบมีความชื้นหลังการอบไม่แตกต่างจากค่าที่วัดได้จากงาคั่วของโรงงาน ผลการเปรียบเทียบ แสดงไว้ในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบ กับความชื้นหลังอบที่ความชื้นเริ่มต้น 25% (ก), 30%(ข) และ 35% (ค) w.b. ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความชื้นหลังอบกรอบ

ปัจจัยการผลิต	ระดับของปัจจัย	ความชื้นหลังอบ (%wb)
เวลา (นาที)	2	5.48 ^a
	3	2.25 ^b
	4	1.16 ^c
อุณหภูมิ (°C)	160	3.74 ^a
	180	3.07 ^b
	220	2.08 ^c
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	25	1.79 ^a
	30	3.12 ^b
	35	3.98 ^c

หมายเหตุ ค่าความชื้นหลังอบเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรเดียวกันในแต่ละปัจจัยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.4 ค่าความชื้นหลังอบเฉลี่ยของงาอบจากการทดลองและจากโรงงาน

ความชื้นเริ่มต้น (%w.b.)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิการอบกรอบ (°C)		
		160	180	220
25	2	4.1881 ⁿ	3.5145 ^{kl}	1.7852 ^g
	3	1.7244 ^{fg}	1.3712 ^{def}	1.1497 ^{bcd}
	4	0.8777 ^{abc}	0.8479 ^{ab}	0.6775 ^a
30	2	7.4125 ^q	5.1973 ^o	3.9743 ^{mn}
	3	3.2911 ^{jk}	3.7035 ^{lm}	1.5480 ^{efg}
	4	1.2269 ^{cdc}	0.9473 ^{abc}	0.8427 ^{ab}
35	2	9.1942 ^r	7.6734 ^q	6.3934 ^p
	3	3.1098 ^{ij}	2.8281 ^{hi}	1.5987 ^{fg}
	4	2.6475 ^h	1.6158 ^{fg}	0.7959 ^{ab}
ค่าจากโรงงาน		1.6930 ^{fg}		

หมายเหตุ ค่าความชื้นหลังอบเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรเดียวกันในแต่ละปัจจัยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

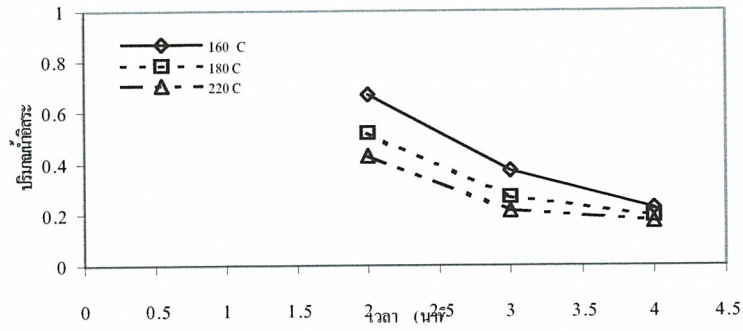
4.1.3 ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)

จากรูปที่ 4.3 (ก)-(ค) จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำอิสระมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นโดยอัตราการลดลงของปริมาณดังกล่าวในช่วงของการอบ 2-3 นาที จะมากกว่าอัตราการลดลงในช่วงการอบ 3-4 นาที เพียงเล็กน้อย งานที่มีความชื้นเริ่มต้น 25% w.b. หลังจากอบเป็นเวลา 4 นาที ด้วยอุณหภูมิต่างกันจะมีปริมาณน้ำอิสระใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.2 แต่งานที่ความชื้นเริ่มต้น 30% w.b. และ 35%w.b. ปริมาณน้ำอิสระที่เหลืออยู่จะแตกต่างกันตามระดับอุณหภูมิในการอบ

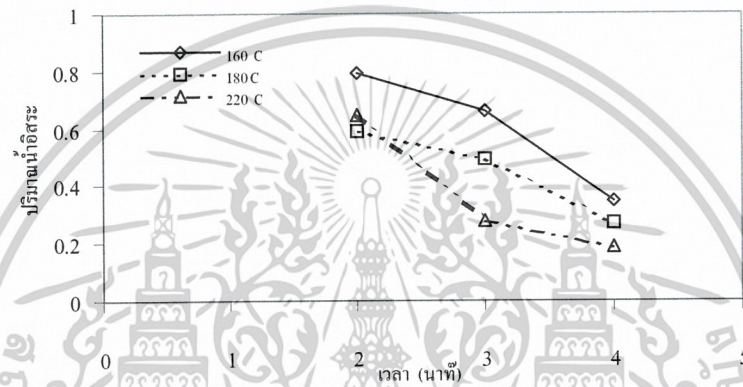
จากการวิเคราะห์สถิติพบว่าปัจจัยการผลิตหลักทั้งสามปัจจัย ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิ เวลา และความชื้นเริ่มต้นมีผลต่อค่า a_w ของงาอบกรอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อพิจารณาจากค่า F-ratios แล้วพบว่าเวลาในการอบกรอบเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุดรองลงมาคือความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบกรอบตามลำดับ ที่ผลของปัจจัยต่างๆดังกล่าวได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

จากตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการอบจะทำค่าปริมาณน้ำอิสระหลังการอบกรอบลดลง แต่ปริมาณน้ำอิสระไม่เพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นเริ่มต้นของงานนอกจากนี้ยังพบผลของปัจจัยร่วมระหว่าง อุณหภูมิ×เวลา, อุณหภูมิ×ความชื้นเริ่มต้น, เวลา×ความชื้นเริ่มต้น และ อุณหภูมิ× เวลา×ความชื้นเริ่มต้น

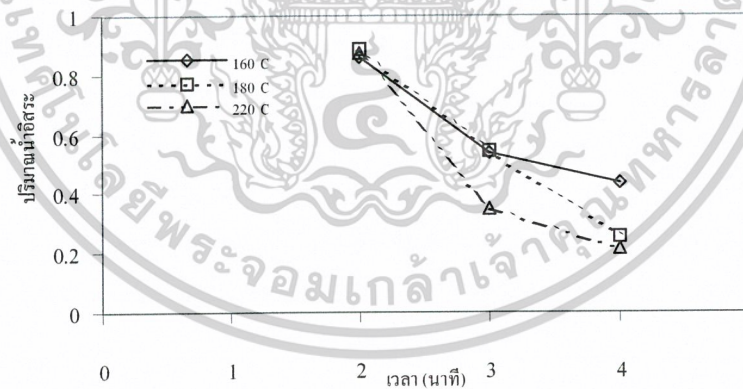
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณน้ำอิสระของงาอบกรอบจากการทดลองทั้ง 27 สภาวะการทดลอง และของงานที่คั่วจากโรงงานแล้วพบว่ามีสภาวะการทดลองทั้งหมด 5 สภาวะการทดลองที่ทำให้งาอบกรอบมี ปริมาณน้ำอิสระหลังการอบไม่แตกต่างจากค่าดังกล่าวของงานจากโรงงาน ดังแสดงในตาราง ที่ 4.6



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบกับปริมาณน้ำอิสระ ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25%,(ก) 30 %(ข) และ 35 % (ค) w.b. ที่ระดับอุณหภูมิการอบกรอบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่า a_w หลังอบกรอบ

ปัจจัยการผลิต	ระดับของปัจจัย	ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)
เวลา (นาที)	2	0.69 ^a
	3	0.41 ^b
	4	0.25 ^c
อุณหภูมิ (°C)	160	0.54 ^a
	185	0.45 ^b
	220	0.37 ^c
ความชื้นเริ่มต้น (%w.b.)	25	0.34 ^a
	30	0.47 ^b
	35	0.55 ^c

ตารางที่ 4.6 ค่าปริมาณน้ำอิสระเฉลี่ยของงาอบจากการทดลองและจากโรงงาน

ความชื้นเริ่มต้น (%w.b.)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิการอบกรอบ (°C)		
		160	180	220
25	2	0.67100 ⁱ	0.52033 ^{ij}	0.42900 ^h
	3	0.42900 ^h	0.26933 ^{dc}	0.21500 ^{abc}
	4	0.22700 ^{bcd}	0.19233 ^{ab}	0.17167 ^a
30	2	0.7167 ^m	0.5267 ^k	0.64533 ^l
	3	0.66267 ^l	0.48967 ⁱ	0.28033 ^c
	4	0.34533 ^{fg}	0.27167 ^{dc}	0.18633 ^{ab}
35	2	0.85700 ^h	0.88633 ⁿ	0.87433 ⁿ
	3	0.54000 ^j	0.54400 ^j	0.34933 ^g
	4	0.43567 ^h	0.25300 ^{cde}	0.21367 ^{abc}
คั่วจากโรงงาน		0.30167 ^{cf}		

หมายเหตุ ค่าปริมาณน้ำอิสระหลังอบเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรเดียวกันในแต่ละปัจจัยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4. คุณสมบัติเชิงกลของงาอบ

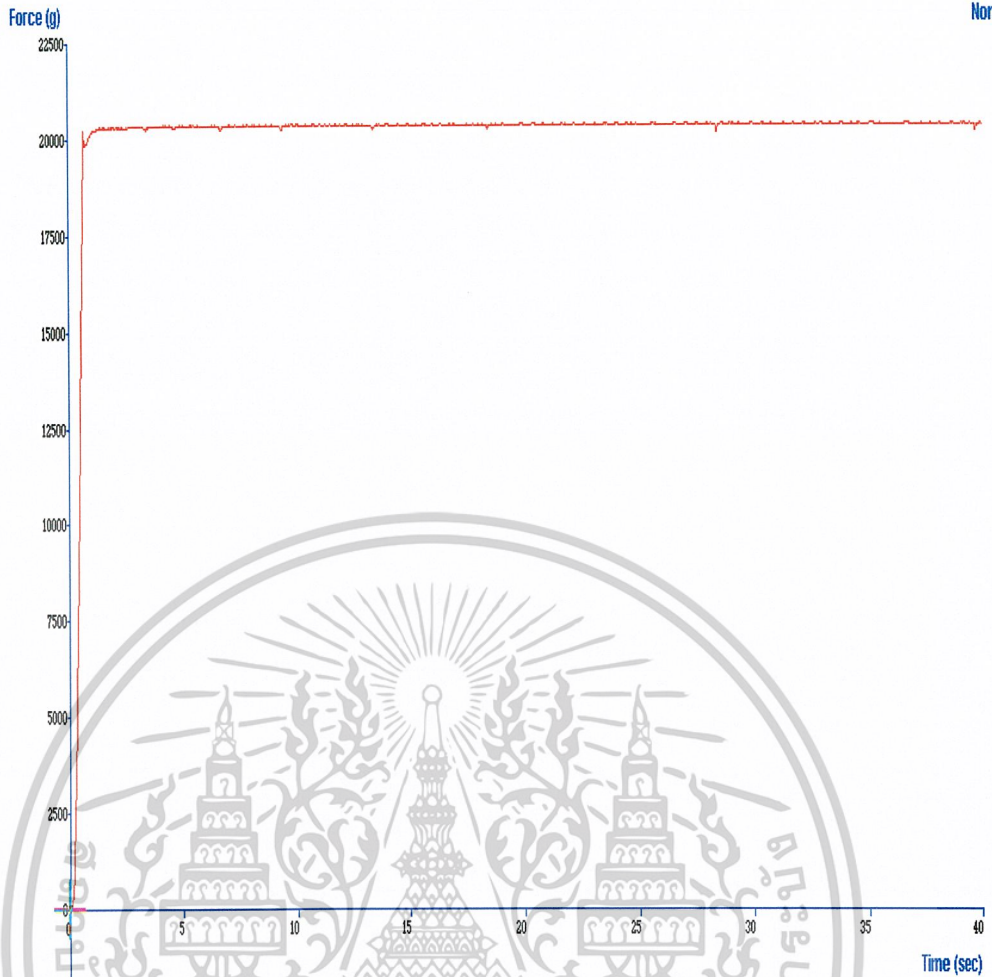
การทดสอบแบบคืบในการทดลองนี้กำหนดแรงที่ใช้เป็น 200 N คงที่ ความเร็ว 60 มิลลิเมตรต่อวินาที รูปที่ (4.4) จะเห็นได้ว่าเครื่องมือทดสอบสามารถควบคุมแรงกดได้เป็นอย่างดี โดยหลังจากที่แรงกดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าที่กำหนดแล้วแรงจะค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการกด

4.1.4.1 ค่า Stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 1 (E_1)

จากการทดลองรอบรอบงาที่สภาวะต่างๆ จะเห็นว่าค่า E_1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา การอบ 2-3 นาที สำหรับทุกๆสภาวะการทดลอง ในช่วงการอบ 3-4 นาที การเปลี่ยนแปลงของค่าดังกล่าวมีแนวโน้มไม่ชัดเจน ส่วนที่ระดับความชื้น 35%มาตรฐานเปียก ในช่วงเวลา 3-4 นาที สำหรับทุกระดับอุณหภูมิค่า E_1 จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงของค่า E_1 แสดงดังรูปที่ 4.6

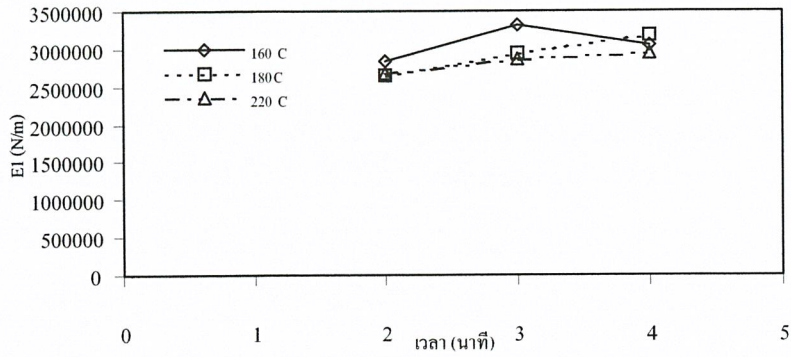
จากการวิเคราะห์ผลของปัจจัยการผลิตหลักพบว่า มีเพียงเวลาและความชื้นเริ่มต้นเท่านั้นที่มีผลต่อ ค่า E_1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่า F-ratios ที่คำนวณได้แสดงให้เห็นว่าเวลาในการอบรอบมีอิทธิพลมากกว่าความชื้นเริ่มต้น ผลของปัจจัยการผลิตทั้งสองแสดงในตาราง 4.7

จากตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการอบจะทำค่าคงที่ E_1 ของงาหลังการอบรอบเพิ่มขึ้น แต่ค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงที่ความชื้นของงาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบผลของปัจจัยร่วมระหว่าง อุณหภูมิ×เวลา, อุณหภูมิ×ความชื้นเริ่มต้น, เวลา×ความชื้นเริ่มต้น และ อุณหภูมิ×เวลา×ความชื้นเริ่มต้นเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ E_1 ของงาอบรอบจากการทดลองทั้ง 27 สภาวะการทดลอง และของงาที่คั่วจากโรงงานแล้วพบว่า มีสภาวะการทดลองทั้งหมด 3 สภาวะการทดลองที่ทำให้งาอบรอบมีค่า E_1 หลังการอบไม่แตกต่างจากค่าดังกล่าวของงาจากโรงงาน แสดงดังตารางที่ 4.8

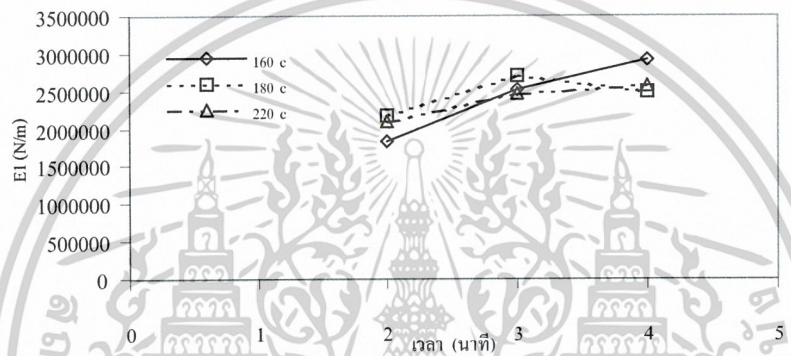


รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันของแรงที่ใช้ในการทดสอบแบบคืบ

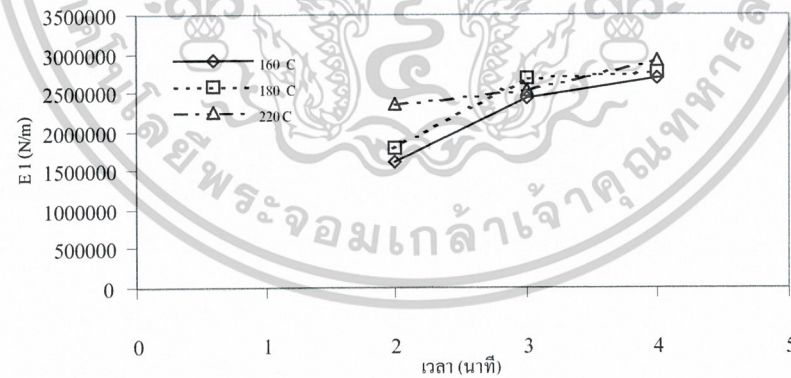
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบกรอบค่า E_1 ของงา ที่ความชื้น 25% (ก), 30% (ข) และ 35% (ค) w.b. ตามลำดับ ที่ระดับอุณหภูมิในการอบกรอบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลของปัจจัยการผลิตหลักที่มีผลต่อค่าคงที่ E_1 ของงาหลังอบกรอบ

ปัจจัยการผลิต	ระดับของปัจจัย	ค่าคงที่ E_1 (N/m)
	2	2223676 ^a
เวลา	3	2713921 ^b
(นาที)	4	2833710 ^c
ความชื้นเริ่มต้น	25	2936036 ^c
(%wb)	30	2417521 ^a
	35	2417748 ^b

หมายเหตุ ค่าคงที่ E_1 หลังอบเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรเดียวกันในแต่ละปัจจัย ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ E_1 เฉลี่ยของงาอบจากการทดลองและจากโรงงาน

ความชื้นเริ่มต้น (%w.b.)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิการอบกรอบ (°C)		
		160	185	220
25	2	2832644.0 ^{ghijk}	2647062.8 ^{efghi}	2672870.0 ^{efghij}
	3	3304355.8 ^l	2940245.7 ^{ijk}	2871399.3 ^{hijk}
	4	3038352.4 ^{ijkl}	3183227.0 ^{kl}	2934166.7 ^{ijk}
	2	1820147.7 ^{ab}	2179169.3 ^{cd}	2103483.7 ^{bc}
30	3	2515774.6 ^{deh}	2694199.3 ^{efghij}	2465394.0 ^{cdefg}
	4	2911485.4 ^{ijk}	2499857.9 ^{defgh}	2568180.0 ^{efghi}
	2	1619906.7 ^a	1789724.6 ^{ab}	2348071.0 ^{cde}
	3	2435935.0 ^{cdef}	2677542.7 ^{efghij}	2520438.0 ^{defgh}
35	4	2683697.0 ^{efghij}	2761848.1 ^{fghij}	2922572.0 ^{ijk}
	คั่วจาก โรงงาน		3384206.4 ^l	

หมายเหตุ ค่าคงที่ E_1 หลังอบเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรเดียวกันในแต่ละปัจจัย ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

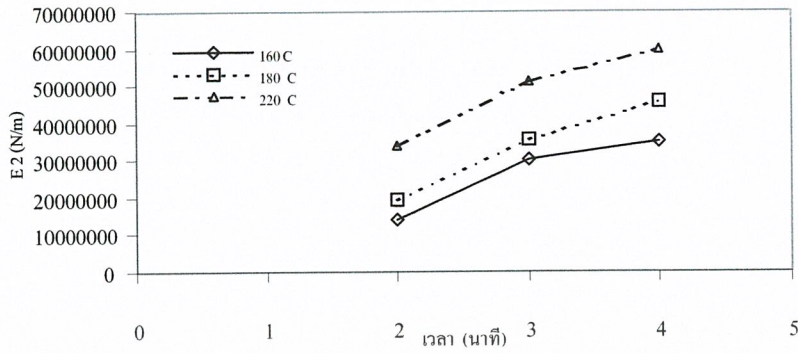
4.1.4.2 ค่า Stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 2 (E_2)

จากผลการทดลองในรูป 4.7(ก)-(ค) จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาการอบเพิ่มขึ้นค่า E_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สำหรับทุกๆระดับอุณหภูมิและทุกระดับความชื้นเริ่มต้นซึ่งรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงของค่า E_2 ในแต่ละสภาวะการทดลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.6

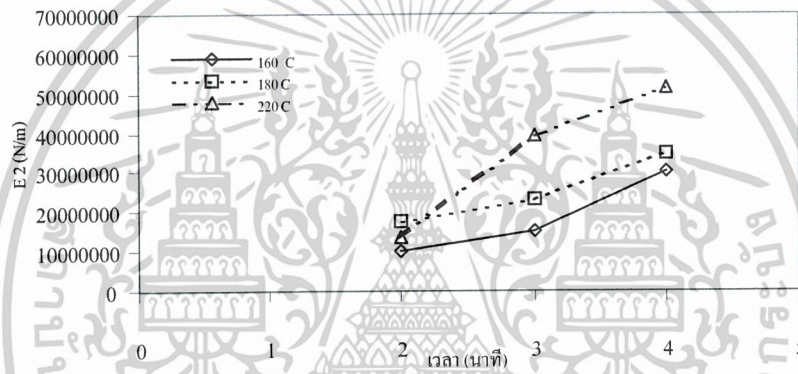
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยหลักในการผลิตหลักทั้งสามปัจจัย ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิ เวลา และความชื้นเริ่มต้น พบว่าทั้งสามปัจจัยมีผลต่อค่า E_2 ของงาอบกรอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาจากค่า F-ratios แล้วพบว่าเวลาในการอบกรอบเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ และความชื้นเริ่มต้นตามลำดับ

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการอบจะทำให้ได้ค่าคงที่ E_2 หลังการอบกรอบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ทำการเพิ่มความชื้นเริ่มต้นจะทำให้ค่า E_2 ลดลงเมื่อพิจารณาจากค่า F-ratios แล้วพบว่าเวลาในการอบกรอบเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ และความชื้นเริ่มต้นตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบผลของปัจจัยร่วมระหว่าง อุณหภูมิ \times เวลา และอุณหภูมิ \times ความชื้นเริ่มต้น

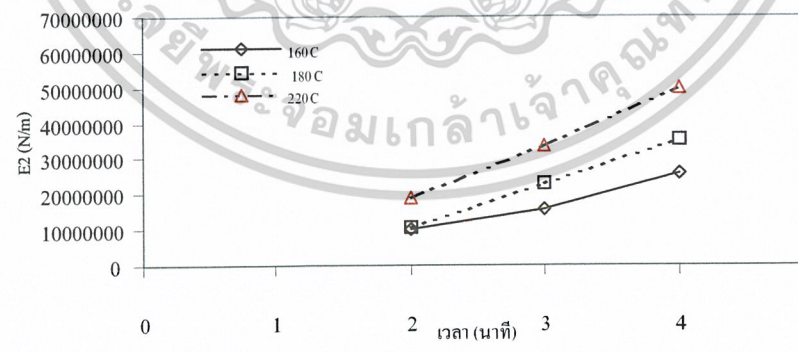
เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ E_2 ของงาอบกรอบจากการทดลองทั้ง 27 สภาวะการทดลอง และงาคั่วจากโรงงานแล้วพบว่ามีสภาวะการทดลองทั้งหมด 10 สภาวะการทดลองที่ทำให้งาอบกรอบมีค่าคงที่ E_2 หลังการอบกรอบที่ไม่แตกต่างจากค่าดังกล่าวของงาคั่วจากโรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.10



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบค่า E_2 กับที่ความชื้นเริ่มต้น 25%(ก), 30%(ข) และ 35% (ค) w.b. ตามลำดับที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลของปัจจัยการผลิตหลักที่มีผลต่อค่า E_2 ของงาหลังอบกรอบ

ปัจจัยการผลิต	ระดับของปัจจัย	ค่าคงที่ E_2 (N/m)
เวลา (นาที)	2	14135604 ^a
	3	26675926 ^b
	4	40861817 ^c
อุณหภูมิ(°C)	160	20705954 ^a
	185	24806807 ^b
	220	36160585 ^c
ความชื้นเริ่มต้น (%w.b.)	25	34403349 ^a
	30	25556533 ^b
	35	21713465 ^c

หมายเหตุ ค่าคงที่ E_2 หลังอบเฉลี่ยในแต่ละปัจจัยที่กำกับด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่ E_2 เฉลี่ยของงาอบจากการทดลองและจากโรงงาน

ความชื้นเริ่มต้น (% w.b.)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิการอบกรอบ (°C)		
		160	185	220
25	2	14117867 ^{abcd}	13491400 ^{abcd}	33684959 ^{fgh}
	3	30234140 ^{cfg}	26511151 ^{defg}	50965086 ^{ij}
	4	35035202 ^{fgh}	45785054 ^{hi}	59805282 ^j
30	2	9915725.0 ^{abc}	17571231 ^{abcde}	8908682.0 ^{ab}
	3	15271884 ^{abcd}	23180393 ^{cdef}	39057988 ^{ghi}
	4	29993514 ^{cfg}	34577381 ^{fgh}	51532001 ^{ij}
35	2	10259655 ^{abc}	10578537 ^{abc}	8692382.9 ^a
	3	15682124 ^{abcd}	16228408 ^{abcd}	22952157 ^{bcd}
	4	25843476 ^{defg}	35337709 ^{fgh}	49846732 ^{ij}
คั่วจาก โรงงาน			46777957 ^{hij}	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

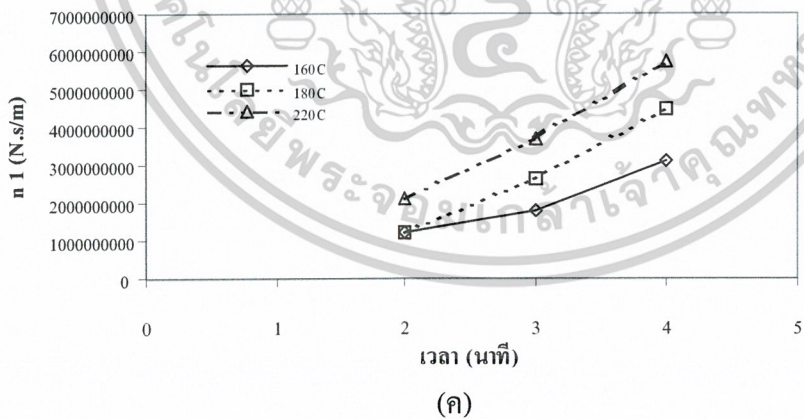
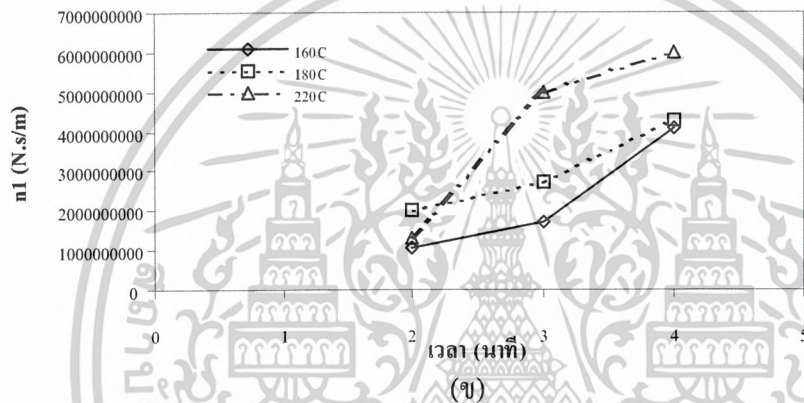
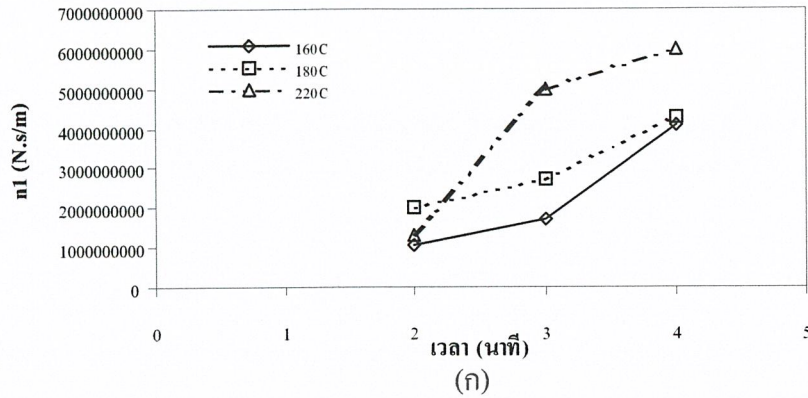
4.1.4.3 ค่า Viscous Damping Coefficient ของแบบจำลองแดชพอดตัวที่ 1 (η_1)

จากการทดลองในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการอบมากขึ้นค่า η_1 ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสำหรับทุกๆ ระดับอุณหภูมิ และความชื้นเริ่มต้น

วิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยหลักในการผลิตหลักทั้งสามปัจจัย มีผลต่อค่าคงที่ η_1 ของงาอบกรอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) พิจารณาจากค่า F-ratios แล้วพบว่าเวลาในการอบกรอบเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ และความชื้นเริ่มต้นตามลำดับ รายละเอียดที่แสดงให้เห็นถึงผลของปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการอบจะทำให้ได้ค่าคงที่ η_1 หลังการอบกรอบเพิ่มขึ้น ส่วนผลของระดับความชื้นเริ่มต้นต่อค่าคงที่ η_1 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ η_1 มีค่าลดลงเมื่อระดับความชื้นเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นนอกจากนี้ยังพบผลของปัจจัยร่วมระหว่าง เวลา \times ความชื้นเริ่มต้น , อุณหภูมิ \times เวลา \times ความชื้นเริ่มต้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ η_1 ของงาอบกรอบจากการทดลองทั้ง 27 สภาวะการทดลอง และของงาที่คั่วจากโรงงานแล้วพบว่ามีสภาวะการทดลองทั้งหมด 12 สภาวะการทดลองที่ทำให้งาอบกรอบมีค่าคงที่ η_1 หลังการอบไม่แตกต่างจากค่าของงาจากโรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์เวลาในการอบกรอบกับระหว่างค่า η_1 ของงา ความชื้นเริ่มต้น 25%(ก), 30 % (ข) และ 35% (ค) w.b. ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่าคงที่ η_1 หลังอบกรอบ

ปัจจัยการผลิต	ระดับของปัจจัย	ค่าคงที่ η_1 (N.s/m)
เวลา (นาทีก)	2	1.83E+09 ^a
	3	3.50E+09 ^b
	4	4.82E+09 ^c
อุณหภูมิ (°C)	160	2.53E+09 ^a
	185	3.27E+09 ^b
	220	4.34E+09 ^c
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	25	4.20E+09 ^a
	30	3.07E+09 ^b
	35	2.88E+09 ^c

หมายเหตุ ค่าคงที่ η_1 หลังอบเฉลี่ยในแต่ละปัจจัยที่กำกับด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่ η_1 เฉลี่ยของงาอบจากการทดลองและจากโรงงาน

ความชื้นเริ่มต้น (% wb)	เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิการอบกรอบ (°C)		
		160	180	220
25	2	1.49E+09 ^{abc}	2.05E+09 ^{abcd}	3.95E+09 ^{fgh}
	3	4.03E+09 ^{ghi}	4.55E+09 ^{hijk}	5.94E+09 ^l
	4	4.85E+09 ^{ijkl}	5.58E+09 ^{ijkl}	5.36E+09 ^{ijkl}
30	2	1.06E+09 ^a	2.00E+09 ^{abcd}	1.33E+09 ^{ab}
	3	1.19E+09 ^a	2.71E+09 ^{cdef}	4.98E+09 ^{hijkl}
	4	4.06E+09 ^{ghi}	4.26E+09 ^{ghij}	6.00E+09 ^l
35	2	1.23E+09 ^a	1.23E+09 ^a	2.08E+09 ^{abcd}
	3	1.80E+09 ^{abcd}	2.62E+09 ^{bcd}	3.71E+09 ^{efgh}
	4	3.08E+09 ^{defg}	4.45E+09 ^{hijk}	5.72E+09 ^{kl}
คั่วจากโรงงาน		5.35E+09 ^{ijkl}		

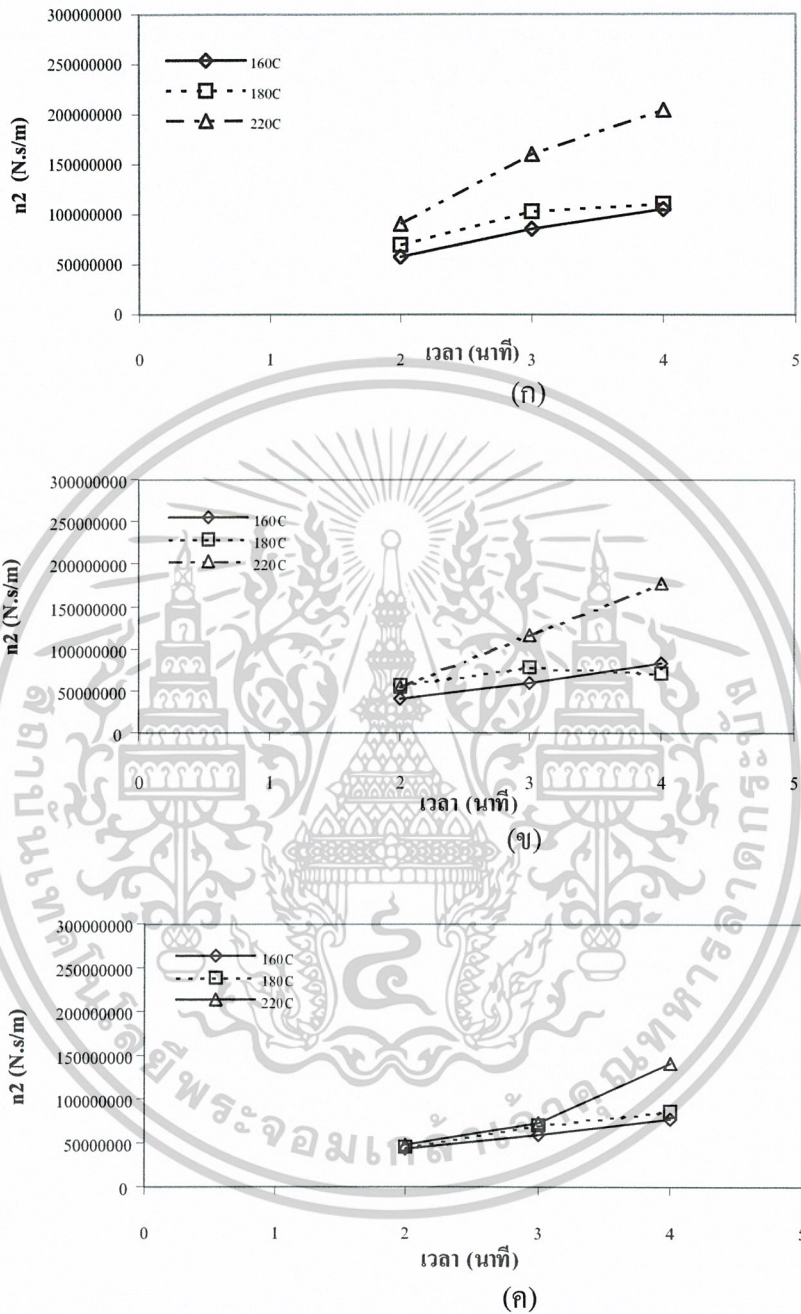
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.4 ค่า Viscous Damping Coefficient ของแบบจำลองแดชพอด ตัวที่ 2 (η_2)

ผลการทดลองซึ่งในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่า η_2 โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาในการอบสำหรับทุกๆระดับอุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้น

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยหลักในการผลิตหลักทั้งสามปัจจัย ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิ เวลา และความชื้นเริ่มต้น พบว่าทั้งสามปัจจัยมีผลต่อค่าคงที่ η_2 ของงาอบกรอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการอบจะทำให้ได้ค่าคงที่ η_2 หลังการอบกรอบเพิ่มขึ้นแต่ค่าดังกล่าวจะลดลงเมื่อ เมื่อระดับความชื้นเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น พิจารณาจากค่า F-ratios แล้วพบว่าเวลาในการอบกรอบเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุดรองลงมาคือ อุณหภูมิ และความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการอบกรอบตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบผลของปัจจัยร่วมระหว่าง อุณหภูมิ X เวลา เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ η_2 ของงาอบกรอบจากการทดลองทั้ง 27 สภาวะการทดลองและของงาที่คั่วจากโรงงานแล้วพบว่ามีสภาวะการทดลองทั้งหมด 14 สภาวะการทดลองที่ทำให้งาอบกรอบมีค่า η_2 หลังการอบ ไม่แตกต่างจากค่าดังกล่าวของงาจากโรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกรอบกับค่า η_2 ที่ความชื้นเริ่มต้นที่ 25%(ก), 30%(ข) และ 35%(ค) w.b. ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่าคงที่ η_2 หลังอบกรอบ

ปัจจัยการผลิต	ระดับของปัจจัย	ค่าคงที่ η_2 (N.s/m)
เวลา (นาที)	2	50270531 ^a
	3	81403323 ^b
	4	1.17E+08 ^c
อุณหภูมิ(°C)	160	67526523 ^a
	185	70187845 ^b
	220	1.11E+08 ^c
ความชื้นเริ่มต้น (%wb.)	25	1.06E+08 ^a
	30	79524011 ^b
	35	63694257 ^c

หมายเหตุ ค่าคงที่ η_2 หลังอบเฉลี่ยในแต่ละปัจจัยที่กำกับด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.14 ค่า η_2 เฉลี่ยของงาอบจากการทดลองและจากโรงงาน

ความชื้นเริ่มต้น (%w.b.)	เวลา(นาที)	อุณหภูมิการอบกรอบ (°C)		
		160	180	220
25	2	57666882 ^{ab}	49764619 ^{ab}	90443465 ^{abcde}
	3	85872926 ^{abcde}	87244679 ^{abcde}	1.60E+08 ^{cfg}
	4	1.05E+08 ^{abcdef}	1.11E+08 ^{abcdef}	2.04E+08 ^g
30	2	40614007 ^{ab}	55975665 ^{ab}	37250673 ^{ab}
	3	59814931 ^{ab}	76980005 ^{abcd}	1.15E+08 ^{bcdef}
	4	81761264 ^{abcd}	71505000 ^{abc}	1.77E+08 ^{fg}
35	2	42177735 ^{ab}	45650226 ^{ab}	32891506 ^a
	3	58091340 ^{ab}	47078588 ^{ab}	42339515 ^{ab}
	4	76301039 ^{abcd}	86807656 ^{abcde}	1.42E+08 ^{cdefg}
คั่วจาก โรงงาน			1.53E+08 ^{defg}	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเปรียบเทียบงาอบกรอบโดยพิจารณาจากคุณลักษณะด้านต่างๆ

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของงาอบจากการทดลองอันได้แก่ ความชื้นหลังอบ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ความหนาแน่นรวม และคุณสมบัติเชิงกลทั้ง 4 ตัว ซึ่งประกอบไปด้วย E_1 , E_2 , η_1 และ η_2 แล้วทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะทั้งหมดกับค่าดังกล่าวของงาคั่วจากโรงงานพบว่า สภาวะการทดลองที่ทำให้งาอบมีคุณลักษณะที่จำกัดว่าไม่แตกต่างกับคุณลักษณะดังกล่าวของงาคั่วจากโรงงาน สามารถสรุปในเบื้องต้นดังตารางที่ 4.5

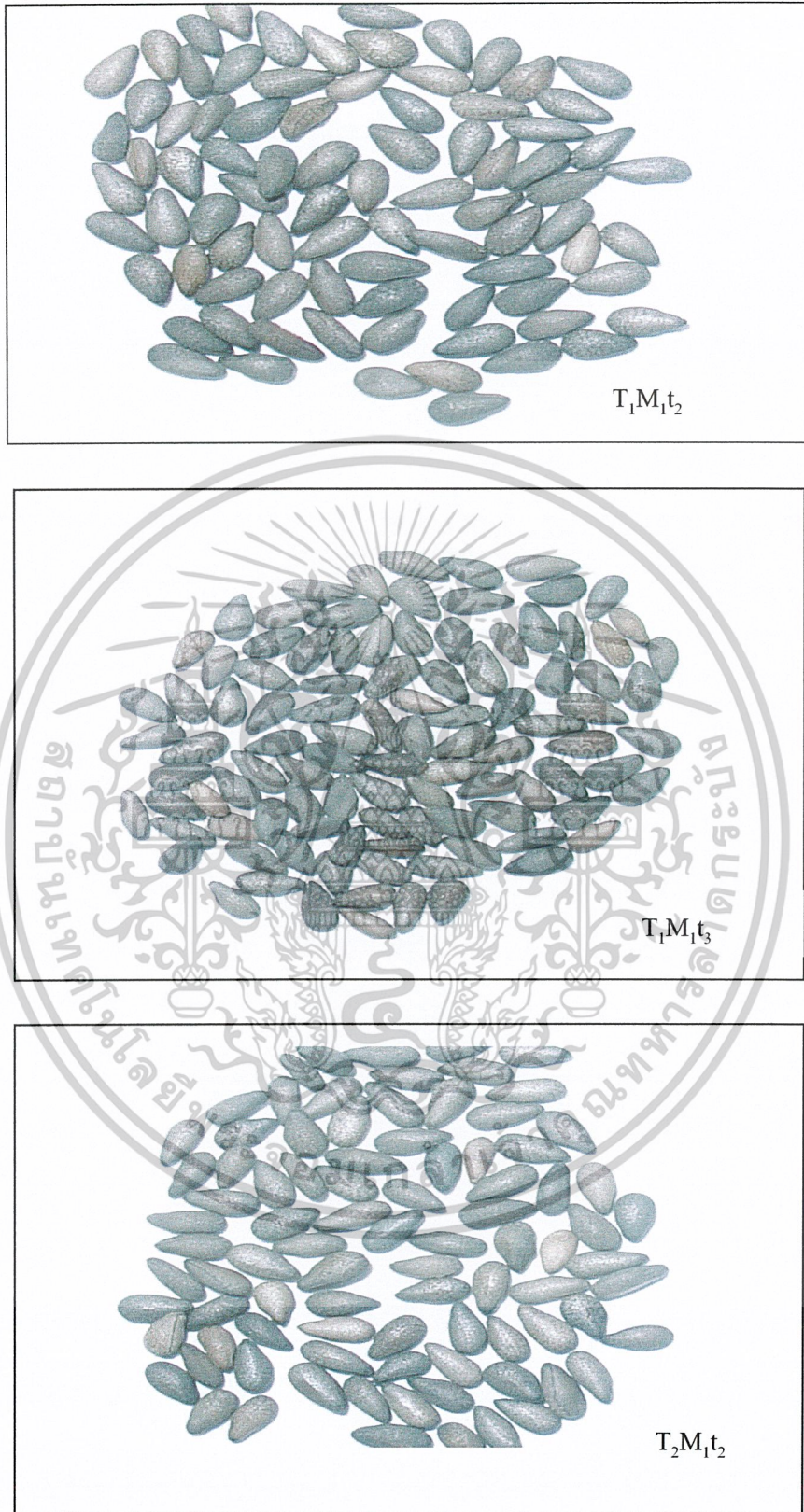
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ในตารางจะพบว่า ไม่มีสภาวะการทดลองใดเลยที่ทำให้งาอบมีคุณลักษณะทั้ง 7 ไม่แตกต่างกับค่าดังกล่าวของงาคั่วจากโรงงาน อย่างไรก็ตามมีสภาวะการทดลอง 6 สภาวะการทดลองที่ทำให้งาอบมีคุณลักษณะ 5 คุณลักษณะไม่แตกต่างกับงาคั่วจากโรงงานซึ่งเป็นจำนวนสูงสุดที่เป็นไปได้ สภาวะการทดลองทั้ง 6 ประกอบด้วย $T_1M_1t_2$, $T_1M_1t_3$, $T_2M_1t_2$, $T_2M_1t_3$, $T_2M_3t_3$ และ $T_3M_2t_3$ สำหรับลักษณะทางกายภาพของงาอบจากการทดลองทั้ง 6 สภาวะดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 ส่วนงาคั่วจากโรงงานแสดงไว้ในรูปที่ 4.11



ตารางที่ 4.15 สถานะการทดลองที่ทำให้ห้องอบกรอบมีคุณภาพไม่แตกต่างจากคุณภาพของงาคั่วจาก
โรงงาน

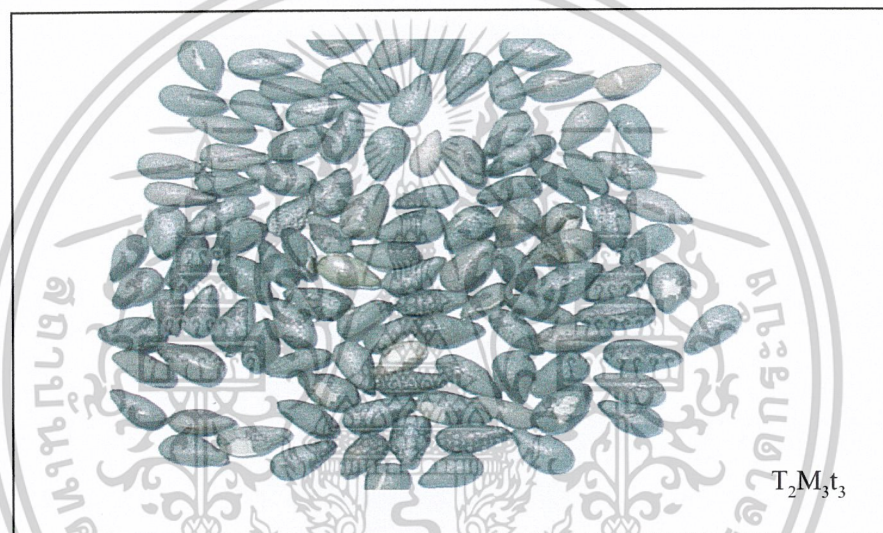
ปัจจัยทางคุณภาพของงาอบ						
ความหนาแน่นรวม	ความชื้นหลังอบ	ปริมาณน้ำอิสระ	ค่าคงที่ E_1	ค่าคงที่ E_2	ค่าคงที่ η_1	ค่าคงที่ η_2
$T_1M_1t_2$	$T_1M_1t_2$	$T_1M_1t_3$	$T_1M_1t_2$	$T_1M_1t_3$	$T_1M_1t_2$	$T_1M_1t_2$
$T_1M_1t_3$	$T_2M_1t_2$	$T_2M_2t_2$	$T_1M_1t_3$	$T_1M_3t_3$	$T_1M_1t_3$	$T_1M_1t_3$
$T_1M_2t_2$	$T_2M_3t_2$	$T_2M_2t_3$	$T_2M_1t_3$	$T_2M_2t_2$	$T_1M_2t_3$	$T_1M_2t_3$
$T_1M_2t_3$	$T_2M_3t_3$	$T_2M_3t_3$		$T_2M_2t_3$	$T_2M_1t_2$	$T_1M_3t_3$
$T_1M_3t_2$	$T_3M_1t_1$	$T_3M_2t_2$		$T_3M_1t_2$	$T_2M_1t_3$	$T_2M_1t_2$
$T_1M_3t_3$	$T_3M_2t_2$			$T_3M_1t_3$	$T_2M_2t_3$	$T_2M_1t_3$
$T_2M_1t_1$				$T_3M_2t_2$	$T_2M_3t_3$	$T_2M_2t_3$
$T_2M_1t_2$				$T_3M_2t_3$	$T_3M_1t_3$	$T_2M_3t_3$
$T_2M_1t_3$				$T_3M_3t_1$	$T_3M_2t_2$	$T_3M_1t_1$
$T_2M_2t_1$				$T_3M_3t_3$	$T_3M_2t_3$	$T_3M_1t_2$
$T_2M_2t_2$					$T_3M_3t_3$	$T_3M_1t_3$
$T_2M_3t_2$					$T_3M_3t_3$	$T_3M_2t_2$
$T_3M_1t_1$						$T_3M_2t_3$
$T_3M_2t_1$						$T_3M_3t_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของงาอบกรอบทั้ง 6 สถานะการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 (ต่อ) ลักษณะทางกายภาพของงาอบกรอบทั้ง 6 สถานะการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ลักษณะทางกายภาพของงาที่คั่วจากโรงงาน

4.3 คุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสของงาอบกรอบ

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของงาอบ 6 สภาวะการทดลองดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.3 และงาคั่วจาก โรงงาน ได้แสดงในตารางที่ 4.16-4.18

ตารางที่ 4.16 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางด้านความกรอบ

สภาวะการทดลอง	ค่าคะแนนระดับความกรอบ	
	กลุ่ม 1	กลุ่ม 2
T ₁ M ₁ t ₂	4.193 ^a	
T ₂ M ₁ t ₃	4.360 ^a	
T ₁ M ₁ t ₂	4.393 ^a	
T ₂ M ₁ t ₃	4.807 ^a	4.807 ^{ab}
T ₂ M ₃ t ₃	5.120 ^a	5.120 ^{ab}
T ₃ M ₂ t ₂	5.380 ^a	5.380 ^{ab}
งานที่คั่วโรงงาน		5.940 ^a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางด้านความสุก

สภาวะการทดลอง	ค่าคะแนนระดับความสุก	
	กลุ่ม 1	กลุ่ม 2
T ₁ M ₁ t ₂	4.087 ^a	
T ₁ M ₁ t ₂	4.233 ^a	
T ₂ M ₁ t ₃	4.377 ^a	
T ₂ M ₁ t ₃	4.770 ^a	4.880 ^{ab}
T ₂ M ₃ t ₃	4.880 ^a	4.770 ^{ab}
T ₃ M ₂ t ₂	5.140 ^a	5.140 ^{ab}
งานที่คั่วโรงงาน		5.590 ^b

ตารางที่ 4.18 การเปรียบเทียบคุณลักษณะด้านระดับความขม

สภาวะการทดลอง	ค่าคะแนนระดับความขม		
	กลุ่ม 1	กลุ่ม 2	กลุ่ม 3
T ₂ M ₁ t ₃	3.637 ^a		
T ₁ M ₁ t ₂	3.667 ^a		
งานที่คั่วโรงงาน	3.943 ^a	3.943 ^{ab}	
T ₁ M ₁ t ₂	4.077 ^a	4.077 ^{ab}	4.077 ^{abc}
T ₂ M ₁ t ₃	4.157 ^a	4.157 ^{ab}	4.157 ^{abc}
T ₂ M ₃ t ₃		4.847 ^b	4.847 ^{bc}
T ₃ M ₂ t ₂			5.050 ^c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากความกรอบพบว่า ค่าระดับคะแนนความกรอบของงาคั่วจากโรงงาน ไม่มีความแตกต่างจากค่าดังกล่าวของงาจากการทดลองด้วยสภาวะ $T_2M_1t_3$ $T_2M_3t_3$ และ $T_3M_2t_2$ หากใช้ระดับความสุก (Degree of Roasting) เป็นเกณฑ์พบว่า ค่าคะแนนระดับความสุกของงาคั่วจากโรงงาน ไม่แตกต่างกับค่าดังกล่าวของงาอบจากสภาวะ $T_2M_1t_3$ $T_2M_3t_3$ และ $T_3M_2t_2$ สำหรับคุณลักษณะด้านความขมพบว่า ค่าระดับคะแนนความขมของงาคั่วจากโรงงานและงาอบด้วยสภาวะ $T_2M_1t_3$ $T_1M_1t_2$ $T_1M_1t_2$ $T_2M_1t_3$ และ $T_2M_3t_3$ ไม่มีความแตกต่างกัน

ผลจากการทดลองในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์งาที่อบจากสภาวะ $T_2M_3t_3$ และงาคั่วจากโรงงานมีคุณลักษณะด้านต่างๆ ใกล้เคียงกันมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบกรอบงาดันแบบ โดยเทคนิคสเปาท์เตดเบด และการทดสอบอบกรอบงาดำด้วยอุณหภูมิ 160 °C, 180 °C และ 220 °C เป็นเวลา 2, 3 และ 4 นาที กับงา ความชื้นเริ่มต้น 25% , 30% และ 35%w.b. ได้ข้อสรุปดังนี้

- 1) เครื่องอบกรอบงาดันแบบ โดยเทคนิคสเปาท์เตดเบด ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมีศักยภาพเพียงพอต่อการพัฒนาให้สามารถใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้
- 2) ปัจจัยการผลิตหลักอันได้แก่ เวลาในการอบ อุณหภูมิของลมร้อน และความชื้นเริ่มต้นของงา มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นรวม ความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ค่า E_2 ค่า η_1 และ η_2 ของงาอบกรอบ โดยเวลาในการอบเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุด รองลงมาคืออุณหภูมิลมร้อน และความชื้นเริ่มต้นตามลำดับ
- 3) อุณหภูมิของลมร้อน ไม่มีผลต่อค่า E_1 ของงาอบ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเวลาในการอบ และความชื้นเริ่มต้นของงาพบว่า เวลาในการอบมีอิทธิพลต่อค่า E_1 มากกว่า
- 4) สภาวะการอบที่ทำให้ผลิตภัณฑ์งาอบที่มีคุณลักษณะต่างๆ ใกล้เคียงกับคุณลักษณะดังกล่าวของงาคั่วจากโรงงาน ได้แก่ สภาวะการอบงา ความชื้นเริ่มต้น 35 %wb ด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 185 °C เป็นเวลา 4 นาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทำการหุ้มฉนวนโดยใช้ฉนวนที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อที่จะให้มีการสูญเสียพลังงานความร้อนน้อยที่สุด และควรจะทำการนำลมร้อนหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน

บรรณานุกรม

ปานมนัส ศิริสมบุญ, พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ สาทิป์ รัตนภาสกร. 2532. สมบัติทางกายภาพ และวิศวกรรมของชีววัสดุ. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ.

นิตินาม1. 2548. ลักษณะของงา.

URL: <http://www.school.net.th/library/snet4/june22/sesame2.html>.

[สืบค้น : 18 เม.ย. 48]

นิตินาม2. 2548. การใช้ประกอบอาหาร.

URL: http://www.tei.ro.th/PliBai/th_pli_bai_58_namsaibaimaiknew.html.

[สืบค้น : 18 เม.ย. 48]

นิตินาม3. 2547. ประโยชน์และโภชนาการของงา.

URL: <http://www.doae.go.th/library/html/detail/nga/sesame3.html>.

[สืบค้น : 29 ธ.ค. 47]

Bala, B.K. 1997. Drying and Storage of Cereal Grains. New York : Science Publishers, Inc.

Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. 1992. Drying and Storage of Grains and Oil Seeds. New York : AVI Publishers.

Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. 1974. Drying of Cereal Grains. New York , AVI Publishers.

Chakravert, A. and De, D.S. 1981. Postharvest Technology of Cereals. India : Oxford and IBH Publishers.

Jayas, D.S., Cenkowski, S. and Muir, W.E. 1991. Review of thin-layer drying and wetting equations. Drying Technology, 9(3) : 551-588.

Jumah, R.Y. and Mujumdar A.S. 1996. Batch Drying Kinetics of Corn in a Novel Roasting Jet Spouted-Bed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Lewis, M.J. 1992. *Physical Properties of Foods and Food Processing Systems*. Great Britain : The Camelot Press, Southamton Publishers.
- Madonna, L.A. and Lama, T.T. 1960, *Pressure Drop in Spouted Bed*. New York : Academic Press Publishers.
- Manurung, F. 1964. *Studies in the Spouted Bed Technique with Particular Reference to Low Temperature Coal Carbonization in Spouted Beds*. New York : Academic Press Publishers, Inc.
- Marcowski, A. and Kaminski, W. 1983. Hydrodynamic Characteristic of Jet Spouted Bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3) : 377–381.
- Mathur, K.B. and Gishler, P.E. 1955. A Technique for Contacting Gases with Coarse Solid Particles. *AIChE Journal*, 1(2) : 157.
- Mohsenin, N.N. 1989. *Physical Properties of Plant and Animal Materials : Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties*. New York : Gordon and Breach, Science Publishers, Inc.
- Mukhlenov, I.P. and Gorshtein, A.E. 1965. Hydrodynamic of Reactor with a Spouting Bed of Granular Material. in *Spouted Beds*. New York :Academic Press Publishers.
- Nagaraju, V.D., Murthy, C.T., Ramalakshmi, K. and Srinivasa, P.N. 1997. Studies on Roasting of Coffee Beans in a Spouted Bed. *Journal of Food Engineerin*, 59 : 263–267.
- Pallai, I. and Nemeth, J. 1969. *Analysis of Flow Forms in a Spouted Bed Apparatus by the Socalled Phase Diagram in Spouted Beds*. New York : Academic Press Publishers.
- Robins, P.T. and Fryer, P.J. 2003. The Spouted–Bed Roasting of Barley Development of Predictive Model for Moisture and Temperature. *Journal of Food Engineering*, 59 :1–68.
- Teter, N.C. 1981. *Grain Storage*. Phillippines : Soustest Asia Cooperative Post–Harvest Research and Development Publishers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wimberly, J.E. 1983. Paddy Rice Postharvest Industry in Developing Countries. Philippines :
Rice Research Institute Publishers.

Zahed, A.H. and Epstein N. 1993. On the Diffusion Mechanism during Spouted Bed Drying of
Cereal Grains. Canadian Journal of Chemical Engineering, 11(2) : 401–409.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก ก.

ตาราง ก.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาแน่นรวม

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: BULKDEN

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	91086.951 ^a	26	3503.344	22.895	.000
Intercept	17705213.780	1	17705213.8	115707.5	.000
TEMP	30354.432	2	15177.216	99.186	.000
TIME	43347.124	2	21673.562	141.642	.000
IMC	5215.906	2	2607.953	17.044	.000
TEMP * TIME	1118.205	4	279.551	1.827	.137
TEMP * IMC	335.332	4	83.833	.548	.701
TIME * IMC	6198.355	4	1549.589	10.127	.000
TEMP * TIME * IMC	4517.597	8	564.700	3.690	.002
Error	8262.917	54	153.017		
Total	17804563.648	81			
Corrected Total	99349.868	80			

a. R Squared = .917 (Adjusted R Squared = .877)

ตาราง ก.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความชื้นดั้งอบ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: MC

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	1151.338 ^a	27	42.642	986.373	.000
TEMP	37.523	2	18.762	433.982	.000
TIME	272.002	2	136.001	3145.895	.000
IMC	65.842	2	32.921	761.511	.000
TEMP * TIME	12.040	4	3.010	69.625	.000
TEMP * IMC	2.565	4	.641	14.834	.000
TIME * IMC	43.011	4	10.753	248.725	.000
TEMP * TIME * IMC	4.815	8	.602	13.923	.000
Error	2.334	54	4.323E-02		
Total	1153.672	81			

a. R Squared = .998 (Adjusted R Squared = .997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณน้ำอิสระ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: AW

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	20.858 ^a	27	.773	1029.212	.000
TEMP	.396	2	.198	263.969	.000
TIME	2.698	2	1.349	1797.271	.000
IMC	.608	2	.304	404.865	.000
TEMP * TIME	5.499E-02	4	1.375E-02	18.317	.000
TEMP * IMC	3.197E-02	4	7.993E-03	10.650	.000
TIME * IMC	.168	4	4.199E-02	55.939	.000
TEMP * TIME * IMC	.130	8	1.627E-02	21.676	.000
Error	4.053E-02	54	7.506E-04		
Total	20.899	81			

a. R Squared = .998 (Adjusted R Squared = .997)

ตาราง ก.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 1 (E₁)

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: E1

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	5.5680E+14 ^a	27	2.062E+13	500.789	.000
TEMP	11683423704	2	5841711852	.142	.868
TIME	5.6415E+12	2	2.821E+12	68.499	.000
IMC	4.8373E+12	2	2.419E+12	58.735	.000
TEMP * TIME	5.0508E+11	4	1.263E+11	3.066	.024
TEMP * IMC	8.1495E+11	4	2.037E+11	4.948	.002
TIME * IMC	6.5758E+11	4	1.644E+11	3.992	.007
TEMP * TIME * IMC	7.9116E+11	8	9.890E+10	2.402	.027
Error	2.2237E+12	54	4.118E+10		
Total	5.5902E+14	81			

a. R Squared = .996 (Adjusted R Squared = .994)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Stiffness ของแบบจำลองสปริงตัวที่ 2 (E_2)

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: E2

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	7.7683E+16 ^a	27	2.877E+15	52.730	.000
TEMP	3.4611E+15	2	1.731E+15	31.717	.000
TIME	9.6551E+15	2	4.828E+15	88.476	.000
IMC	2.2866E+15	2	1.143E+15	20.954	.000
TEMP * TIME	8.6660E+14	4	2.167E+14	3.971	.007
TEMP * IMC	5.5051E+14	4	1.376E+14	2.522	.051
TIME * IMC	1.7904E+14	4	4.476E+13	.820	.518
TEMP * TIME * IMC	6.4885E+14	8	8.111E+13	1.486	.184
Error	2.9464E+15	54	5.456E+13		
Total	8.0629E+16	81			

a. R Squared = .963 (Adjusted R Squared = .945)

ตาราง ก.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Viscous damping coefficient ของแบบจำลองแดชพอตตัวที่ 1 (η_1)

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: N1

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	1.1466E+21 ^a	27	4.247E+19	81.347	.000
TEMP	4.4689E+19	2	2.234E+19	42.803	.000
TIME	1.2144E+20	2	6.072E+19	116.321	.000
IMC	2.7513E+19	2	1.376E+19	26.352	.000
TEMP * TIME	4.3327E+18	4	1.083E+18	2.075	.097
TEMP * IMC	3.4042E+17	4	8.510E+16	.163	.956
TIME * IMC	6.1885E+18	4	1.547E+18	2.964	.028
TEMP * TIME * IMC	1.4827E+19	8	1.853E+18	3.550	.002
Error	2.8189E+19	54	5.220E+17		
Total	1.1747E+21	81			

a. R Squared = .976 (Adjusted R Squared = .964)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Viscous damping coefficient ของแบบจำลอง
แดชพอดตัวที่ 2 (η_2)

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: N2

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	7.1263E+17 ^a	27	2.639E+16	15.902	.000
TEMP	3.2437E+16	2	1.622E+16	9.771	.000
TIME	6.0731E+16	2	3.037E+16	18.295	.000
IMC	2.4353E+16	2	1.218E+16	7.336	.002
TEMP * TIME	1.9850E+16	4	4.962E+15	2.990	.027
TEMP * IMC	9.5917E+15	4	2.398E+15	1.445	.232
TIME * IMC	3.7825E+15	4	9.456E+14	.570	.686
TEMP * TIME * IMC	4.0600E+15	8	5.075E+14	.306	.961
Error	8.9629E+16	54	1.660E+15		
Total	8.0226E+17	81			

a. R Squared = .888 (Adjusted R Squared = .832)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก ข.

ตาราง ข.1 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นรวม (Bluk density)

(I) TEMP	(J) TEMP	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
150	165	23.173(*)	3.367	.000	16.424	29.923
	180	47.414(*)	3.367	.000	40.664	54.164
165	150	-23.173(*)	3.367	.000	-29.923	-16.424
	180	24.241(*)	3.367	.000	17.491	30.991
180	150	-47.414(*)	3.367	.000	-54.164	-40.664
	165	-24.241(*)	3.367	.000	-30.991	-17.491

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง ข.2 ผลของเวลาต่อความหนาแน่นรวม (Bluk density)

(I) TIME	(J) TIME	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
2	3	43.091(*)	3.367	.000	36.341	49.841
	4	53.413(*)	3.367	.000	46.663	60.163
3	2	-43.091(*)	3.367	.000	-49.841	-36.341
	4	10.323(*)	3.367	.003	3.573	17.072
4	2	-53.413(*)	3.367	.000	-60.163	-46.663
	3	-10.323(*)	3.367	.003	-17.072	-3.573

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.3 ผลของความชื้นเริ่มต้นต่อความหนาแน่นรวม (Bluk density)

(I) IMC	(J) IMC	Mean Difference (I-J)	Std.Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
25	30	7.586(*)	3.367	.028	.836	14.336
	35	-11.911(*)	3.367	.001	-18.661	-5.161
30	25	-7.586(*)	3.367	.028	-14.336	-.836
	35	-19.497(*)	3.367	.000	-26.247	-12.747
35	25	11.911(*)	3.367	.001	5.161	18.661
	30	19.497(*)	3.367	.000	12.747	26.247

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง ข.4 ผลของอุณหภูมิต่อความชื้นหลังอบ

(I) TEMP	(J) TEMP	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
150	165	.664(*)	.057	.000	.550	.777
	180	1.656(*)	.057	.000	1.543	1.770
165	150	-.664(*)	.057	.000	-.777	-.550
	180	.993(*)	.057	.000	.879	1.106
180	150	-1.656(*)	.057	.000	-1.770	-1.543
	165	-.993(*)	.057	.000	-1.106	-.879

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.5 ผลของเวลาต่อความชื้นหลังอบ

(I) TIME	(J) TIME	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
2	3	3.223(*)	.057	.000	3.110	3.337
	4	4.317(*)	.057	.000	4.204	4.431
3	2	-3.223(*)	.057	.000	-3.337	-3.110
	4	1.094(*)	.057	.000	.980	1.207
4	2	-4.317(*)	.057	.000	-4.431	-4.204
	3	-1.094(*)	.057	.000	-1.207	-.980

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง ข.6 ผลของความชื้นเริ่มต้นต่อความชื้นหลังอบ

(I) IMC	(J) IMC	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
25	30	-1.334(*)	.057	.000	-1.448	-1.221
	35	-2.191(*)	.057	.000	-2.305	-2.078
30	25	1.334(*)	.057	.000	1.221	1.448
	35	-.857(*)	.057	.000	-.970	-.744
35	25	2.191(*)	.057	.000	2.078	2.305
	30	.857(*)	.057	.000	.744	.970

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.7 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำอิสระ(a_w)

(I) TEMP	(J) TEMP	Mean Difference (I-J)	Std.Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
150	165	9.800E-02(*)	.007	.000	8.305E-02	.113
	180	.171(*)	.007	.000	.156	.186
165	150	-9.800E-02(*)	.007	.000	-.113	-8.305E-02
	180	7.270E-02(*)	.007	.000	5.775E-02	8.765E-02
180	150	-.171(*)	.007	.000	-.186	-.156
	165	-7.270E-02(*)	.007	.000	-8.765E-02	-5.775E-02

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง ข.8 ผลของเวลาต่อปริมาณน้ำอิสระ (a_w)

(I) TIME	(J) TIME	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
2	3	.283(*)	.007	.000	.268	.298
	4	.441(*)	.007	.000	.426	.456
3	2	-.283(*)	.007	.000	-.298	-.268
	4	.158(*)	.007	.000	.143	.173
4	2	-.441(*)	.007	.000	-.456	-.426
	3	-.158(*)	.007	.000	-.173	-.143

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.9 ผลของความชันเริ่มต้นต่อปริมาณน้ำอิสระ(α_{μ})

(I) IMC	(J) IMC	Mean Difference (I-J)	Std.Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
25	30	-.133(*)	.007	.000	-.148	-.118
	35	-.210(*)	.007	.000	-.225	-.195
30	25	.133(*)	.007	.000	.118	.148
	35	-7.641E-02(*)	.007	.000	-9.136E-02	-6.146E-02
35	25	.210(*)	.007	.000	.195	.225
	30	7.641E-02(*)	.007	.000	6.146E-02	9.136E-02

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง ข.10 ผลของเวลาต่อค่าคงที่ E₁

(I) TIME	(J) TIME	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
2	3	-490244.982(*)	55229.701	.000	-600973.866	-379516.098
	4	-610034.015(*)	55229.701	.000	-720762.899	-499305.131
3	2	490244.982(*)	55229.701	.000	379516.098	600973.866
	4	-119789.033(*)	55229.701	.035	-230517.918	-9060.149
4	2	610034.015(*)	55229.701	.000	499305.131	720762.899
	3	119789.033(*)	55229.701	.035	9060.149	230517.918

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.11 ผลของความชื้นเริ่มต้นต่อค่า E_1

(I) IMC	(J) IMC	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
25	30	518514.641(*)	55229.701	.000	407785.757	629243.526
	35	518287.687(*)	55229.701	.000	407558.802	629016.571
30	25	-518514.641(*)	55229.701	.000	-629243.526	-407785.757
	35	-226.955	55229.701	.997	-110955.839	110501.930
35	25	-518287.687(*)	55229.701	.000	-629016.571	-407558.802
	30	226.955	55229.701	.997	-110501.930	110955.839

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง ข.12 ผลของอุณหภูมิต่อค่า E_2

(I) TEMP	(J) TEMP	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.a	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
150	165	-4100852.859(*)	2010407.747	.046	-8131477.711	-70228.007
	180	-15454631.470(*)	2010407.747	.000	-19485256.322	-11424006.618
165	150	4100852.859(*)	2010407.747	.046	70228.007	8131477.711
	180	-11353778.611(*)	2010407.747	.000	-15384403.462	-7323153.759
180	150	15454631.470(*)	2010407.747	.000	11424006.618	19485256.322
	165	11353778.611(*)	2010407.747	.000	7323153.759	15384403.462

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.13 ผลของเวลาต่อค่าคงที่ E_2

(I) TIME	(J) TIME	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
2	3	-12540321.330(*)	2010407.747	.000	-16570946.182	-8509696.478
	4	-26726212.539(*)	2010407.747	.000	-30756837.391	-22695587.687
3	2	12540321.330(*)	2010407.747	.000	8509696.478	16570946.182
	4	-14185891.209(*)	2010407.747	.000	-18216516.061	-10155266.357
4	2	26726212.539(*)	2010407.747	.000	22695587.687	30756837.391
	3	14185891.209(*)	2010407.747	.000	10155266.357	18216516.061

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง ข.14 ผลของความชื้นเริ่มต้นต่อค่าคงที่ E_2

(I) IMC	(J) IMC	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
25	30	8846815.496(*)	2010407.747	.000	4816190.644	12877440.348
	35	12689884.350(*)	2010407.747	.000	8659259.498	16720509.202
30	25	-8846815.496(*)	2010407.747	.000	-12877440.348	-4816190.644
	35	3843068.854	2010407.747	.061	-187555.998	7873693.706
35	25	-12689884.350(*)	2010407.747	.000	-16720509.202	-8659259.498
	30	-3843068.854	2010407.747	.061	-7873693.706	187555.998

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.15 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ η_1

(I) TEMP	(J) TEMP	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
150	165	-739656139.241(*)	196642866.704	.000	-1133901349.86	-345410928.616
	180	-1809406487.83(*)	196642866.704	.000	-2203651698.45	-1415161277.21
165	150	739656139.241(*)	196642866.704	.000	345410928.616	1133901349.865
	180	-1069750348.59(*)	196642866.704	.000	-1463995559.21	-675505137.968
180	150	1809406487.833(*)	196642866.704	.000	1415161277.209	2203651698.458
	165	1069750348.593(*)	196642866.704	.000	675505137.968	1463995559.217

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง ข.16 ผลของเวลาต่อค่าคงที่ η_1

(I) TIME	(J) TIME	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
2	3	-1676563192.91(*)	196642866.704	.000	-2070808403.53	-1282317982.28
	4	-2992060934.78(*)	196642866.704	.000	-3386306145.40	-2597815724.15
3	2	1676563192.907(*)	196642866.704	.000	1282317982.283	2070808403.532
	4	-1315497741.87(*)	196642866.704	.000	-1709742952.49	-921252531.246
4	2	2992060934.778(*)	196642866.704	.000	2597815724.153	3386306145.402
	3	1315497741.870(*)	196642866.704	.000	921252531.246	1709742952.495

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.17 ผลของความชื้นเริ่มต้นต่อค่าคงที่ η_1

(I) IMC	(J) IMC	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
25	30	1134399921.611(*)	196642866.704	.000	740154710.987	1528645132.236
	35	1317771335.704(*)	196642866.704	.000	923526125.079	1712016546.328
30	25	-1134399921.61(*)	196642866.704	.000	-1528645132.24	-740154710.987
	35	183371414.093	196642866.704	.355	-210873796.532	577616624.717
35	25	-1317771335.70(*)	196642866.704	.000	-1712016546.33	-923526125.079
	30	-183371414.093	196642866.704	.355	-577616624.717	210873796.532

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง ข.18 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ η_2

(I) TEMP	(J) TEMP	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
150	165	-2661321.977	11088189.738	.811	-24891803.93	19569159.972
	180	-43718705.969(*)	11088189.738	.000	-65949187.92	-21488224.02
165	150	2661321.977	11088189.738	.811	-19569159.97	24891803.926
	180	-41057383.992(*)	11088189.738	.001	-63287865.94	-18826902.04
180	150	43718705.969(*)	11088189.738	.000	21488224.020	65949187.918
	165	41057383.992(*)	11088189.738	.001	18826902.043	63287865.941

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.19 ผลของเวลาต่อค่าคงที่ η_2

(I) TIME	(J) TIME	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
2	3	-31132792.653(*)	11088189.738	.007	-53363274.602	-8902310.704
	4	-67015210.658(*)	11088189.738	.000	-89245692.607	-44784728.709
3	2	31132792.653(*)	11088189.738	.007	8902310.704	53363274.602
	4	-35882418.005(*)	11088189.738	.002	-58112899.954	-13651936.056
4	2	67015210.658(*)	11088189.738	.000	44784728.709	89245692.607
	3	35882418.005(*)	11088189.738	.002	13651936.056	58112899.954

หมายเหตุ (*) หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง ข.20 ผลของความชื้นเริ่มต้นต่อค่าคงที่ η_2

(I) IMC	(J) IMC	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.(a)	95% Confidence Interval for Difference(a)	
					Lower Bound	Upper Bound
25	30	26217316.996(*)	11088189.738	.022	3986835.047	48447798.945
	35	42047071.357(*)	11088189.738	.000	19816589.408	64277553.306
30	25	-26217316.996(*)	11088189.738	.022	-48447798.945	-3986835.047
	35	15829754.361	11088189.738	.159	-6400727.588	38060236.310
35	25	-42047071.357(*)	11088189.738	.000	-64277553.306	-19816589.408
	30	-15829754.361	11088189.738	.159	-38060236.310	6400727.588

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

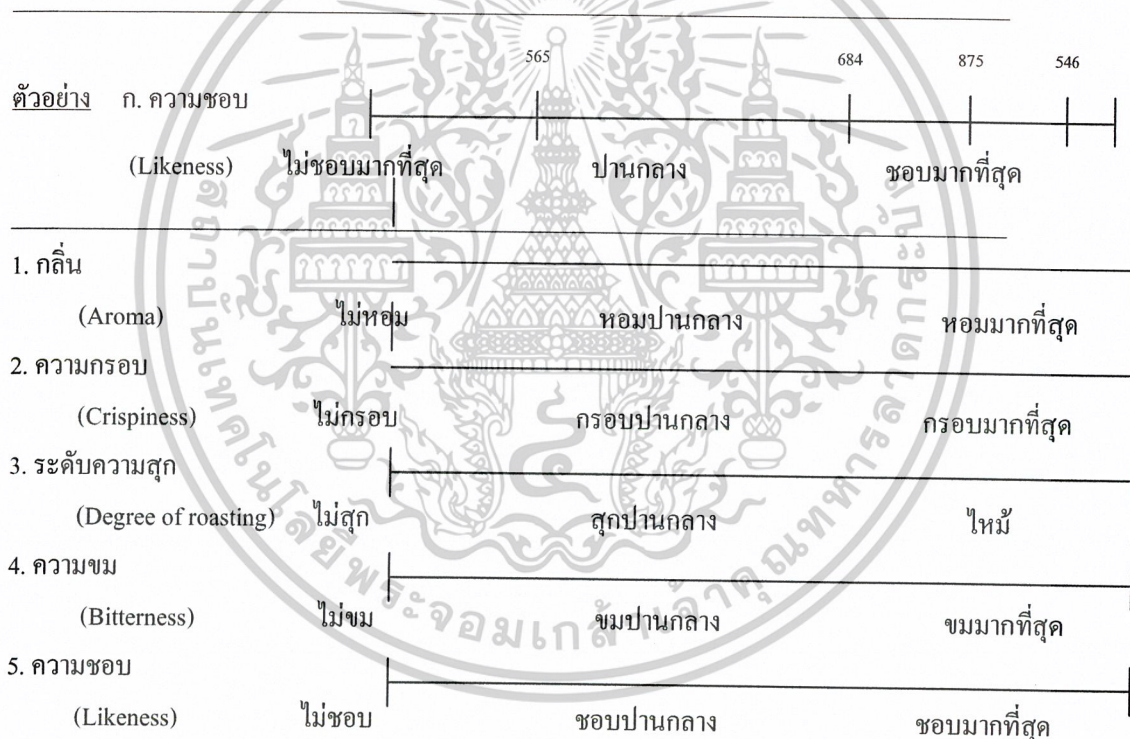
ผนวก ค.

แบบบันทึกผลการทดสอบ การประเมินความกรอบของจอบกรอบ

ชื่อผู้ทดสอบ _____ วันที่ทดสอบ _____

การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัสนี้เป็นการทดสอบแบบ Quantitative Descriptive Analysis (QDA) ของตัวอย่างจอบกรอบ คุณลักษณะที่ทำการทดสอบ คือ กลิ่น, ความกรอบ, ระดับความสุก, ความขม, และความชอบ

หมายเหตุ: - ลำดับการชิมตัวอย่างจะไม่มีผลในการระบุลักษณะความกรอบ และความชอบ
- บางตัวอย่างจะมีความแตกต่างกันน้อยมาก กรุณาเลือกคุณลักษณะที่ทำการทดสอบที่ใกล้เคียงกับความรู้สึกรับมากที่สุด



ข้อคิดเห็น

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้