



การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น
Feasibility Study of Paddy Drying System Using Adsorption Technique

อีลีหัยะ สนิโซ
Eleeyah Saniso

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Physics
Prince of Songkla University

2549

ISBN 974-11-4776-7

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

๑

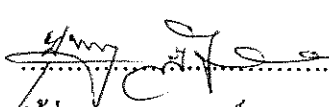
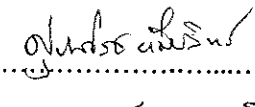
เลขหมู่	TP963	064	2549	ร. 2
Bib Key	571			280053
			9	CA 2549


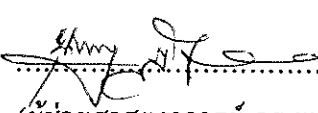
(1)


ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิค
การดูดซับความชื้น
ผู้เขียน นายอัสหิยะ สนิโซ
สาขาวิชา ฟิสิกส์


คณะกรรมการที่ปรึกษา

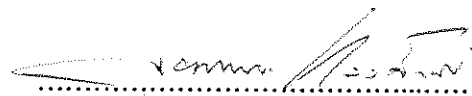
คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ .....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล) (รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภสโรช หมื่นสิทธิ์)

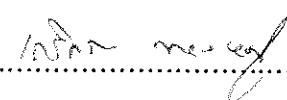
.....กรรมการ .....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สายันห์ สดุดี)

.....กรรมการ
(ดร.จอมภพ แวศักดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น
ผู้เขียน	นายอีลีหัยะ สนิโซ
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเทคนิคการดูดซับโดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ทางใบสาकु กาบมะพร้าวและสารสังเคราะห์ซิลิกาเจลเป็นสารดูดซับ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพเบื้องต้น และส่วนที่ 2 เป็นการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น การทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งในรูปของร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ร้อยละการงอกและร้อยละความขาว และการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Inoue *et al.* (2002) เพื่อใช้ทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้ง

จากการทดลอง พบว่า ความหนาแน่นปรากฏและความจุความร้อนจำเพาะจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับความชื้น ขณะที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศจะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสำหรับสารดูดซับความชื้นต่าง ๆ พบว่า สมการแบบเอมพิริคัลของ Page สามารถอธิบายจลนศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางสารดูดซับได้ดีที่สุด ค่าความชื้นสมดุลเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะแวดล้อม สมการของ Henderson (1952) เป็นรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้อธิบายผลการทดลอง

ในการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับ สรุปได้ว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและซิลิกาเจลเท่ากับ 1:1.5 และ 1:1.0 โดยปริมาตร ตามลำดับ กาบมะพร้าวและแกลบสามารถใช้เป็นสารดูดซับสำหรับลดความชื้นข้าวเปลือกได้ดีที่สุด สำหรับการศึกษาคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการลดความชื้น พบว่า ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ร้อยละการงอกและร้อยละความขาว ไม่มีความแตกต่างกับข้าวเปลือกอ้างอิง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นสามารถใช้ทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกได้สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 1.04-3.26 และ 4.09-7.90 สำหรับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและซิลิกาเจลตามลำดับ

คำสำคัญ : ข้าวเปลือกสายพันธุ์อินดิกา / คุณสมบัติทางกายภาพ / สารดูดซับความชื้น / วัสดุเหลือ
ใช้ทางการเกษตร / แบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้ง

Thesis Title Feasibility Study of Paddy Drying System Using Adsorption
Technique
Author Mr. Eleeyah Saniso
Major Program Physics
Academic Year 2006

ABSTRACT

This research work is to the feasibility study of paddy drying using the adsorption technique with various agriculture residues such as rice husk, sago palm rachis, coconut husk and silica gel. The experiments were divided into 2 parts. Firstly, the physical parameters of all adsorbents were studied. The another part was to investigate moisture removal of paddy by adsorption and quality analysis. Physical quality in terms of percentage of head rice yield, germination and whiteness value were determined and finally, the mathematical model developed by Inoue *et al.* (2002) was modified and used for predicting drying kinetics of paddy.

The results show that the bulk density and specific heat capacity is a linear function of initial moisture content. The percentage of void fraction decreased with increase of an initial moisture content and the diffusion coefficient has relation to the drying air temperature. From the mathematical modeling for adsorbents, it showed that Page's equation is the best fitting for describing of thin-layer drying kinetic of adsorbents. The equilibrium moisture content is the function of temperature and relative humidity of surrounding. The Henderson's equation is the most appropriate equation for describing the experimental results.

For paddy drying using adsorption technique, the result shows that the mixing volumetric ratios between rough rice and adsorbents of 1:1.5 and 1:1.0 are suitable for all agriculture residues and silica gel, respectively. The coconut husk and rice husk are the most appropriate desiccant for this rough rice drying. For determining of the physical qualities, the head rice yield, percentage of germination and percentage of whiteness are not different from the reference samples and the predicted results from the modified modelling has good agreement with the experimental results. The percentage of error are in ranges of 1.04–3.26 and 4.09–7.90% for agriculture residues and silica gel, respectively.

Keywords: *Indica rice varieties / Physical qualities / Desiccant / Agriculture residue / Drying kinetic modeling.*

กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินการวิจัย ตลอดจนคอยติดตามความก้าวหน้า ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ อยู่เสมอ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมศักดิ์ เตียวสุรินทร์ และ ดร. ภราดร ภักดีวานิช ที่ได้ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ศุภสโรช หมื่นสิทธิ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สายัณห์ สดุดี และ ดร. จอมภพ แววศักดิ์ ที่ได้ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบและประเมินผลการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองต่าง ๆ

ขอขอบคุณ ผู้อำนวยการและเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดพัทลุงและจังหวัดปัตตานีทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนในการจัดเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดสอบคุณภาพต่าง ๆ จนทำให้การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่คอยให้การช่วยเหลือและคอยเป็นกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณอา คุณยาย พี่ชายและน้องชาย ที่คอยเป็นแรงบันดาลใจและเป็นที่ยึดเหนี่ยวในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายที่สุด ขอขอบคุณ พี่ตู่ สำหรับกำลังใจในการต่อสู้กับปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ตลอดมา ... อัล ฮัมดุลิลลาฮฺ ซูโกรต่อเอกองค์อัลลอฮฺ ซุบฮานะฮฺ วะ ตะอาลา ...

... โอ้อัลลอฮฺ ขอพระองค์ทรงโปรดอภัยให้แก่ข้าพระองค์และแก่พ่อแม่ของข้าพระองค์และขอพระองค์ได้ทรงประทานความเมตตาแก่ท่านทั้งสองตั้งที่ท่านทั้งสองได้เลี้ยงดูข้าพระองค์เมื่อครั้งเยาว์วัยและขอพระองค์ทรงรับคำวิงวอนของข้าพระองค์และงานของข้าพระองค์และขอพระองค์ทรงนำทางสว่างของพระองค์ด้วยเทอญ ...

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(15)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับข้าวและสารดูดซับความชื้น	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.3 ทฤษฎีการอบแห้งเบื้องต้น	20
2.4 สมการการอบแห้งชั้นบาง	22
2.5 พารามิเตอร์ทางกายภาพ	28
2.6 สมบัติทางความชื้น	31
2.7 สารดูดซับกับการดูดซับความชื้น	36
2.8 แนวทางการอบแห้งข้าวเปลือก	37
3 วิธีการดำเนินการวิจัย	42
3.1 การเตรียมตัวอย่าง วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง	43
3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง	45
3.3 การทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก	56
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	58
4.1 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสารดูดซับความชื้น	58
4.2 ผลการทดลองหาจลนศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้น	69
4.3 ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกเพื่ออัตราส่วนที่เหมาะสม	78
4.4 ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกระดับสัทธิการใช้งาน	84
4.5 ผลการทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก	94

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการอบแห้ง	96
5.1 การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้ง	96
5.2 การทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	107
5.3 ผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้ง	115
6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	123
6.1 สรุปผลการทดลอง	123
6.2 ข้อเสนอแนะ	125
บรรณานุกรม	126
ภาคผนวก	132
ก. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลและตัวอย่างสารละลายเกลืออิ่มตัว	133
ข. การแบ่งชนิดของข้าวและข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ที่ปลูกในประเทศไทย	136
ค. การวิเคราะห์ความชื้น	140
ง. ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	142
ประวัติผู้เขียน	151

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ปริมาณข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่ใช้ทดลองอบแห้งตามอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ในภาชนะอบแห้งขนาด 427.7 cm^3	52
3.2 ปริมาณข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่ใช้ทดลองอบแห้งในถังอบแห้งขนาด 20000.0 cm^3	55
4.1 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของแกลบ	62
4.2 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของแกลบ	63
4.3 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของทางใบสาคุ	63
4.4 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของทางใบสาคุ	63
4.5 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของกามมะพร้าว	64
4.6 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของกามมะพร้าว	64
4.7 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล	64
4.8 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของซิลิกาเจล	65
4.9 ค่าคงที่ของการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์เล็บนกปัตตานีและพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105	90
5.1 ผลการวิเคราะห์ค่า RMSE และ E% ระหว่างจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงขึ้นกับผลจากการทดลอง	115
5.1 (ต่อ)	116

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ข้าวเปลือกพันธุ์เล็บนกปีตทานี	5
2.2 ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105	6
2.3 ซิลิกาเจล	7
2.4 แกลบ	8
2.5 ทางใบสาคุ	8
2.6 กาบมะพร้าว	9
2.7 การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ซิลิกาเจล	17
2.8 การทดลองดูดซับความชื้นที่แค่นด้วยซิลิกาเจล	18
2.9 การอบแห้งในช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง	22
2.10 ปฏิกิริยาการขึ้นสีของข้าว	33
2.11 ประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นของสารดูดซับความชื้นชนิดต่าง ๆ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีการเปลี่ยนแปลง	37
2.12 โครงสร้างภาพตัดของเมล็ดข้าว	38
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	42
3.2 อุปกรณ์การทดลองหาความชื้นสมดุล	49
3.3 อุปกรณ์อบแห้งที่ใช้ทำอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม	53
3.4 อุปกรณ์อบแห้งที่ใช้อบแห้งระดับสาคิดการใช้งาน	56
4.1 ความหนาแน่นปรากฏของสารดูดซับความชื้น	59
4.2 เปรอ์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของสารดูดซับความชื้น	60
4.3 ความจุความร้อนจำเพาะของสารดูดซับความชื้น	61
4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสารดูดซับความชื้น	66
4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสารดูดซับความชื้น	67
4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นสมดุลของแกลบตามแบบจำลองของ Henderson (1952)	68
4.7 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของสารดูดซับความชื้นตามแบบจำลองของ Chung & Pfof (1967)	68
4.8 เปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งชั้นบางกับแบบจำลองเอมพิริคัลของซิลิกาเจล	70
4.9 เปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งชั้นบางกับแบบจำลองเอมพิริคัลของแกลบ	70

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.10 เปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งชั้นบางกับแบบจำลองเอมพิริคัลของทางใบสาคุและกาบมะพร้าว	71
4.11 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของทางใบสาคุและซิลิกาเจล	73
4.12 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของแกลบและกาบมะพร้าว	73
4.13 อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นที่มีต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของทางใบสาคุและกาบมะพร้าว	74
4.14 อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นที่มีต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของแกลบที่อุณหภูมิ 90.0°C	74
4.15 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งชั้นบางของสารดูดซับความชื้นความชื้นเริ่มต้น $27.6 \pm 0.2\%$ dry-basis	75
4.16 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งชั้นบางของสารดูดซับความชื้นความชื้นเริ่มต้น $15.4 \pm 0.2\%$ dry-basis	76
4.17 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งชั้นบางของสารดูดซับความชื้นความชื้นเริ่มต้น $20.3 \pm 0.1\%$ dry-basis	76
4.18 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของสารดูดซับความชื้น	77
4.19 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยแกลบที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ	78
4.20 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยทางใบสาคุที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ	79
4.21 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยกาบมะพร้าวที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ	80
4.22 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยซิลิกาเจลที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ	81
4.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยทางใบสาคุและกาบมะพร้าว	84
4.24 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยแกลบ	86
4.25 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่ออบแห้งด้วยทางใบสาคุ	86
4.26 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่ออบแห้งด้วยกาบมะพร้าว	87

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.27 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่ออบแห้งด้วยซิลิกาเจล	87
4.28 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์เล็บนกปัตตานี และพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการอบแห้งด้วยแกลบ ทางใบสาคร กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล	89
4.29 เปรียบเทียบผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการอบแห้ง ข้าวเปลือกด้วยซิลิกาเจลกับผลที่ได้จากการทดลอง	91
4.30 เปรียบเทียบผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการอบแห้ง ข้าวเปลือกด้วยทางใบสาครกับผลที่ได้จากการทดลอง	91
4.31 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยแกลบ	92
4.32 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยทางใบสาคร	93
4.33 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยกาบมะพร้าว	93
4.34 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยซิลิกาเจล	94
5.1 ผิวสัมผัสระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นในระบบอบแห้ง	100
5.2 การแพร่ความชื้นในสารดูดซับความชื้นที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก	103
5.3 การแพร่ความชื้นในสารดูดซับความชื้นที่มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์	104
5.4 การแพร่ความชื้นในสารดูดซับความชื้นที่มีลักษณะเป็นทรงกลม	106
5.5 ขั้นตอนการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	109
5.6 เปรียบเทียบผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยแกลบ	118
5.7 เปรียบเทียบผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยทางใบสาคร	118
5.8 เปรียบเทียบผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยกาบมะพร้าว	119
5.9 เปรียบเทียบผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยซิลิกาเจล	119
5.10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยแกลบ	120
5.11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยทางใบสาคร	121
5.12 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยกาบมะพร้าว	121

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.13 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยซิลิกาเจล	122

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	คือ พื้นที่ผิว (m^2)
A, B, C	คือ ค่าคงที่ของสมการ
a_w	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (decimal)
c_c	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของแคลอรีมิเตอร์ ($kJ/kg^\circ C$)
c_w	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ($kJ/kg^\circ C$)
c_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($kJ/kg^\circ C$)
D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)
DML	คือ มวลแห้งที่สูญเสีย (decimal)
D_0	คือ ค่าคงที่ของสมการ
$d.b.$	คือ มาตรฐานแห้ง (dry-basis)
E	คือ พลังงานกระตุ้น ($kcal/kg\ mol$)
EMC_A	คือ ความชื้นสมดุลของสารดูดซับความชื้น (% dry-basis)
EMC_p	คือ ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก (% dry-basis)
EMC_{total}	คือ ความชื้นสมดุลรวมของระบบ (% dry-basis)
h'	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ ($kJ/m^2\ ^\circ C$)
h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอ (kJ/kg)
k_d	คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง (min^{-1})
k_c	คือ สัมประสิทธิ์การพามวล (m^2/s)
l	คือ ความหนาของแผ่นแบบซึ่งกว้างและยาวมาก (m)
M	คือ ความชื้น (% dry-basis)
MR	คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)
\overline{MR}_t	คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ (decimal)
M_d	คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% dry-basis)
M_{eq}	คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis)
M_t	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (% dry-basis)
M_w	คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% dry-basis)
M_0	คือ ความชื้นเริ่มต้น (% dry-basis)
\dot{M}_w	คือ อัตราการถ่ายโอนมวล ($kg/s, kg/h$)
\dot{m}_w	คือ อัตราการระเหยของน้ำ (kg/h)
m_c	คือ มวลแคลอรีมิเตอร์ (kg)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

m_p	คือ มวลวัสดุ (kg)
m_w	คือ มวลน้ำ (kg)
ΔQ	คือ ความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม (kJ)
R	คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ เท่ากับ 8.314 kJ/kg mol K
RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
RH_a	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (%)
RH_g	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ในของผสม (%)
r	คือ ระยะตามแนวรัศมีของทรงกลม (m)
T	คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$, K)
$T_{ab.}$	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)
T_{eq}	คือ อุณหภูมิที่สมดุล ($^{\circ}\text{C}$)
T_g	คือ อุณหภูมิในของผสม ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{wb.}$	คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{c,0}$	คือ อุณหภูมิของแคลอรีมิเตอร์ที่สภาวะเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{p,0}$	คือ อุณหภูมิของวัสดุที่สภาวะเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{w,0}$	คือ อุณหภูมิของน้ำที่สภาวะเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)
T_{∞}	คือ อุณหภูมิของกระแสอากาศ ($^{\circ}\text{C}$)
t	คือ เวลา (s, min)
ΔU	คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน (kJ)
V	คือ ปริมาตร (m^3)
V_{oil}	คือ ปริมาตรของน้ำมันพืช (m^3)
W	คือ มวลเปียก (kg)
$w.b.$	คือ มาตรฐานเปียก (dry-basis)
ΔW	คือ งานที่แลกเปลี่ยนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม (kJ)
x	คือ ระยะตามแนวแกน x (m)
y	คือ ระยะตามแนวแกน y (m)
z	คือ ระยะตามแนวแกน z (m)
ρ	คือ ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)
ε	คือ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ (%)
α	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

#01

#02

#03

#04

#05

#06

#07

#08

#09

#10

คือ หมายเลขแสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในถังอบแห้ง

คือ หมายเลขแสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในถังควบคุม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

สารดูดซับ (Adsorbent) นับว่าเป็นวัสดุสำคัญทั้งในด้านอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม เพราะในปัจจุบันได้มีการนำสารดูดซับชนิดต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นการดูดซับความชื้นในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเพื่อลดความชื้นสำหรับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การดูดซับความชื้นในผลผลิตทางการเกษตร เช่น ข้าวเปลือกชื้น และเมล็ดธัญพืช (Cereal grain) ชนิดต่าง ๆ ด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การดูดซับโลหะหนัก ตะกั่ว ทองแดง และแคดเมียมในน้ำทิ้ง การดูดซับธาตุทอง และการดูดซับคราบน้ำมันในน้ำด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ เช่น เยื่อกระดาษ (Plant fibre) ซิลิกาเจล (Silica gel) แกลบ (Rice husk) ไม้ถ่าน (Charcoal ash) กาบมะพร้าว (Coconut husk) ฟางข้าว (Rice straw) เปลือกไข่ (Egg shell) ทางใบสาธุ (Sago palm rachis) และถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นต้น

การใช้สารดูดซับดูดซับความชื้นในผลผลิตทางการเกษตรก็นับว่ามีความสำคัญ โดยเฉพาะในประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรมและเป็นที่ทราบกันดีว่าประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่สามารถผลิตข้าวได้ในปริมาณมากเป็นอันดับต้น ๆ ของโลก อาทิเช่น ในปี พ.ศ. 2547 มีผลผลิตโดยเฉลี่ยประมาณ 26.5 ล้านตันต่อปี (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2547) อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบหลังการเก็บเกี่ยวข้าว คือ ข้าวเปลือกที่ได้มีความชื้นสูง คือ จะอยู่ในช่วง 25.0-39.0% dry-basis (ดูภาคผนวก ค. 1) โดยเฉพาะข้าวนาปรังที่ต้องเก็บเกี่ยวในช่วงฤดูฝน (สมชาติ, 2543; ชาญ, 2536)

การลดความชื้นข้าวเปลือกให้อยู่ในช่วงความชื้นต่ำเพียงพอที่จะเก็บรักษาไว้ได้ ประมาณ 14.0-16.0% dry-basis (สมชาติ, 2543; งามชื่น และคณะ, 2545) เป็นเรื่องที่ยุ่งยากเพราะไม่สามารถทำการตากลานได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาทราบว่าข้าวเปลือกชื้นเมื่อกองสะสมกันไว้หรือเก็บในกระสอบจะเกิดการสะสมความร้อนอันเนื่องมาจากการหายใจ (ลือพงษ์ และคณะ, 2545) เช่น เมื่อเก็บไว้ในกระสอบพลาสติกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง อุณหภูมิจะสูงถึง $53 \pm 4^{\circ}\text{C}$ (Tirawanichakul *et al.*, 2003) นอกจากนี้ที่อุณหภูมิและความชื้นสูงยังเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา เช่น เชื้อจุลินทรีย์และแมลงชนิดต่าง ๆ (Abe and Basunia, 1996) ที่จะเข้ามาทำลายข้าวเปลือกทำให้ข้าวมีคุณภาพต่ำลงและเสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็ว (วันชัย, 2542)

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การลดความชื้นข้าวเปลือกจะมีวิธีการและเทคโนโลยีต่างๆ แตกต่างกันไป อาทิเช่น การตากแดดข้าวเปลือกเป็นชั้นบางๆ บนลานคอนกรีต (Imoudu and Olufayo, 2000) หรือใช้เครื่องอบแห้ง (สมชาติ, 2540) อบเมล็ดข้าวเปลือกก็เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยิยมใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือก แต่การที่จะลดความชื้นข้าวเปลือกให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือประมาณ 14.0-16.0% dry-basis (งามชื่น และคณะ, 2545) นั้นจะต้องกระทำด้วยวิธีการที่เหมาะสมและถูกวิธี เนื่องจากการตากแดดหรือใช้เครื่องอบแห้งนั้นจะทำให้เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นระหว่างการอบแห้งนี้จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพของเมล็ดข้าวขึ้น คือ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพเพิ่มมากขึ้น เช่น ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดลดลง (สมชาติ, 2543; Imoudu and Olufayo, 2000) เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลทำให้ข้าวสารที่ได้มีสีเหลืองรวมถึงมีผลต่อการงอกของเมล็ดอีกด้วย (Soponronnarit et al., 1998) ดังนั้น เพื่อเป็นการลดปัญหาและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับข้าวเปลือกดังกล่าว การนำสารดูดซับความชื้นมาใช้ในการดูดซับความชื้นออกจากข้าวเปลือกจึงอาจเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดความชื้นข้าวเปลือกให้มีค่าความชื้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยไม่ทำให้คุณภาพและมูลค่าหลังการเก็บเกี่ยวลดลง

งานวิจัยนี้จึงได้นำสารดูดซับความชื้นชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่หาง่าย ไม่มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งและสามารถที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกเป็นสารดูดซับในการดูดซับความชื้นจากข้าวเปลือกให้มีค่าความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาเพื่อทำเป็นเมล็ดพันธุ์หรือรอการจัดจำหน่ายในทางพาณิชย์ต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษากระบวนการดูดซับความชื้น (Moisture adsorption) ข้าวเปลือกด้วยสารดูดซับความชื้นจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (Agricultural residue) และซิลิกาเจล
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของการลดความชื้นโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นต่อคุณภาพทางกายภาพ (Physical quality) ของข้าวเปลือก

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการดูดซับความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้ แกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าว และซิลิกาเจล เป็นสารดูดซับความชื้น โดยใช้ความชื้นเริ่มต้นของสารดูดซับความชื้นในช่วง 5.0-11.0% dry-basis

2) ใช้ข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์เล็บนกปัตตานีและสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ได้จากศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดพัทลุงและศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดปัตตานี ความชื้นเริ่มต้นในช่วง 22.0–31.5% dry-basis

3) หาค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสารดูดซับความชื้นและปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Inoue *et al.* (2002) เพื่อทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น

4) หาสมาการความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC) และสมการการอบแห้งชั้นบาง (Thin layer drying equation) ที่เหมาะสมของสารดูดซับความชื้น

5) ทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกหลังการดูดซับความชื้นในรูปของข้าวเต็มเมล็ด (Head rice yield) ร้อยละการงอก (Percentage of germination) และร้อยละความขาว (Percentage of whiteness) เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับข้าวและสารดูดซับความชื้น

2.1.1 ข้าว (Rice)

“ ข้าว ” เป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญมากในประเทศที่กำลังพัฒนา เป็นอาหารประจำวันของประชากรกว่าครึ่งหนึ่งของประชากรโลก 3 พันกว่าล้านคน ในกว่า 200 ประเทศทั่วโลก โดยประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ของเมล็ดพืชทั่วโลกเป็นเมล็ดข้าว รองลงมาคือ ข้าวสาลี มีประเทศที่ปลูกข้าวประมาณ 113 ประเทศในทุกทวีป ยกเว้นทวีปแอนตาร์คติกซึ่งปกคลุมไปด้วยน้ำแข็ง มีเอเชียเป็นทวีปที่ปลูกข้าวมากที่สุดในโลกถึงร้อยละ 90 ของผลผลิตทั่วโลก (Acquaah, 2005) มีจีนและอินเดียเป็นแหล่งผลิตข้าวรายใหญ่ที่สุด สามารถผลิตได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณข้าวทั้งหมด แต่ส่วนใหญ่จะใช้บริโภคภายในประเทศ ส่วนประเทศไทยเป็นประเทศที่สามารถส่งออกข้าวได้มากที่สุดในโลก ทำให้ปัจจุบันข้าวเป็นที่รู้จักและมีการเพาะปลูกเพื่อการบริโภคเป็นอาหารหลักกันอย่างกว้างขวางของประชากรเกือบทุกประเทศทั่วโลก ตามชนิดของข้าวที่สามารถปลูกได้ตามสภาพภูมิประเทศนั้น ๆ ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของข้าวตามแหล่งกำเนิดได้ 2 ชนิด ดังนี้ (ประพาส, 2531)

1) ข้าวเอเชีย : เป็นข้าวชนิด *Oryza sativa* L. สามารถปรับตัวต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี ขึ้นได้ในพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันของสภาพภูมิศาสตร์อย่างมากได้ ตั้งแต่ที่มีน้ำท่วมจนถึงที่แห้งบนภูเขา แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1.1) ข้าวอินดิกา (*Indica*) : เป็นข้าวอินเดีย มีปลูกมากในเขตร้อนแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ศรีลังกา จีนตอนใต้และตอนกลาง อินเดียรวมถึงประเทศไทย เป็นต้น

1.2) ข้าวจาปอนิกา (*Japonica* or *Sinica*) : เป็นข้าวญี่ปุ่น มีการปลูกมากในเขตอบอุ่น เช่น ทางตอนเหนือและตะวันออกของจีนและประเทศเกาหลี เป็นต้น

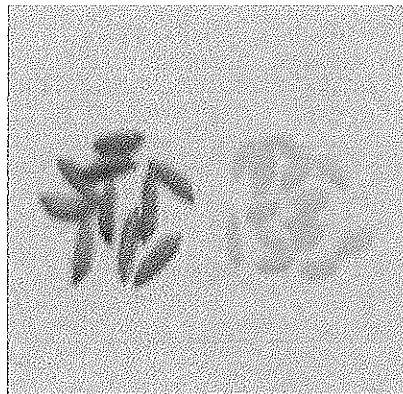
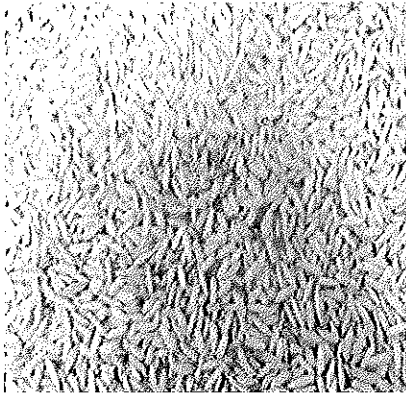
1.3) ข้าวจาวานิกา (*Javanica* or *Bulu*) : เป็นข้าวอินโดนีเซียหรือข้าวชวา มีการปลูกในประเทศอินโดนีเซียเท่านั้น

2) ข้าวแอฟริกา : เป็นข้าวชนิด *Oryza glaberrima* L. มีการปลูกในทวีปแอฟริกาเท่านั้น

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์เล็บนกปัตตานีและสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีสมบัติเฉพาะดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ข้าวเล็บนกปัตตานี (Leb Nok Pattani)

1.1) ประวัติพันธุ์ : เป็นข้าวสายพันธุ์ Indica ได้จากการเก็บรวบรวมข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่นิยมปลูกทางภาคใต้ โดยนักวิชาการจากสถานีทดลองข้าวปัตตานี ภายใต้การดำเนินงานในรูปแบบของการประสานงานวิจัยและส่งเสริมการเกษตร เมื่อปี พ.ศ. 2527 จำนวน 307 พันธุ์ จาก 107 อำเภอ 14 จังหวัด พ.ศ. 2527-2530 ปลูกคัดเลือกพันธุ์แบบหมู่ (Mass selection) ประเมินค่าและจัดหมวดหมู่ พร้อมทั้งปลูกศึกษาพันธุ์ที่สถานีทดลองข้าวปัตตานี ได้สายพันธุ์เล็บนก PTNC 84210 ได้รับการประเมินเป็นสายพันธุ์ดีเด่น พ.ศ. 2531-2532 ปลูกเปรียบเทียบผลผลิตภายในสถานีที่สถานีทดลองข้าวปัตตานี และปลูกคัดเลือกพันธุ์บริสุทธิ์ (Pure-line selection) แบบรวงต่อแถว พ.ศ. 2533-2535 ปลูกเปรียบเทียบผลผลิตระหว่างสถานีที่ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุงและสถานีเครือข่าย พ.ศ. 2536 ปลูกขยายเป็นเมล็ดพันธุ์คัดและเมล็ดพันธุ์หลัก



ภาพประกอบที่ 2.1 ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี

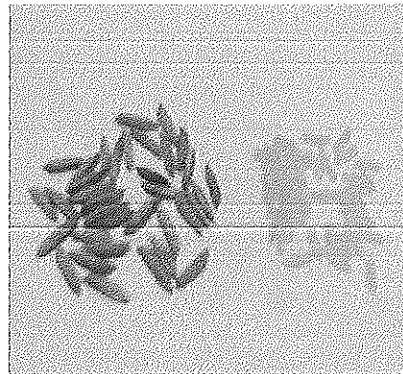
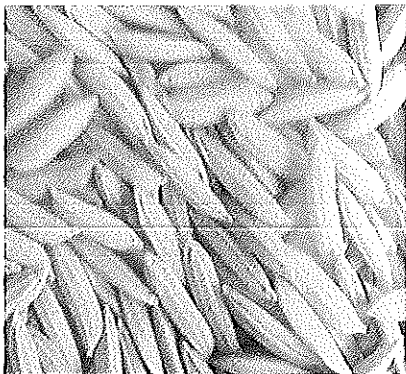
1.2) ลักษณะประจำพันธุ์ : เป็นข้าวเจ้าพื้นเมือง ไวต่อช่วงแสง (ดูภาคผนวก ข. 1-3) ลำต้นสูงประมาณ 170 cm อายุหนัก วันออกดอกประมาณกลางถึงปลายเดือนมกราคม อายุเก็บเกี่ยวประมาณกุมภาพันธ์ มีใบธงแผ่เป็นแฉนวนอน คอรวงยาว รวงยาวจับกันแน่น ระแงะถี่ เมล็ดข้าวเรียวยาวเล็ก ก้นจุก เปลือกสีฟาง ยอดเมล็ดสีม่วง ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 3 สัปดาห์ มีเมล็ดข้าวกลวง กว้าง 2.1 mm ยาว 6.0 mm หนา 1.7 mm มีท้องไขปานกลาง ปริมาณแอมิโลสสูงประมาณ 23-28% คุณภาพข้าวสุกอ่อน นุ่ม รสชาติดี

1.3) ผลผลิต : ประมาณ 481 กิโลกรัมต่อไร่

1.4) ลักษณะเด่น : ให้ผลผลิตค่อนข้างสูงเมื่อปลูกในสภาพนาที่ลุ่มน้ำแห้งซ้ำ มีคุณภาพการสีดีมาก คุณภาพการหุงต้มดี ข้าวสุกอ่อน รสชาติดี เป็นที่นิยมของผู้บริโภค ไม่พบการทำลายของโรคและแมลงในธรรมชาติ

2) พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105)

2.1) ประวัติพันธุ์ : เป็นข้าวสายพันธุ์ Indica ได้มาโดย นายสุนทร สีหะเนิน พนักงานเกษตร รวบรวมจากอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา เมื่อ พ.ศ. 2493-2494 จำนวน 199 รวง แล้วนำไปคัดเลือกแบบคัดพันธุ์บริสุทธิ์และปลูกเปรียบเทียบพันธุ์ที่สถานีทดลองข้าวโคกสำโรง แล้วปลูกเปรียบเทียบพันธุ์ท้องถิ่นในภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



ภาพประกอบที่ 2.2 ข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

2.2) ลักษณะประจำพันธุ์ : เป็นข้าวเจ้าหอม ลำต้นสูงประมาณ 140-150 cm เป็นข้าวไวต่อช่วงแสงปลูกได้เฉพาะนาปี ลำต้นสีเขียวจาง ใบสีเขียวยาวค่อนข้างแคบ ฟางอ่อน ใบธงทำมุมกว้างกับรวง เมล็ดข้าวรูปร่างเรียวยาว ข้าวเปลือกสีฟาง จะออกดอกประมาณวันที่ 20 ตุลาคม และสุกแก่เก็บเกี่ยวได้ประมาณวันที่ 20 พฤศจิกายนของทุกปี อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 25 พฤศจิกายน มีระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์ ขนาดเมล็ดข้าวกล็อง ยาว 7.2-7.6 mm กว้าง 2.1 mm หนา 1.8 mm มีปริมาณแอมิโลส 12-17% คุณภาพข้าวสุกนุ่มหอม ปลูกได้ในที่นาดอนทั่วไป ทนแล้ง ทนดินเปรี้ยว ทนดินเค็ม คุณภาพการหุงต้มดี อุณหภูมิแป้งสุกต่ำ ความคงตัวแป้งสุกอ่อน ข้าวสุกนุ่มและเหนียว มีกลิ่นหอม รสชาติดี

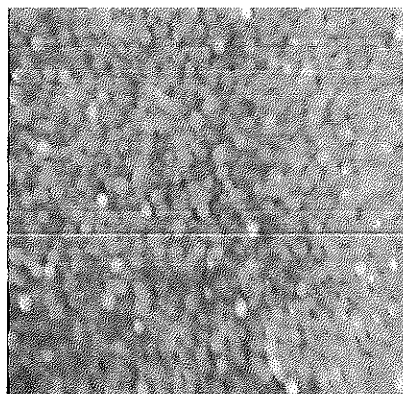
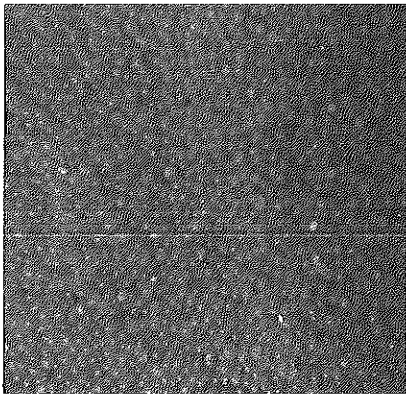
2.3) ผลผลิต : ประมาณ 363 กิโลกรัมต่อไร่

2.4) ลักษณะเด่น : ทนแล้งได้ดีพอสมควร ปลูกเป็นข้าวไร่ได้ เมล็ดข้าวสารใส แกร่ง คุณภาพการขัดสีดี คุณภาพการหุงต้มมีกลิ่นหอมและอ่อนนุ่ม โรงสีมีความต้องการสูง จำหน่ายได้ราคาดี แดกกอดี ต้นสูงเก็บเกี่ยวง่าย ทนต่อสภาพดินเปรี้ยวและดินเค็ม

2.1.2 สารดูดซับความชื้น (Moisture Adsorbent)

1) ซิลิกาเจล

ซิลิกาเจล ผลิตจากซิลิกาซึ่งสกัดจากทรายขาวผสมกรดกำมะถันที่เป็นพอลิเมอร์ของกรดซิลิซิก (Silicic) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ มีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ดกลมใสหรือสีน้ำเงิน มีจุดเดือดสูงกว่า 2230°C มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่า $800 \text{ m}^2/\text{g}$ เป็นสารดูดซับความชื้นที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ใส่ไหลดูดความชื้นสำหรับห้องปฏิบัติการทางเคมี ใส่ในท่อของเพื่อดูดความชื้นระหว่างการขนส่ง ใช้ในเครื่องดูดความชื้นและใช้ในการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์พืช เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 2.3 ซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลที่ใช้ทั่วไปมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ๆ เหมือนลูกปัดบางครั้งมีการใส่ลิเทียมคลอไรด์ทำให้เปลี่ยนสีได้ กล่าวคือ เป็นสีน้ำเงินเมื่อแห้ง และเป็นสีชมพู ดังภาพประกอบที่ 2.3 เมื่อดูดซับความชื้นเข้าไปมากพอ (อิมตัวจากความชื้น) เช่น เมื่อซิลิกาเจลดูดซับความชื้น 20, 35 และ 50% ซิลิกาเจลจะกลายเป็นสีน้ำเงินอ่อน ๆ สีเทาหรือม่วง และสีชมพู ตามลำดับ ซิลิกาเจลไม่มีพิษสามารถดูดซับความชื้นได้ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว โดยขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขณะนั้น ๆ เช่น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 20, 30 และ 40% ซิลิกาเจลสามารถดูดซับความชื้นได้ 10, 23 และ 32% ตามลำดับ และสามารถไล่ความชื้นออกได้โดยการเผาหรืออบที่อุณหภูมิประมาณ 150°C นานประมาณ 3 ชั่วโมง ทำให้สามารถนำมาใช้ซ้ำได้อีก

2) แกลบ

แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือกประมาณ 1 ใน 5 หรือร้อยละ 20-28 ของข้าวเปลือก แล้วแต่ชนิดของพันธุ์ข้าวเปลือกที่แตกต่างกัน (ละมุล, 2541) ดังภาพประกอบที่ 2.4

ในปัจจุบันได้มีการนำแกลบไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในหลายลักษณะ เช่น นำแกลบมาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งหรือนำแกลบมาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงก็ได้ เนื่องจากแกลบมีน้ำหนักเบาและเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน จึงได้มีการนำแกลบมาจับตะกั่ว คราบน้ำมันหรือสารพิษเจือปนในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (กฤษณ์ และ ศิริพร, 2545) และทำเป็นตัวดูดซับความชื้นข้าวเปลือกชื้น (Tirawanichakul *et al.*, 2003) เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 2.4 แกลบ

3) ทางใบสาคุ

ต้นสาคุ (สมศักดิ์, 2530; Chunjula, 1999) เป็นพืชท้องถิ่นทางภาคใต้ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้จากส่วนต่าง ๆ ของต้นเกือบทุกส่วน เช่น เปลือกก้านใบ ใช้ทำวัสดุก่อสร้าง ฝาผนังหรือทำเป็นไม้ระแนงหรือทาด้วยน้ำมันสามารถใช้เป็นเครื่องประดับได้ เปลือก ใช้ทำวัสดุปูพื้นหรือเชื้อเพลิง ก้านใบหรือทางใบสาคุ ดังภาพประกอบที่ 2.5 เมื่อแห้งแล้วนำมาลอกเปลือกก้านใบออกใช้ทำจุกอุดขวด ทุ่นลอยในการทำกระถางและเชื้อเพลิง เป็นต้น

ทางใบ
สาคุ

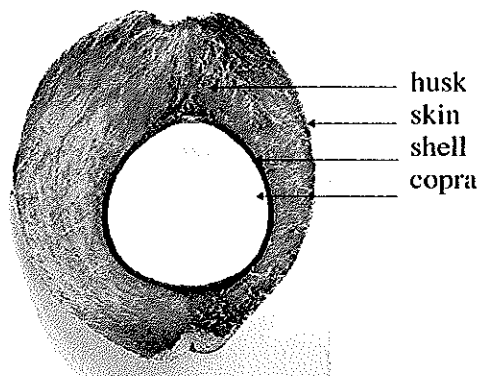


ภาพประกอบที่ 2.5 ทางใบสาคุ

ทางใบสาครเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนจึงสามารถนำทางใบสาครที่แห้งแล้วจากต้นหรือที่เหลือจากการนำใบไปใช้ประโยชน์มาทำเป็นสารดูดซับความชื้นได้

4) กาบมะพร้าว (Coconut husk)

กาบมะพร้าว เป็นส่วนที่อยู่ถัดไปจากเปลือกนอกที่หุ้มลูกมะพร้าวอยู่ จะช่วยป้องกันไม่ให้ผลถูกทำลาย ประกอบด้วยเส้นใยและขุยเม็ดเล็ก ๆ มีคุณสมบัติแข็งแรง คงทน ต่อน้ำและน้ำทะเล มีความยืดหยุ่นและสปริงดี นำมาทำเชือก ทำพรม กระสอบ ไม้กวาดหรือทำแปรงชนิดต่าง ๆ เส้นใย ใช้อัดไส้ทำเบาะที่นอน เบาะรถยนต์หรือใช้ทำเชือก เป็นต้น เมื่อนำกาบมะพร้าวมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ เช่น ตัดเป็นทรงลูกบาศก์ขนาดประมาณ 0.3-5.1 เซนติเมตร ดังภาพประกอบที่ 2.6 จะสามารถนำมาใช้แทนหรือผสมกับดินในกระถางเพื่อปลูกไม้ดอกไม้ประดับหรือใช้เพาะเมล็ดพืชได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ Manju *et al.* (1998) ได้ทำการเตรียมคาร์บอนจากกาบมะพร้าวเพื่อใช้เป็นสารดูดซับในการดูดซับ As (III) ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยในเมือง Cochin (Kerala) ประเทศอินเดีย โดยคาร์บอนที่เตรียมได้จะมีความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.5 มีพื้นที่ผิว $206 \text{ m}^2/\text{g}$ มีความหนาแน่น 1.38 g/ml และมีความเป็นรูพรุนเท่ากับ 0.53 ml/g เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 2.6 กาบมะพร้าว (Jan *et al.*, 2004)

นอกจากแกลบ ทางใบสาครและกาบมะพร้าว จะเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนแล้วยังเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีราคาถูกและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เมื่อนำมาตากแดดหรือทำให้แห้งจะทำให้ส่วนที่เป็นรูพรุนสามารถดูดน้ำหรือของเหลวเข้าไปได้ เมื่อนำมาตัด หั่นหรือบดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ จะสามารถนำมาใช้เป็นสารดูดซับความชื้นได้ จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับความชื้นเมล็ดพืชหรือผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวได้ เช่น เมล็ดข้าวเปลือก เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้แกลบ ทางใบสาคร กาบมะพร้าวและชิลิกาเจลเป็นสารดูดซับความชื้นข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางการอบแห้ง

การอบแห้งเมล็ดพืชและผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิดโดยใช้อากาศร้อนเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เพราะสามารถลดความชื้นให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้รวดเร็ว แต่การอบแห้งจะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การออกแบบระบบอบแห้งให้เหมาะสมกับวัสดุนั้น ๆ โดยเฉพาะเมล็ดพืช เพราะการอบแห้ง จะมีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมีและทางชีวภาพของเมล็ดพืชแต่ละชนิดแตกต่างกัน ดังนั้น การศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการอบแห้งจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ดังรายงาน การวิจัยต่อไปนี้

Basunia and Abe (2005) ได้ศึกษาการทำเปียกชั้นบางข้าวเปลือกเมล็ดกลาง (Japonica of nonponbare variety) ที่อุณหภูมิสูงและต่ำ โดยใช้อุณหภูมิ 17.8-45.0°C ความชื้นสัมพัทธ์ 56.0-89.3% และความชื้นเริ่มต้นในช่วง 12.26-12.71% dry-basis ตามลำดับ พบว่าแบบจำลอง Page เหมาะสมที่สุดในการอธิบายการทำเปียกโดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.14% dry-basis โดยการทำให้เปียกจะดำเนินไปอย่างรวดเร็วและเพิ่มมากขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น

Iguaz *et al.* (2004) ได้พัฒนาแบบจำลองในการทำนายอุณหภูมิและค่าความชื้นของข้าวเปลือกขนาดกลาง (Lido cultivar) ในถังเก็บรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.30 m สูง 3.95 m ใช้สภาวะอุณหภูมิแวดล้อมและไม่มีอากาศไหลผ่านข้าวเปลือก โดยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference model) สองมิติ จำลองแบบการอบแห้งในรูปของการถ่ายโอนมวลและความร้อน โดยบรรจุข้าวเปลือกในถังสูง 2.30 m ความชื้นเริ่มต้น 10.6% dry-basis ทำการวัดอุณหภูมิ 4 จุด ทุก ๆ 30 นาที ที่ตำแหน่ง (z, r) ของถังอบเท่ากับ (0.46, 0.39), (0.92, 0.52), (1.38, 0.65) และ (1.84, 0.39) ตามลำดับ ใช้เวลาทดลองประมาณ 1-2 สัปดาห์ พบว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำนายอุณหภูมิและค่าความชื้นสามารถใช้งานได้โดยมีความสัมพันธ์กันกับการถ่ายโอนมวลและความร้อนในกองข้าวเปลือก โดยค่าของอุณหภูมิที่ทำนายด้วยแบบจำลองเป็นไปตามการทดลองทั้ง 4 จุด แต่ที่จุด 1 กับ 4 มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก มีค่า Standard error (S.E.) และ Average absolute difference (AAD) เท่ากับ 0.62-2.03 และ 0.56-1.90°C ตามลำดับ

Iguaz *et al.* (2003) ได้พัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของข้าวเปลือกขนาดกลาง (Lido cultivar) ความชื้นเริ่มต้น 25% dry-basis ที่อุณหภูมิ 5, 12,

25 และ 35°C ความชื้นสัมพัทธ์ 30–70% ความเร็วลม 0.75 และ 2.50 m/s ตามลำดับ ในการทดลองได้ใช้แบบจำลอง 4 แบบ ได้แก่ แบบจำลอง Single exponential แบบจำลอง Biparametric exponential แบบจำลอง Page และแบบจำลอง Two term exponential พบว่าแบบจำลอง Biparametric exponential และแบบจำลอง Page ใช้ได้ดีสำหรับการอบแห้งชั้นบางที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่ำ โดยที่แบบจำลอง Biparametric exponential ใช้ง่ายไม่สลับซับซ้อนและให้ค่า Mean regression coefficient (R^2) สูงกว่า แบบจำลอง Page

Tirawanichakul *et al.* (2003) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกชั้นภายใต้สภาวะอากาศเขตร้อนชื้นในภาคสนาม ด้วยเทคนิคฟลูอิดไรเซชันโดยการเป่าอากาศแวดล้อมและใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดซับความชื้น ที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเท่ากับ 22.0–28.3% dry-basis พบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไรเซชันในช่วง $19.1 \pm 1.5\%$ dry-basis และแบบใช้สารดูดซับความชื้นอยู่ในช่วง $15.0 \pm 1.8\%$ dry-basis สุดท้ายพบว่า ความชื้นสุดท้ายภายหลังการอบแห้งทั้งสองแบบมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน

Tirawanichakul *et al.* (2002) ได้ศึกษาค่าความขาวและคุณภาพของข้าวในรูปของค่าความแข็ง ความเหนียว การยึดเกาะติด ความหนืด และร้อยละการงอกของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบแห้งในที่เก็บ (In-store paddy drying) โดยทำการทดลองและเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบใกล้สมดุล (Near-equilibrium model) โดยใช้ข้าวเปลือกเมล็ดยาวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ที่มีปริมาณแอมิโลสประมาณ 27% ทดลองที่อุณหภูมิแวดล้อม $30 \pm 4^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $76 \pm 4\%$ ชั้นข้าวเปลือกสูง 1.0 m ความชื้นเริ่มต้น 22.7–25.2% dry-basis เป่าอากาศผ่านกองข้าวต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลของอากาศจำเพาะ $0.65\text{--}0.93 \text{ m}^3/\text{min}\text{-m}^3$ ของข้าวเปลือก จนมีความชื้นสุดท้ายประมาณ $15.4 \pm 0.6\%$ dry-basis พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายอัตราการอบแห้งและค่าความขาวของข้าวสอดคล้องกับผลการทดลอง สรุปได้ว่า การอบแห้งในที่เก็บไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความขาวของข้าวเปลือก และร้อยละการงอกของเมล็ดข้าว แต่ค่าความแข็ง ความเหนียว การยึดเกาะติดกันและความหนืดของข้าวอ้างอิงและข้าวหลังอบแห้ง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยหลังการอบแห้งข้าวจะมีค่าความแข็ง ความเหนียว การยึดเกาะติดกันและความหนืดเพิ่มสูงขึ้น

Tirawanichakul *et al.* (2002) ได้ศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของข้าวเมล็ดยาว (*Indica rice*) ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงและต่ำ ในเทอมของร้อยละของข้าวเต็มเมล็ด ค่าความขาวและค่าความแข็ง โดยเลือกพันธุ์ข้าว 2 ชนิด คือ สายพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ที่มีปริมาณแอมิโลส 27% และสายพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่มีปริมาณแอมิโลส 15–17%

ความชื้นเริ่มต้น 34.4-41.3% dry-basis อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน (Fluidization) ที่อุณหภูมิ 40-150°C จนเหลือความชื้นประมาณ 28.3% dry-basis แล้วนำไปเป่าด้วยอากาศ แวดล้อมจนความชื้นสุดท้ายประมาณ 19.0% dry-basis พบว่า ค่าความขาวและร้อยละข้าวเต็มเมล็ด เมื่ออบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80°C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิงที่ระดับความชื้น 95% ($p \leq 0.05$) แต่ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการอบแห้งข้าวเปลือกชั้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C ขึ้นไป ค่าร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดเพิ่มขึ้นและค่าความขาวลดลงเล็กน้อย

Tirawanichakul et al. (2001) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเหลืองของข้าวเปลือกโดยการอบแห้งแบบชั้นหนา ใช้สมการแบบใกล้เคียงของ Soponronnarit (1994) โดยให้อากาศไหลอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิแวดล้อม ความชื้นเริ่มต้น 25.2% dry-basis จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 16.3% dry-basis พบว่า แบบจำลองครอบคลุมอุณหภูมิแวดล้อมระหว่าง 30-40°C ความชื้นสัมพัทธ์ 60-90% ถึงอบแห้งสูง 1.8-3.6 m อัตราการไหลของอากาศช่วง 0.35-1.00 m³/min-m³ ของข้าวเปลือก โดยที่ค่าความเหลืองจะแปรผันตรงตามอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความหนาของชั้นหนาและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและแปรผกผันกับอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น

Imoudu and Olufayo (2000) ศึกษาคุณภาพและเปอร์เซ็นต์ข้าวหักหลังการสีเนื่องจากการตากบนลานคอนกรีตและเสื่อภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมของดวงอาทิตย์ที่ 30-40°C ความชื้นสัมพัทธ์ 70.0-82.6% ใช้ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 10, 12, 14 และ 16% dry-basis แบ่งเป็นข้าวึ่ง (Parboiled) และข้าวไม่ึ่ง (Non-parboiled) พันธุ์ *Oryza* ทดลองโดยการนำข้าวที่ผ่านการตากบนลานคอนกรีตความชื้นต่าง ๆ กัน ไปขัดสีแล้วชั่งหาน้ำหนักข้าวเต็มเมล็ดและข้าวหัก โดยทำซ้ำ 4 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 82.6, 79.0, 64.0, 71.0 และ 70.0% ตามลำดับ พบว่า ค่าความชื้นก่อนการขัดสีที่ผ่านการตากบนลานคอนกรีตมีผลสำคัญต่อคุณภาพหลังการขัดสีและเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก โดยเปอร์เซ็นต์ข้าวหักน้อยที่สุดที่ค่าความชื้น 12 และ 14% dry-basis คือ น้อยกว่า 34 และ 48% สำหรับข้าวึ่งและข้าวไม่ึ่ง ตามลำดับ นอกจากนี้ข้าวที่ตากบนลานคอนกรีตให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสูงและข้าวหักต่ำกว่าที่ตากบนเสื่อ เพราะขณะที่ทำการตากบนลานคอนกรีตความชื้นจะมีการถ่ายโอนไปยังพื้นคอนกรีต นอกจากนี้เมื่ออัตราการอบแห้งเป็นไปอย่างช้า ๆ จะทำให้คุณภาพข้าวหลังการขัดสีสูงขึ้นอีกด้วย

Basunia and Abe (1999) ได้ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้นข้าวเปลือกเมล็ดขนาดกลาง (*Japonica* variety) อบแห้งแบบชั้นบางในช่วงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเท่ากับ 56.0-89.3% และ 17.8-45.0°C ตามลำดับ แล้วหาค่า Equilibrium moisture content/Equilibrium relative humidity (EMC/ERH) พบว่า สมการดัดแปลงของ Chung &

content/Equilibrium relative humidity (EMC/ERH) พบว่า สมการดัดแปลงของ Chung & Pfof (1976) สามารถอธิบายผลของ EMC/ERH ของไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นข้าวเปลือกได้ดีที่สุด

Soponronnarit et al. (1998) ได้ศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเหลือของข้าวเปลือกพร้อมทั้งสร้างสมการแบบจำลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ โดยทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ในระบบปิด ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 24% dry-basis อุณหภูมิ 35, 45, 55, 60 และ 65°C และใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวเป็นตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 80-95% พบว่า อัตราการเหลือของข้าวเปลือกเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 130-145 kJ/mol ค่าคงที่อัตราการเหลือเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแบบเอกซโปเนนเชียลและเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์แบบเชิงเส้น ได้สมการทำนายอัตราการเหลือที่สามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 35-65°C และ 80-95% ตามลำดับ ดังนี้

$$\ln k = \alpha - \delta a_w - \frac{\varepsilon}{T} + \frac{v a_w}{T} \quad (2.1)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราการเหลือ (b unit/day)

a_w คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (decimal)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$\alpha, \delta, \varepsilon$ และ v คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 71.87, 25.32, 25919.13 และ 10712.78 ตามลำดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าคงที่อัตราการเหลือ พบว่า T , a_w และปฏิสัมพันธ์ร่วมของทั้งสองปัจจัย มีอิทธิพลต่ออัตราการเหลือของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเมื่ออุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ค่าความเหลือของข้าวเปลือกจะสูงขึ้นตามไปด้วย

2.2.2 การอบแห้งโดยใช้สารดูดความชื้นเป็นตัวกลางการอบแห้ง

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้สารดูดซับที่ได้จากธรรมชาติ สิ่งมีชีวิต วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ ฯลฯ ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ในด้านอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อมได้มีการนำ *Chlorella vulgaris* แกลบและถ่านกัมมันต์ดูดซับธาตุทอง พบว่า แกลบสามารถดูดซับธาตุทองได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์และ *Chlorella vulgaris* (Nakbanpote et al., 2002) อัญชสิทธิ์ และคณะ (2545) ใช้วัสดุชีวภาพดูดซับไอออน

ของตะกั่ว เหล็ก และแคดเมียมที่สังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น ผลการทดลองสรุปได้ว่า เส้นผมมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วมากที่สุด คือ 95-97% ในขณะที่ กฤษณ์ และ ศิริพร (2545) พบว่า โลหะตะกั่ว (+2) จากการทดลองของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ อุตสาหกรรมชุบโลหะ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ถูกดูดซับด้วยไส้สับประดมากกว่าหญ้าสลาบลวง ขณะที่ฝ้ายเหมาะสมที่สุดในการนำไปดูดซับคราบน้ำมันเตาในน้ำของแม่น้ำเจ้าพระยา (สุรินทร์ และ อรไท, 2543) นอกจากนี้ยังได้มีการนำถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากขี้เลื่อยและกลบไปดูดซับสีย้อม (Acid Yellow 36) พบว่า สามารถดูดซับได้ 183.8 และ 86.9 mg/adsorbent ตามลำดับ โดยการดูดซับจะขึ้นอยู่กับเวลาและความเป็นกรด-ต่าง (Malik, 2003)

ในด้านเกษตรกรรม การดูดซับความชื้นจากเมล็ดธัญพืช เช่น ข้าวเปลือก ข้าวสาลี ถั่วเหลือง ข้าวโพดและอื่น ๆ นับว่าเป็นสิ่งสำคัญ เพราะการดูดซับความชื้นออกจากเมล็ดพืชนั้นจะทำให้สามารถเก็บรักษาเมล็ดพืชไว้ได้นานขึ้นโดยไม่ทำให้สมบัติและคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีเสียไป ซึ่งจะมีเทคนิคและพารามิเตอร์ต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้องกับการลดความชื้น ดังรายงานการวิจัยต่อไปนี้

กิตติศักดิ์ และคณะ (2547) ได้ศึกษาอัตราส่วนระหว่างปริมาตรกลบกับข้าวเปลือก อุณหภูมิ ความชื้นเริ่มต้นของกลบที่มีผลต่อระยะเวลาในการดูดซับความชื้นข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง โดยทดลองในภาชนะที่ปิดสนิทและหุ้มด้วยฉนวน ใช้ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 33% dry-basis อัตราส่วนผสมระหว่างกลบต่อข้าวเปลือกเป็น 0.8:1, 1.5:1 และ 2.0:1 โดยปริมาตร อุณหภูมิเริ่มต้นของกลบ 33, 45, 60 และ 90°C ตรงกับความชื้นเริ่มต้นของกลบประมาณ 11.5, 5.0, 2.5 และ 0.8% dry-basis พบว่า ที่ความชื้นเริ่มต้นของกลบต่ำจะสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วกว่าที่ความชื้นเริ่มต้นของกลบสูง โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของกลบต่อข้าวเปลือกให้สูงขึ้นจาก 0.8:1 เป็น 1.5:1 โดยปริมาตร จะทำให้สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้เร็วขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนที่มากเกินไป จาก 1.5:1 เป็น 2.0:1 โดยปริมาตร จะไม่สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้มากนักเมื่อเทียบกับการเพิ่มอัตราส่วนจาก 0.8:1 เป็น 1.5:1 โดยปริมาตร และเมื่อวิเคราะห์คุณภาพของข้าวเปลือก พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นของกลบและอัตราส่วนผสมระหว่างกลบกับข้าวเปลือกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าวและความขาว

ภาวิกา (2547) ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่างกลบและข้าวเปลือก ผลของความหนาแน่นปรากฏของกลบที่มีต่ออัตราการอบแห้งและคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง โดยใช้ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 33% dry-basis จำนวน 1 kg ผสมกับกลบความชื้นเริ่มต้นประมาณ 11% dry-basis ที่มีความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 105 kg/m³ และที่บด

ด้วยเครื่องบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ขนาดช่องเปิด 500 ไมโครเมตร ให้มีความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 160 และ 230 kg/m³ ที่อัตราส่วนผสมของแกลบต่อข้าวเปลือกเท่ากับ 1.0:1, 1.5:1 และ 2.0:1 โดยปริมาตร พบว่า การเพิ่มความหนาแน่นปรากฏของแกลบและอัตราส่วนผสมของแกลบต่อข้าวเปลือกที่สูงขึ้น จะสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้เร็วกว่าการใช้อัตราส่วนผสมและความหนาแน่นปรากฏต่ำ แต่ที่อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบและข้าวเปลือกสูงกว่า 1.5:1 โดยปริมาตร อัตราการอบแห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและความชื้นของข้าวเปลือกจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สูงอยู่จึงทำการเปลี่ยนแกลบชุดใหม่ที่มีความชื้นเริ่มต้นเหมือนชุดแรก คือ ประมาณ 11% dry-basis เข้าไปแทนที่ โดยทดลองเปลี่ยนแกลบ 6 รอบ ๆ ละ 2 ชั่วโมง รวมเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 32.5% dry-basis เป็น 25.2, 23.8 และ 22.8% dry-basis สอดคล้องกับความหนาแน่นปรากฏของแกลบที่ 105, 160 และ 230 kg/m³ และการทดสอบคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งในรูปของข้าวเต็มเมล็ด พบว่า ข้าวเต็มเมล็ดมีค่าใกล้เคียงกันกับข้าวเต็มเมล็ดของข้าวอ้างอิง

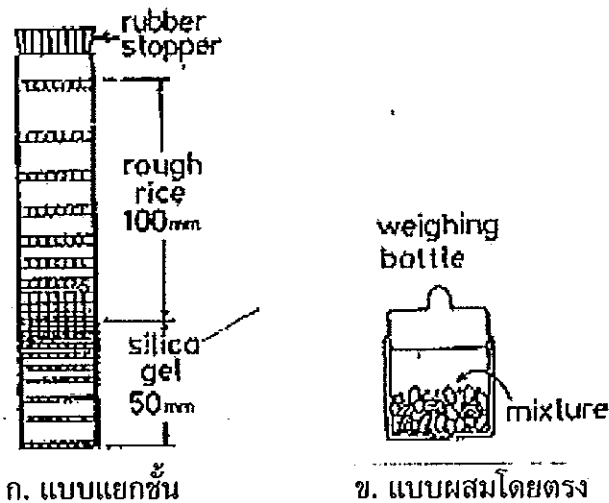
วันพุธ (2544) ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับความชื้นของเบตซิลิกาเจลที่มีความหนาแตกต่างกัน โดยใช้พัดลมแบบหอยโข่งพัดอากาศแวดล้อมที่มีความชื้น ผ่านเบตซิลิกาเจลหนา 0.03 และ 0.05 m ตามลำดับ และทดลองให้อากาศไหลผ่านเบตซิลิกาเจลเป็นเวลา 3, 6, 8, 12 และ 24 h ตามลำดับ พบว่า เบตซิลิกาเจลที่มีความหนา 0.03 m ใช้เวลาในการอิมตัว 12 h และเบตซิลิกาเจลที่มีความหนา 0.05 m ใช้เวลาในการอิมตัว 18 h โดยเบตซิลิกาเจลที่มีความหนา 0.03 m สามารถลดความชื้นจากอากาศแวดล้อมได้เฉลี่ย 6.5% มีอัตราการดูดซับความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 33.75 g/h ส่วนเบตซิลิกาเจลที่มีความหนา 0.05 m สามารถดูดซับความชื้นจากอากาศแวดล้อมได้ 13.2% อัตราการดูดซับความชื้นเฉลี่ยประมาณ 98.63 g/h จึงสามารถสรุปได้ว่า อัตราการดูดซับความชื้นของเบตซิลิกาเจลที่มีความหนาเท่ากับ 0.05 m สามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่าเบตซิลิกาเจลที่มีความหนา 0.03 m ประมาณ 3 เท่า แต่ต้องใช้ปริมาณซิลิกาเจลมากกว่า 2 เท่า

ฉัตรชัย (2531) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการเก็บเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง สจ. 5 ในกระป๋องปิดผนึกร่วมกับซิลิกาเจล ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักเมล็ด และเก็บรวมกับข้าวคั่ว ข้าวโพดคั่ว และปุนเผา ที่อัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ของน้ำหนักเมล็ด เปรียบเทียบกับการเก็บรักษาในกระป๋องพลาสติกปิดผนึกโดยไม่มีสารดูดซับความชื้นและเก็บรักษาในสภาพธรรมดา คือ เปิดฝากระป๋องไว้แล้วเก็บไว้ในห้องที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลา 12 เดือน สุ่มตัวอย่างมาทดสอบคุณภาพทุก ๆ 2 เดือน พบว่า เมล็ดพันธุ์ที่เก็บในสภาพธรรมดามีค่าความชื้นของเมล็ดเปลี่ยนแปลงไปตาม

ความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศในห้องเก็บ ส่วนเมล็ดพันธุ์ที่เก็บไว้ในกระป๋องที่ปิดผนึก แต่ไม่ผสมเข้ากับสารดูดซับความชื้น เมล็ดพันธุ์จะมีความชื้นคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บและเมล็ดพันธุ์ที่เก็บโดยผสมเข้ากับซิลิกาเจล ข้าวคั่ว ข้าวโพดคั่วและปูนเผา ความชื้นของเมล็ดจะลดลงตามอัตราส่วนของสารดูดซับความชื้นที่เพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยเมล็ดพันธุ์จะเข้าสู่สมดุลทางความชื้นในเดือนที่ 2 ของการเก็บรักษา และปูนเผามีประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นมากที่สุด คือ สามารถลดความชื้นจาก 8.7% dry-basis เหลือเพียง 1.3-3.8% dry-basis และการใช้ ซิลิกาเจลที่อัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเมล็ด ขึ้นไป ข้าวคั่วและข้าวโพดคั่วที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ของน้ำหนักเมล็ด ขึ้นไป และปูนเผาที่อัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 25 ของน้ำหนักเมล็ด เป็นสารดูดซับความชื้น จะสามารถรักษาเมล็ดพันธุ์ให้มีความงอกอยู่ในระดับที่สูงกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ไว้ได้นาน 1 ปี

Yamaguchi and Kawasaki (1994) ทดลองดูดซับความชื้นข้าวเปลือกเมล็ดสั้น (*Japonica*) ความชื้นเริ่มต้น 0.41 kg/kg-Solid ด้วยซิลิกาเจลขนาด 14-28 mesh ความชื้นประมาณ 0 kg/kg-Solid โดยแยกการทดลองออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ทดลองโดยการแยกชั้นระหว่างข้าวเปลือกและซิลิกาเจลในภาชนะรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 25 mm สูง 150 mm โดยบรรจุซิลิกาเจลไว้ที่ส่วนล่างของทรงกระบอกสูง 50 mm ส่วนข้าวเปลือกจะบรรจุไว้ด้านบนสูง 100 mm ทรงกระบอกที่ใช้ทดลองประกอบด้วยวงแหวนที่มีความสูง 2-17 mm มาเชื่อมต่อกันโดยพื้นด้วยพลาสติกเทป ดังภาพประกอบที่ 2.7 ก. เมื่อบรรจุข้าวเปลือกและซิลิกาเจลเข้าไปแล้วทรงกระบอกจะถูกปิดแล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนแบบที่ 2 ทดลองโดยการผสมข้าวเปลือกขึ้นเข้ากับซิลิกาเจลในขวดทดลองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 mm และ สูง 30 mm ดังภาพประกอบที่ 2.7 ข. ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและซิลิกาเจลเท่ากับ 1:0.3, 1:0.5, 1:0.7 และ 1:0.8 โดยมวล ทดลองที่อุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิเท่ากับ 3, 23 และ 45°C ระหว่างการทดลองทำการแยกและชั่งน้ำหนักทุก ๆ 2, 4, 8,..., 128 h พบว่า การทดลองแบบที่ 1 จะลดความชื้นได้น้อยมากแม้เวลาการอบแห้งจะผ่านไปเป็นเวลานานกว่า 5 วัน และที่ระดับความสูงตั้งแต่ 50 mm ขึ้นไป จากรอยต่อระหว่างข้าวเปลือกและซิลิกาเจล ความชื้นของข้าวเปลือกจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีการร้าวเกิดขึ้น ส่วนการทดลองแบบที่ 2 ที่อัตราส่วนผสม 1:0.8 โดยมวล อุณหภูมิ 3, 23 และ 45°C จะใช้เวลาเท่ากับ 40, 18 และ 3 h ตามลำดับ ในการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 0.41 kg/kg-Solid ให้เหลือ 17 kg/kg-Solid เมื่อนำไปศึกษาการร้าวของเมล็ด พบว่า ที่อุณหภูมิ 3°C และ 23°C ร้อยละการร้าวของเมล็ดจะต่ำกว่า 5% แต่จะมีค่ามากกว่า 5% ที่อุณหภูมิ 45°C แต่เมื่อเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าที่อัตราส่วนผสมโดยมวลระหว่างข้าวเปลือกและซิลิกาเจลเท่ากับ 1:0.6, 1:0.7 และ 1:0.8 จะสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 0.41 kg/kg-Solid ให้เหลือ 17 kg/kg-Solid ต้องใช้เวลานาน 30, 18 และ 18 h ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า การทดลองแบบที่ 1 ไม่เหมาะสม

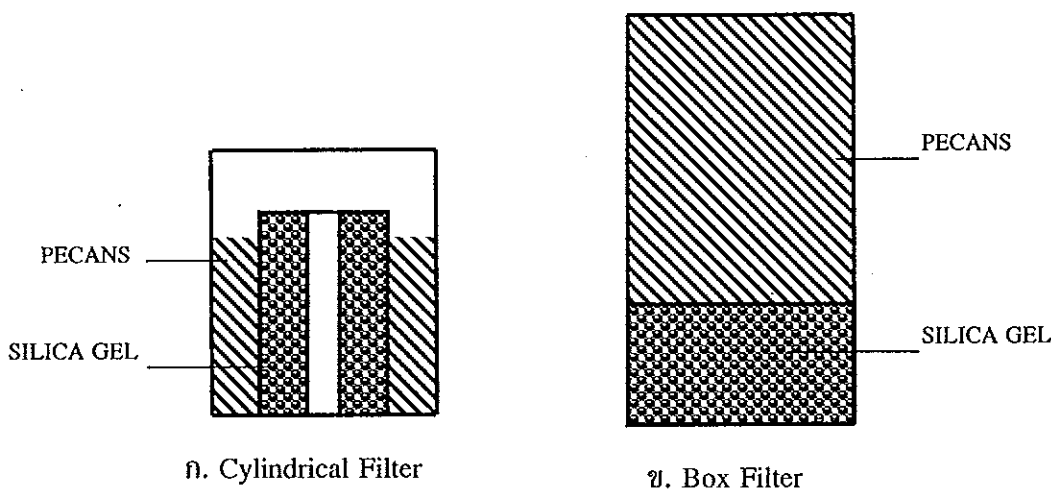
ที่จะนำมาใช้ลดความชื้นข้าวเปลือกเนื่องจากประสิทธิภาพการลดความชื้นต่ำและต้องใช้เวลาในการอบแห้งทำให้เกิดการร้าวในเมล็ดข้าวเปลือก แบบที่ 2 ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและซิลิกาเจลเท่ากับ 1:0.8 โดยมวล อุณหภูมิ 23°C เหมาะสมที่สุดในการใช้ลดความชื้นข้าวเปลือก เพราะใช้เวลาน้อยและการร้าวของเมล็ดข้าวเปลือกอยู่ในระดับต่ำกว่า .5%



ภาพประกอบที่ 2.7 การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ซิลิกาเจล
(Yamaguchi and Kawasaki, 1994)

Ghate *et al.* (1983) ได้ทำการทดลองดูดซับความชื้นพีแคน (Pecans) ด้วยซิลิกาเจลเกรด 42 ของบริษัท Davidson chemical division แยกการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง ทำการผสมพีแคนเข้ากับซิลิกาเจลโดยตรง โดยใช้ซิลิกาเจล 180 g อัตราส่วนผสมของซิลิกาเจลต่อพีแคนเท่ากับ 1.0:1, 1.5:1 และ 0.3:1 โดยมวล พบว่า ที่อัตราส่วน 1.0:1 โดยมวล สามารถลดความชื้นพีแคนได้สูงที่สุด คือ ลดความชื้นจาก 14.3% เป็น 4.5% ภายในเวลา 15 h และที่อัตราส่วนผสม 0.3:1 โดยมวล ต้องใช้เวลา 21 h จึงจะลดความชื้นได้เท่ากับที่อัตราส่วนผสม 1.0:1 โดยมวล ทำให้สรุปได้ว่า อัตราการอบแห้งจะลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของซิลิกาเจลที่ใช้มีค่าลดลง ส่วนที่สอง ทดลองโดยผสมพีแคนเข้ากับซิลิกาเจลแล้วบรรจุไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท 2 ลักษณะ คือ ภาชนะรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 73 mm สูง 162 mm โดยบรรจุซิลิกาเจลไว้ที่ส่วนในของทรงกระบอกและบรรจุพีแคนจำนวน 180 g ไว้ที่ส่วนนอกของทรงกระบอกซึ่งเป็นวงแหวนซ้อนกัน ดังภาพประกอบที่ 2.8 ก. และบรรจุพีแคนจำนวน 180 g ในกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 152 mm ยาว 152 mm และสูง 216 mm ดังภาพประกอบที่ 2.8 ข. พบว่า อัตราการอบแห้งจะช้ากว่าการทดลองโดยการผสมกันโดยตรงเหมือนส่วนที่หนึ่ง โดยการทดลองที่ใช้ภาชนะรูปทรงกระบอกจะให้อัตราการอบแห้งดีกว่าการใช้กล่องสี่เหลี่ยม กล่าวคือ การทดลองในภาชนะรูปทรงกระบอก จะลดความชื้นให้เหลือ 4.5% ที่อัตราส่วน

1.0:1 และ 0.3:2 โดยมวล ภายในเวลา 22 และ 48 h ตามลำดับ ส่วนที่ใช้กล่องสี่เหลี่ยม พบว่า พีแคนที่อยู่ติดกับ ซิลิกาเจลสามารถลดความชื้นให้เหลือ 4.5% ภายใน 24 h แต่พีแคนที่อยู่ บนสุดความชื้นจะลดลงน้อยมาก คือ ใช้เวลาถึง 96 h ความชื้นของพีแคนถึงจะลดลงเหลือ 6.5% ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า การทดลองอบแห้งแบบแยกชั้นระหว่างเมล็ดพืชและสารดูดความชื้นไม่ สมควรที่จะนำมาใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืชเนื่องจากมีอัตราการอบแห้งต่ำและความชื้นที่ระยะ ต่าง ๆ มีค่าไม่สม่ำเสมอ



ภาพประกอบที่ 2.8 การทดลองดูดซับความชื้นพีแคนด้วยซิลิกาเจล
(ดัดแปลงจาก Ghate *et al.*, 1983)

Sturton *et al.* (1983) ได้ทำการทดลองและพัฒนาสมการในการหาความชื้น ที่ถ่ายโอนระหว่างข้าวโพดและเบนโตไนท์ (Bentonite) โดยใช้ข้าวโพด 6 ตัวอย่าง ผสมเข้ากับ เบนโตไนท์โดยตรงที่ความชื้นเริ่มต้นของเบนโตไนท์และข้าวโพดในช่วง 0.05-13.55 และ 29.80-40.26% dry-basis ตามลำดับ เมื่อทำการผสมข้าวโพดและเบนโตไนท์แล้วนำไปบรรจุไว้ในโถงที่ถูกปิดสนิท ขนาด 455 mm โดยตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อหา ความชื้น 6-8 ครั้ง ในหนึ่งสัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า ปริมาณความชื้นของข้าวโพดลดลง อย่างรวดเร็วใน 20 h แรก ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการ ดังนี้

$$m = m_0 - a_c(1 - e^{-b_c t}) \quad (2.2)$$

ส่วนความชื้นของเบนโตไนท์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$m = m_0 - a_b(1 - e^{-b_b t}) \quad (2.3)$$

- เมื่อ m คือ ปริมาณความชื้นของวัสดุ ณ เวลาใด ๆ (h)
- m_0 คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (% dry-basis)
- t คือ เวลา (h)
- a_b และ a_c คือ ค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างของความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายที่สมดุลของเบนโทไนท์และข้าวโพด ตามลำดับ
- b_b และ b_c คือ ค่าคงที่ ซึ่งสัมพันธ์กับการเข้าสู่จุดสมดุลของเส้นกราฟของเบนโทไนท์และข้าวโพด ตามลำดับ

โดยค่า a_b, a_c, b_b และ b_c สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีของ Hooke and jeeves optimization นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่า a_b และ a_c มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับ d ดังนี้

$$a_b = -2.6671 + (0.5102d) \quad (2.4)$$

$$a_c = -0.3368 + (0.4296d) \quad (2.5)$$

- เมื่อ d คือ ผลต่างของปริมาณความชื้นเริ่มต้นระหว่างข้าวโพดและเบนโทไนท์ ค่า b_b และ b_c จะแปรผันระหว่าง 0.1744 และ 0.4941

Sturton *et al.* (1981) ได้ทำการทดลองอบแห้งเมล็ดพืชโดยใช้เบนโทไนท์เป็นสารดูดซับความชื้น โดยใช้ไวโอมิ่งเบนโทไนท์ขนาด 80 mesh ความชื้นเริ่มต้นในช่วง 2.5–8.2% dry-basis ความหนาแน่นเท่ากับ 1121 kg/m³ ไปทำการดูดซับความชื้นในเมล็ดข้าวสาลี ข้าวโอ๊ตและข้าวโพด ที่มีความชื้นเริ่มต้น 17.7, 28.3 และ 29.2–36.9% dry-basis ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวสาลีและข้าวโอ๊ตต่อไวโอมิ่งเบนโทไนท์ที่ 1:1.0, 1:2.0 และ 2:1.0 โดยมีมวล ส่วนข้าวโพดใช้ที่อัตราส่วนผสม 1:1.0, 1:2.0 และ 1:3.0 โดยมีมวล ไวโอมิ่งเบนโทไนท์มีความชื้นเริ่มต้น 3.1 และ 3.5% dry-basis ดูดซับความชื้นในข้าวสาลีและข้าวโอ๊ต ส่วนข้าวโพดใช้ไวโอมิ่งเบนโทไนท์ต่อจากการดูดซับความชื้นในข้าวสาลีและข้าวโอ๊ตแล้ว ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 7.8 และ 8.2% dry-basis ตามลำดับ เมื่อผสมเมล็ดพืชกับไวโอมิ่งเบนโทไนท์แล้วจะถูกบรรจุลงในถังขนาด 150 ลิตร และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องตลอดการทดลอง พบว่าที่อัตราส่วนผสมระหว่างเมล็ดพืชต่อไวโอมิ่งเบนโทไนท์เท่ากับ 1:1.0 โดยมีมวล ความชื้นเริ่มต้นของไวโอมิ่งเบนโทไนท์ในช่วง 2.5–8.2% dry-basis มีความเหมาะสมที่สุดในการอบแห้งข้าวสาลี

ข้าวโอ๊ตและข้าวโพด ส่วนข้าวโพดที่ใช้ไวโอมิงเบนโตไนท์ความชื้นเริ่มต้น 8.5 และ 9.0% dry-basis พบว่า ที่อัตราส่วนผสม 1:2.0 และ 1:3.0 โดยมวล สามารถนำมาใช้ในการอบแห้งได้และยังพบอีกว่า คุณภาพของเมล็ดพืชทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีการเสื่อมสภาพหลังจากการทดลองอบแห้ง

2.3 ทฤษฎีการอบแห้งเบื้องต้น (สมชาติ, 2540; Brooker, 1981)

การอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางการอบแห้ง ความร้อนจะมีการถ่ายโอนจากกระแสน้ำอากาศไปยังผิวของวัสดุที่นำมาอบแห้งเช่นเดียวกับข้าวเปลือกและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่นำมาใช้เป็นสารดูดซับความชื้น ความร้อนจากอากาศแวดล้อมในห้องอบแห้งจะถูกถ่ายโอนให้กับผิวของวัสดุที่นำมาอบแห้งโดยวิธีการพาความร้อน การนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ทำให้น้ำหรือของเหลวที่อยู่ในเนื้อวัสดุมีการระเหยออกจากวัสดุโดยความชื้นแฝงของการระเหยหรือการกลายเป็นไอ

เมล็ดพืชและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ข้าวเปลือก แกลบ ทางใบสาธูและกาบมะพร้าวหรือสารดูดซับความชื้นที่เป็นสารสังเคราะห์ เช่น ซิลิกาเจล จัดเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ทำให้น้ำหรือของเหลวจับตัวอยู่บนผิวของวัสดุและน้ำหรือของเหลวอีกส่วนหนึ่งไปแทรกอยู่ในรูพรุนต่างๆ ของวัสดุ ทำให้สามารถแบ่งการอบแห้งวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนออกเป็น 2 ช่วง คือ 1) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และ 2) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ดังภาพประกอบที่ 2.9 หากพิจารณาเฉพาะการอบแห้งข้าวเปลือก จะพบว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการอบแห้งเพราะในช่วงต้นของการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกจะมีความชื้นสูงและมีโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ที่ผิวของเมล็ดเป็นจำนวนมาก ทำให้การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวเท่านั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นหรืออัตราการอบแห้งจึงมีค่าคงที่ เมื่อความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าสูงกว่าความชื้นวิกฤติ (Critical moisture content) คือ ค่าความชื้นวัสดุขณะที่อัตราการอบแห้งเริ่มเปลี่ยนแปลงจากอัตราการอบแห้งคงที่เป็นอัตราการอบแห้งลดลง เมื่อผ่านกระแสน้ำอากาศไปบนเมล็ดข้าวเปลือก การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกเท่านั้น โดยน้ำจะมีการระเหยออกจากเมล็ดข้าวเปลือกไปยังอากาศ ที่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ น้ำจะมีการเคลื่อนที่จากภายในเมล็ดข้าวเปลือกมาที่ผิวในลักษณะของของเหลวและไอน้ำ โดยน้ำที่ผิวจะมีการระเหยออกไปยังอากาศ ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวจะเกิดขึ้นในระยะแรกขณะที่เมล็ดข้าวเปลือกยังมีความชื้นที่สูงอยู่แต่เมื่อความชื้นลดต่ำลงมากน้ำจะมีการเคลื่อนที่ในรูปของไอน้ำและโมเลกุลของน้ำที่เกาะอยู่ภายในผนังของช่องว่างหรือรูพรุนหนาเพียงสองสามชั้นของโมเลกุลเท่านั้น โดยปกติวัสดุที่มีความชื้นเริ่มต้นไม่สูงมากนัก เช่น เมล็ดพืชหรือข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวจะมีค่าความชื้นอยู่ในช่วง

ประมาณ 25.0-39.0% dry-basis การอบแห้งส่วนใหญ่จึงอยู่ในช่วงของอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น (สมชาติ, 2540)

2.3.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate period)

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่จะมีลักษณะหรือกลไกของการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลระหว่างวัสดุกับอากาศเหมือนกับการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือ จะเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบ ๆ ผิวของวัสดุเท่านั้น โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของกระแสอากาศ มีอัตราการระเหยของน้ำเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากอากาศมายังวัสดุต่อความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำหรือเท่ากับอัตราการถ่ายโอนมวล ดังสมการ

$$\dot{m}_w = \frac{h'A(T_\infty - T_{wb})}{h_{fg}} \quad (2.6)$$

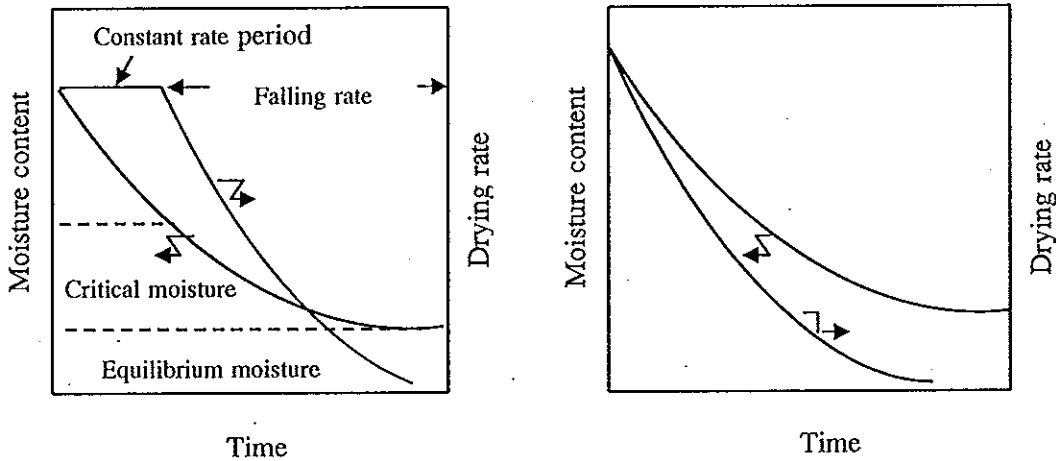
เมื่อ	\dot{m}_w	คือ อัตราการระเหยของน้ำ (kg/h)
	h'	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ ($\text{kJ/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)
	A	คือ พื้นที่สัมผัสของวัสดุกับอากาศ (m^2)
	T_∞	คือ อุณหภูมิของกระแสอากาศแวดล้อม ($^\circ\text{C}$)
	T_{wb}	คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก ($^\circ\text{C}$)
	h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอ (kJ/kg)

จากสมการ (2.6) จะเห็นว่าอัตราการระเหยของน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของลมวิธีนี้จะทำให้ความหนาของชั้นอากาศนิ่งที่อยู่รอบ ๆ ผิววัสดุมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มอัตราการระเหยน้ำได้อีกโดยการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งหรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งเป็นการทำให้ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น

2.3.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate period)

ช่วงของอัตราการอบแห้งลดลงนี้ ความชื้นของวัสดุจะมีค่าต่ำกว่าปริมาณความชื้นวิกฤติ การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความร้อนจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนหรืออัตราการอบแห้งลดลงและจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการ

เคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในวัสดุทำให้เกิดเกรตไยน์ที่ความชื้นและอุณหภูมิในวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิระเปาะเป็ยของอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น



ก. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

ข. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ภาพประกอบที่ 2.9 การอบแห้งในช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง
(ดัดแปลงจาก สมชาติ, 2540)

2.4 สมการการอบแห้งชั้นบาง (สมชาติ, 2540)

สมการการอบแห้งชั้นบาง คือ สมการที่เขียนขึ้นโดยใช้ทฤษฎีหรือผลการทดลองหรือทั้งสองประกอบกันเพื่อนำมาใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งตลอดจนผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการอบแห้งวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ สมการการอบแห้งชั้นบางสามารถแบ่งออกเป็น สมการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoretical equation) สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical equation) และสมการอบแห้งเอมพิริคัล (Empirical equation)

1) สมการอบแห้งทางทฤษฎี

ได้มีการนำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนในช่วงการอบแห้งลดลง เช่น Luikov (1966) ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุที่อาจเกิดขึ้นในแบบต่างๆ ดังนี้

1.1) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจาก Capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว

- 1.2) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น
- 1.3) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากการแพร่ความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็ก ๆ
- 1.4) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น
- 1.5) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ
- 1.6) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวและไอเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม

กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุดังกล่าว Luikov (1966) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิและความดันรวม แต่แบบจำลองของ Luikov (1966) มีความยุ่งยากมากเพราะมีตัวแปรและพารามิเตอร์หลายตัว จึงยังไม่มีให้นำแบบจำลองไปใช้ แต่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น โดยน้ำจะเคลื่อนที่มายังผิวของวัสดุแล้วจึงระเหยกลายเป็นไอ โดยอัตราการถ่ายโอนมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของการถ่ายโอนมวลแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนต์ความเข้มข้นของความชื้น สามารถเขียนได้ว่า

$$\dot{M}_w = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.7)$$

เมื่อ	\dot{M}_w	คือ อัตราการถ่ายโอนมวล (kg/h)
	A	คือ พื้นที่การถ่ายโอนมวล (m^2)
	C	คือ ความเข้มข้นของความชื้น (kg/m^3)
	x	คือ ระยะตามแนวแกน x (m)
	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)

จากสมการ (2.7) หากกำหนดสภาวะขอบเขตและสภาวะเริ่มต้นสำหรับวัสดุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง l_x ความยาว l_y และความหนา l_z ส่วนวัสดุรูปทรงกลมกำหนดให้มีรัศมี r จะสามารถเขียนเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตได้ ดังนี้

- สำหรับวัสดุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่กว้าง l_x ยาว l_y และหนา l_z
 สภาวะเริ่มต้น $M(x, y, z, 0) = M_0$

สภาวะขอบเขต $M(0, y, z, t) = M(x, 0, z, t) = M(x, y, 0, t) = M_{eq}$
 $M(l_x, y, z, t) = M(x, l_y, z, t) = M(x, y, l_z, t)$

○ สำหรับวัสดุรูปทรงกลมรัศมี r

สภาวะเริ่มต้น $M(r, 0) = M_0$

สภาวะขอบเขต $M(r_0, t) = M_{eq}$

กำหนดให้

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_0 - M_{eq})} \quad (2.8)$$

เมื่อ	M	คือ ความชื้น (% dry-basis)
	M_0	คือ ความชื้นเริ่มต้น (% dry-basis)
	M_{eq}	คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis)
	M_t	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (% dry-basis)
	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)
	r	คือ ระยะตามแนวรัศมี (m)
	r_0	คือ รัศมีทรงกลม (m)
	l_x, l_y, l_z	คือ ความหนาตามแนวแกน x, y และ z (m)
	x, y, z	คือ แนวแกน x, y และ z (m)
	t	คือ เวลา (min)

จากวิธีเชิงวิเคราะห์จะได้ผลเฉลยสำหรับการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุรูปทรงต่าง ๆ ดังนี้ (สมชาติ, 2540)

○ สำหรับวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (Infinite slab)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2p+1)^2} \right] \exp \left[-\frac{(2p+1)^2 \pi^2 Dt}{l^2} \right] \quad (2.9)$$

○ สำหรับวัสดุทรงลูกบาศก์ (Cubic shape)

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2} \right)^3 \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2n+1)^2} \right]^3 \exp \left[-3 \frac{(2n+1)^2 \pi^2 Dt}{l^2} \right] \quad (2.10)$$

○ สำหรับวัสดุทรงกลม (Sphere)

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) \exp \left[- \left(\frac{n\pi A}{3V} \right)^2 Dt \right] \quad (2.11)$$

○ สำหรับวัสดุทรงกระบอกยาวมาก (Infinite cylinder)

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4l}{\lambda_n^2} \right) \exp \left[- \left(\frac{\lambda_n A}{2V} \right)^2 Dt \right] \quad (2.12)$$

สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและอุณหภูมิ
ลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งได้จากสมการของอาเรเนียส (Arrhenius equation) ดังนี้

$$D = D_0 \exp \left[- \frac{E}{R(T + 273.15)} \right] \quad (2.13)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)
	A	คือ พื้นที่ผิว (m^2)
	V	คือ ปริมาตร (m^3)
	n	คือ จำนวนเต็ม มีค่าเท่ากับ 0, 1, 2, ..., ∞
	λ_n	คือ รากของเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์
	l	คือ ความหนาของแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (m)
	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)
	D_0	คือ ค่าคงที่ของสมการ
	t	คือ เวลา (min)
	E	คือ พลังงานกระตุ้น (kcal/kg mol)
	R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 (kJ/kg mol K)
	T	คือ อุณหภูมิลมร้อน ($^{\circ}C$)

โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สมการ (2.9), (2.10) และ (2.11) ในการคำนวณ
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของสารดูดซับความชื้นซึ่งสอดคล้องกับรูปทรงของ แกลบ ทางใบ
สาขุ กาบมะพร้าวและชิลิกาเจล

2) สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

การนำสมการทางทฤษฎีที่ประกอบด้วยจำนวนพจน์ที่ไม่สิ้นสุดมาใช้งานไม่เป็นที่ยอมรับจึงพยายามทำให้ง่ายขึ้นโดยการตัดพจน์หลังๆ ซึ่งมีค่าน้อย ๆ ทิ้งไป เพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณ ดังนั้นจากสมการ (2.11) ถ้าคงไว้เพียงพจน์แรกจะทำให้ได้สมการ ดังนี้

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D\pi^2 t}{r_0^2}\right) \quad (2.14)$$

$$\text{หรือ} \quad MR = \frac{6}{\pi^2} \exp(-kt) \quad (2.15)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)
	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)
	t	คือ เวลา (min)
	r_0	คือ รัศมีทรงกลม (m)
	k_d	คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง (min^{-1})

สมการ (2.11) และ (2.14) จะให้ค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามากและความแตกต่างจะน้อยกว่า 5% ถ้าอัตราส่วน $D\pi^2 t/r_0^2$ มีค่ามากกว่า 1.2 (สมชาติ, 2540) ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองการอบแห้งได้โดยการสมมติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นและความชื้นสมดุลของวัสดุ สมมติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) เมื่อเขียนในรูปสมการอบแห้งจะได้ ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = -k_d(M - M_{eq}) \quad (2.16)$$

สภาวะเริ่มต้น	$M(0) = M_0$
สภาวะขอบเขต	$M(t) = M_{eq}$

โดยการอินทิเกรต สมการ (2.16) จะได้

$$MR = \exp(-k_d t) \quad (2.17)$$

เมื่อ	M	คือ ความชื้น (% dry-basis)
-------	-----	----------------------------

M_0	คือ ความชื้นเริ่มต้น (% dry-basis)
M_{eq}	คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis)
MR	คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)
k_d	คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง (min^{-1})
t	คือ เวลา (min)

3) สมการอบแห้งเอมพิริคัล

สมการอบแห้งเอมพิริคัล คือ สมการที่สร้างจากข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุในช่วงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมของการอบแห้งค่าหนึ่ง สามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดีแต่มีข้อจำกัดในเรื่องของเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องตรงกับสภาวะการทดลองนั้น ๆ ได้มีผู้เสนอสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัลไว้หลายท่านด้วยกัน ดังเช่น

Newton (Mujumdar, 1987)

$$MR = \exp(-k_d t) \quad (2.18)$$

Page (1949)

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (2.19)$$

Modified Page (White *et al.*, 1978)

$$MR = \exp[-(kt)^n] \quad (2.20)$$

Henderson and Pabis (1961)

$$MR = a \exp(-kt) \quad (2.21)$$

Wang and Singh (1978)

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (2.22)$$

Logarithmic (Yagcioglu *et al.*, 1999)

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (2.23)$$

Two term (Henderson, 1974)

$$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t) \quad (2.24)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)
 k_d คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง (min^{-1})
 t คือ เวลา (min)
 a, b, c, n, k, k_0, k_1 คือ ค่าคงที่ของสมการ

ค่าคงที่ k_d ที่ได้จากสมการอบแห้งชั้นบางสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับอุณหภูมิลมร้อนได้จากสมการของอาเรเนียส ดังนี้

$$k_d = a \exp\left(-\frac{b}{T + 273.15}\right) \quad (2.25)$$

เมื่อ k_d คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง (min^{-1})
 T คือ อุณหภูมิลมร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
 a, b คือ ค่าคงที่ของสมการที่แปรตามอุณหภูมิลมร้อน

2.5 พารามิเตอร์ทางกายภาพ

2.5.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์การอบแห้ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ความหนาแน่นจริง (True density) และความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) ความหนาแน่นจริง หมายถึง อัตราส่วนของมวลวัสดุต่อปริมาตรวัสดุ ส่วนความหนาแน่นปรากฏจะใช้กับวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ด ๆ กองรวมกันอยู่เป็นปริมาณหนึ่ง หมายถึง อัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรทั้งหมด โดยรวมปริมาตรของเม็ดวัสดุและปริมาตรของอากาศที่แทรกตัวอยู่ตามช่องว่างของเม็ดวัสดุนั้น ๆ เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (2.26)$$

สำหรับวัสดุที่มีความชื้นแตกต่างกันอาจจะมี ความหนาแน่นแตกต่างกันตามไปด้วย โดยขณะที่ทำการอบแห้งวัสดุอยู่นั้นความชื้นในวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้

ความหนาแน่นของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความชื้นของวัสดุที่จะนำมาอบแห้งในรูปแบบต่าง ๆ โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจริงกับความชื้นของวัสดุหรือความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของวัสดุจะอยู่ในรูปเชิงเส้น (ชอบ, 2530; Altuntas *et al.*, 2005; Karababa, 2006) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\rho = aM + b \quad (2.27)$$

เมื่อ	ρ	คือ ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)
	W	คือ มวลเปียกของวัสดุ (kg)
	V	คือ ปริมาตรของวัสดุหรือภาชนะบรรจุวัสดุ (m^3)
	M	คือ ความชื้นของวัสดุ (% dry-basis)
	a, b	คือ ค่าคงที่ของสมการ

2.5.2 ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity)

การศึกษาและออกแบบอุปกรณ์อบแห้งจำเป็นต้องศึกษาถึงอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุจึงเป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการช่วยให้การออกแบบและใช้งานอุปกรณ์การอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ความจุความร้อนจำเพาะ หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศา ที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ ความจุความร้อนจำเพาะนิยมใช้กันทั่วไปในหน่วยของ $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ วิธีการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะที่นิยมใช้กัน คือวิธีของผสมโดยกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนี้

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (2.28)$$

ถ้าไม่มีงานจากภายนอกและไม่มีความร้อนไหลเข้าออกผ่านขอบเขตของระบบ จะเขียนสมการ (2.28) ได้ว่า $\Delta U = 0$ ในระบบที่มีความดันและปริมาตรคงที่ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในเท่ากับกับการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี (ΔH) นั่นคือ $\Delta H = 0$ การทดลองหาความจุความร้อนจำเพาะโดยวิธีของผสมนี้จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า แคลอรีมิเตอร์ ที่ทำด้วยกระป๋องทองแดงหุ้มด้วยฉนวนอย่างดีและมีแท่งแก้วกวนของผสมให้เข้ากัน ส่วนมากจะใช้น้ำ เป็นตัวผสมกับผลิตภัณฑ์หรือวัสดุที่ต้องการหาความจุความร้อนจำเพาะ เมื่อพิจารณาตัวแคลอรีมิเตอร์และของผสมเป็นระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ จะเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ ดังนี้

$$\Delta H_w + \Delta H_p + \Delta H_c = 0 \quad (2.29)$$

จะได้

$$m_c c_c (T_{eq} - T_{c,0}) + m_p c_p (T_{eq} - T_{p,0}) + m_w c_w (T_{eq} - T_{w,0}) = 0 \quad (2.30)$$

$$\text{หรือ} \quad c_p = - \frac{[m_c c_c (T_{eq} - T_{c,0}) + m_w c_w (T_{eq} - T_{w,0})]}{m_p (T_{eq} - T_{p,0})} \quad (2.31)$$

เมื่อ	ΔU	คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน (kJ)
	ΔQ	คือ ความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม (kJ)
	ΔW	คือ งานที่แลกเปลี่ยนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม (kJ)
	c_c	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของแคลอริมิเตอร์ (kJ/kg ^o C)
	c_w	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg ^o C)
	c_p	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (kJ/kg ^o C)
	m_c	คือ มวลของแคลอริมิเตอร์ (kg)
	m_w	คือ มวลของน้ำ (kg)
	m_p	คือ มวลของวัสดุ (kg)
	T_{eq}	คือ อุณหภูมิที่สภาวะสมดุล (°C)
	$T_{c,0}$	คือ อุณหภูมิของแคลอริมิเตอร์ที่สภาวะเริ่มต้น (°C)
	$T_{w,0}$	คือ อุณหภูมิของน้ำที่สภาวะเริ่มต้น (°C)
	$T_{p,0}$	คือ อุณหภูมิของวัสดุที่สภาวะเริ่มต้น (°C)

จากสมการ (2.31) สามารถคำนวณความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุได้ เมื่อทราบค่าของเทอมต่าง ๆ ในสมการ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุกับความชื้นมักจะอยู่ในรูปเชิงเส้น เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้ (ชอบ, 2530; สมชาติ, 2540)

$$c_p = aM + b \quad (2.32)$$

เมื่อ	c_p	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (kJ/kg ^o C)
	M	คือ ความชื้นของวัสดุ (% dry-basis)
	a, b	คือ ค่าคงที่ของสมการ

2.5.3 เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ (Void fraction)

เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรน้ำมันพืชต่อปริมาตรของขวดที่ใช้ทดลอง เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{V_{oil}}{V} \quad (2.33)$$

เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศเป็นส่วนหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความดันลดของอากาศในท่ออบแห้งวัสดุทางการเกษตรหรือเมล็ดธัญพืชชนิดต่าง ๆ การศึกษาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศจะทำให้สามารถกำหนดขนาดของอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการอบแห้งได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศกับความชื้นของวัสดุที่จะนำมาอบแห้งในรูปแบบต่าง ๆ โดยเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศจะขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุซึ่งมักจะอยู่ในรูปเชิงเส้น (ชอบ, 2530; สมชาติ, 2540) เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\varepsilon = aM + b \quad (2.34)$$

เมื่อ	ε	คือ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ (%)
	V_{oil}	คือ ปริมาตรของน้ำมันพืช (m^3)
	V	คือ ปริมาตรของภาชนะบรรจุวัสดุ (m^3)
	M	คือ ความชื้นของวัสดุ (% dry-basis)
	a, b	คือ ค่าคงที่ของสมการ

2.6 สมบัติทางความชื้น

2.6.1 ค่าความชื้น (Moisture content)

ค่าความชื้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎีเพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้นเนื่องจากมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง และความชื้นมาตรฐานเปียก นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยทั่วไปจะกล่าวไว้ในรูปของเปอร์เซ็นต์

1) การคำนวณค่าความชื้น

การคำนวณค่าความชื้นอาจแบ่งเป็น 2 วิธี คือ วิธีโดยตรง เช่น การใช้ตู้อบ การกลั่น การใช้สารดูดซับความชื้นในห้องสูญญากาศ และวิธีโดยอ้อม คือ การหาความชื้นโดยการวัดสมบัติบางอย่างที่ขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุ เช่น ความต้านทานทางไฟฟ้า หรือวัดสมบัติทางไดอิเล็กตริก เป็นต้น สำหรับการหาความชื้นโดยวิธีตรงตามมาตรฐาน Association of official agricultural chemists (AOAC, 2000) โดยชั่งน้ำหนักวัสดุที่ต้องการหาความชื้นประมาณ 30-40 กรัม ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 72-96 ชั่วโมง แล้วนำวัสดุไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง โดยถือว่าน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านการอบที่อุณหภูมินี้มาแล้วเป็นน้ำหนักแห้ง จากนั้นคำนวณค่าความชื้นตามสมการ

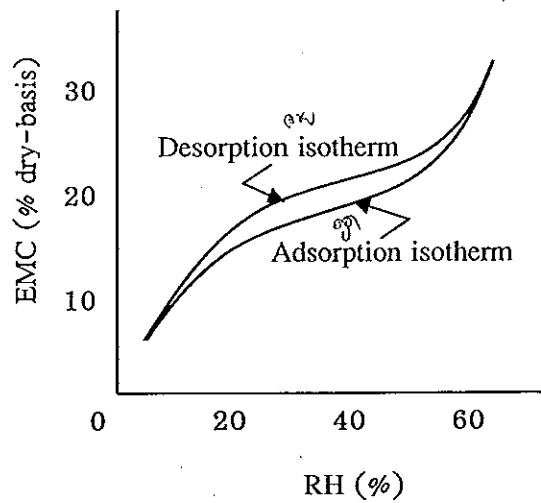
$$M_d = \frac{W - d}{d} \times 100 \quad (2.35)$$

$$M_w = \frac{W - d}{W} \times 100 \quad (2.36)$$

เมื่อ	M_d	คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% dry-basis)
	M_w	คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% wet-basis)
	d	คือ มวลแห้ง (kg)
	W	คือ มวลเปียก (kg)

2) ความชื้นสมดุล (สมชาติ, 2540)

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้งเพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นของวัสดุก็จะลดต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลงอีกต่อไป ในขณะที่ความชื้นในวัสดุจะมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย เรียกความชื้นในขณะนี้ว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลทั้งกระบวนการคายความชื้นและกระบวนการดูดซับความชื้น กับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอม เมล็ดพืชและวัสดุอาหารโดยส่วนใหญ่มีเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอมเป็นรูปซิกมอยด์ (Sigmoid shape) แต่เส้นโค้งของกระบวนการคายความชื้นกับกระบวนการดูดซับความชื้นที่ได้จากเมล็ดพืชชนิดเดียวกันอาจมีค่าแตกต่างกัน (Chakraverty and Paul, 2001) ดังภาพประกอบที่ 2.10



ภาพประกอบที่ 2.10 ปรากฏการณ์ฮีสเทอรีซิส (ดัดแปลงจาก สมชาติ, 2540)

ความแตกต่างของกระบวนการคายความชื้นและดูดซับความชื้น เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮีสเทอรีซิส (Hysteresis effect) เช่น เมล็ดพืชมีการเข้าสู่จุดความชื้นสมดุล เนื่องจากการคายหรือดูดซับความชื้นที่แตกต่างกันออกไป เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ฮีสเทอรีซิส ปกติแล้วความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชหรือวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่เกิดจากกระบวนการ คายความชื้นให้กับอากาศที่อยู่รอบ ๆ จะมีค่ามากกว่าความชื้นสมดุลที่เกิดจากกระบวนการดูดซับ ความชื้นจากอากาศที่อยู่รอบ ๆ โดยปัจจุบันยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าปรากฏการณ์ฮีสเทอรีซิสเกิดขึ้น เนื่องจากสาเหตุใด แต่มีสมมติฐานที่ว่า เมล็ดพืชหรือวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนเมื่อมีการ คายหรือดูดซับความชื้นให้กับอากาศที่อยู่รอบ ๆ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในรูพรุน ของเมล็ดพืชหรือวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนนั้น ๆ ส่งผลให้เมล็ดพืชหรือวัสดุมีการดูดซับ ความชื้นจากอากาศรอบ ๆ ได้ในปริมาณที่น้อยกว่าการคายความชื้น (Chung and Pfost, 1967)

3) วิธีการหาความชื้นสมดุล (สมชาติ, 2540) มี 2 วิธีใหญ่ ๆ ได้แก่

3.1) วิธีสถิติ

เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมาก่อน มีหลักการคือ ต้องทำให้ ความชื้นของเมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลกับอากาศรอบ ๆ ที่อยู่นิ่ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

3.1.1) การหาความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชในภาชนะปิด โดยการควบคุม ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิให้คงที่ด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัวหรือสารละลายกรด ความชื้น สัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวจะแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ดังตาราง ภาคผนวกที่ ก. 2-1 (นิยมใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวมากกว่าเพราะมีเสถียรภาพ ราคาถูกและการ กัดกร่อนโลหะน้อยกว่าสารละลายกรด) และชั่งน้ำหนักของเมล็ดพืชจนกระทั่งไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อนำหนักไม่เปลี่ยนแปลงก็แสดงว่าเมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลและความชื้นของเมล็ดพืชขณะนั้นก็คือความชื้นสมดุล วิธีนี้เป็นที่ยอมรับได้แต่มีข้อเสีย คือ ใช้เวลานานหลายวันกว่าจะทำให้เมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลและที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 80% อาจเกิดเชื้อราขึ้นที่ผิวของวัสดุหรือเมล็ดพืชก่อนที่จะถึงจุดสมดุลทำให้ความชื้นสมดุลมีค่าคลาดเคลื่อนได้

3.1.2) การวัดความชื้นสัมพัทธ์ที่สมดุลกับเมล็ดพืชเมื่อทราบความชื้นภายในภาชนะปิดที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ความชื้นสัมพัทธ์นี้สามารถวัดได้ด้วยเครื่องไฮโกรมิเตอร์ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์คงที่ก็แสดงว่าเมล็ดพืชเข้าสู่สมดุล วิธีนี้ถ้าจำกัดปริมาณอากาศรอบ ๆ เมล็ดพืชให้น้อยที่สุดได้จะช่วยให้อุณหภูมิถึงจุดสมดุลในระยะเวลาที่รวดเร็วกว่าแบบแรก

การหาความชื้นสมดุลด้วยวิธีสถิตินั้นสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้จะต้องมีสมบัติดังนี้ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ต้องไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปซึ่งขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ ความเข้มข้นและอุณหภูมิ

3.2) วิธีจลน์

วิธีจลน์เป็นวิธีที่ปรับปรุงจากวิธีสถิต มีลักษณะเหมือนกับวิธีสถิตต่างกันตรงที่วิธีจลน์อากาศรอบ ๆ เมล็ดพืชจะมีการเคลื่อนที่ในขณะที่วิธีสถิตอากาศจะอยู่นิ่ง ทำให้เมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าวิธีสถิตมาก คือ ประมาณ 1-2 วัน หรือน้อยกว่าแต่มีข้อเสีย คือ การควบคุมสภาวะของอากาศซึ่งเคลื่อนที่ให้มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน

วิธีทางสถิตเป็นวิธีการหาความชื้นสมดุลที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากได้ใช้ตู้อบไฟฟ้ารุ่น Memmert ULM400-800 ในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งทำได้ง่ายและสะดวกกว่าวิธีจลน์

4) สมการความชื้นสมดุล

ได้มีการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลทั้งสมการทางทฤษฎี กึ่งทฤษฎีและสมการเอมพิริคัล เพื่อใช้หาค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชและวัสดุชนิดต่าง ๆ สมการทางทฤษฎีที่มีอยู่ในปัจจุบันยังไม่มีสมการใดที่สามารถอธิบายความชื้นสมดุลได้อย่างถูกต้องตลอดช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่พิจารณา สมการที่จัดว่าสามารถอธิบายความชื้นสมดุลได้ดีพอสมควร คือ สมการของ BET (1938) และสมการของ Chung & Pfof (1967) มีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$\frac{RH}{(1-RH)M_{eq}} = \frac{1}{AB} + \frac{RH(C-1)}{AB} \quad (2.37)$$

$$\ln(RH) = \left(-\frac{A}{RT} \right) \exp(-BM_{eq}) \quad (2.38)$$

- เมื่อ A, B คือ ค่าคงที่ของสมการ
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis)
 RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (decimal)
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 kJ/kg mol K

จากข้อจำกัดของสมการทางทฤษฎีทำให้มีการสร้างสมการกึ่งทฤษฎีและสมการเอมพิริคัล โดยมีสมการกึ่งทฤษฎีที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุดสมการหนึ่ง คือ สมการของ Henderson (1952) มีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$1 - RH = \exp(-kTM_{eq}^n) \quad (2.39)$$

- เมื่อ k, n คือ ค่าคงที่ของสมการ
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis)
 RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (decimal)
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

นอกจากนี้ยังมีผู้เสนอสมการความชื้นสมดุลทั้งสมการที่ได้จากทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และสมการเอมพิริคัลอีกหลายสมการ เช่น

สมการของ Halsey (1948) มีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$RH = \exp\left[\left(\frac{-A}{RT}\right)M_{eq}^B\right] \quad (2.40)$$

และสมการของ Oswin (1946) มีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$M_{eq} = A\left(\frac{RH}{1-RH}\right)^B \quad (2.41)$$

- เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (decimal)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis)
 R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 kJ/kg mol K
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 A, B คือ ค่าคงที่ของสมการ

2.7 สารดูดซับกับการดูดซับความชื้น

2.7.1 การดูดซับ (อรรวรรณ, 2543)

การดูดซับ หมายถึง การที่สารซึ่งมีความเข้มข้นค่าหนึ่งถูกดึงดูดอยู่บนผิวของของแข็งหรือของเหลว สารที่ถูกดูดซับที่ผิว เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ สารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ สามารถแบ่งชนิดของการดูดซับออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) หมายถึง การดูดซับที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเป็นแบบวานเดอร์วาลส์ เช่น การดูดซับของก๊าซชนิดต่าง ๆ บนผิวด้าน

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) หมายถึง การดูดซับที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับผิวของของแข็ง โดยมีการสร้างและทำลายพันธะ เช่น การดูดซับของออกซิเจนบนทั้งสแตน

การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ อาทิเช่น อุณหภูมิ ชนิดของตัวดูดซับ รูปร่างและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ เป็นต้น

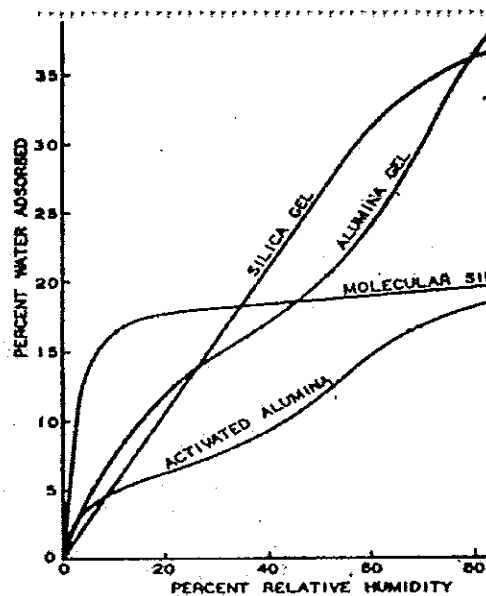
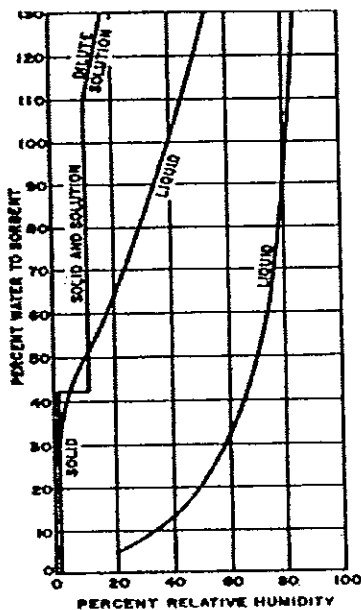
2.7.2 สารดูดซับความชื้น (ASHRAE, 1981)

สารดูดซับความชื้นมีทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว โดยมีกลไกการทำงานที่คล้าย ๆ กัน คือ เมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดซับความชื้นมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำในบรรยากาศรอบ ๆ ไอน้ำก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่สารดูดซับความชื้น แต่เมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดซับความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำในบรรยากาศรอบ ๆ ไอน้ำหรือความชื้นก็จะเคลื่อนที่ออกจากสารดูดซับความชื้นและถ้าความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดซับความชื้นเท่ากับความดันไอน้ำในบรรยากาศรอบ ๆ จะทำให้ไม่มีการถ่ายโอนไอน้ำหรือความชื้นระหว่างผิวของทั้งสองอีกหรือเรียกว่าเกิดความชื้นสมดุล โดยสารดูดซับความชื้นแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดซับความชื้นหรือน้ำที่แตกต่างกัน ดังภาพประกอบที่ 2.11 ความเหมาะสมในการนำสารดูดซับความชื้นมาใช้งานขึ้นอยู่กับค่าใช้จ่ายและพลังงานในการอบสารดูดซับความชื้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ดังนั้นการเลือกชนิดของสารดูดซับความชื้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โดยมีลักษณะที่สำคัญบางประการของสารดูดซับความชื้นที่ควรพิจารณาในการเลือกใช้งาน ดังนี้

1) สามารถดูดซับความชื้นได้ในปริมาณมากเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

2) มีความเสถียรภาพสูง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือไม่มีการเสื่อมสภาพระหว่างกระบวนการดูดซับ สามารถหาได้โดยทั่วไปและมีราคาถูก

- 3) ต้องไม่ถูกกัดกร่อน ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษและไม่ติดไฟง่าย
- 4) สารดูดซับความชื้นที่เป็นของเหลว ต้องมีความหนืดต่ำและสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ดี
- 5) สารดูดซับความชื้นที่เป็นของแข็ง ต้องมีความเป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง
- 6) การนำสารดูดซับความชื้นกลับมาใช้ใหม่หรือที่เรียกว่า การทำให้คืนสภาพ (Regeneration) ต้องสามารถทำได้โดยง่ายและไม่สลับซับซ้อน



ภาพประกอบที่ 2.11 ประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นของสารดูดซับความชื้นชนิดต่าง ๆ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีการเปลี่ยนแปลง (ASHRAE, 1981)

2.8 แนวทางการอบแห้งข้าวเปลือก

2.8.1 ลักษณะสำคัญของข้าวเปลือก

1) โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าว หมายถึง ส่วนรวมที่เป็นแบ่งเรียกว่า เอนโดสเปิร์ม (Endosperm) และส่วนที่จะเจริญเป็นต้นอ่อนเรียกว่าเอ็มบริโอ (Embryo) ซึ่งถูกหุ้มโดยเปลือกนอกที่เรียกว่าแกลบล (Hull or Lemma) และเปลือกใน (Palea) เอนโดสเปิร์มเป็นแบ่งที่เราใช้ในการบริโภค เอ็มบริโอเป็นส่วนที่มีชีวิตที่งอกออกมาเมื่อนำไปเพาะ เมื่อกะเทาะเปลือกนอกจะได้เมล็ดข้าวที่เรียกว่าข้าวกล้อง (Brown rice) จะมีสีน้ำตาลอ่อน ๆ เมล็ดข้าวกล้องจะประกอบด้วยเยื่อชั้นนอกบาง ๆ เรียกว่าชั้นผนังผล (Pericarp layers) จำนวน 2 ชั้น เยื่อชั้นกลาง 1 ชั้น เรียกว่าเปลือกเมล็ดชั้นใน

เรียกว่าชั้นผนังผล (Pericarp layers) จำนวน 2 ชั้น เยื่อชั้นกลาง 1 ชั้น เรียกว่าเปลือกเมล็ดชั้นใน (Tegmen) และเยื่อชั้นในบาง ๆ อีก 1 ชั้น เรียกว่าชั้นแอลิวโรน (Aleurone layer) ถ้าส่วนที่เป็นชั้นผนังผลเป็นสีแดงเมล็ดข้าวกล้องก็จะเป็นสีแดง ส่วนภายในที่เป็นเอนโดสเปิร์มจะเป็นแป้งสีขาวใส โดยข้าวเหนียวจะมีเอนโดสเปิร์มเป็นสีขาวขุ่น ส่วนข้าวเจ้ามีเอนโดสเปิร์มใสกว่า แต่บางครั้งเอนโดสเปิร์มของเมล็ดข้าวอาจมีสีขาวขุ่นที่ด้านข้างหรือตรงกลางของเมล็ด เรียกว่าท้องไข่หรือท้องปลาชิว (Chalkiness) (ประพาส, 2531) ดังภาพประกอบที่ 2.12

2) การจำแนกขนาดของเมล็ดข้าวเปลือก (งามชื่น และคณะ, 2545)

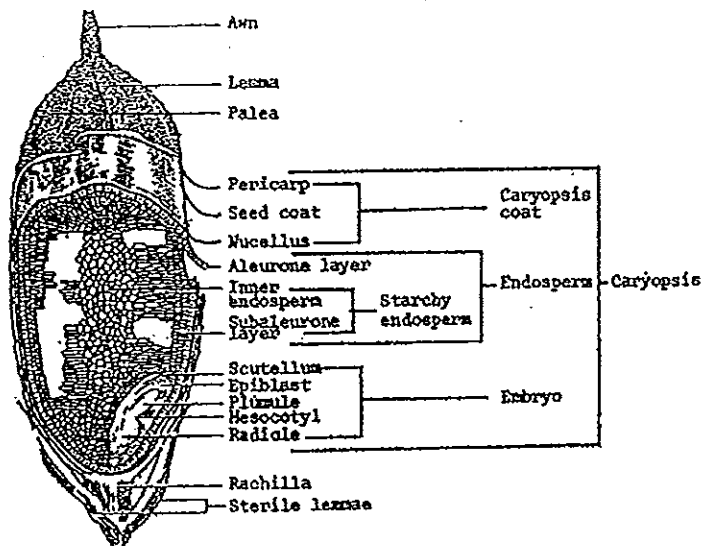
2.1) จำแนกตามความยาวของเมล็ด สามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

2.1.1) ข้าวเมล็ดสั้น (Short grain) : เป็นข้าวที่มีความยาวของเมล็ดข้าวกล้องน้อยกว่า 5.50 mm

2.1.2) ข้าวเมล็ดปานกลาง (Medium-long grain) : เป็นข้าวที่มีความยาวของเมล็ดข้าวกล้องระหว่าง 5.51-6.60 mm

2.1.3) ข้าวเมล็ดยาว (Long grain) : เป็นข้าวที่มีความยาวของเมล็ดข้าวกล้องระหว่าง 6.61-7.50 mm

2.1.4) ข้าวเมล็ดยาวมาก (Extra-long grain) : เป็นข้าวที่มีความยาวของเมล็ดข้าวกล้องมากกว่า 7.50 mm



ภาพประกอบที่ 2.12 โครงสร้างภาพตัดของเมล็ดข้าว (De Datta, 1981)

2.2) จำแนกตามสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ด สามารถแบ่งได้

3 ชนิด ดังนี้

2.2.1) ข้าวเมล็ดเรียว หมายถึง ข้าวที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ดมากกว่า 3.0 mm

2.2.2) ข้าวเมล็ดปานกลาง หมายถึง ข้าวที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ด 2.0-3.0 mm

2.2.3) ข้าวเมล็ดป้อม หมายถึง ข้าวที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ดน้อยกว่า 2.0 mm

2.8.2 การอบแห้งเมล็ดพืชและความสำคัญ (เอกสงวน, 2544)

ความชื้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เมล็ดพืชเสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็วเพราะเมล็ดพืชที่เก็บเกี่ยวใหม่ ๆ จะมีความชื้นสูง เช่น ข้าวเปลือกจะมีความชื้นอยู่ในช่วง 25.0-39.015% dry-basis (สมชาติ, 2540) จึงจำเป็นต้องทำให้เมล็ดพืชแห้งหรือต้องลดความชื้นให้เร็วที่สุดเพราะเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงเมื่อกองรวมกันมาก ๆ จะทำให้เกิดการสะสมความร้อนเนื่องจากการหายใจของเมล็ด ความร้อนและความชื้นนี้จะทำให้เมล็ดเสื่อมคุณภาพเร็วยิ่งขึ้น

1) การลดความชื้น

จงจันทร์ (2541) กล่าวว่า การอบหรือการตาก คือ การทำให้เมล็ดพืชมีความชื้นลดลงอยู่ในระดับที่จะเก็บรักษาไว้ได้อย่างปลอดภัยและมีความเสียหายเกิดขึ้นน้อยที่สุดในกรณีที่เป็นเมล็ดพืชที่ใช้ในการบริโภคการลดความชื้นต้องไม่ทำให้คุณค่าทางอาหารในเมล็ดพืชลดลงหรือเปลี่ยนแปลงไป เช่น ต้องไม่เปลี่ยนสี รสชาติต้องเหมือนเดิมหรือดีขึ้น ส่วนที่จะใช้ทำเมล็ดพันธุ์ คุณภาพในด้านการใช้เป็นเมล็ดพันธุ์ต้องไม่สูญเสียไป เช่น ต้องไม่ตาย ปลูกแล้วงอก หรือความงอกไม่ลดลงนั่นเอง ปกติควรมีความชื้นต่ำกว่า 15% dry-basis การลดความชื้นจึงเป็นข้อควรปฏิบัติที่จำเป็นสำหรับเมล็ดพืชไม่ว่าจะมีการผลิตจำนวนน้อยหรือผลิตเป็นอุตสาหกรรม เพื่อป้องกันความเสียหายของเมล็ดที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการมีความชื้นสูงดัง เช่น

1.1) เชื้อรา จะมีการเจริญเติบโตและแพร่ขยายปริมาณได้ดีเมื่อเมล็ดพืชมีความชื้นสูงทำให้เมล็ดพืชเกิดการเน่าเสียและเชื้อราบางชนิดยังสร้างสารพิษทำให้เมล็ดพืชมีการปนเปื้อนสารพิษที่เป็นอันตรายกับผู้บริโภค เช่น เชื้อรา *Aspergillus flavus* ในถั่วลิสง และข้าวโพด จะสร้างสารพิษ Alfa toxin ปนเปื้อนติดไปกับเมล็ดพืชเมื่อนำเมล็ดพืชที่มีสารพิษมาบริโภคสารพิษจะเข้าไปสะสมอยู่ในร่างกายเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง

1.2) แมลง จะมีการเจริญเติบโตและเข้าทำลายเมล็ดพืชได้

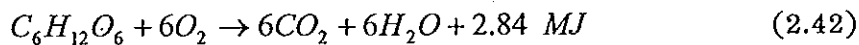
1.3) องค์กรประกอบทางเคมีและทางชีวเคมี จะเสื่อมคุณภาพ (Deterioration) เช่น แป้งและน้ำตาลจะสลายตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงานความร้อน ไขมันจะถูกย่อยสลายเป็นกรดไขมันและเกิดการเหม็นหืน โปรตีนจะถูกย่อยสลายทำให้เน่าเสีย

2) วิธีลดความชื้น

การลดความชื้นของเมล็ดพืชสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การลดความชื้นโดยอาศัยธรรมชาติ ได้แก่ การตากแดด ตากลม การลดความชื้นโดยการปรับสภาพอากาศ เช่น การใช้เครื่องอบหรือโรงอบและการลดความชื้นโดยใช้สารดูดซับความชื้น เป็นต้น

3) การสูญเสียมวลแห้ง

สมชาติ (2540) กล่าวว่า เมล็ดพืชเป็นสิ่งมีชีวิตซึ่งจะมีการหายใจอยู่ตลอดเวลา ในระหว่างการอบแห้งหรือการเก็บรักษา ทำให้มวลแห้งที่มีอยู่ในเมล็ดพืชลดน้อยลง เมื่อเกิดการเผาผลาญแป้งแบบสมบูรณ์ จะได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ พร้อมทั้งความร้อน ดังสมการเคมีต่อไปนี้



ซึ่งหมายความว่า การเผาผลาญแป้งแบบสมบูรณ์ปริมาณ 1 kg จะต้องใช้ออกซิเจน 1.07 kg และจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ 1.47 kg น้ำ 0.6 kg พร้อมทั้งความร้อน 15.778 MJ ถ้าสมมติว่า ความร้อนจำนวนนี้สามารถทำให้เมล็ดพืชร้อนขึ้น จะสามารถเขียนสมการการหาอุณหภูมิของเมล็ดพืชที่เพิ่มขึ้นได้ ดังนี้

$$\Delta T = 15778 \text{ DML} / c_{p,w} \quad (2.43)$$

และถ้าสมมติว่าน้ำที่เกิดขึ้นนี้ จะกลับเข้าไปอยู่ในเมล็ดพืชอีก จะทำให้สามารถเขียนสมการแสดงความชื้นของเมล็ดพืชที่เพิ่มขึ้นได้ดังนี้

$$\Delta M = 0.6 \text{ DML} \quad (2.44)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น (% wet-basis)

DML คือ มวลแห้งที่สูญเสีย (decimal)

$c_{p,w}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของเมล็ดพืชชื้น (kJ/kg^{°C})

T คือ อุณหภูมิ (°C)

โดยมวลแห้งที่มีการสูญเสียจะเป็นฟังก์ชันกับเวลา ความชื้น อุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การแตกตัวของเมล็ดพืช ซึ่งกรณีของเมล็ดข้าวเปลือกการสูญเสียมวลแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$DML = 1 - \exp(-TERM) \quad (2.45)$$

โดยที่ $TERM = A(t/100)^C \exp[D(1.8\theta - 28)] \exp[E(M_w - 0.14)]$

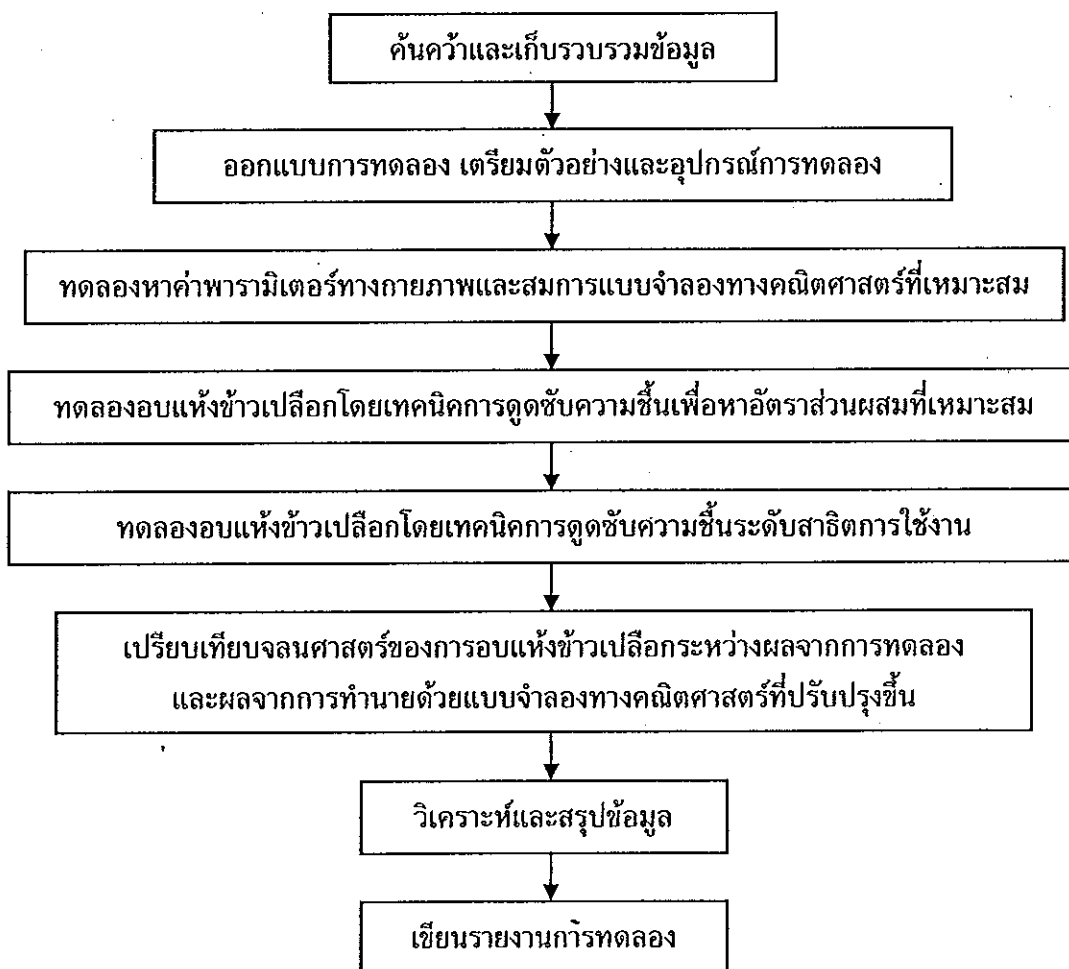
- เมื่อ DML คือ มวลแห้งที่สูญเสีย (decimal)
 θ คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
 M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% wet-basis)
 t คือ เวลาการเก็บรักษา (h)
 A คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 0.000914
 C คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 0.654
 D คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 0.03756
 E คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 33.61

สำหรับการอบแห้งโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น เมล็ดพืชจะถูกผสมเข้ากับสารดูดซับความชื้นโดยตรง เมื่อเมล็ดพืชมีความชื้นสูงกว่าสารดูดซับความชื้นจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำจากเมล็ดพืชเข้าไปยังสารดูดซับความชื้นได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความชื้นคือ ความเข้มข้นของความชื้นและความดันไอน้ำระหว่างผิวของวัสดุทั้งสอง เมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงจะมีค่าความเข้มข้นและความดันไอน้ำสูง ส่วนสารดูดซับความชื้นที่มีความชื้นต่ำกว่าก็จะมีค่าความเข้มข้นและความดันไอน้ำต่ำกว่า ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำจากเมล็ดพืชไปยังสารดูดซับความชื้นและความชื้นก็จะถูกดูดซับไว้ในรูพรุนของสารดูดซับความชื้นซึ่งมีความเข้มข้นและความดันไอน้ำต่ำกว่า จากการวิจัย พบว่า ความเข้มข้นและความดันไอน้ำยิ่งแตกต่างกันมากเท่าไร อัตราการอบแห้งก็ยิ่งเกิดได้เร็วขึ้นเท่านั้น (ภาวิกา, 2547) เมื่อมีอัตราการอบแห้งเกิดขึ้นเมล็ดพืชก็จะแห้งลงหรือมีความชื้นลดลง การเคลื่อนย้ายของความชื้นแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการเคลื่อนย้ายความชื้นจากส่วนในสุดของเมล็ดพืชสู่บริเวณผิวนอกของเมล็ด ขั้นตอนนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของเมล็ด ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการเคลื่อนย้ายความชื้นจากผิวเมล็ดไปสู่อากาศภายนอก ขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศเป็นสำคัญ การลดความชื้นโดยการใช้สารดูดซับความชื้นสามารถทำได้โดยการเก็บเมล็ดพืชร่วมกับวัสดุบางอย่างที่มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้น เช่น ซิลิกาเจล ปูนเผา เมล็ดพืชที่คั่ว (จิณณจาร์, 2531) และสารละลายเกลืออิ่มตัวบางชนิด เช่น โปแตสเซียมอะซีเตต แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ และลิเทียมคลอไรด์ เป็นต้น โดยประสิทธิภาพของการลดความชื้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพืช อุณหภูมิ การระบายอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ปริมาณและชนิดของเมล็ดพืช เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสารดูดซับความชื้น ได้แก่ ความหนาแน่นปรากฏ ความจุความร้อนจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ความชื้นสมดุลและจลนศาสตร์ของการอบแห้ง ชั้นบางสารดูดซับความชื้น ส่วนที่ 2 เป็นการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น ได้แก่ การหาอัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่เหมาะสมและการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นระดับสาธิตการใช้งาน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังภาพประกอบที่ 3.1



ภาพประกอบที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่าง วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) ข้าวเปลือก

งานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์เล็บนกปัตตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดพัทลุงและศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดปัตตานี

2) สารดูดซับความชื้น แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

2.1) วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้เป็นสารดูดซับความชื้น ได้แก่ แกลบ ทางใบสาธูและกาบมะพร้าว ความชื้นเริ่มต้นในช่วง 5.0-11.0% dry-basis โดยแกลบได้จากการกะเทาะข้าวเปลือกตามโรงสีข้าวทั่วไป ส่วนทางใบสาธูและกาบมะพร้าวได้จากการนำทางใบสาธูและกาบมะพร้าวที่แห้ง มาตัดเป็นทรงลูกบาศก์ขนาดความยาวด้านละประมาณ $0.45 \times 0.45 \times 0.45 \text{ cm}^3$

2.2) ซิลิกาเจล

ใช้ซิลิกาเจลที่หาซื้อได้โดยทั่วไปตามท้องตลาด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.17 cm ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5.0-11.0% dry-basis

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างทดลอง

การเตรียมตัวอย่างทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นข้าวเปลือก และส่วนที่เป็นสารดูดซับความชื้น ดังนี้

1) ข้าวเปลือกเตรียมได้ ดังนี้

1.1) นำตัวอย่างข้าวเปลือกทั้ง 2 สายพันธุ์มาทำความสะอาด เพื่อแยกเศษวัสดุและสิ่งเจือปนออก

1.2) ทาปริมาณความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (2000)

1.3) นำไปลดความชื้นหรือทำเปียกเพื่อให้ได้ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5.0-11.0% dry-basis

2) วัสดุดูดซับความชื้น

2.1) แกลบ เตรียมได้ ดังนี้

2.1.1) นำเกลบที่ได้จากการกะเทาะข้าวเปลือก มาทำความสะอาดเพื่อแยกเศษ
หญ้า ดิน และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออก

2.1.2) วัดขนาดของเกลบด้วยเวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ แล้วใช้ค่าเฉลี่ย

2.1.3) หาค่าความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (2000)

2.1.4) นำไปลดความชื้นหรือทำเปียกเพื่อให้ได้ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5.0-
11.0% dry-basis

2.2) ทางใบสาकुและกาบมะพร้าวเตรียมได้ ดังนี้

2.2.1) นำทางใบสาकुและกาบมะพร้าวมาตัดเป็นทรงลูกบาศก์ ให้มีขนาด
ความยาวด้านละประมาณ $0.45 \times 0.45 \times 0.45 \text{ cm}^3$

2.2.2) วัดขนาดด้วยเวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ แล้วใช้ค่าเฉลี่ย

2.2.3) หาค่าความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (2000)

2.2.4) นำไปลดความชื้นหรือทำเปียกเพื่อให้ได้ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5.0-
11.0% dry-basis

2.3) ซิลิกาเจลเตรียมได้ ดังนี้

2.3.1) นำซิลิกาเจลมาวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยเวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ แล้ว
ใช้ค่าเฉลี่ย

2.3.2) หาค่าความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (2000)

2.3.3) นำไปลดความชื้นหรือทำเปียกเพื่อให้ได้ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5.0-
11.0% dry-basis

หมายเหตุ :

1) ในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นสูงกว่า 31.5 และ
11.0% dry-basis ตามลำดับ จะนำไปลดความชื้นโดยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมสำหรับข้าวเปลือก
ส่วนสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและซิลิกาเจลจะอบแห้งที่อุณหภูมิ 50-70 และ
110°C ตามลำดับ เพื่อให้มีความชื้นอยู่ในช่วงที่ต้องการ

2) ในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นต่ำกว่า 22.0 และ
5.0% dry-basis ตามลำดับ จะนำไปทำเปียก โดยการเติมน้ำลงในข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้น
ที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร แล้วทำการคลุกเคล้าให้เข้ากัน จากนั้นนำไปเก็บไว้ในห้องเย็น
ที่อุณหภูมิประมาณ 4-5°C เป็นเวลาประมาณ 7 วัน ระหว่างที่เก็บอยู่จะต้องทำการคลุกทุกวัน เพื่อให้
ความชื้นมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ เมื่อครบกำหนด 7 วัน จึงนำตัวอย่างข้าวเปลือกและสารดูดซับ
ความชื้นออกจากห้องเย็นมาพักไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อมจนข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นมีอุณหภูมิ
ใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม จึงนำไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นและใช้ทำการทดลอง

3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.2.1 การศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสารดูดซับความชื้น ดังนี้

1) การทดลองหาความหนาแน่นปรากฏ

1.1) วัสดุและอุปกรณ์ทดลอง ประกอบด้วย

1.1.1) ภาชนะปริมาตร 80 cm³

1.1.2) เครื่องชั่งระบบดิจิทัลที่มีค่าความละเอียดเท่ากับ 0.01 g ชั่งน้ำหนักได้สูงสุดเท่ากับ 3000 g

1.1.3) ตัวอย่างเกลือความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 2.2, 4.2, 7.1, 7.4, 8.5 และ 10.4% dry-basis

1.1.4) ตัวอย่างทางใบสาकुความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 6.4, 9.3, 11.7 และ 18.3% dry-basis

1.1.5) ตัวอย่างกาบมะพร้าวความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 4.4, 10.1, 20.5, 26.5, 41.1 และ 59.7% dry-basis

1.1.6) ตัวอย่างซิลิกาเจลความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 1.3, 2.1, 2.9, 6.9, 7.4 และ 13.9% dry-basis

1.2) วิธีการทดลอง ทำได้ดังนี้

1.2.1) หาปริมาตรภาชนะที่ใช้ทดลอง โดยเติมน้ำให้เต็มภาชนะแล้วนำน้ำไปตวงหาปริมาตรและบันทึกค่าไว้

1.2.2) หาน้ำหนักของภาชนะทดลอง โดยชั่งด้วยเครื่องชั่งที่ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

1.2.3) นำตัวอย่างของเกลือ ทางใบสาकु กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล เติลงในภาชนะทดลองที่เตรียมไว้ ซึ่งจะต้องค่อย ๆ เติงทีละน้อย ๆ จนเต็มขวดโดยไม่มีกรเซย

1.2.4) นำภาชนะทดลองที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่จาก ข้อ 1.2.3) ไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่าไว้

1.2.5) คำนวณค่าความหนาแน่นปรากฏด้วยวิธีการทางสถิติ ตามสมการ (2.26)

1.2.6) ทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1.2.1)-1.2.5) อีก 2 ครั้ง แล้วใช้ค่าเฉลี่ย

2) การทดลองหาความจุความร้อนจำเพาะ

2.1) วัสดุและอุปกรณ์ทดลอง ประกอบด้วย

2.1.1) แคลอรีมิเตอร์ขนาดความจุเท่ากับ 1200 cm^3 และมีความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ $0.8 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

2.1.2) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) รุ่น Wisco DL 2100

2.1.3) สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

2.1.4) เครื่องชั่งระบบดิจิทัลที่มีค่าความละเอียดเท่ากับ 0.01 g และชั่งน้ำหนักได้สูงสุดเท่ากับ 3000 g

2.1.5) เต้าไฟฟ้า

2.1.6) บีกเกอร์ขนาด 500 ml

2.1.7) ตัวอย่างแกลบความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 4.3, 11.8, 24.9, 28.8, 33.9, 41.4 และ 45.1% dry-basis

2.1.8) ตัวอย่างทางใบสาकुความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 4.6, 8.3, 13.3, 22.1, 31.5 และ 44.3% dry-basis

2.1.9) ตัวอย่างกาบมะพร้าวความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 4.5, 7.6, 13.8, 24.9, 32.5, 40.5 และ 46.9% dry-basis

2.1.10) ตัวอย่างชิลิกาเจลความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 2.6, 3.4, 8.1, 9.8, 11.4, 21.0, และ 24.0% dry-basis

2.2) วิธีการทดลอง ทำได้ดังนี้

2.2.1) ชั่งตัวอย่างแกลบประมาณ 10 g แล้วบันทึกค่าไว้

2.2.2) ชั่งตัวอย่างทางใบสาकुและกาบมะพร้าวประมาณ 3-5 g แล้วบันทึกค่าไว้

2.2.3) ชั่งตัวอย่างชิลิกาเจลประมาณ 20 g แล้วบันทึกค่าไว้

2.2.4) ชั่งน้ำประมาณ 60 g แล้วบันทึกค่าไว้

2.2.5) นำน้ำไปต้มบนเต้าไฟฟ้าจนมีอุณหภูมิประมาณ $55-65^\circ\text{C}$ บันทึกค่าไว้

2.2.6) วัดอุณหภูมิของแคลอรีมิเตอร์และตัวอย่างแกลบ ทางใบสาकु กาบมะพร้าวและชิลิกาเจล แล้วบันทึกค่าไว้

2.2.7) เติมน้ำร้อนและตัวอย่างแกลบ ทางใบสาकु กาบมะพร้าวและชิลิกาเจลลงในแคลอรีมิเตอร์ ปิดฝาให้แน่นสนิท ตั้งไว้ประมาณ 3-5 นาที (ชอบ, 2530) จากนั้นวัดอุณหภูมิแล้วบันทึกค่าไว้

2.2.8) คำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะด้วยวิธีการทางสถิติ ตามสมการ (2.31)

2.2.9) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 2.2.1)-2.2.8) อีก 2 ครั้ง แล้วใช้ค่าเฉลี่ย

3) การทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ

3.1) วัสดุและอุปกรณ์ทดลอง ประกอบด้วย

3.1.1) ขวดแก้วปริมาตร 60 cm³

3.1.2) กระจกบอกลงขนาด 100 ml

3.1.3) น้ำมันพืช

3.1.4) ตาชั่ง

3.1.5) ยางรัด

3.1.6) ตัวอย่างแกลบความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 4.1, 10.7, 18.8, 22.5, 27.4, 39.6 และ 46.2% dry-basis

3.1.7) ตัวอย่างทางใบสาकुความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 4.6, 8.3, 13.35, 22.1, 31.5 และ 44.3% dry-basis

3.1.8) ตัวอย่างกาบมะพร้าวความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 7.6, 16.2, 23.2, 32.4, 41.41, และ 45.0% dry-basis

3.1.9) ตัวอย่างชิลิกาเจลความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 3.4, 8.1, 11.4, 21.0, 24.0 และ 32.9% dry-basis

3.2) วิธีการทดลอง ทำได้ดังนี้

3.2.1) หาปริมาตรของขวดแก้วที่ใช้ทดลอง โดยเติมน้ำให้เต็มขวดแล้วนำน้ำไปตวงหาปริมาตรและบันทึกค่าไว้

3.2.2) นำตัวอย่างแกลบ ทางใบสาकु กาบมะพร้าวและชิลิกาเจลที่เตรียมไว้ เทลงในขวดแก้วที่เตรียมไว้ โดยค่อย ๆ เทลงทีละน้อย ๆ จนเต็มขวดโดยไม่มีการเขย่า

3.2.3) นำตาชั่งที่เตรียมไว้มาครอบปากขวด แล้วใช้ยางรัดมัดให้แน่น

3.2.4) ตวงน้ำมันพืชที่เตรียมไว้ แล้วเทลงในกระจกบอกลง จากนั้นเทลงในขวดแก้วตามข้อ 3.2.3) อย่าง ช้า ๆ จนกระทั่งเต็มพอดี บันทึกปริมาตรน้ำมันพืชที่ใช้ไป

3.2.5) คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศด้วยวิธีการทางสถิติ ตามสมการ (2.33)

3.2.6) ทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 3.2.1)-3.2.5) อีก 2 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

4) การทดลองหาความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุลของ แกลบ ทางใบสาकु กาบมะพร้าวและชิลิกาเจล ทดลอง ทั้งแบบการดูดซับความชื้นและแบบการคายความชื้น มีตู้อบไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิให้อยู่

ในช่วง 30–50°C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 10–90% ด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1) วัสดุและอุปกรณ์ทดลอง ประกอบด้วย

4.1.1) ตัวอย่างเกลบที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 6.4 และ 11.1% dry-basis สำหรับทดลองหาความสัมพันธ์แบบดูดซับความชื้นและแบบคายความชื้น ตามลำดับ

4.1.2) ตัวอย่างทางใบสาครที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 8.0 และ 23.9% dry-basis สำหรับทดลองหาความสัมพันธ์แบบดูดซับความชื้นและแบบคายความชื้น ตามลำดับ

4.1.3) ตัวอย่างกาบมะพร้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 5.5 และ 29.5% dry-basis สำหรับทดลองหาความสัมพันธ์แบบดูดซับความชื้นและแบบคายความชื้น ตามลำดับ

4.1.4) ตัวอย่างชิลิกาเจลที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 7.2 และ 21.4% dry-basis สำหรับทดลองหาความสัมพันธ์แบบดูดซับความชื้นและแบบคายความชื้น ตามลำดับ

4.1.5) ขวดแก้วปริมาตร 500 cm³ พร้อมฝาปิด

4.1.6) ตะแกรงรูปทรงกระบอก

4.1.7) เส้นด้ายหรือลวดสำหรับยึดตะแกรง

4.1.8) สารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด ได้แก่ MgCl₂·6H₂O, Mg(NO₃)₂·6H₂O, LiCl, NaCl และ KNO₃

4.1.9) ตู้อบไฟฟ้ารุ่น Memmert ULM400–800

4.1.10) เครื่องชั่งระบบดิจิทัลที่มีค่าความละเอียดเท่ากับ 0.01 g ชั่งน้ำหนักได้สูงสุดเท่ากับ 3000 g

4.2) วิธีการทดลอง ทำได้ดังนี้

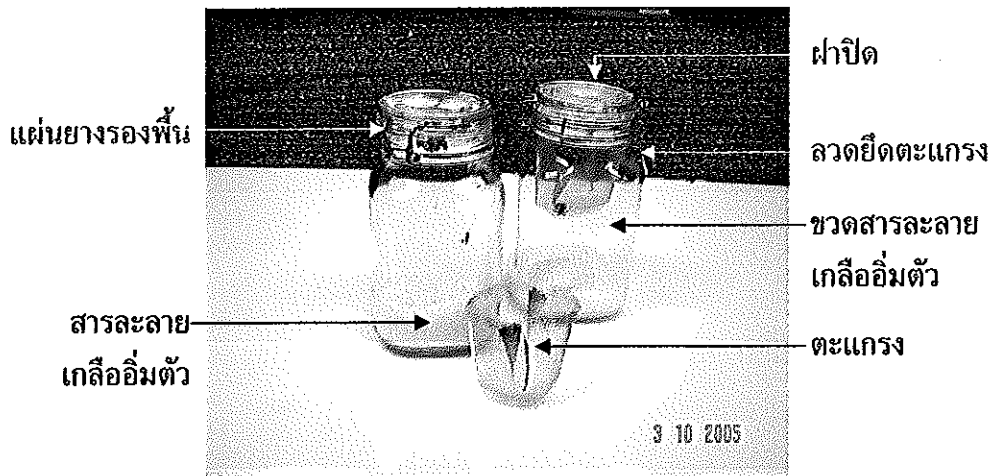
4.2.1) แบบดูดซับความชื้น

4.2.1.1) ชั่งน้ำหนักตะแกรงพร้อมกับเส้นด้ายหรือลวดที่ใช้บรรจุตัวอย่างสารดูดซับความชื้น ทำการบันทึกค่าไว้

4.2.1.2) นำตัวอย่างสารดูดซับความชื้นที่เตรียมไว้สำหรับการดูดซับความชื้นประมาณ 4–10 และ 40 g สำหรับสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชิลิกาเจล ตามลำดับ เถลงในตะแกรงตามข้อ 4.2.1.1) แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง บันทึกค่าไว้

4.2.1.3) นำตะแกรงที่บรรจุตัวอย่างสารดูดซับความชื้นจากข้อ 4.2.1.2) ใส่ลงในขวดที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวของ LiCl, MgCl₂·6H₂O, Mg(NO₃)₂·6H₂O, NaCl และ KNO₃ ปิดฝาให้แน่นสนิทเพื่อไม่ให้อากาศแวดล้อมเข้าไปในขวด ดังภาพประกอบที่ 3.2

4.2.1.4) นำขวดที่ได้จากข้อ 4.2.1.3) ไปวางไว้ที่อุณหภูมิ 30°C (อุณหภูมิแวดล้อม) และวางในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 และ 50°C โดยปรับอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลอง



ภาพประกอบที่ 3.2 อุปกรณ์การทดลองหาความชื้นสมดุล

4.2.1.5) นำเอาตัวอย่างสารดูดซับความชื้นพร้อมตะแกรงไปชั่งน้ำหนักในวันถัด ๆ ไป จนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะไม่เปลี่ยนแปลง

4.2.1.6) เมื่อน้ำหนักที่ชั่งได้ไม่เปลี่ยนแปลงอีก จึงนำตัวอย่างสารดูดซับความชื้นไปหาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (2000)

4.2.1.7) ทดลองซ้ำทำนองเดียวกันกับข้อ 4.2.1.1) – 4.2.1.6) อีกครั้งหนึ่งแล้วใช้ค่าเฉลี่ย

4.2.1.8) ทดลองทำนองเดียวกันกับข้อ 4.2.1.1) – 4.2.1.7) แต่เปลี่ยนตัวอย่างสารดูดซับความชื้นให้ครบทั้ง 4 ชนิด

4.2.2) แบบคายความชื้น

การทดลองหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้น ทดลองทำนองเดียวกันกับการทดลองแบบดูดซับความชื้นแต่เปลี่ยนตัวอย่างสารดูดซับความชื้นไปเป็นตัวอย่างที่เตรียมไว้สำหรับการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นแทน ซึ่งจะมีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าที่เตรียมไว้สำหรับการทดลองแบบดูดซับความชื้น

5) การทดลองศึกษาจลนศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้น

5.1) การทดลองอบแห้งชั้นบาง

5.1.1) วัสดุและอุปกรณ์ทดลอง ประกอบด้วย

5.1.1.1) เครื่องอบแห้งชั้นบางที่พัฒนาโดย สุภวรรณ และคณะ (2536)

5.1.1.2) สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

5.1.1.3) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) รุ่น Wisco DL 2100

5.1.1.4) เครื่องชั่งระบบดิจิทัลที่มีค่าความละเอียดเท่ากับ 0.01 g ชั่งน้ำหนักได้สูงสุดเท่ากับ 3000 g

5.1.1.5) ตัวอย่างแกลบที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 15.6 ± 0.1 , 20.3 ± 0.1 , $27.8 \pm 0.1\%$ dry-basis

5.1.1.6) ตัวอย่างทางใบสาकुที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 15.2 ± 0.1 , 20.4 ± 0.1 , $27.6 \pm 0.1\%$ dry-basis

5.1.1.7) ตัวอย่างกาบมะพร้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 15.4 ± 0.1 , 20.3 ± 0.1 , $27.5 \pm 0.1\%$ dry-basis

5.1.1.8) ตัวอย่างซิลิกาเจลที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $16.9 \pm 0.1\%$ dry-basis

5.1.2) วิธีการทดลอง ทำได้ดังนี้

การอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและซิลิกาเจล ที่จะนำไปใช้เป็นสารดูดซับความชื้นในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น ทดลองที่อุณหภูมิร้อนในช่วง $30-90^{\circ}\text{C}$ สำหรับแกลบ ทางใบสาकुและกาบมะพร้าว และที่อุณหภูมิร้อนในช่วง $50-130^{\circ}\text{C}$ สำหรับซิลิกาเจล ใช้ความเร็วลมประมาณ 1.58 m/s โดยนำตัวอย่างสารดูดซับความชื้นที่เตรียมไว้มาอบแห้งชั้นบางในอุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้งชั้นบางที่พัฒนาโดย สุภวรรณ และคณะ (2536)

ขณะทำการอบแห้งจะชั่งน้ำหนักสารดูดซับความชื้นทุก ๆ 1 นาที ใน 10 นาทีแรก หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักทุก ๆ 2 นาที จนถึงนาทีที่ 20 และชั่งน้ำหนักทุก ๆ 5 นาที จนน้ำหนักของสารดูดซับความชื้นที่ทำการอบแห้งไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ประมาณ 0.02 กรัม จึงหยุดการทดลอง โดยทุกการทดลองจะบันทึกอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกไว้ตลอดเวลา ทำการทดลองในทำนองเดียวกันจนครบทุกตัวอย่างของสารดูดซับความชื้น

5.2) การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของสารดูดซับความชื้นทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ แกลบ ทางใบสาकु กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล ทำได้โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองอบแห้งชั้นบางมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของสารดูดซับความชื้น ตามสมการ 2.9 ถึง 2.11 โดยสมมติให้แกลบมีรูปทรงเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก ส่วนทางใบสาकुและกาบมะพร้าวสมมติให้มีรูปทรงเป็นทรงลูกบาศก์ และสมมติให้ซิลิกาเจลมีรูปทรงเป็นทรงกลม

3.2.2 การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น

1) การทดลองหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการดูดซับความชื้น

การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น ทดลองโดยการดูดซับความชื้นข้าวเปลือกด้วยสารดูดซับความชื้น 4 ชนิด ได้แก่ แกลบ ทางใบสาตุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล ใช้ข้าวเปลือกสายพันธุ์เงี้ยวพัทลุง สายพันธุ์เล็บนกปัตตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ทดลองที่อุณหภูมิแวดล้อม โดยใช้ปริมาตรข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้น ตามอัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้น ดังตารางที่ 3.1 โดยมีวัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง ดังนี้

1.1) วัสดุและอุปกรณ์ทดลอง ประกอบด้วย

1.1.1) ขวดพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 8.5 cm สูง 9.0 cm หุ้มด้วยฉนวนโฟมหนา 2.0 cm เพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนระหว่างภาชนะอบแห้งกับสิ่งแวดล้อม

1.1.2) สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

1.1.3) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) รุ่น Wisco DL 2100

1.1.4) เครื่องชั่งระบบดิจิทัลที่มีค่าความละเอียดเท่ากับ 0.01 g ชั่งน้ำหนักได้สูงสุดเท่ากับ 3000 g

1.1.5) ตัวอย่างข้าวเปลือกสายพันธุ์เงี้ยวพัทลุงที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $23.2 \pm 0.1\%$ dry-basis

1.1.6) ตัวอย่างข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 30.4 ± 0.7 และ $24.0 \pm 0.9\%$ dry-basis

1.1.7) ตัวอย่างข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $31.3 \pm 0.1\%$ dry-basis

1.1.8) ตัวอย่างแกลบที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $7.6 \pm 0.1\%$ dry-basis

1.1.9) ตัวอย่างทางใบสาตุที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $7.7 \pm 0.2\%$ dry-basis

1.1.10) ตัวอย่างกาบมะพร้าวความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $7.6 \pm 0.1\%$ dry-basis

1.1.11) ตัวอย่างซิลิกาเจลที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $5.7 \pm 0.6\%$ dry-basis

1.2) วิธีการทดลอง ทำได้ดังนี้

1.2.1) สุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้น เพื่อหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (2000)

1.2.2) ผสมข้าวเปลือกเข้ากับสารดูดซับความชื้นตามอัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ปริมาณข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่ใช้ทดลองอบแห้ง ตามอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ในภาชนะอบแห้งขนาด 427.7 cm³

สารดูดซับความชื้น	อัตราส่วนผสมของข้าวเปลือกต่อสารดูดซับความชื้น			
	โดยปริมาตร	ปริมาตร (cm ³)	โดยมวล	น้ำหนัก (g)
แกลบ	1 : 0.5	285 : 143	1 : 0.07	154 : 13
	1 : 1.0	213 : 214	1 : 0.15	116 : 19
	1 : 1.5	171 : 256	1 : 0.22	92 : 23
	1 : 2.0	143 : 285	1 : 0.29	77 : 26
	1 : 2.5	122 : 305	1 : 0.37	66 : 28
ทางใบสาคุ	1 : 0.5	285 : 143	1 : 0.03	154 : 5
	1 : 1.0	213 : 214	1 : 0.06	116 : 8
	1 : 1.5	171 : 256	1 : 0.09	92 : 9
	1 : 2.0	143 : 285	1 : 0.12	77 : 10
	1 : 2.5	122 : 305	1 : 0.15	66 : 11
กาบมะพร้าว	1 : 0.5	285 : 143	1 : 0.05	154 : 8
	1 : 1.0	213 : 214	1 : 0.09	116 : 12
	1 : 1.5	171 : 256	1 : 0.14	92 : 15
	1 : 2.0	143 : 285	1 : 0.19	77 : 17
	1 : 2.5	122 : 305	1 : 0.23	66 : 18
ซิลิกาเจล	1 : 0.5	285 : 143	1 : 0.68	154 : 120
	1 : 1.0	213 : 214	1 : 1.36	116 : 181
	1 : 1.5	171 : 256	1 : 2.04	92 : 217
	1 : 2.0	143 : 285	1 : 2.72	77 : 241
	1 : 2.5	122 : 305	1 : 3.40	66 : 258

หมายเหตุ: อัตราส่วนผสมนี้คำนวณที่ความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นเท่ากับ 30 ± 1.0 และ $8 \pm 1.0\%$ dry-basis ตามลำดับ

1.2.2.1) ข้าวเปลือกผสมแกลบ

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของข้าวเปลือก 2 ค่า คือ 31.1 ± 0.1 และ $23.2 \pm 0.1\%$ dry-basis และใช้แกลบที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $7.6 \pm 0.1\%$ dry-basis ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและแกลบเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร

1.2.2.2) ข้าวเปลือกผสมทางใบสาตุ

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของข้าวเปลือก 2 ค่า คือ 29.6 ± 0.1 และ $23.2 \pm 0.1\%$ dry-basis และใช้ทางใบสาตุที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $7.7 \pm 0.2\%$ dry-basis ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและทางใบสาตุเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร

1.2.2.3) ข้าวเปลือกผสมกาบมะพร้าว

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของข้าวเปลือก 2 ค่า คือ 31.1 ± 0.1 และ $23.2 \pm 0.1\%$ dry-basis และใช้กาบมะพร้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $7.6 \pm 0.1\%$ dry-basis ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและกาบมะพร้าวเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร

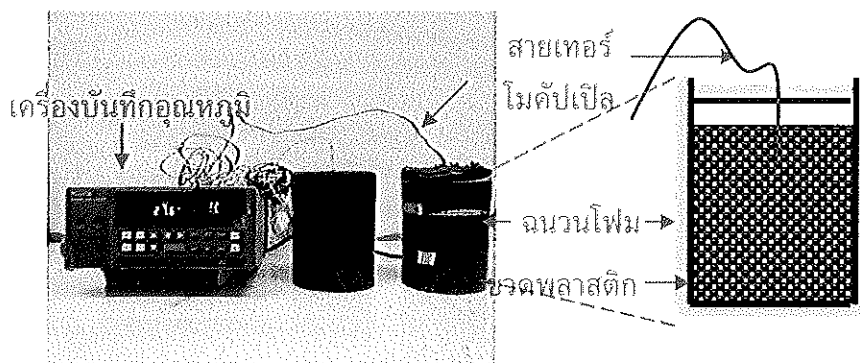
1.2.2.4) ข้าวเปลือกผสมชิลิกาเจล

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกเท่ากับ $31.3 \pm 0.1\%$ dry-basis และ $24.8 \pm 0.1\%$ dry-basis และใช้ชิลิกาเจลที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $5.7 \pm 0.6\%$ dry-basis ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและชิลิกาเจลเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร

1.2.3) คลุกข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นให้เข้ากัน แล้วนำไปเทลงในภาชนะอบแห้ง ปิดฝาและปิดทับด้วยพลาสติกเทปให้สนิท นำไปเก็บที่อุณหภูมิแวดล้อม ดังภาพประกอบที่ 3.3

1.2.4) บันทึกลงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิภายในของผสมในภาชนะอบแห้ง

1.2.5) เมื่อครบกำหนดเวลา 5, 10, 30, 120, 300 และ 600 นาที จึงนำของผสมมาทำการคัดแยกข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นออกจากกัน แล้วนำไปหาความชื้นสุดท้ายที่เวลาต่าง ๆ ตามมาตรฐาน AOAC (2000) บันทึกค่าไว้



ภาพประกอบที่ 3.3 อุปกรณ์อบแห้งที่ใช้หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นระดับสาริตการใช้งาน

เมื่อได้อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง (บทที่ 4 หัวข้อ 4.3) คือ 1:1.5 โดยปริมาตร สำหรับแกลบ ทางใบสาकुและ กาบมะพร้าว และ 1:1 โดยปริมาตร สำหรับซิลิกาเจล จึงคำนวณหาปริมาณข้าวเปลือกและ สารดูดซับความชื้นที่ต้องใช้ทดลอง ดังตารางที่ 3.2 โดยมีวัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง ดังนี้

2.1) วัสดุและอุปกรณ์ทดลอง ประกอบด้วย

2.1.1) ถังน้ำแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 26.5 cm สูง 33.0 cm หุ้มด้วย ฉนวนโฟมโพลีเอทิลีนหนา 1.0 cm เพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนระหว่างถังกับสิ่งแวดล้อม ให้อุณหภูมิของผสมระหว่างข้าวเปลือกกับสารดูดซับความชื้นในถังมีค่าคงที่มากที่สุด

2.1.2) สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

2.1.3) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) รุ่น Wisco DL 2100

2.1.4) เครื่องชั่งระบบดิจิทัลที่มีค่าความละเอียดเท่ากับ 0.01 g ชั่งน้ำหนักได้ สูงสุดเท่ากับ 3000 g

2.1.5) ตัวอย่างข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย เท่ากับ $24.4 \pm 1.0\%$ dry-basis

2.1.6) ตัวอย่างข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย เท่ากับ $26.3 \pm 0.7\%$ dry-basis

2.1.7) ตัวอย่างแกลบที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $6.1 \pm 0.2\%$ dry-basis

2.1.8) ตัวอย่างทางใบสาकुที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis

2.1.9) ตัวอย่างกาบมะพร้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis

2.1.10) ตัวอย่างซิลิกาเจลที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $6.1 \pm 0.1\%$ dry-basis

2.2) วิธีการทดลอง ทำได้ดังนี้

2.2.1) สุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นเพื่อหาความชื้นเริ่มต้น ตามมาตรฐาน AOAC (2000)

2.2.2) ผสมข้าวเปลือกเข้ากับสารดูดซับความชื้นตามอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ตาม ตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ปริมาณข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่ใช้ทดลองอบแห้งระดับสาธิตการใช้งาน
ในถังอบแห้งขนาด 20000 cm³

สารดูดซับความชื้น	อัตราส่วนผสมของข้าวเปลือกต่อสารดูดซับความชื้น			
	โดยปริมาตร	ปริมาตร (cm ³)	โดยมวล	น้ำหนัก (g)
แคลบ	1 : 1.5	8,000 : 12,000	1 : 0.23	4,300 : 1,000
ทางใบสาคุ	1 : 1.5	8,000 : 12,000	1 : 0.16	4,300 : 690
กาบมะพร้าว	1 : 1.5	8,000 : 12,000	1 : 0.10	4,300 : 440
ซิลิกาเจล	1 : 1.0	8,000 : 8,000	1 : 1.50	4,300 : 6,590

หมายเหตุ: อัตราส่วนผสมนี้คำนวณที่ความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นเท่ากับ 25 ± 1.0
และ $8 \pm 1.0\%$ dry-basis ตามลำดับ

2.2.2.1) ข้าวเปลือกผสมแคลบ

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปิดตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เท่ากับ 23.4 ± 0.1 และ $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis ตามลำดับ ส่วนแคลบใช้ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $6.1 \pm 0.2\%$ dry-basis

2.2.2.2) ข้าวเปลือกผสมทางใบสาคุ

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปิดตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เท่ากับ 23.6 ± 0.2 และ $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis ตามลำดับ ส่วนทางใบสาคุใช้ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis

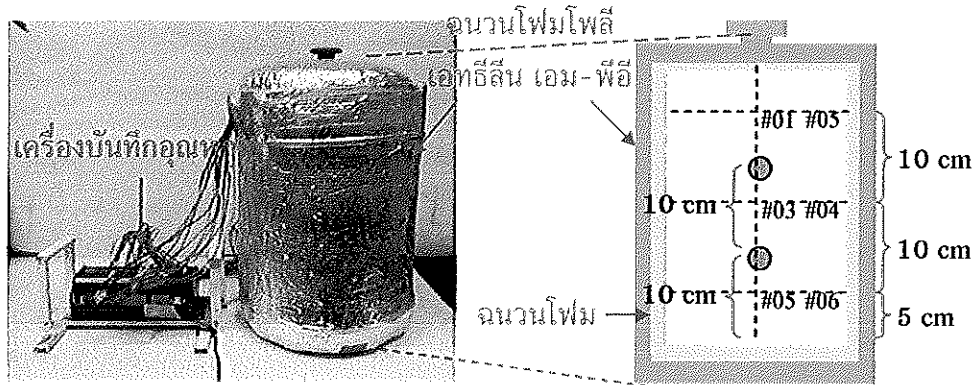
2.2.2.3) ข้าวเปลือกผสมกาบมะพร้าว

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปิดตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เท่ากับ 25.2 ± 0.2 และ $26.9 \pm 0.1\%$ dry-basis ตามลำดับ ส่วนกาบมะพร้าวใช้ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis

2.2.2.4) ข้าวเปลือกผสมซิลิกาเจล

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปิดตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เท่ากับ 25.4 ± 0.1 และ $25.7 \pm 0.1\%$ dry-basis ตามลำดับ ส่วนซิลิกาเจลใช้ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $6.1 \pm 0.1\%$ dry-basis

2.2.3) คลุกข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นให้เข้ากันเทลงในถังทดลองปิดฝาและปิดทับด้วยพลาสติกเทปให้สนิท ดังภาพประกอบที่ 3.4 แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อม



- ช่องที่ใช้นำตัวอย่างทดลองออกมาหาความชื้นที่เวลาต่าง ๆ
- # ตำแหน่งวัดอุณหภูมิภายในถังอบแห้ง

ภาพประกอบที่ 3.4 อุปกรณ์อบแห้งที่ใช้อบแห้งระดับสาธิตการใช้งาน

2.2.4) สุ่มตัวอย่างของผสมมาคัดแยกข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นออกจากกัน ที่เวลา 10, 30, 120, 300 และ 600 นาที แล้วนำไปหาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (2000) บันทึกค่าไว้

2.2.5) บันทึกค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิภายในของผสมในถังอบแห้ง

2.2.6) นำข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นมาคัดแยกออกจากกันโดยใช้แรงลมเป่า

2.2.7) นำข้าวเปลือกที่ได้ไปทดสอบคุณภาพทางกายภาพ

3.3 การทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก

งานวิจัยนี้ได้เลือกทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก ในรูปของร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ร้อยละการงอกและร้อยละความขาว โดยนำข้าวเปลือกที่ได้ในข้อ 2.2.6) มาทดสอบคุณภาพทางกายภาพ ดังนี้

3.3.1 การทดสอบร้อยละข้าวเต็มเมล็ด

การทดสอบร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ทำได้ดังนี้

1) นำข้าวเปลือกจำนวน 125 กรัม ไปกะเทาะด้วยเครื่องกะเทาะเพื่อแยกแกลบออกจากข้าวกล้อง แล้วนำข้าวกล้องไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าไว้

2) นำข้าวกล้องไปขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาวเป็นเวลา 60 วินาที (ขัดหยาบ 30 วินาที และขัดละเอียด 30 วินาที) พักข้าวสารไว้ประมาณ 20 นาที จนเย็นจึงชั่งน้ำหนักข้าวสารบันทึกค่าไว้

3) นำข้าวสารไปแยกขนาดด้วยเครื่องคัดขนาด เพื่อแยกข้าวเต็มเมล็ดและข้าวหักออกจากกัน แล้วนำข้าวเต็มเมล็ดไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าไว้

4) คำนวณร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ดังนี้

$$\text{ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด} = (\text{มวลข้าวเต็มเมล็ด} / \text{มวลข้าวเปลือก}) \times 100$$

5) เปรียบเทียบข้าวเต็มเมล็ดจากการทดลองอบแห้งด้วยสารดูดซับความชื้นชนิดต่าง ๆ กับข้าวเต็มเมล็ดของข้าวอ้างอิงและข้าวควบคุม (ข้าวอ้างอิง คือ ข้าวเปลือกที่ถูกลงไว้ ในภาชนะ ๓ อุณหภูมิแวดล้อมบริเวณเดียวกันกับข้าวเปลือกที่ทำการทดลอง แต่ไม่ได้ผสมกับสารดูดซับความชื้น ส่วนข้าวควบคุม คือ ข้าวเปลือกที่ถูกบรรจุไว้ในถังอบแห้งและวางไว้ ณ อุณหภูมิแวดล้อมบริเวณเดียวกันกับข้าวเปลือกที่ทำการทดลอง แต่ไม่ได้ผสมกับสารดูดซับความชื้น)

3.3.2 การทดสอบร้อยละการงอก

ร้อยละการงอก ทดสอบโดยการนำข้าวเปลือกจำนวน 400 เมล็ด (ISTA, 2003) มาเพาะบนกระดาษเพาะที่ชุ่มน้ำแล้วไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ประเมินผลการงอกโดยนับจำนวนเมล็ดที่งอก หลังจากเพาะแล้วเป็นเวลา 5-8 วัน แล้วคำนวณเป็นร้อยละการงอกออกมา ดังนี้

$$\text{ร้อยละการงอก} = (\text{จำนวนเมล็ดงอก} / 400) \times 100$$

3.3.3 การทดสอบร้อยละความขาว

ร้อยละความขาวของข้าวสาร ทดสอบโดยการนำข้าวสารที่ได้หลังการกะเทาะและขัดแยกเสร็จเรียบร้อยแล้วไปวัดสีขาวของข้าวสารด้วยเครื่องวัดความขาวรุ่น Kett Electric laboratory C-300-3

หมายเหตุ :

การทดสอบร้อยละข้าวเต็มเมล็ดและร้อยละความขาวของข้าวเปลือกหลังการทดลองอบแห้งได้นำตัวอย่างทดลองไปทำการทดสอบที่ศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดพัทลุง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองถึงความเป็นไปได้ของการอบแห้งข้าวเปลือก โดยเทคนิคการดูดซับความชื้นและปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Inoue *et al.* (2002) เพื่อใช้ทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้ง โดยใช้ซิลิกาเจลและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ทางใบสาคุและกาบมะพร้าวเป็นสารดูดซับความชื้น ได้ผลการทดลองในส่วนต่างๆ ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพและจลนศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้น การอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นระดับสัทธิการใช้งาน การทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกในรูปของ ร้อยละข้าวเต็ม เมล็ด ร้อยละการงอกและร้อยละความขาว ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสารดูดซับความชื้น

ค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสารดูดซับความชื้นที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์การอบแห้งข้าวเปลือก อาทิเช่น ความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ความจุความร้อนจำเพาะและความชื้นสมดุล ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ ดังนี้

4.1.1 ผลการทดลองหาความหนาแน่นปรากฏ

จากการทดลองหาความหนาแน่นปรากฏของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล พบว่า เมื่อความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจลเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นปรากฏจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังภาพประกอบที่ 4.1 โดยซิลิกาเจลจะมี ความหนาแน่นปรากฏสูงที่สุด รองลงมาคือแกลบ กาบมะพร้าวและทางใบสาคุ ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล ให้ผลดังนี้

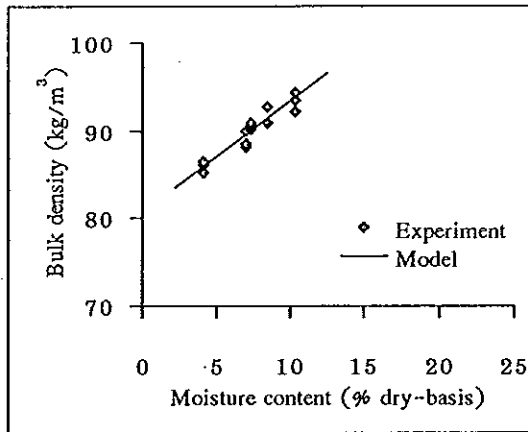
$$\text{แกลบ} \quad \rho = 1.226M + 80.805 \quad ; \quad R^2 = 0.985 \quad (4.1)$$

$$\text{ทางใบสาคุ} \quad \rho = 0.275M + 34.342 \quad ; \quad R^2 = 0.959 \quad (4.2)$$

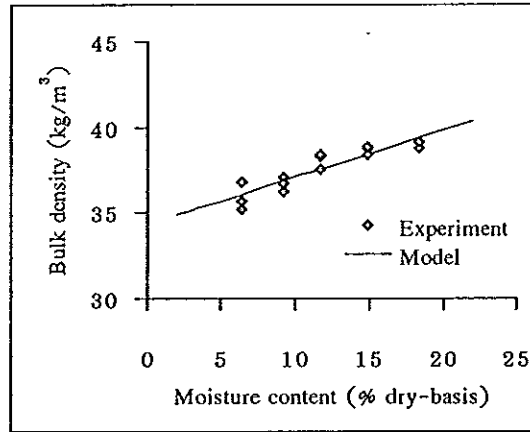
$$\text{กาบมะพร้าว} \quad \rho = 0.094M + 57.161 \quad ; \quad R^2 = 0.948 \quad (4.3)$$

$$\text{ซิลิกาเจล} \quad \rho = 9.025M + 772.185 \quad ; \quad R^2 = 0.983 \quad (4.4)$$

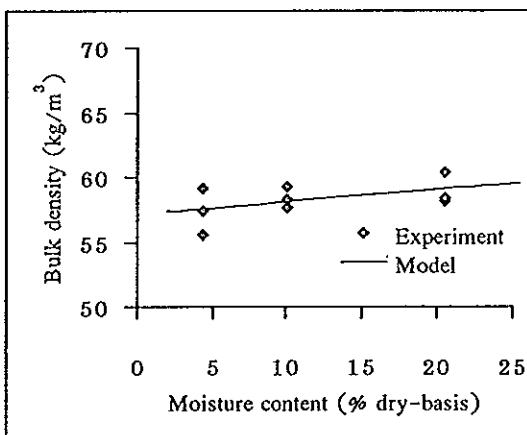
เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)
 M คือ ความชื้น (% dry-basis)



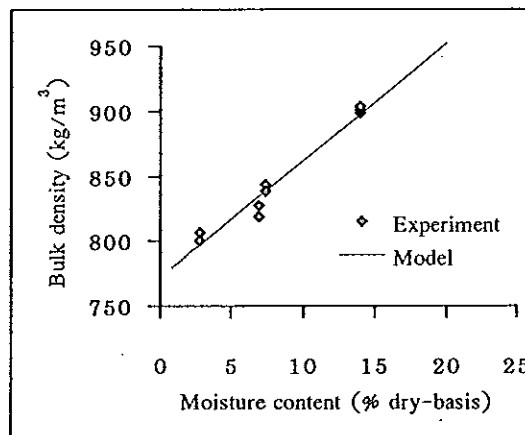
แกลบ (4.2-10.3% dry-basis)



ทางใบสาคุ (6.4-18.3% dry-basis)



กาบมะพร้าว (4.4-20.5% dry-basis)



ซิลิกาเจล (2.7-13.9% dry-basis)

ภาพประกอบที่ 4.1 ความหนาแน่นปรากฏของสารดูดซับความชื้น

4.1.2 ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ

ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าว และซิลิกาเจล พบว่า เมื่อความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศจะมีค่าลดลง ดังภาพประกอบที่ 4.2 โดยแกลบจะมี เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศสูงที่สุด รองลงมา คือ กาบมะพร้าว ทางใบสาคุและซิลิกาเจล ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศกับความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล ให้ผลดังนี้

แกลบ $\varepsilon = -0.120M + 99.071$; $R^2 = 0.976$ (4.5)

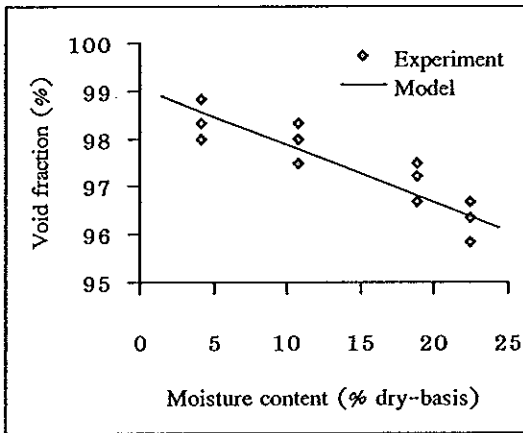
ทางใบสาตุ $\varepsilon = -0.063M + 69.934$; $R^2 = 0.987$ (4.6)

กามมะพร้าว $\varepsilon = -0.077M + 81.080$; $R^2 = 0.996$ (4.7)

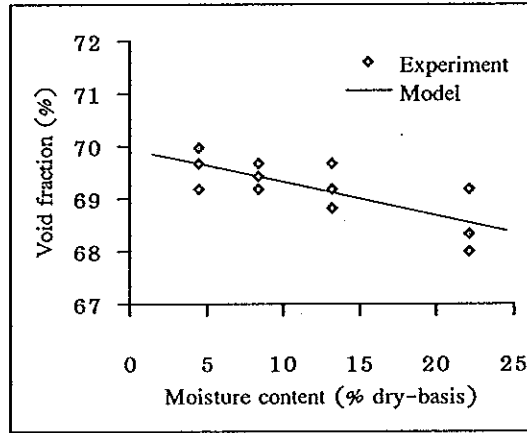
ซีลีกาเจล $\varepsilon = -0.131M + 45.128$; $R^2 = 0.979$ (4.8)

เมื่อ ε คือ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ (%)

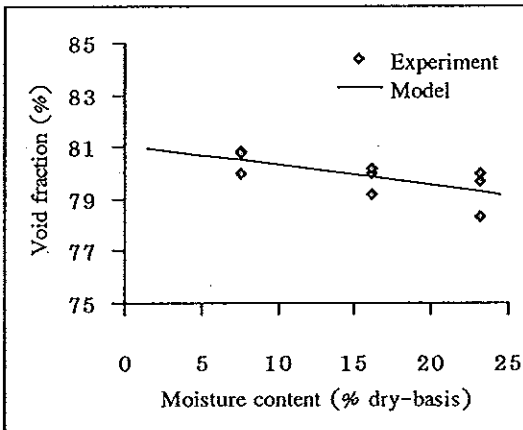
M คือ ความชื้น (% dry-basis)



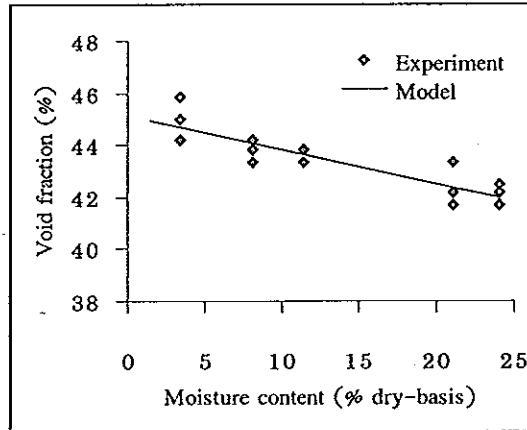
แกลบ (4.1-22.5% dry-basis)



ทางใบสาตุ (4.6-22.1% dry-basis)



กามมะพร้าว (7.6-23.2% dry-basis)

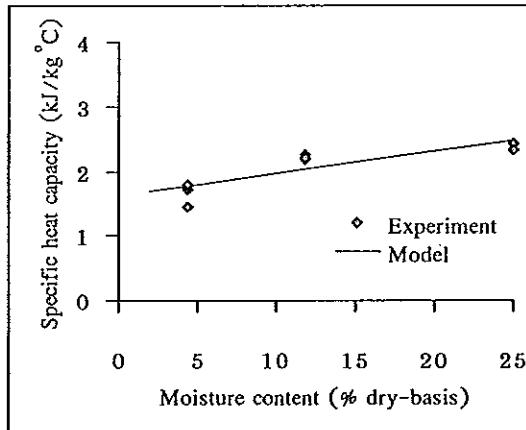


ซีลีกาเจล (3.4-24.0% dry-basis)

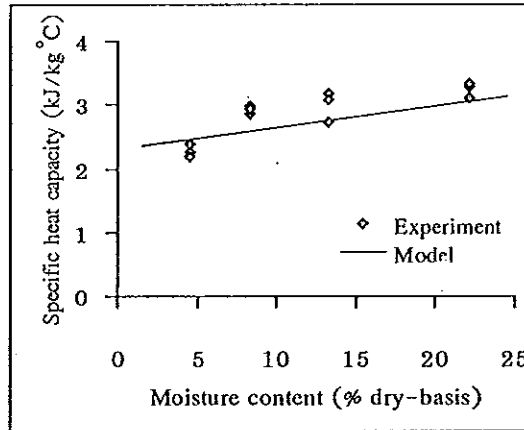
ภาพประกอบที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของสารดูดซับความชื้น

4.1.3 ผลการทดลองหาความจุความร้อนจำเพาะ

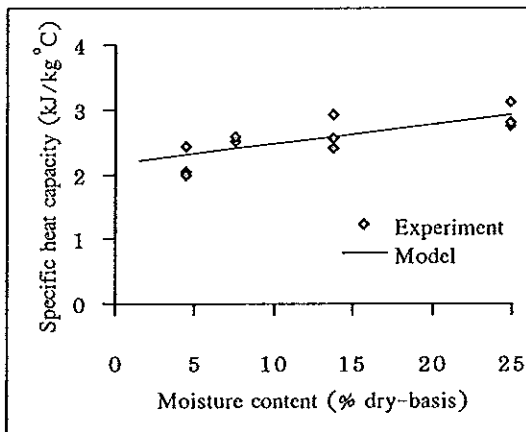
การทดลองหาความจุความร้อนจำเพาะของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าว และ ซิลิกาเจล พบว่า เมื่อความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจลเพิ่มขึ้น ความจุความร้อนจำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังภาพประกอบที่ 4.3



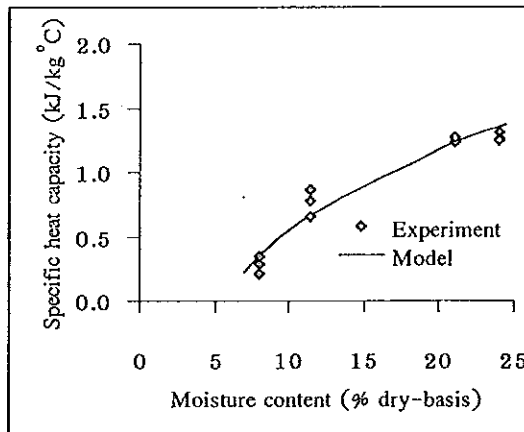
แกลบ (4.3-25.0% dry-basis)



ทางใบสาคุ (4.6-22.1% dry-basis)



กาบมะพร้าว (4.5-24.9% dry-basis)



ซิลิกาเจล (8.1-24.0% dry-basis)

ภาพประกอบที่ 4.3 ความจุความร้อนจำเพาะของสารดูดซับความชื้น

โดยทางใบสาคุจะมีความจุความร้อนจำเพาะสูงที่สุด รองลงมาคือ กาบมะพร้าว แกลบ และซิลิกาเจล ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อนจำเพาะกับความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล ให้ผลดังนี้

$$\text{แกลบ} \quad c_p = 0.034M + 1.629 \quad ; \quad R^2 = 0.905 \quad (4.9)$$

$$\text{ทางใบสาคุ} \quad c_p = 0.048M + 2.284 \quad ; \quad R^2 = 0.869 \quad (4.10)$$

$$\text{กาบมะพร้าว} \quad c_p = 0.031M + 2.166 \quad ; \quad R^2 = 0.902 \quad (4.11)$$

$$\text{ชิลิกาเจล} \quad c_p = 0.0913 \ln M - 1.553 \quad ; \quad R^2 = 0.975 \quad (4.12)$$

เมื่อ c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)

M คือ ความชื้น (% dry-basis)

4.1.4 ผลการทดลองหาความชื้นสมดุล

จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นและแบบคายความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและชิลิกาเจล เมื่อนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุล อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่างๆ 4 สมการ ได้แก่ สมการ BET (1938) สมการ Chung & Pfof (1967) สมการ Henderson (1952) และสมการ Halsey (1948) ตามสมการที่ 2.37 ถึง 2.40 โดยการวิเคราะห์ข้อมูลได้ใช้โปรแกรมที่พัฒนาโดย ธวัชชัย (2547) หาค่าคงที่ของแต่ละสมการออกมา ดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.8 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของแกลบที่อุณหภูมิ 29.6–50.0°C ความชื้นสัมพัทธ์ 32.8–85.0%

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าคงที่		R^2	RMSE*
	A	B		
Henderson (1952)	2.750×10^{-4}	1.13	0.988	0.862
Chung & Pfof (1967)	7.426×10^3	0.199	0.996	2.616
Halsey (1948)	8.673×10^3	-1.017	0.995	2.743
Modified BET (1938)	0.998	1.638	0.815	6.329

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของ
 แกลบที่อุณหภูมิ 29.6-50.0°C ความชื้นสัมพัทธ์ 11.8-75.6%

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าคงที่		R ²	RMSE*
	A	B		
Henderson (1952)	3.027 x10 ⁻⁴	0.910	0.942	2.131
Chung & Pfof (1967)	6.770 x10 ³	0.158	0.957	6.614
Halsey (1948)	7.416 x10 ³	-0.661	0.944	6.691
Modified BET (1938)	1.436	2.029	0.495	7.105

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของ
 ทางใบสาकुที่อุณหภูมิ 31.1°C ความชื้นสัมพัทธ์ 32.7-75.6%

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าคงที่		R ²	RMSE*
	A	B		
Henderson (1952)	1.289 x10 ⁻⁵	2.257	0.999	0.397
Chung & Pfof (1967)	1.858 x10 ⁴	0.240	0.996	0.439
Halsey (1948)	5.071 x10 ⁵	-2.528	0.999	0.497
Modified BET (1938)	0.725	1.415	0.944	9.138

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของ
 ทางใบสาकुที่อุณหภูมิ 31.3-50.0°C ความชื้นสัมพัทธ์ 11.8-75.6%

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าคงที่		R ²	RMSE*
	A	B		
Henderson (1952)	1.019 x10 ⁻⁴	1.301	0.942	1.237
Chung & Pfof (1967)	7.584 x10 ³	0.135	0.941	1.085
Halsey (1948)	1.737 x10 ⁴	-0.982	0.957	3.542
Modified BET (1938)	1.606	1.495	0.852	8.648

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของ
กาบมะพร้าวที่อุณหภูมิ 30.7-50.0°C ความชื้นสัมพัทธ์ 32.8-75.6%

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าคงที่		R ²	RMSE*
	A	B		
Henderson (1952)	1.608 x10 ⁻⁵	2.374	0.773	2.343
Chung & Pfof (1967)	3.899 x10 ⁴	0.393	0.731	2.565
Halsey (1948)	1.010 x10 ⁶	-3.103	0.842	2.549
Modified BET (1938)	0.613	1.557	0.902	9.098

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของ
กาบมะพร้าวที่อุณหภูมิ 30.7-50.0°C ความชื้นสัมพัทธ์ 11.8-75.5%

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าคงที่		R ²	RMSE*
	A	B		
Henderson (1952)	2.569 x10 ⁻⁴	0.922	0.942	2.714
Chung & Pfof (1967)	7.157 x10 ³	0.125	0.981	0.908
Halsey (1948)	8.224 x10 ³	-0.719	0.960	6.037
Modified BET (1938)	2.791	1.394	0.342	7.634

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของ
ซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 31.6-50.0°C ความชื้นสัมพัทธ์ 11.4-87.9%

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าคงที่		R ²	RMSE*
	A	B		
Henderson (1952)	3.211 x10 ⁻⁴	1.111	0.887	1.725
Chung & Pfof (1967)	6.382 x10 ³	0.209	0.892	1.538
Halsey (1948)	1.133 x10 ⁴	-1.170	0.897	2.913
Modified BET (1938)	1.546	0.638	0.757	6.428

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของ ซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 32.4–50.0 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 11.4–89.2%

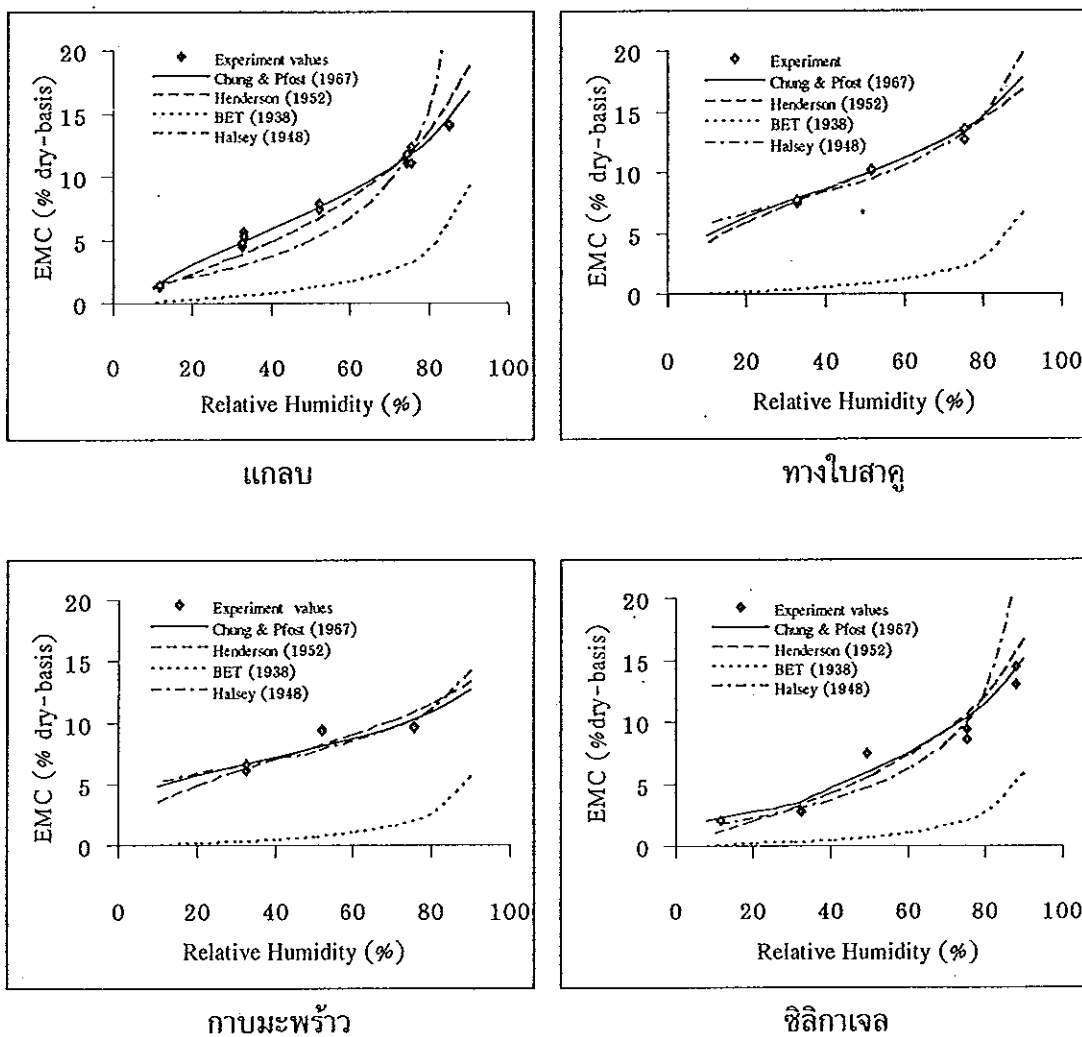
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าคงที่		R ²	RMSE*
	A	B		
Henderson (1952)	9.142 x10 ⁻⁵	1.430	0.931	2.816
Chung & Pfof (1967)	8.574 x10 ³	0.166	0.886	2.652
Halsey (1948)	2.989 x10 ⁴	-1.391	0.943	4.723
Modified BET (1938)	2.185	1.139	0.862	10.131

* ดูสมการ (5.30)

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 สมการ โดยพิจารณาค่า Mean regression coefficient (R²) พบว่า ในกรณีความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung & Pfof (1967) ให้ค่า R² ใกล้เคียงกับ 1 ที่สุดสำหรับแกลบ ส่วนกาบมะพร้าวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified BET (1938) ให้ค่า R² ใกล้เคียงกับ 1 ที่สุด ในขณะที่ทางใบสาครและซิลิกาเจลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson (1952) และ Halsey (1948) ให้ค่า R² ใกล้เคียงกับ 1 ที่สุด ตามลำดับ ส่วนในกรณีความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นรูปแบบสมการของ Chung & Pfof (1967) ให้ค่า R² ใกล้เคียงกับ 1 ที่สุดสำหรับแกลบ ทางใบสาครและกาบมะพร้าว ส่วนซิลิกาเจล แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Halsey (1948) ให้ค่า R² ใกล้เคียงกับ 1 ที่สุด เมื่อนำค่าคงที่สมการในตารางที่ 4.1 ถึง 4.8 แทนกลับในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 สมการ ตามสมการที่ 2.37 ถึง 2.40 แล้วนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์จะสามารถแสดงกราฟได้ ดังภาพประกอบที่ 4.4 ถึง 4.5

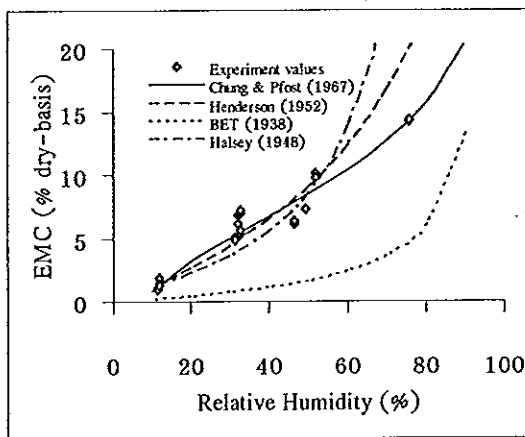
เมื่อพิจารณาค่า Root mean square error (RMSE) พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson (1952) ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด สำหรับความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของแกลบ ทางใบสาครและกาบมะพร้าว ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung & Pfof (1967) ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด สำหรับซิลิกาเจล และความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของแกลบบนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson (1952) ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด ส่วนทางใบสาคร กาบมะพร้าวและซิลิกาเจลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung & Pfof (1967) ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด โดยค่า RMSE ที่ต่ำ หมายถึง ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผิดพลาดจากการทดลองน้อย ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ค่า RMSE ต่ำ จึงเป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับผลจากการทดลองมากที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า RMSE ที่ได้จากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1

ถึง 4.8 จึงสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson (1952) สามารถอธิบายผลการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของแกลบ ทางใบสาकुและกาบมะพร้าวได้ดีที่สุด ส่วนซิลิกาเจลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung & Pfof (1967) สามารถอธิบายได้ดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ที่นำมาพิจารณา นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung & Pfof (1967) ยังสามารถอธิบายผลการทดลองความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของทางใบสาकु กาบมะพร้าวและซิลิกาเจลได้ดีที่สุดอีกด้วย ส่วนแกลบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson (1952) สามารถอธิบายได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้

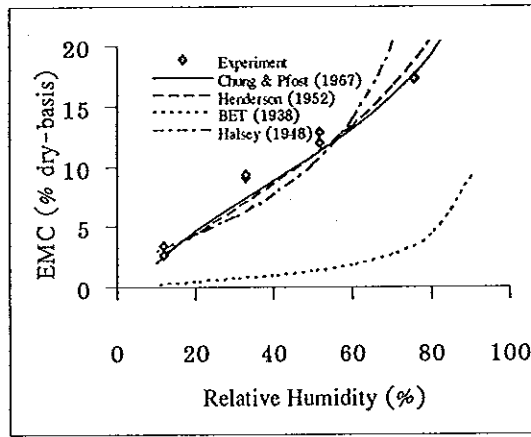


ภาพประกอบที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสารดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิ $31.0 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ (อุณหภูมิแวดล้อม)

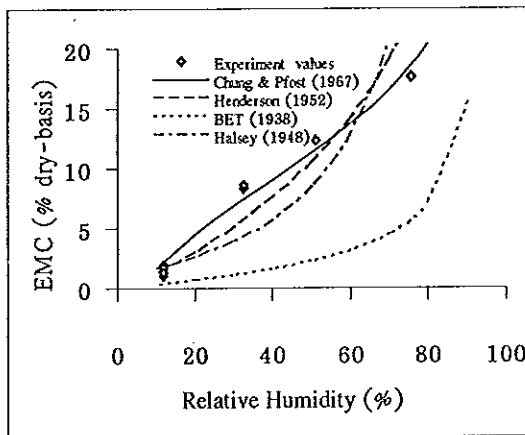
จากกราฟที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นและแบบคายความชื้นดังภาพประกอบที่ 4.4 ถึง 4.5 จะเห็นว่า ที่อุณหภูมิคงที่ความชื้นสมดุลของสารดูดซับความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น และที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ความชื้นสมดุลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นโมเลกุลของน้ำในสารดูดซับความชื้น จะได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้สารดูดซับความชื้นมีพลังงานสูงขึ้นส่งผลให้น้ำเคลื่อนที่กลายเป็นไอได้เร็วขึ้น ทำให้ความชื้นในสารดูดซับความชื้นลดลงค่าความชื้นสมดุลจึงต่ำลง ส่วนที่อุณหภูมิ 40 และ 50°C ก็เป็นไปในทำนองเดียวกัน



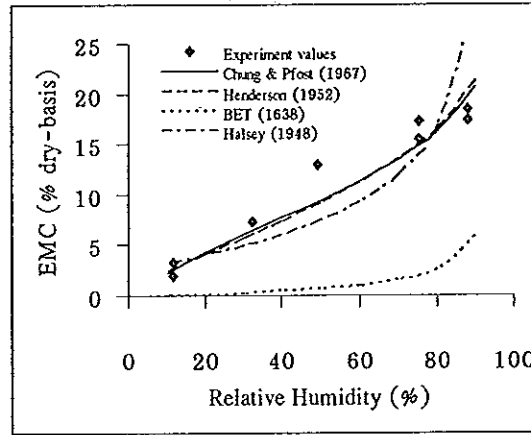
แกลบ



ทางใบสาธุ



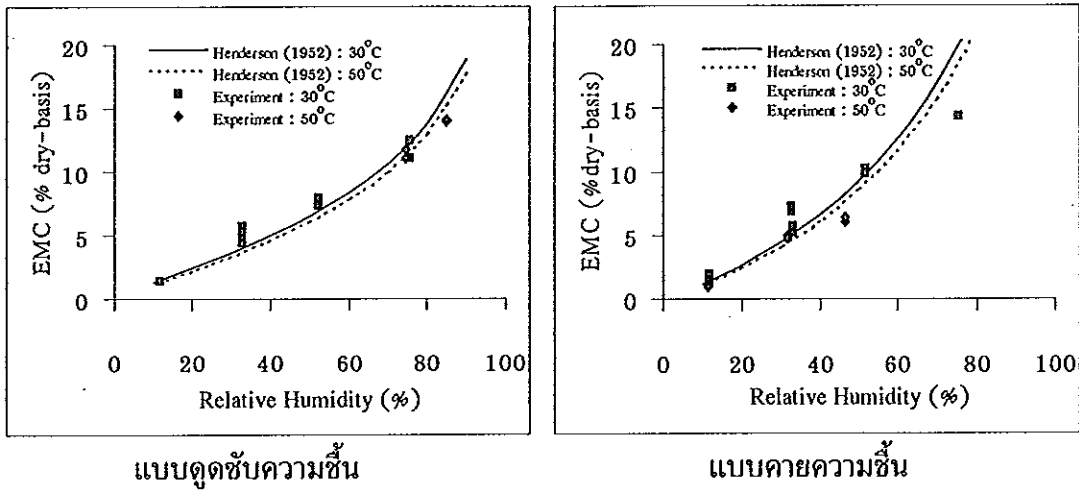
กาบมะพร้าว



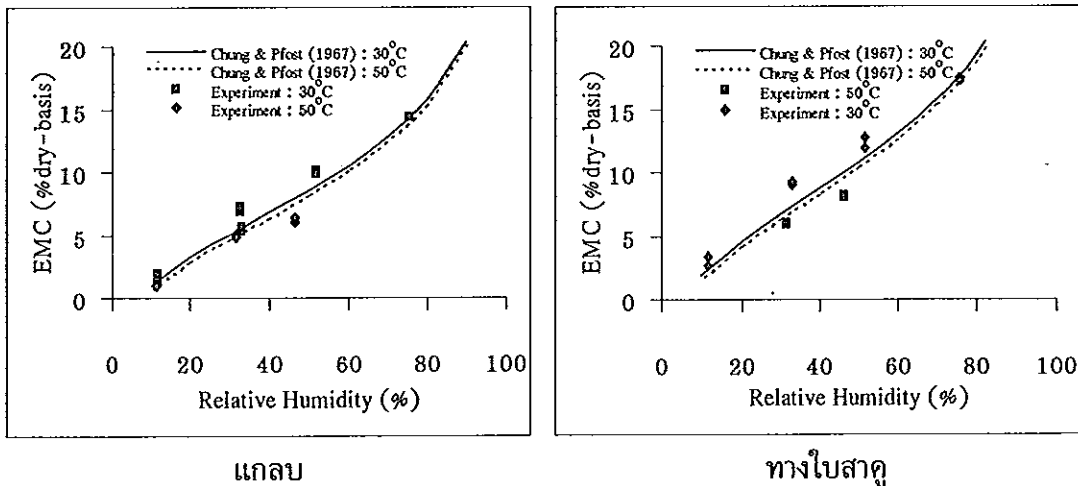
ซิลิกาเจล

ภาพประกอบที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสารดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิ $31.4 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ (อุณหภูมิแวดล้อม)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิ ต่อความชื้นสมดุลในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง คือ 30.0-50.0°C พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อความชื้นสมดุลของสารดูดซับความชื้นน้อยมาก ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟที่เกือบจะทับกัน ดังภาพประกอบที่ 4.6 ถึง 4.7



ภาพประกอบที่ 4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นสมดุลของแกลบตามแบบจำลองของ Henderson (1952)



ภาพประกอบที่ 4.7 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของสารดูดซับความชื้นตามแบบจำลองของ Chung & Pfof (1967)

4.2 ผลการทดลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้น

4.2.1 ผลการทดลองอบแห้งชั้นบาง

จากการทดลองอบแห้งชั้นบางของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ ดังต่อไปนี้

1) การเปรียบเทียบสมการทางคณิตศาสตร์

การอบแห้งชั้นบางแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล ได้เปรียบเทียบกับสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล 5 สมการ คือ สมการ Henderson and Pabis (1961) สมการ Modified Page (White *et al.*, 1978) สมการ Newton (Mujumdar, 1987) สมการ Page (1949) และสมการ Wang and Singh (1978) โดยมีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$\text{Henderson and Pabis (1961); } \quad MR = a \exp(-kt) \quad (4.13)$$

$$\text{Modified Page (White et al., 1978); } \quad MR = \exp[-(kt)^n] \quad (4.14)$$

$$\text{Newton (Mujumdar, 1987); } \quad MR = \exp(-k_d t) \quad (4.15)$$

$$\text{Page (1949); } \quad MR = \exp(-kt^n) \quad (4.16)$$

$$\text{Wang and Singh (1978); } \quad MR = 1 + at + bt^2 \quad (4.17)$$

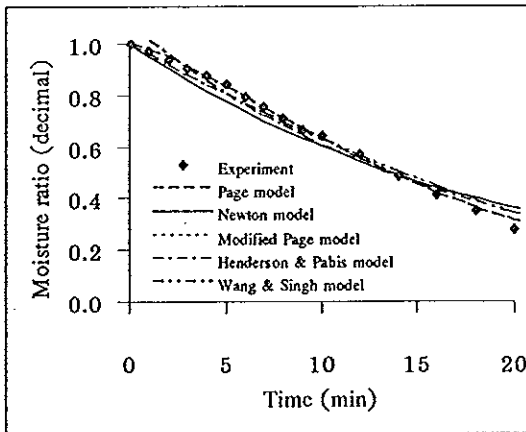
เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

t คือ เวลา (min)

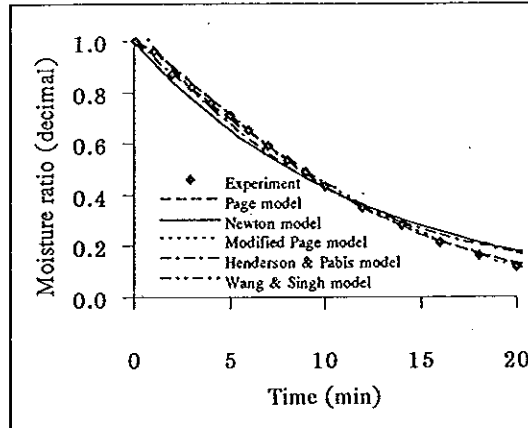
k_d คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง (min^{-1})

a, b, k และ n คือ ค่าคงที่ของสมการ

เมื่อนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างการอบแห้งชั้นบาง กับเวลา ตามรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว จะได้ค่าคงที่ของสมการออกมาและเมื่อนำค่าคงที่ของสมการแทนกลับในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 4.13 ถึง 4.17 แล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ ดังภาพประกอบที่ 4.8 ถึง 4.10 ดังนี้

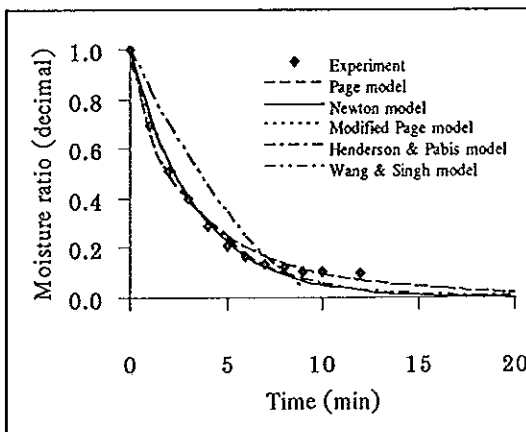


อุณหภูมิ 90.0°C



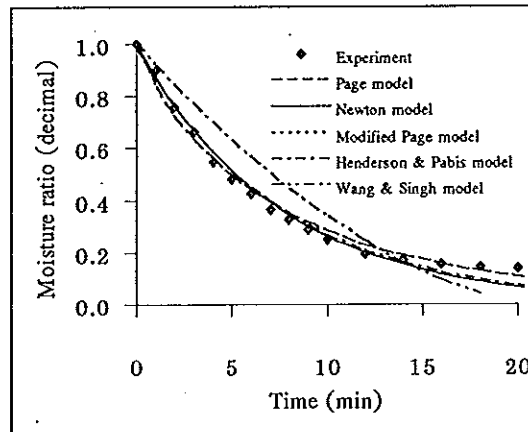
อุณหภูมิ 110.0°C

ภาพประกอบที่ 4.8 เปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งชั้นบางกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของซิลิกาเจลความชื้นเริ่มต้น 16.9% dry-basis



ความชื้นเริ่มต้น 20.3% dry-basis

อุณหภูมิ 70.0°C



ความชื้นเริ่มต้น 27.8% dry-basis

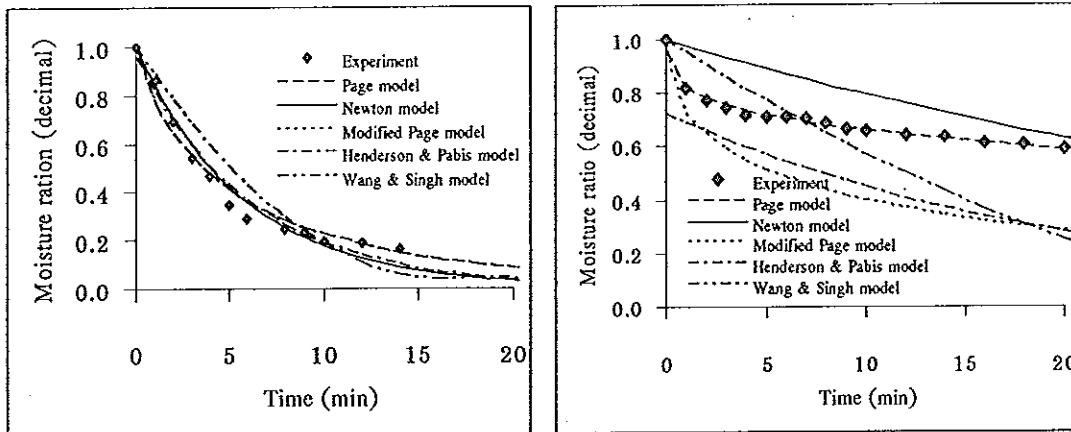
อุณหภูมิ 35.5°C (อุณหภูมิแวดล้อม)

ภาพประกอบที่ 4.9 เปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งชั้นบางกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของแอลบ

หมายเหตุ :

1) การทดลองอบแห้งชั้นบางในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ 2548 ถึง เดือนสิงหาคม พ.ศ 2548

2) การทดลองอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้นและหารูปแบบสมการที่เหมาะสมเพื่อทำนายอัตราการอบแห้งชั้นบางนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำไปใช้ในการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงขึ้นดังที่ได้กล่าวต่อไปในบทที่ 5



ทางใบสาकुความชื้นเริ่มต้น 20.4% dry-basis อุณหภูมิ 50.0°C
 กาบมะพร้าวความชื้นเริ่มต้น 15.4% dry-basis อุณหภูมิ 34.8°C (อุณหภูมิแวดล้อม)

ภาพประกอบที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งชั้นบางกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของทางใบสาकुและกาบมะพร้าว

เมื่อพิจารณาค่า R^2 และค่า RMSE เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลนศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้นพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของ Page และ Modified Page จะให้ค่า R^2 และ RMSE ใกล้เคียงกัน (มีความแตกต่างกันประมาณ $\pm 0.1\%$) โดยสมการของ Page จะให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกับ 1 มากกว่าสมการของ Modified Page และให้ค่า RMSE ต่ำกว่าสมการของ Modified Page เล็กน้อย สำหรับสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ทางใบสาकुและกาบมะพร้าว เช่น จากผลการอบแห้งชั้นบางแกลบ ความชื้นเริ่มต้น 20.3% dry-basis อุณหภูมิ 70.0°C สมการของ Page และ Modified Page ให้ค่า R^2 และ RMSE เท่ากัน คือ เท่ากับ 0.991 และ 0.354 ตามลำดับ ส่วนการอบแห้งชั้นบางกาบมะพร้าวความชื้นเริ่มต้น 15.4% dry-basis ที่อุณหภูมิแวดล้อม (34.8°C) สมการของ Page ให้ค่า R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.995 และ 0.010 ตามลำดับ และสมการของ Modified Page ให้ค่า R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.987 และ 0.268 ตามลำดับ ส่วนการอบแห้งชั้นบางชิลิกาเจล พบว่า รูปแบบสมการของ Page และ Modified Page ให้ค่า R^2 และ RMSE ใกล้เคียงกัน แต่สมการของ Modified Page ให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกับ 1 มากกว่าสมการของ Page และให้ค่า RMSE ต่ำกว่าสมการของ Page เล็กน้อย เช่น จากการอบแห้งชั้นบางชิลิกาเจล ที่ความชื้นเริ่มต้น 16.9% dry-basis อุณหภูมิ 70.0°C สมการของ Page ให้ค่า R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.997 และ 0.021 ตามลำดับ ส่วนสมการของ Modified Page ให้ค่า R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.997 และ 0.019 ตามลำดับ เป็นต้น

ดังนั้น สรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถใช้อธิบายผล

การอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ทางใบสาคร และกาบมะพร้าวได้ดีที่สุด ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Page สามารถใช้อธิบายผลการทดลองอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้นที่เป็นซิลิกาเจลได้ดีที่สุด

2) อิทธิพลของอุณหภูมิ

จากการพิจารณารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม สำหรับการอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้นซึ่ง พบว่า สมการของ Page และ Modified Page สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด เมื่อนำค่าคงที่ (k และ n) ของสมการทั้งสองมาเขียนให้อยู่ในรูปที่ขึ้นกับอุณหภูมิมลร้อนของการอบแห้งจะได้รับความสัมพันธ์ ดังนี้

2.1) แกลบ

$$k = 0.0946 \ln T - 0.1735 \quad ; \quad R^2 = 0.823 \quad (4.18)$$

$$n = 0.5912 \exp(0.0096T) \quad ; \quad R^2 = 0.977 \quad (4.19)$$

2.2) ทางใบสาคร

$$k = 0.0161T - 0.4517 \quad ; \quad R^2 = 0.994 \quad (4.20)$$

$$n = 0.3178 \exp(0.0199T) \quad ; \quad R^2 = 0.784 \quad (4.21)$$

2.3) กาบมะพร้าว

$$k = 0.0110T - 0.24500 \quad ; \quad R^2 = 0.993 \quad (4.22)$$

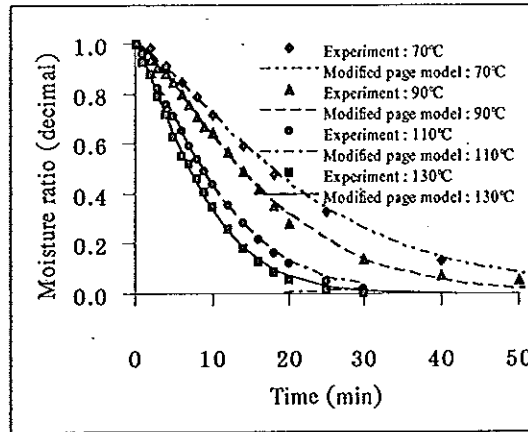
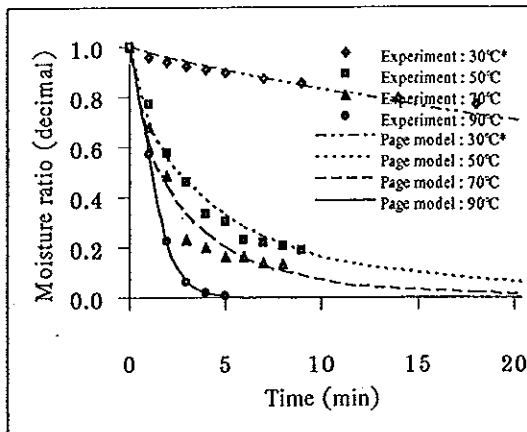
$$n = 0.3260 \exp(0.0146T) \quad ; \quad R^2 = 0.982 \quad (4.23)$$

2.4) ซิลิกาเจล

$$k = 0.0110T - 0.0396 \quad ; \quad R^2 = 0.979 \quad (4.24)$$

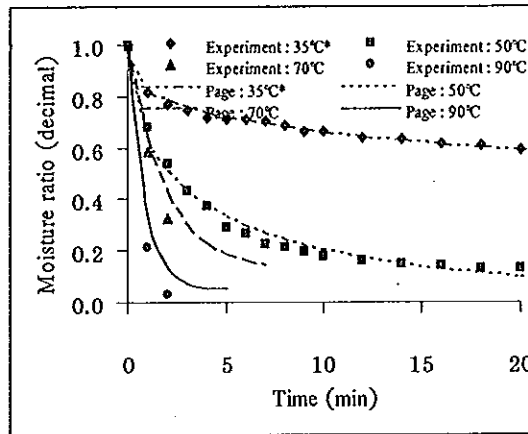
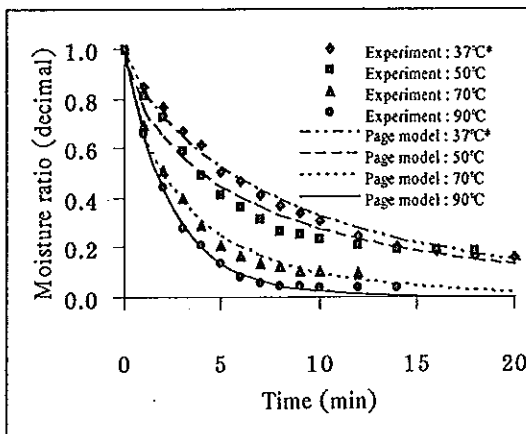
$$n = 0.0004T + 1.2567 \quad ; \quad R^2 = 0.904 \quad (4.25)$$

จะเห็นว่า อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของสารดูดซับความชื้น โดย เมื่ออุณหภูมิมลร้อนของการอบแห้งเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งชั้นบางจะดำเนินไปเร็วขึ้น อธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิมลร้อนสูงขึ้นโมเลกุลของน้ำในสารดูดซับความชื้นจะได้รับความร้อนมากขึ้น ทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำมีมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นโมเลกุลได้ ทำให้น้ำเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งชั้นบางเป็นไปอย่างรวดเร็วมากขึ้น ดังภาพประกอบที่ 4.11 ถึง 4.12 ดังนี้



ทางใบสาकुความชื้นเริ่มต้น 26.7% dry-basis ซิลิกาเจลความชื้นเริ่มต้น 16.9% dry-basis

ภาพประกอบที่ 4.11 อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อนที่มีต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของทางใบสาकु และซิลิกาเจล (* หมายถึง อุณหภูมิแวดล้อม)

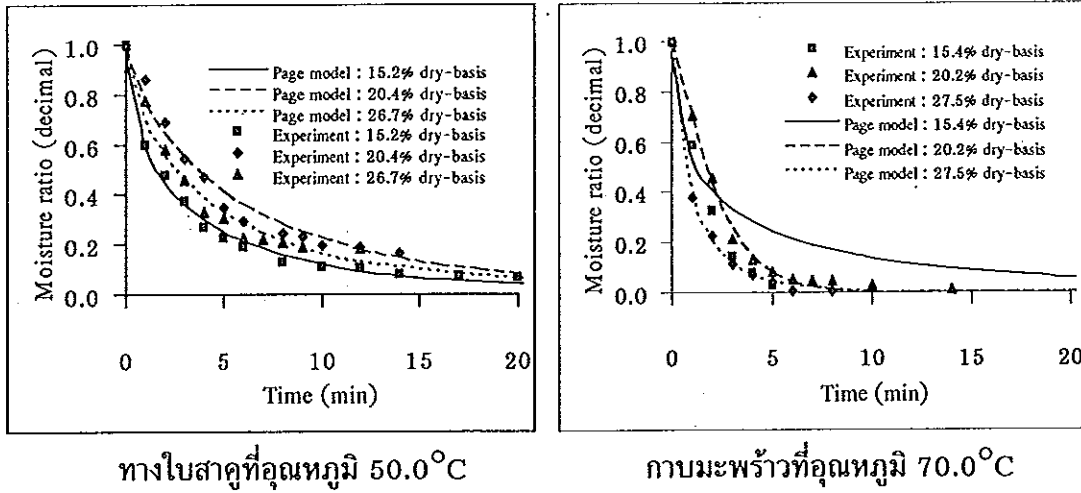


แกลบความชื้นเริ่มต้น 20.3% dry-basis กาบมะพร้าวความชื้นเริ่มต้น 15.4% dry-basis

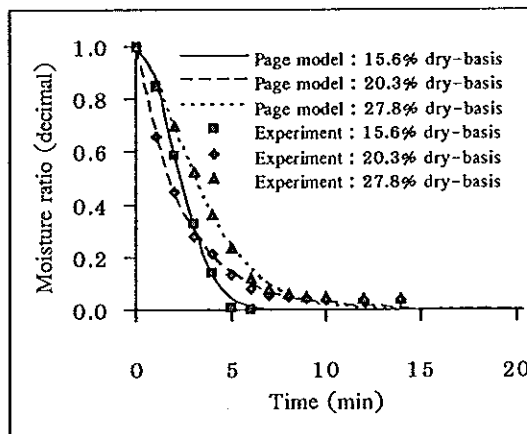
ภาพประกอบที่ 4.12 อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อนที่มีต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของแกลบและ กาบมะพร้าว (* หมายถึง อุณหภูมิแวดล้อม)

3) อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น

การอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้ทำการทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 15.4 ± 0.2 , 20.3 ± 0.1 และ 27.6 ± 0.2 % dry-basis ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น ดังภาพประกอบที่ 4.13 ถึง 4.14 ดังนี้



ภาพประกอบที่ 4.13 อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นที่มีต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของทางใบสาकु และกามะพร้าว

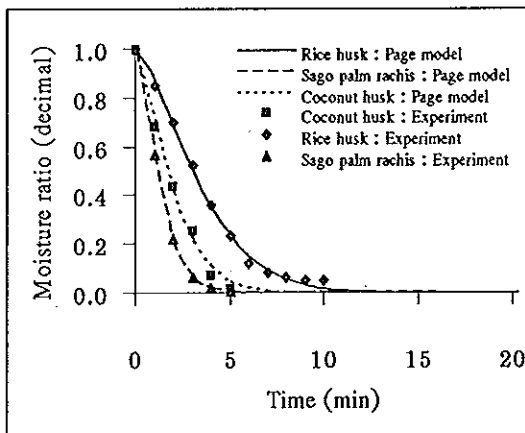


ภาพประกอบที่ 4.14 อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นที่มีต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของแกลบที่อุณหภูมิ 90.0°C

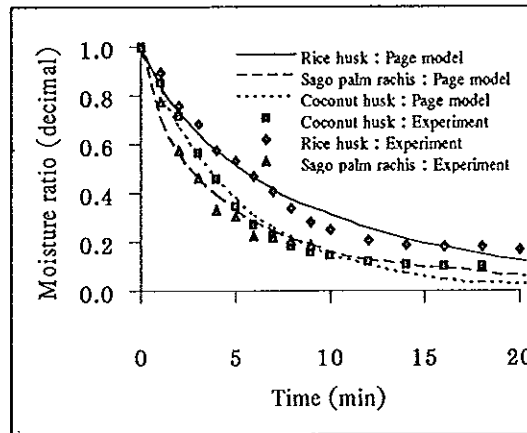
จากการอบแห้งชั้นบางและภาพประกอบที่ 4.13 ถึง 4.14 ไม่สามารถสรุปได้ว่าความชื้นเริ่มต้นในช่วงที่ทดลองมีผลต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของแกลบ ทางใบสาकुและกามะพร้าวหรือไม่ เนื่องจากข้อมูลการทดลองและเส้นกราฟที่ได้ให้ค่าอัตราการอบแห้งชั้นบางไม่สอดคล้องกับความชื้นเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงทุกผลการทดลอง ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลเนื่องจากความชื้นเริ่มต้นที่ทำการทดลองอบแห้งชั้นบางของแกลบ ทางใบสาकुและกามะพร้าว มีค่าต่ำและอยู่ในช่วงที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

4) เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งชั้นบางระหว่างสารดูดซับความชื้นแต่ละชนิด

จากการทดลองอบแห้งชั้นบางและวิเคราะห์รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายอัตราการอบแห้งชั้นบางของแกลบ ทางใบสาकुและกาบมะพร้าวแล้วนั้น เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งชั้นบางกับเวลา จะได้ผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4.15 ถึง 4.17 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นเดียวกันอัตราการอบแห้งชั้นบางของแกลบ ทางใบสาकुและกาบมะพร้าวมีความแตกต่างกัน โดย ณ เวลาเดียวกันทางใบสาकुจะมีค่าอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด รองลงมาคือ กาบมะพร้าวและแกลบ ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออบแห้งชั้นบางแกลบ ทางใบสาकुและกาบมะพร้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิลมร้อนในการอบแห้งเดียวกันอัตราการระเหยของน้ำในวัสดุทั้ง 3 ชนิด จะมีค่าแตกต่างกัน โดยทางใบสาकुจะมีการระเหยของน้ำออกไปยังอากาศแวดล้อมได้ดีกว่ากาบมะพร้าวและแกลบ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในการอบแห้งชั้นบางแกลบ ทางใบสาकुและกาบมะพร้าวนั้น ทางใบสาकुจะใช้เวลาการอบแห้งน้อยที่สุดทำให้สามารถประหยัดเวลาและพลังงานในการอบแห้งได้มากกว่าแกลบและกาบมะพร้าว

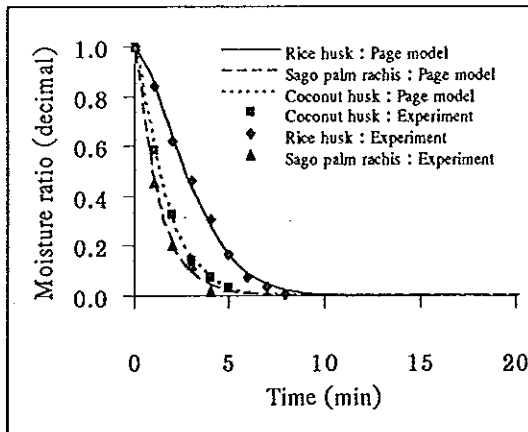


อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90.0°C

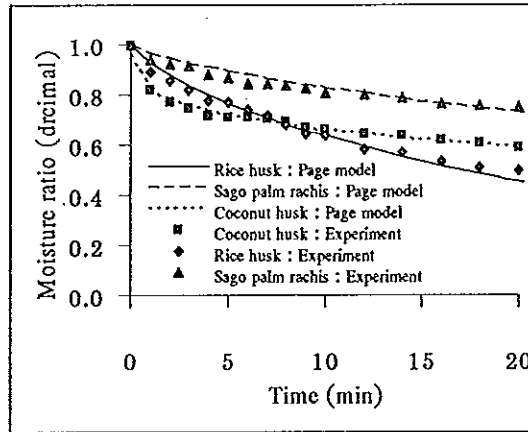


อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 50.0°C

ภาพประกอบที่ 4.15 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งชั้นบางของสารดูดซับความชื้นที่มีความชื้นเริ่มต้น $27.6 \pm 0.2\%$ dry-basis

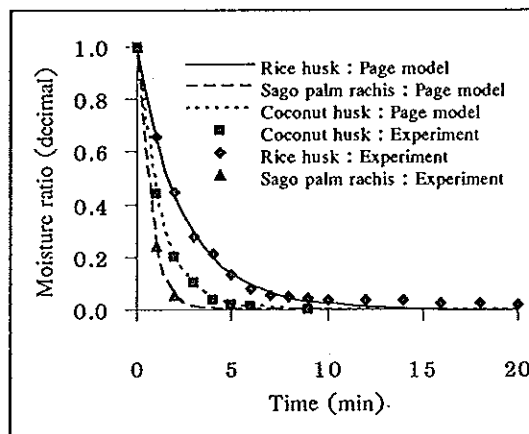


อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 70.0°C



อุณหภูมิลมเวดล้อมโดยเฉลี่ย (32.7°C)

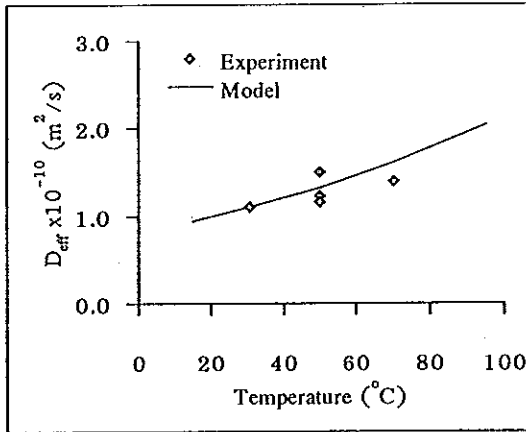
ภาพประกอบที่ 4.16 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งชั้นบางของสารดูดซับความชื้นที่มีความชื้นเริ่มต้น $15.4 \pm 0.2\%$ dry-basis



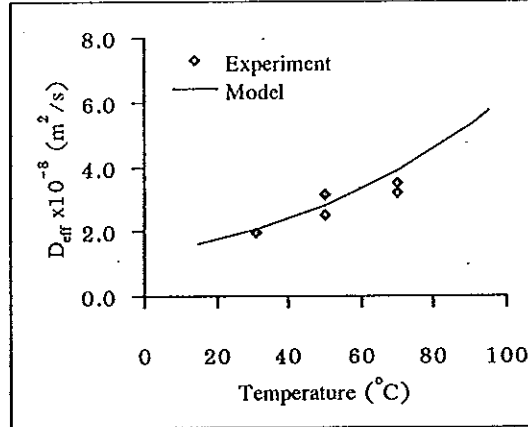
ภาพประกอบที่ 4.17 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งชั้นบางของสารดูดซับความชื้นที่มีความชื้นเริ่มต้น $20.3 \pm 0.1\%$ dry-basis อุณหภูมิร้อน 90.0°C

4.2.2 ผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

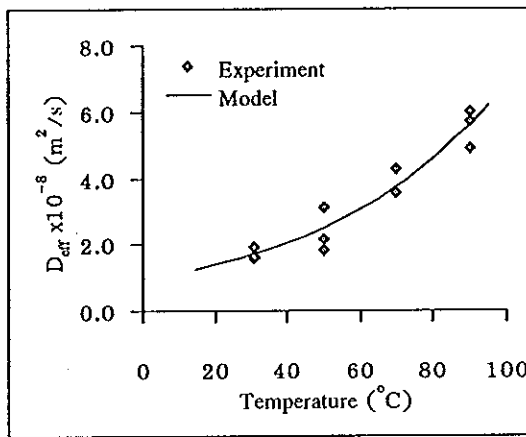
จากการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและชิลิกาเจล แล้วนำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า เมื่ออุณหภูมิร้อนของการอบแห้งแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและชิลิกาเจลเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะมีค่าสูงขึ้น โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและชิลิกาเจล จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเอกซโปเนนเชียลกับความชื้น ดังภาพประกอบที่ 4.18



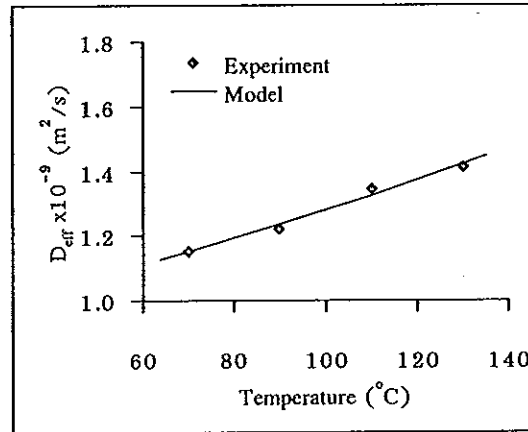
กล้วย



ทางใบสาคู



กามะพร้าว



ชิลิกาเจล

ภาพประกอบที่ 4.18 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของสารดูดซับความชื้นเมื่ออุณหภูมิร้อนในการอบแห้งเปลี่ยนแปลงไป

สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความดันไอภายในและภายนอกสารดูดซับความชื้นจะมีความแตกต่างกันมากขึ้นส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในสารดูดซับความชื้นเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนออกมายังภายนอกได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของสารดูดซับความชื้นแต่ละชนิด พบว่า ทางใบสาคูมีสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงที่สุด รองลงมาคือ กามะพร้าว ชิลิกาเจลและกล้วย ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิร้อนในการอบแห้ง โดยการแทนค่าข้อมูลการทดลองลงในสมการของสารดูดซับความชื้นแต่ละประเภทดังสมการที่ (2.9) ถึง (2.11) จะให้ผลดังนี้

$$\text{กล้วย} \quad D = 0.815 \exp(0.010T) \quad ; \quad R^2 = 0.997 \quad (4.26)$$

$$\text{ทางใบสาตุ} \quad D = 1.260 \exp(0.016T) \quad ; \quad R^2 = 0.998 \quad (4.27)$$

$$\text{กามะพร้าว} \quad D = 0.914 \exp(0.020T) \quad ; \quad R^2 = 0.997 \quad (4.28)$$

$$\text{ชิลิกาเจล} \quad D = 0.900 \exp(0.004T) \quad ; \quad R^2 = 0.993 \quad (4.29)$$

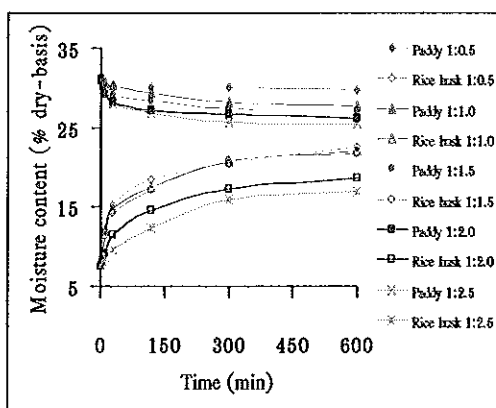
4.3 ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม

การทดลองอบแห้งอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำได้โดยการผสมข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นแต่ละชนิดโดยตรง ในภาชนะอบแห้งขนาดความจุ 427.7 cm^3 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ ดังนี้

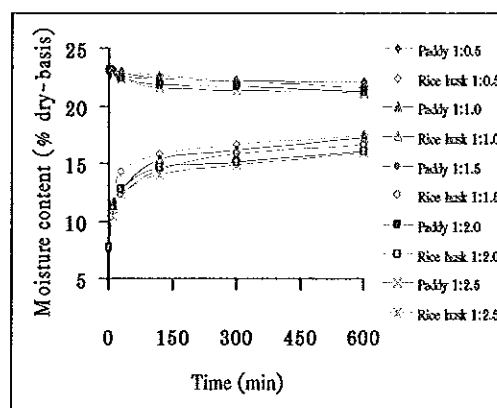
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้น

1) ข้าวเปลือกผสมเกลือ

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและเกลือเท่ากับ 31.2 และ 7.7% dry-basis ตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและเกลือเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร การอบแห้งจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นลดลง จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.3, 3.4, 3.9, 4.9 และ 5.7% dry-basis ตามลำดับ โดยผลต่าง ความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0 โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร และการอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 300 นาที ดังภาพประกอบที่ 4.19



ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 31.2% dry-basis



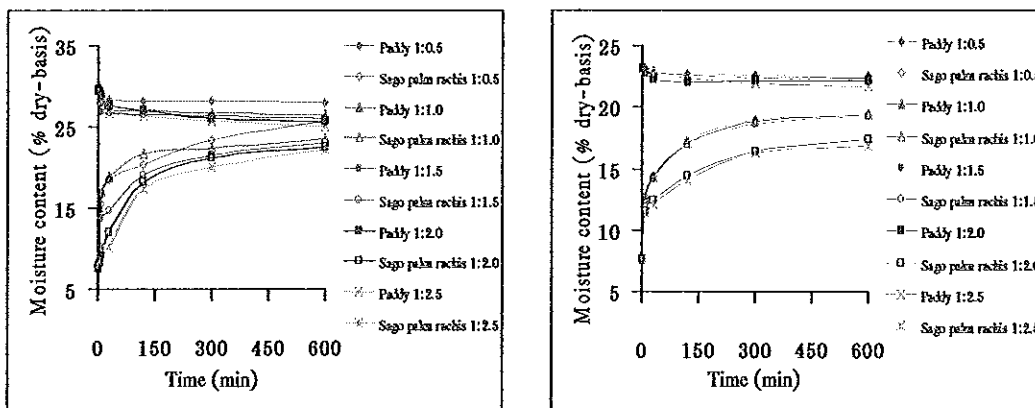
ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 23.2% dry-basis

ภาพประกอบที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยเกลือที่อัตราส่วนผสมต่างๆ (ทดลองที่อุณหภูมิแวดล้อม)

ที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและแกลบเท่ากับ 23.2 และ 7.7% dry-basis ตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและแกลบเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร การอบแห้งจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.1, 1.1, 1.6, 1.9 และ 2.1% dry-basis ตามลำดับ โดยผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5 โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร และการอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 200 นาที ดังภาพประกอบที่ 4.19

2) ข้าวเปลือกผสมทางใบสาคุ

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและทางใบสาคุเท่ากับ 29.5 และ 7.7% dry-basis ตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและทางใบสาคุเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร การอบแห้งจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.4, 3.0, 3.4, 4.1 และ 4.7% dry-basis ตามลำดับ โดยผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0 โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร และการอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 300 นาที ดังภาพประกอบที่ 4.20



ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 29.5% dry-basis ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 23.2% dry-basis

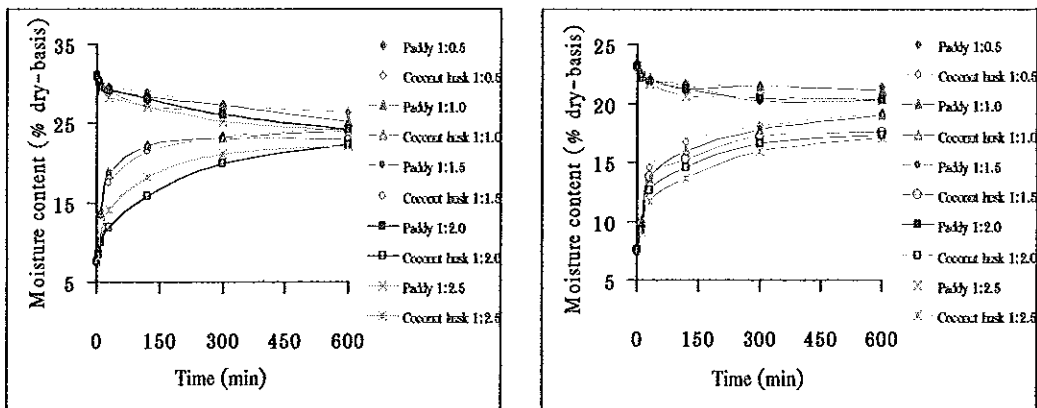
ภาพประกอบที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยทางใบสาคุที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (ทดลองที่อุณหภูมิแวดล้อม)

ที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและทางใบสาคุเท่ากับ 23.2 และ 7.7% dry-

basis ตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและทางใบสาकुเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร การอบแห้งจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นลดลง จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.7, 0.9, 1.1, 1.0 และ 1.1% dry-basis ตามลำดับ โดยผลต่าง ความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5 โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร และการอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อ ระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 200 นาที ดังภาพประกอบที่ 4.20

3) ข้าวเปลือกผสมกับมะพร้าว

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและกากมะพร้าวเท่ากับ 31.1 และ 7.7% dry-basis ตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและกากมะพร้าวเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร การอบแห้งจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 4.7, 5.8, 6.8, 6.9 และ 7.1% dry-basis ตามลำดับ โดยผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0 โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร และการอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุล เมื่อ ระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 300 นาที ดังภาพประกอบที่ 4.21



ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 31.1% dry-basis ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 23.2% dry-basis

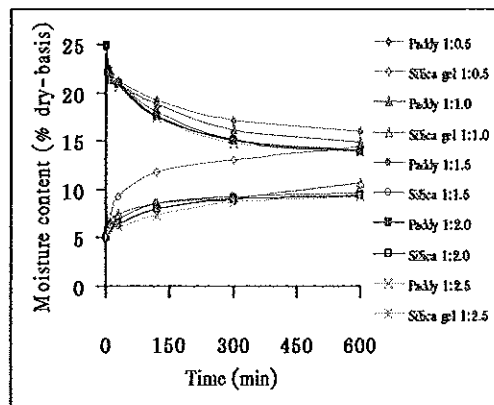
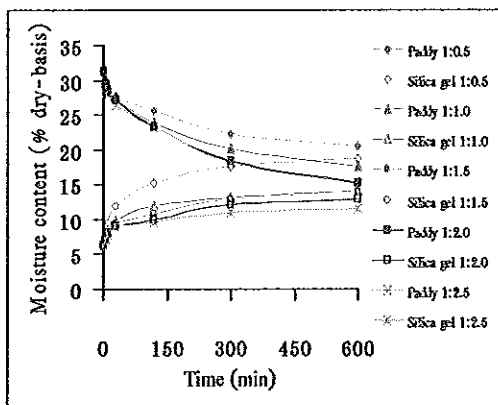
ภาพประกอบที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยกากมะพร้าวที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (ทดลองที่อุณหภูมิแวดล้อม)

ที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและกากมะพร้าวเท่ากับ 23.2 และ 7.7% dry-basis ตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและกากมะพร้าวเท่ากับ 1:0.5,

1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร การอบแห้งจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นลดลง จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.7, 2.1, 2.8, 2.8 และ 2.9% dry-basis ตามลำดับ โดยผลต่าง ความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5 โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร และการอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลา การอบแห้งดำเนินไปประมาณ 200 นาที ดังภาพประกอบที่ 4.21

4) ข้าวเปลือกผสมซิลิกาเจล

ทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและซิลิกาเจลเท่ากับ 31.3 และ 6.2% dry-basis ตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและซิลิกาเจลเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร การอบแห้งจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นลดลง จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 10.8, 13.7, 16.1, 16.1 และ 16.2% dry-basis ตามลำดับ โดย ผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0 โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร และการอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุล เมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 300 นาที ดังภาพประกอบที่ 4.22



ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 31.3% dry-basis ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 24.8% dry-basis

ภาพประกอบที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยซิลิกาเจลที่อัตรา ส่วนผสมต่าง ๆ (ทดลองที่อุณหภูมิแวดล้อม)

ที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและซิลิกาเจลเท่ากับ 24.8 และ 5.1% dry-basis ตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและซิลิกาเจลเท่ากับ 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร การอบแห้งจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงจากความชื้น เริ่มต้นเท่ากับ 8.8, 9.9, 10.8, 10.9 และ 11.0% dry-basis ตามลำดับ

โดยผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0 โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร และการอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 200 นาที ดังภาพประกอบที่ 4.22

จากการทดลองอบแห้งข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนผสมของสารดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความสามารถในการลดความชื้นข้าวเปลือกมีมากขึ้น เพราะการเพิ่มอัตราส่วนผสมของสารดูดซับความชื้นให้สูงขึ้นก็คือการลดปริมาณข้าวเปลือกให้น้อยลง จึงทำให้สารดูดซับความชื้นมีอัตราการดูดซับความชื้นที่เพิ่มขึ้น กรณีที่ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $30.4 \pm 0.9\%$ dry-basis จะมีผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0 โดยปริมาตร สูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร ส่วนกรณีที่ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $23.9 \pm 0.8\%$ dry-basis จะมีผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5 โดยปริมาตร สูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร สำหรับสารดูดซับความชื้นที่เป็นเกลบ ทางใบสาคุและกาบมะพร้าว ส่วนสารดูดซับความชื้นที่เป็นซิลิกาเจลการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:0.5 เป็น 1:1.0 โดยปริมาตร จะมีผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมจาก 1:1.0 เป็น 1:1.5, 1:1.5 เป็น 1:2.0 และ 1:2.0 เป็น 1:2.5 โดยปริมาตร อธิบายได้ว่าการอบแห้งที่อัตราส่วนผสมต่ำนั้นปริมาณสารดูดซับความชื้นจะมีปริมาณน้อย จึงไม่เพียงพอต่อการดูดซับความชื้นข้าวเปลือกทำให้สารดูดซับความชื้นเกิดการอิ่มตัวด้วยความชื้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของสารดูดซับความชื้นให้สูงขึ้น จึงเปรียบเสมือนการเพิ่มอัตราการดูดซับความชื้นให้สูงขึ้น แต่จะเห็นได้เด่นชัดที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นเท่ากับ 1:1.0 และ 1:1.5 โดยปริมาตร สำหรับซิลิกาเจลและสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ตามลำดับ แต่ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นสูงกว่านี้ พบว่า ผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นมีค่าลดลงเนื่องจากสารดูดซับความชื้นมีปริมาณมากเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณข้าวเปลือกในระบบอบแห้งทำให้สารดูดซับความชื้นสัมผัสข้าวเปลือกได้ไม่สม่ำเสมอ และที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นสูง ๆ จำเป็นต้องใช้สารดูดซับความชื้นในปริมาณมากเมื่อเทียบกับปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ทดลอง แต่สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้ใกล้เคียงกันกับที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นเท่ากับ 1:1.5 และ 1:1.5 โดยปริมาตร

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นข้าวเปลือกของสารดูดซับความชื้นทั้ง 4 ชนิด พบว่า ซิลิกาเจลสามารถดูดซับความชื้นข้าวเปลือกได้ดีที่สุดแต่ซิลิกาเจลจะมี

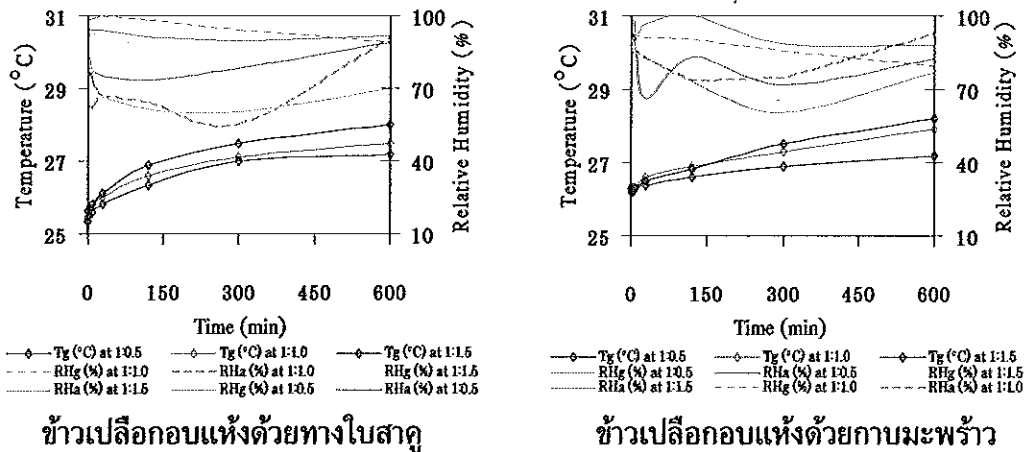
การแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ เมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น รองลงมาคือ กาบมะพร้าว แกลบและทางใบ สาคุ ตามลำดับ โดยข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $30.4 \pm 0.9\%$ dry-basis การอบแห้ง จะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 300 นาที ส่วนข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $23.9 \pm 0.8\%$ dry-basis การอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 200 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ที่เริ่มคงที่เมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 250-300 นาที ดังภาพประกอบที่ 4.23 จึงสรุปได้ว่า กาบมะพร้าวสามารถนำมาใช้เป็นสารดูดซับความชื้นในการดูดซับความชื้นข้าวเปลือก โดยเทคนิคการดูดซับความชื้นได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับแกลบ ทางใบสาคุและชิลิกาเจล โดยที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเท่ากับ $30.4 \pm 0.9\%$ dry-basis จะมีอัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับ 1:1.0 โดยปริมาตร สำหรับสารดูดซับความชื้นที่เป็น แกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและชิลิกาเจล และที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเท่ากับ $23.9 \pm 0.8\%$ dry-basis จะมีอัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับ 1:1.5 โดยปริมาตร สำหรับสารดูดซับความชื้นที่เป็น แกลบ ทางใบสาคุและกาบมะพร้าว ส่วนชิลิกาเจลมีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเท่ากับ 1:1.0 โดยปริมาตร

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมนี้ ได้ใช้ตัวอย่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ $25.5 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ผสมเข้าด้วยกันแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อมและทำการบันทึกอุณหภูมิในของผสม อุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก แล้วคำนวณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์ในของผสม ดังได้แสดงตัวอย่างไว้ในภาพประกอบที่ 4.23 ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิในของผสมที่เวลา 600 นาที มีค่าสูงขึ้นประมาณ $1.0-2.4^{\circ}\text{C}$ จากอุณหภูมิเริ่มต้น $25.5 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ (ก่อนทำการทดลองได้เก็บข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นไว้ที่อุณหภูมิห้อง) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากกระบวนการหายใจของข้าวเปลือกเนื่องจากการเผาผลาญแป้งซึ่งจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและความร้อนออกมา (สมชาติ, 2540; ASHRAE, 1981) โดยอุณหภูมิจะแตกต่างกันเล็กน้อยตามอัตราส่วนผสมของสารดูดซับความชื้นที่ลดลง กล่าวคือ ที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นเท่ากับ 1:0.5 โดยปริมาตร จะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 1:1.0 และ 1:1.5 โดยปริมาตร ตามลำดับ เนื่องจากการทดลองได้ใช้ภาชนะบรรจุของผสมที่มีปริมาตรคงที่ ทำให้ปริมาณข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่ใช้ทดลองแต่ละอัตราส่วนไม่เท่ากัน คือ ปริมาณข้าวเปลือกที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 1:0.5 โดยปริมาตร จะมีมากกว่าที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 1:1.0 และ 1:1.5 โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับปริมาณของสารดูดซับความชื้นที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออัตรา

ส่วนผสมเพิ่มขึ้นจาก 1:0.5, 1:1.0 และ 1:1.5 โดยปริมาตร ตามลำดับ จึงทำให้ความชื้นในภาชนะของผสมเนื่องจากการหายใจของข้าวเปลือกที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 1:0.5 โดยปริมาตร มีค่ามากกว่าที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 1:1.0 และ 1:1.5 โดยปริมาตร ส่งผลให้อุณหภูมิในของผสมที่อัตราส่วน 1:0.5 โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 1:1.0 และ 1:1.5 โดยปริมาตร ตามลำดับ

การทดลองได้ทำในภาชนะปิดสนิทความชื้นจึงไม่สามารถออกมายังภายนอกได้ ส่งผลให้ความชื้นของข้าวเปลือกมีการระเหยสู่อากาศโดยรอบภายในภาชนะอบแห้ง ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในภาชนะของผสมมีค่าสูงในช่วงแรก ๆ ของการอบแห้ง จนเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปได้ระยะหนึ่งความแตกต่างของความดันไอน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกกับอากาศในภาชนะของผสมเริ่มลดลง ความชื้นจากข้าวเปลือกจึงระเหยออกมาได้มากขึ้นทำให้ความชื้นสัมพัทธ์เริ่มมีค่าคงที่ ในขณะที่สารดูดซับความชื้นที่ผสมอยู่มีความชื้นต่ำจึงดูดซับความชื้นจากอากาศในภาชนะของผสมเข้าไปทำให้ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยเมื่ออัตราส่วนผสมของสารดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นความชื้นสัมพัทธ์จะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่อัตราส่วนผสมของสารดูดซับความชื้นสูงนั้นปริมาณสารดูดซับความชื้นจะมีมาก ความชื้นจึงถูกดูดซับด้วยสารดูดซับความชื้นได้มาก ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะของผสมมีค่าลดลงตามไปด้วย และความชื้นสัมพัทธ์ในระบบอบแห้งจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 250-300 นาที เนื่องจากกระบวนการดูดซับความชื้นเริ่มเข้าสู่สมดุล ดังภาพประกอบที่ 4.19 ถึง 4.22



ภาพประกอบที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 29.6 ± 0.1 และ $31.1 \pm 0.1\%$ dry-basis ด้วยทางใบสาคุและกามมะพร้าว

4.4 ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกระดับสาธิตการใช้งาน

การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นระดับสาธิตการใช้งานทดลองได้โดยการผสมข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์เล็บนกปีตตานีและสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เข้ากับสารดูดซับความชื้นแต่ละชนิดโดยตรง ในถังอบแห้งขนาดความจุ 20 ลิตร กำหนดให้ข้าวเปลือกมีปริมาณคงที่ประมาณ 4.3 กิโลกรัม อบแห้งเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิแวดล้อม ได้ผลการทดลอง ดังนี้

4.4.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้น

1) ข้าวเปลือกผสมเกลือ

จากการอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปีตตานีและสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 23.4 ± 0.1 และ $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis ตามลำดับ ด้วยเกลือความชื้นเริ่มต้น $6.1 \pm 0.2\%$ dry-basis พบว่า เมื่อทำการอบแห้งเป็นเวลา 10 ชั่วโมง จะสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปีตตานีและสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จาก 23.4 ± 0.1 และ $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis เป็น 20.5 ± 0.3 และ $22.8 \pm 0.2\%$ dry-basis ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 4.24

2) ข้าวเปลือกผสมทางใบสาคุ

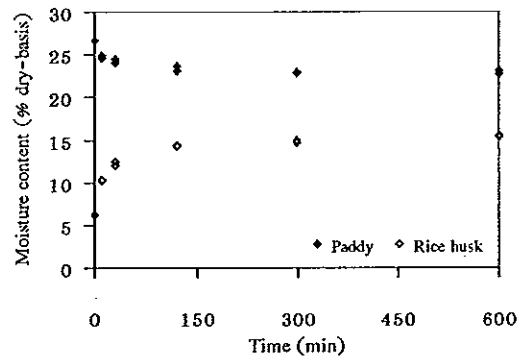
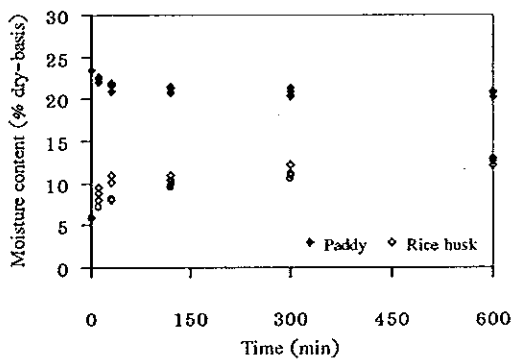
จากการอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปีตตานีและสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 23.6 ± 0.2 และ $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis ตามลำดับ ด้วยทางใบสาคุความชื้นเริ่มต้น $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis พบว่า เมื่อทำการอบแห้งเป็นเวลา 10 ชั่วโมง จะสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปีตตานีและสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จาก 23.6 ± 0.2 และ $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis เป็น 21.4 ± 0.5 และ $24.4 \pm 0.2\%$ dry-basis ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 4.25

3) ข้าวเปลือกผสมกาบมะพร้าว

จากการอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปีตตานีและสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 25.2 ± 0.2 และ $26.9 \pm 0.1\%$ dry-basis ตามลำดับ ด้วยกาบมะพร้าวความชื้นเริ่มต้น $6.9 \pm 0.2\%$ dry-basis พบว่า เมื่อทำการอบแห้งเป็นเวลา 10 ชั่วโมง จะสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปีตตานีและสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จาก 25.2 ± 0.2 และ $26.9 \pm 0.1\%$ dry-basis เป็น 20.0 ± 0.2 และ $23.6 \pm 0.3\%$ dry-basis ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 4.26

4) ข้าวเปลือกผสมชิลิกาเจล

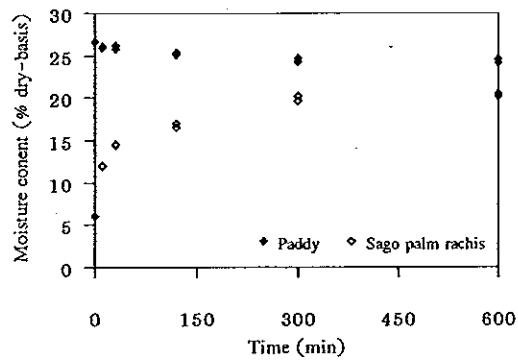
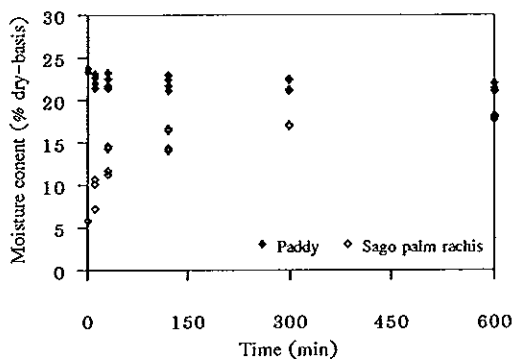
จากการอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปิดตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 25.4 ± 0.1 และ $25.7 \pm 0.1\%$ dry-basis ตามลำดับ ด้วยชิลิกาเจลความชื้นเริ่มต้น $6.2 \pm 0.1\%$ dry-basis พบว่า เมื่อทำการอบแห้งเป็นเวลา 10 ชั่วโมง จะสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปิดตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จาก 25.4 ± 0.1 และ $25.7 \pm 0.1\%$ dry-basis เป็น 16.5 ± 0.2 และ $16.6 \pm 0.1\%$ dry-basis ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 4.27



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปิดตานี
ความชื้นเริ่มต้น $23.4 \pm 0.1\%$ dry-basis

ข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
ความชื้นเริ่มต้น $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis

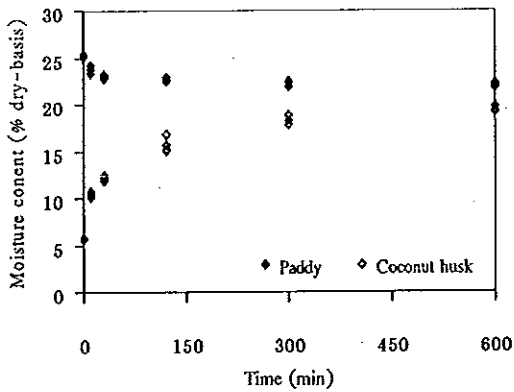
ภาพประกอบที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยแคลบที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.1 \pm 0.2\%$ dry-basis



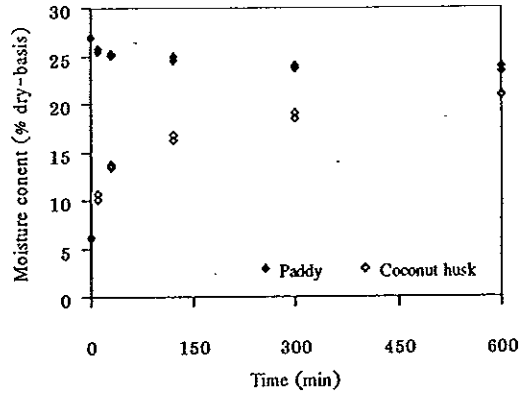
ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปิดตานี
ความชื้นเริ่มต้น $23.5 \pm 0.2\%$ dry-basis

ข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
ความชื้นเริ่มต้น $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยทางใบสาकुที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis

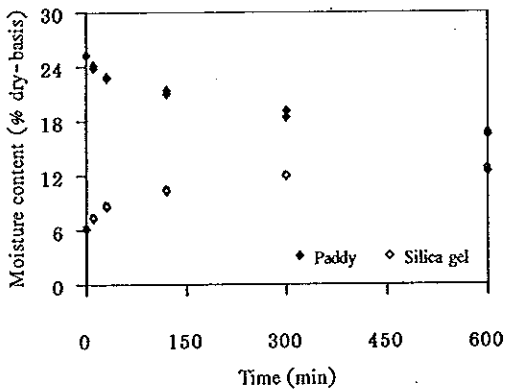


ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
ความชื้นเริ่มต้น $23.6 \pm 0.2\%$ dry-basis

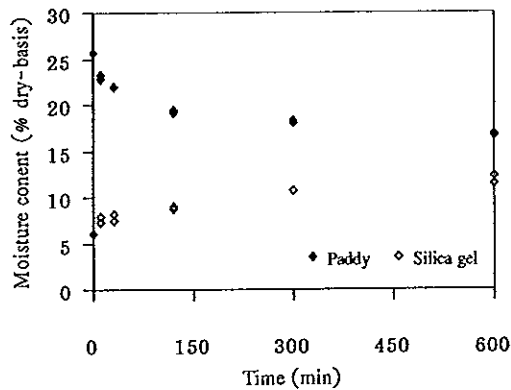


ข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
ความชื้นเริ่มต้น $26.9 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยกาบมะพร้าว
ที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.9 \pm 0.2\%$ dry-basis



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
ความชื้นเริ่มต้น $25.4 \pm 0.1\%$ dry-basis



ข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
ความชื้นเริ่มต้น $25.7 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยซิลิกาเจลที่มีความชื้น
เริ่มต้นเท่ากับ $6.2 \pm 0.1\%$ dry-basis

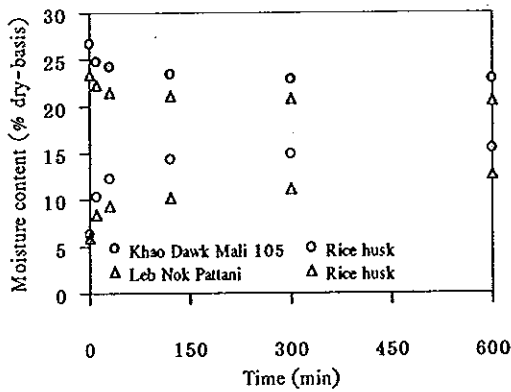
จากภาพประกอบที่ 4.24 ถึง 4.27 พบว่า การอบแห้งในระยะเวลา 200 นาที
แรกจะเป็นช่วงที่อัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นความสามารถในการลดความชื้น
ข้าวเปลือกของสารดูดซับความชื้นจะน้อยลง ซึ่งอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกของการอบแห้งข้าวเปลือก
ยังมีความชื้นสูงอยู่ความแตกต่างของความดันไอน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกกับสารดูดซับความชื้นและ
อากาศในระบบอบแห้งยังมีค่ามาก ทำให้ปริมาณไอน้ำที่ระเหยออกสู่อากาศในถังอบแห้ง

มีปริมาณมากตามไปด้วย สารดูดซับความชื้นซึ่งมีความชื้นต่ำกว่าความชื้นของข้าวเปลือกจึงดูดซับความชื้นจากข้าวเปลือกและอากาศในระบบอบแห้งได้ในปริมาณมากและรวดเร็ว ทำให้อัตราการอบแห้งดำเนินไปอย่างรวดเร็วในช่วง 200 นาที แรกของการอบแห้ง แต่เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปนานขึ้น ความแตกต่างของความดันไอน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกกับสารดูดซับความชื้นและอากาศในระบบอบแห้งจะลดลง ปริมาณน้ำที่ระเหยสู่อากาศในระบบอบแห้งจึงมีปริมาณน้อยลงตามไปด้วย ส่งผลให้อัตราการดูดซับความชื้นของสารดูดซับความชื้นลดลง ทำให้อัตราการอบแห้งลดลงจนเข้าสู่สมดุลทางความชื้นในที่สุด ซึ่งที่สมดุลนี้จะไม่มีการถ่ายโอนความชื้นระหว่างข้าวเปลือก สารดูดซับความชื้นและอากาศในระบบอบแห้งอีก เมื่อพิจารณาผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นเมื่อใช้สารดูดซับความชื้นชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล พบว่า ซิลิกาเจลสามารถดูดซับความชื้นข้าวเปลือกได้ดีที่สุดเท่ากับ $8.9 \pm 0.2\%$ dry-basis รองลงมาคือกาบมะพร้าวกับแกลบเท่ากับ $3.3 \pm 0.7\%$ dry-basis และทางใบสาคุเท่ากับ $2.3 \pm 0.2\%$ dry-basis ตามลำดับ แต่การอบแห้งที่ใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดซับความชื้นนั้น พบว่า ซิลิกาเจลจะเริ่มแตกเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปถึงชั่วโมงที่ 4-5 และจะแตกเพิ่มมากขึ้นที่เวลาการอบแห้งเท่ากับ 10 ชั่วโมง ส่วนทางใบสาคุจะดูดซับความชื้นข้าวเปลือกได้น้อยเมื่อเทียบกับ กาบมะพร้าวและแกลบ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากทางใบสาคุมีลักษณะที่ค่อนข้างแข็งและมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่ากาบมะพร้าวและแกลบที่สามารถเห็นได้ชัดเจน จึงสรุปได้ว่า กาบมะพร้าวและแกลบเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารดูดซับความชื้นเพื่อดูดซับความชื้นข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น

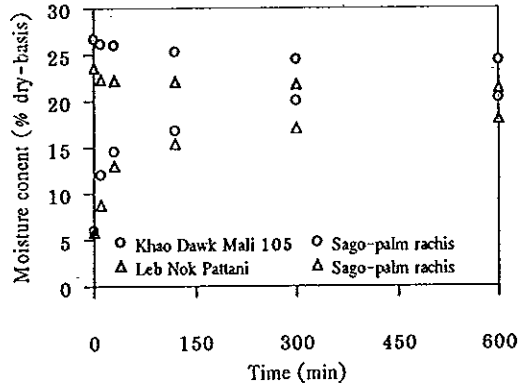
4.4.2 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง

ในการทดลองได้ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ คือ ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีและข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ความชื้นเริ่มต้น 23.4-26.9% dry-basis) ด้วยสารดูดซับความชื้น 4 ชนิด ได้แก่ แกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล (ความชื้นเริ่มต้น 5.9-6.9% dry-basis) ดังนั้นเพื่อศึกษาถึงความสามารถในการอบแห้งข้าวเปลือกทั้งสองสายพันธุ์ด้วยสารดูดซับความชื้นทั้ง 4 ชนิด ดังภาพประกอบที่ 4.28 จึงได้วิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาค่าคงที่ของการอบแห้ง (Drying rate constant, k_d) เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกทั้งสองสายพันธุ์ ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งพบว่าข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีที่อบแห้งด้วยทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจลมีค่าคงที่ของการอบแห้งสูงกว่าข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ส่วนการอบแห้งด้วยแกลบนั้นข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จะมีค่าคงที่ของการอบแห้งสูงกว่าข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี จึงสรุปได้ว่า ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล สามารถใช้เป็นสารดูดซับความชื้นในการอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีได้ดีกว่าข้าวเปลือกสายพันธุ์

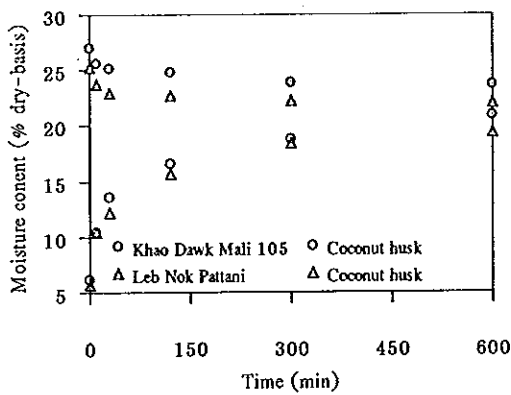
ข้าวดอกมะลิ 105 ยกเว้นแกลบที่สามารถใช้เป็นสารดูดซับความชื้นในการอบแห้งข้าวเปลือก
สายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ได้ดีกว่าข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี



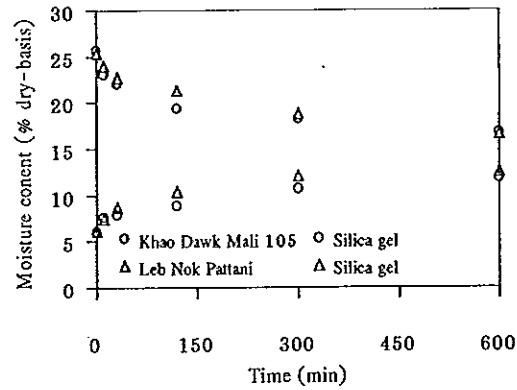
ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
และสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
อบแห้งด้วยแกลบ



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
และสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
อบแห้งด้วยหางใบสาคุ



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
และสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
อบแห้งด้วยกาบมะพร้าว



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
และสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
อบแห้งด้วยซิลิกาเจล

ภาพประกอบที่ 4.28 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกสายพันธุ์
เล็บนกปัตตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการอบแห้งด้วยแกลบ
หางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่ของการอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปิดตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

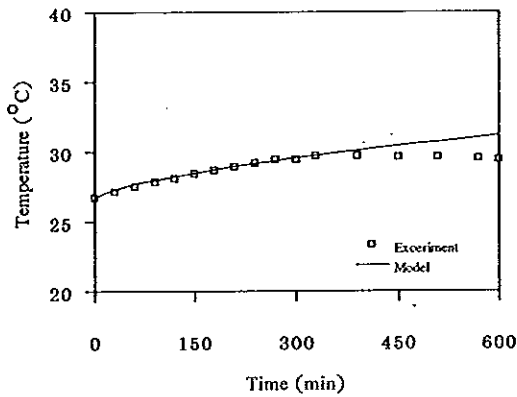
ลักษณะการอบแห้ง	ค่าคงที่ของการอบแห้ง (min^{-1})			
	ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปิดตานี	ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)	ข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105	ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)
อบแห้งด้วยแกลบ ($6.1 \pm 0.2\%$ dry-basis)	8.16×10^{-4}	23.4 ± 0.1	1.19×10^{-3}	26.6 ± 0.1
อบแห้งด้วยทางใบสาคุ ($5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis)	8.16×10^{-4}	23.5 ± 0.2	5.93×10^{-4}	26.6 ± 0.2
อบแห้งด้วยกาบมะพร้าว ($6.9 \pm 0.2\%$ dry-basis)	9.24×10^{-4}	23.6 ± 0.2	8.92×10^{-4}	26.9 ± 0.2
อบแห้งด้วยซิลิกาเจล ($6.2 \pm 0.1\%$ dry-basis)	9.67×10^{-3}	25.4 ± 0.1	9.31×10^{-3}	25.7 ± 0.1

4.4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

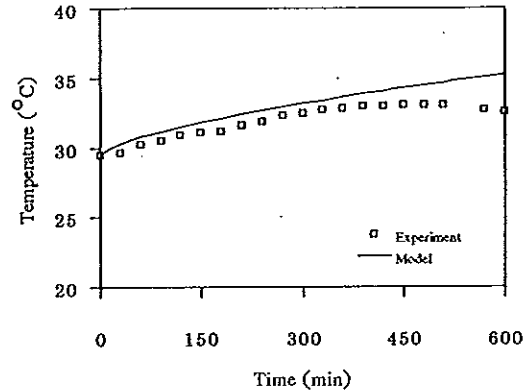
1) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การทดลองอบแห้งได้ใช้ข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม คือ ประมาณ $28.5^{\circ}C$ โดยข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นจะถูกผสมเข้าด้วยกันในถังอบแห้งที่ปิดสนิทและถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนระหว่างระบบอบแห้งกับสิ่งแวดล้อม เมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไป พบว่า อุณหภูมิในถังอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเมื่อการอบแห้งดำเนินไปถึงชั่วโมงที่ 10 อุณหภูมิในถังอบแห้งจะเพิ่มสูงขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 1.5 ถึง $3.5^{\circ}C$ สำหรับข้าวเปลือกอ้างอิง ข้าวเปลือกควบคุมและข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยสารดูดซับความชื้นทั้ง 4 ชนิด ดังภาพประกอบที่ 4.31 ถึง 4.34 อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ด้วยกระบวนการหายใจของข้าวเปลือกเนื่องจากการเผาผลาญแป้ง จะได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและความร้อนออกมา (ASHRAE, 1981) เมื่อข้าวเปลือกอยู่ในสถานะปิดสนิท จะทำให้เกิดการสะสมความร้อนขึ้นในถังอบแห้งตลอดระยะเวลาของการอบแห้ง จากสมการการสูญเสียมวลแห้ง พบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กับมวลแห้งที่สูญเสีย (DML) โดยเมื่อ DML เพิ่มขึ้นอุณหภูมิก็น่าจะเพิ่มขึ้น ตามไปด้วย (สมชาติ, 2540) โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ 2.43 ถึง 2.45 ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพประกอบที่ 4.33 และ 4.34 กล่าวคือ เมื่อการทดลองอบแห้งครบกำหนดเวลา

10 ชั่วโมง พบว่า อุณหภูมิในถังอบแห้งจะสูงขึ้นประมาณ 3 ถึง 5 °C จากอุณหภูมิเริ่มต้น

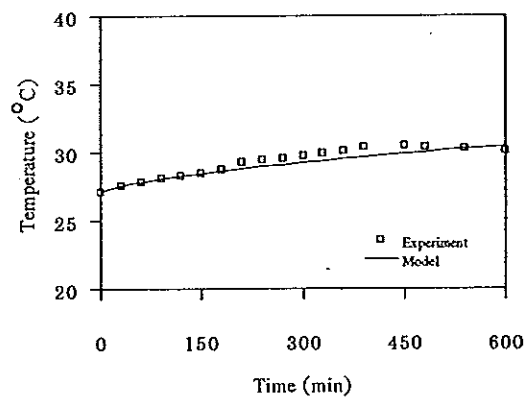


ข้าวเปลือกพันธุ์เล็บนกปิดตานี
ความชื้นเริ่มต้น $25.4 \pm 0.1\%$ dry-basis



ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
ความชื้นเริ่มต้น $25.7 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 4.29 เปรียบเทียบผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการอบแห้ง ข้าวเปลือกด้วยซิลิกาเจลที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.2 \pm 0.1\%$ dry-basis กับผลที่ได้จากการทดลอง (เฉลี่ยจากการวัดทั้งหมด 6 ตำแหน่ง)

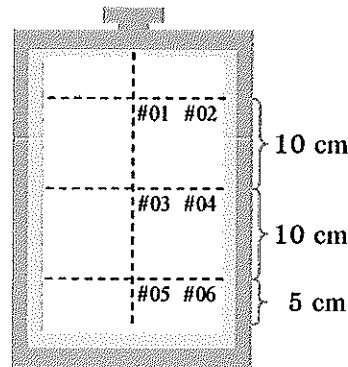
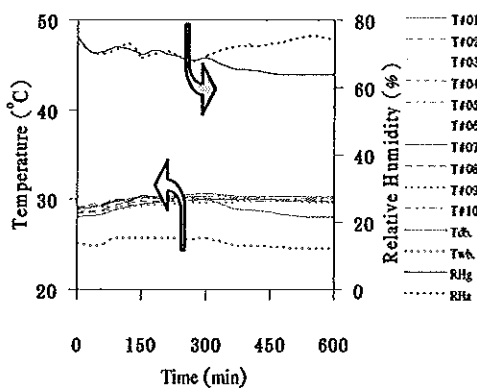


ข้าวเปลือกพันธุ์เล็บนกปิดตานี
ความชื้นเริ่มต้น $23.5 \pm 0.2\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 4.30 เปรียบเทียบผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการอบแห้ง ข้าวเปลือกด้วยทางใบสาอูที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis กับผลที่ได้จากการทดลอง (เฉลี่ยจากการวัดทั้งหมด 6 ตำแหน่ง)

2) การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์

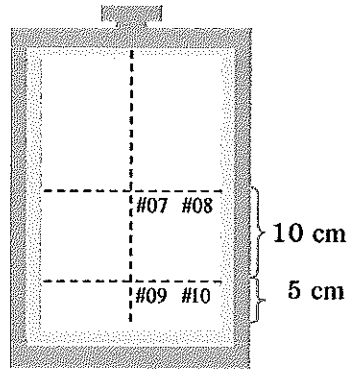
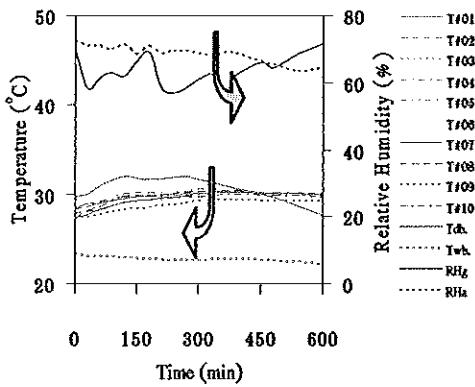
การทดลองอบแห้งทำในภาวะปิดสนิทความชื้นไม่สามารถออกมายังภายนอกถึงอบแห้งได้ จึงเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างผิวของข้าวเปลือกที่ขึ้นกับสารดูดซับความชื้นและอากาศโดยรอบในถังอบแห้งทำให้ความชื้นจากเมล็ดข้าวเปลือกระเหยออกมาและสะสมอยู่ในถังอบแห้งส่งผลให้ระบบอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันสารดูดซับความชื้นซึ่งมีความชื้นต่ำกว่าข้าวเปลือกจะทำการดูดซับความชื้นไว้ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 300 นาที แรกของการอบแห้งมีแนวโน้มคงที่ แต่เมื่อระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นความชื้นของข้าวเปลือกลดน้อยลง ความแตกต่างของความดันไอน้ำที่ผิวข้าวเปลือกกับสารดูดซับความชื้นและอากาศโดยรอบในถังอบแห้งมีค่าน้อยลง ความชื้นของข้าวเปลือกจึงระเหยออกมาได้ยากขึ้นส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ในถังอบแห้งมีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุลเมื่อการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 500 นาที ดังภาพประกอบที่ 4.31 ถึง 4.34



ข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 10
ความชื้นเริ่มต้น $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis

แสดงตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ
ภายในถังอบแห้ง

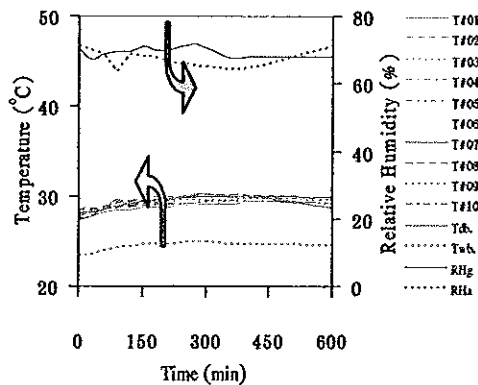
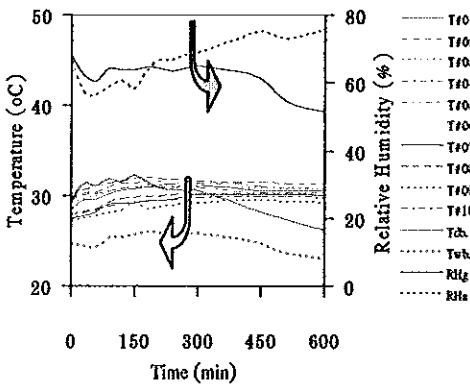
ภาพประกอบที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เมื่ออบแห้งข้าวเปลือก
ด้วยกลบที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.1 \pm 0.2\%$ dry-basis



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
ความชื้นเริ่มต้น $23.5 \pm 0.2\%$ dry-basis

แสดงตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ
ภายในถังควบคุม

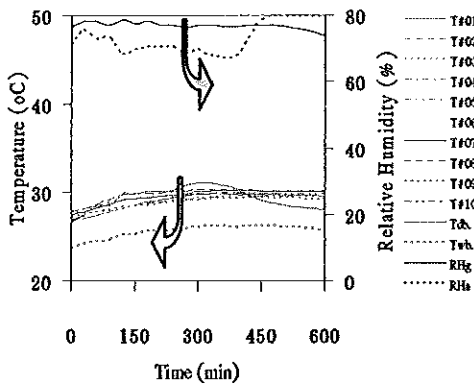
ภาพประกอบที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยทางใบสาคุที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
ความชื้น เริ่มต้น $23.6 \pm 0.2\%$ dry-basis

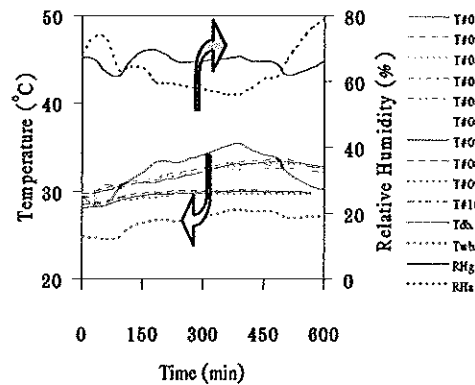
ข้าวเปลือกสายพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105
ความชื้นเริ่มต้น $26.9 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยกาบมะพร้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี

ความชื้นเริ่มต้น $25.4 \pm 0.1\%$ dry-basis



ข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

ความชื้นเริ่มต้น $25.7 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 4.34 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยซิลิกาเจลที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.2 \pm 0.1\%$ dry-basis

4.5 ผลการทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก

การทดลองอบแห้งได้ใช้ข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์เล็บนกปัตตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 24.4 ± 1.0 และ $26.3 \pm 0.6\%$ dry-basis ตามลำดับ โดยการทดลองอบแห้งได้ผสมข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นเข้าด้วยกันและเก็บไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อม เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการอบแห้งจึงนำตัวอย่างข้าวเปลือกที่ได้ไปทำการทดสอบคุณภาพทางกายภาพในรูปของร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ร้อยละการงอกและร้อยละความขาว ได้ผลการทดลอง ดังนี้

4.5.1 ผลการทดสอบหาร้อยละข้าวเต็มเมล็ด

จากการทดสอบร้อยละข้าวเต็มเมล็ดของข้าวเปลือกหลังการทดลองอบแห้ง พบว่าร้อยละข้าวเต็มเมล็ดของข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีมีค่าใกล้เคียงกับร้อยละข้าวเต็มเมล็ดของข้าวเปลือกอ้างอิง และสูงกว่าข้าวเปลือกควบคุมเล็กน้อยในทุกเงื่อนไขการทดลอง ส่วนข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 พบว่า ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดที่ผ่านการอบแห้งด้วยกาบมะพร้าว ทางใบสาคุและซิลิกาเจลมีค่าสูงกว่าร้อยละข้าวเต็มเมล็ดของข้าวเปลือกอ้างอิงและข้าวเปลือกควบคุมเล็กน้อย แต่ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยแกลบ มีร้อยละข้าวเต็มเมล็ดต่ำกว่าร้อยละข้าวเต็มเมล็ดของข้าวเปลือกอ้างอิงและข้าวเปลือกควบคุมเล็กน้อย

4.5.2 ผลการทดสอบหาร้อยละการงอก

จากการทดสอบร้อยละการงอกของข้าวเปลือกหลังการทดลองอบแห้ง พบว่า ร้อยละการงอกของข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีที่อบแห้งด้วยแกลบ มีค่าใกล้เคียงกับ ร้อยละการงอกของข้าวเปลือกอ้างอิงและข้าวเปลือกควบคุม แต่ข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยทางใบ สาคุและกาบมะพร้าวและซิลิกาเจลมีร้อยละการงอกต่ำกว่าร้อยละการงอกของข้าวเปลือกอ้างอิง และข้าวเปลือกควบคุมเล็กน้อย ส่วนข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่เป็นข้าวเปลือก อ้างอิง ข้าวเปลือกควบคุม และที่อบแห้งด้วยแกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล มีร้อยละการงอกใกล้เคียงกัน

4.5.3 ผลการทดสอบหาร้อยละความขาว

จากการทดสอบร้อยละความขาวของข้าวเปลือกหลังการทดลอง พบว่า ร้อยละ ความขาวของข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีและสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ผ่าน การอบแห้งด้วยแกลบ ทางใบสาคุและกาบมะพร้าว มีค่าใกล้เคียงกับร้อยละความขาว ของข้าวเปลือกอ้างอิงและข้าวเปลือกควบคุมในทุกเงื่อนไขการทดลอง ส่วนร้อยละความขาว ของข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีที่ผ่านการอบแห้ง ด้วยซิลิกาเจลจะมีค่าสูงและต่ำกว่าร้อยละความขาวของข้าวเปลือกอ้างอิงและข้าวเปลือกควบคุม ตามลำดับ

การที่คุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก ได้แก่ ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ร้อยละ การงอกและร้อยละความขาว มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกอ้างอิงและ ข้าวเปลือกควบคุม คือ มีความแตกต่างประมาณ $\pm 2-3$ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก อุณหภูมิของผสมในถังอบแห้งขณะเริ่มทำการทดลองอยู่ที่ประมาณ 28.5°C เมื่อการทดลอง ดำเนินไปถึงชั่วโมงที่ 10 อุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1.5 ถึง 3.5°C ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำและเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ดังภาพประกอบที่ 4.31 ถึง 4.34 จึงไม่ส่งผลกระทบต่อ ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ร้อยละการงอก และร้อยละความขาวของข้าวเปลือกหลังการทดลองอบแห้ง

บทที่ 5

แบบจำลองจลนศาสตร์ของการอบแห้ง

แบบจำลองจลนศาสตร์ของการอบแห้งในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงมาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นด้วยกลีบของ Inoue *et al.* (2002) เพื่อให้ทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น โดยทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดระยะเวลาการทดลองอบแห้งที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ กัน

5.1 การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้ง

การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Inoue *et al.* (2002) เพื่อทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทำนายผลการทดลองภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

- (1) ถังอบแห้งหุ้มด้วยฉนวนหนาพอที่จะไม่ทำให้ความร้อนและความชื้นมีการแลกเปลี่ยนระหว่างระบบอบแห้งและสิ่งแวดล้อม
- (2) พิจารณาสารดูดซับความชื้นเป็นรูปทรงต่าง ๆ กล่าวคือ กลีบ พิจารณาเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก ทางใบเสาและก้ามมะพร้าว พิจารณาเป็นทรงลูกบาศก์ ส่วนซิลิกาเจล พิจารณาเป็นทรงกลม
- (3) ไม่มีการหดตัวของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นระหว่างการทดลองอบแห้ง
- (4) ช่องว่างระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นถือว่ามีน้อยมากเมื่อเทียบกับผิวสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสองจึงถือว่าการแพร่ความชื้นในระบบอบแห้งเกิดขึ้นเฉพาะวัสดุทั้งสองเท่านั้น
- (5) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นถือว่ามีความคงที่ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง
- (6) การถ่ายโอนความร้อนและความชื้นระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นกับอากาศในถังอบแห้งถือว่ามีน้อย

5.1.1 การคำนวณความชื้นสมดุล

จากการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของสารดูดซับความชื้น ได้แก่ แกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล ซึ่งพบว่า ความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นและแบบคายความชื้นจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยที่ความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นจะมีค่าสูงกว่าความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้น (บทที่ 4 หัวข้อ 4.1.4) โดยค่าความชื้นสมดุลทั้งแบบดูดซับความชื้นและแบบคายความชื้นที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าฮีสเทอรีซิสเพื่อใช้ในการคำนวณหาความชื้นสมดุลของสารดูดซับความชื้นในแบบจำลองของการอบแห้งที่จะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป อย่างไรก็ตามในที่นี้สามารถคำนวณค่าความชื้นสมดุลต่างๆ ได้จากผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

1) สมการสมดุลไอโซเทอมของสารดูดซับความชื้น คำนวณจากรูปแบบจำลองของ Henderson (1952) ดังได้วิเคราะห์แล้วในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1.4 ดังนี้

1.1) แกลบ

○ แบบดูดซับความชื้น ($T = 29.6-32.8^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 50.0-85.0\%$)

$$1 - \text{RH} = \exp[-2.75 \times 10^{-4} (T + 273.15) M_{eq}^{1.13}]; R^2 = 0.988 \quad (5.1)$$

○ แบบคายความชื้น ($T = 29.6-50.0^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 11.8-75.6\%$)

$$1 - \text{RH} = \exp[-3.03 \times 10^{-4} (T + 273.15) M_{eq}^{0.91}]; R^2 = 0.942 \quad (5.2)$$

จะได้สมการฮีสเทอรีซิสที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เช่น งานของ Inoue *et al.* (2002) ดังนี้

$$\Delta M_{eq} = M_{eq,Des.} - M_{eq,Ads.} = 10.05 - 0.04T \quad ; R^2 = 0.999 \quad (5.3)$$

1.2) ทางใบสาคุ

○ แบบดูดซับความชื้น ($T = 31.1^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 32.7-75.6\%$)

$$1 - \text{RH} = \exp[-1.29 \times 10^{-5} (T + 273.15) M_{eq}^{2.26}]; R^2 = 0.999 \quad (5.4)$$

○ แบบคายความชื้น ($T = 31.3-50.0^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 11.8-75.6\%$)

$$1 - \text{RH} = \exp[-1.02 \times 10^{-4} (T + 273.15) M_{eq}^{1.30}]; R^2 = 0.942 \quad (5.5)$$

จะได้สมการฮีสเทอรีซิสที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เช่น งานของ Inoue *et al.* (2002) ดังนี้

$$\Delta M_{eq} = M_{eq,Des.} - M_{eq,Ads.} = 5.65 - 0.02T \quad ; R^2 = 0.999 \quad (5.6)$$

1.3) กาบมะพร้าว

○ แบบดูดซับความชื้น ($T = 30.7-50.0^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 32.8-75.6\%$)

$$1 - \text{RH} = \exp[-1.64 \times 10^{-5} (T + 273.15) M_{eq}^{2.37}]; R^2 = 0.773 \quad (5.7)$$

○ แบบคายความชื้น ($T = 30.7-50.0^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 11.8-75.5\%$)

$$1 - \text{RH} = \exp[-2.57 \times 10^{-5} (T + 273.15) M_{eq}^{0.92}]; R^2 = 0.942 \quad (5.8)$$

จะได้สมการอีสเทอร์ชีสที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เช่น งานของ Inoue et al. (2002) ดังนี้

$$\Delta M_{eq} = M_{eq,Des.} - M_{eq,Ads.} = 4.74 - 0.01T \quad ; R^2 = 0.999 \quad (5.9)$$

1.4) ซิลิกาเจล

○ แบบดูดซับความชื้น ($T = 31.6-50.0^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 11.4-87.9\%$)

$$1 - \text{RH} = \exp[-3.21 \times 10^{-4} (T + 273.15) M_{eq}^{1.11}]; R^2 = 0.887 \quad (5.10)$$

○ แบบคายความชื้น ($T = 32.4-50.0^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 11.4-89.2\%$)

$$1 - \text{RH} = \exp[-9.14 \times 10^{-5} (T + 273.15) M_{eq}^{1.43}]; R^2 = 0.931 \quad (5.11)$$

จะได้สมการอีสเทอร์ชีสที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เช่น งานของ Inoue et al. (2002) ดังนี้

$$\Delta M_{eq} = M_{eq,Des.} - M_{eq,Ads.} = 3.25 - 0.09T \quad ; R^2 = 0.999 \quad (5.12)$$

เมื่อ	RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (decimal)
	ΔM_{eq}	คือ อีสเทอร์ชีส (% dry-basis)
	$M_{eq,Des.}$	คือ ความชื้นสมดุลแบบคายความชื้น (% dry-basis)
	$M_{eq,Ads.}$	คือ ความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้น (% dry-basis)
	T	คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

2) สมการสมดุลไอโซเทอมของข้าวเปลือก ในรูปของสมการอีสเทอร์ชีสที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (Inoue et al., 2002) คำนวณได้ดังนี้

$$\Delta M_{eq} = M_{eq,Des.} - M_{eq,Ads.} = 3.37 - 0.08T \quad (5.13)$$

เมื่อ	ΔM_{eq}	คือ อีสเทอร์ชีส (% dry-basis)
	$M_{eq,Des.}$	คือ ความชื้นสมดุลแบบคายความชื้น (% dry-basis)
	$M_{eq,Ads.}$	คือ ความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้น (% dry-basis)
	T	คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

5.1.2 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระบบอบแห้ง

การทดลองได้ใช้ถังอบแห้งที่ปิดสนิทซึ่งถือว่าระบบอบแห้งไม่มีการแลกเปลี่ยนความชื้นและความร้อนกับสิ่งแวดล้อมและพิจารณาโดยสมมติว่าช่องว่างระหว่างข้าวเปลือกและ

สารดูดซับความชื้นในระบบอบแห้งมีน้อยมากเมื่อเทียบกับผิวสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสอง ดังภาพประกอบที่ 5.1 ทำให้ถือได้ว่าความชื้นที่ออกจากข้าวเปลือกสามารถถูกดูดซับได้ด้วยสารดูดซับความชื้นทั้งหมด เมื่อระบบอยู่ในภาวะสมดุลจะอธิบายได้ว่าน้ำที่เคลื่อนที่ออกจากข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ น้ำที่ถูกดูดซับด้วยสารดูดซับความชื้น ซึ่งคำนวณได้ดังต่อไปนี้ (Brooker, 1981; Inoue *et al.*, 2002)

1) ความชื้นสมมูลรวมของระบบอบแห้ง คำนวณจากสมการ

$$EMC_{total} = \frac{W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) M_{d,P} + W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right) M_{d,A}}{W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) + W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right)} \quad (5.14)$$

เมื่อพจน์ทางขวามือ หมายถึง ปริมาณน้ำในข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นรวมกันเทียบกับน้ำหนักแห้งของทั้งสอง

2) ความชื้นสมมูลของข้าวเปลือกในระบบอบแห้ง คำนวณจากสมการ

$$EMC_P = EMC_{total} - \frac{W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right) \Delta M_{eq,A}}{W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) + W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right)} \quad (5.15)$$

เมื่อพจน์ที่สองทางขวามือ หมายถึง ปริมาณน้ำในสารดูดซับความชื้นเทียบกับน้ำหนักแห้งของข้าวเปลือกรวมกันกับสารดูดซับความชื้น

3) ความชื้นสมมูลของสารดูดซับความชื้นในระบบอบแห้ง คำนวณจากสมการ

$$EMC_A = EMC_{total} - \frac{W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) \Delta M_{eq,A}}{W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) + W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right)} \quad (5.16)$$

เมื่อพจน์ที่สองทางขวามือ หมายถึง ปริมาณน้ำในข้าวเปลือกเทียบกับน้ำหนักแห้งของข้าวเปลือกรวมกันกับสารดูดซับความชื้น

โดยที่ EMC_{total} คือ ความชื้นสมมูลรวมของระบบ (% dry-basis)
 EMC_p คือ ความชื้นสมมูลของข้าวเปลือก (% dry-basis)
 EMC_A คือ ความชื้นสมมูลของสารดูดซับความชื้น (% dry-basis)

$W_p \left(1 - \frac{M_{w,p}}{100}\right)$ คือ มวลแห้งของข้าวเปลือก (g)

$W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right)$ คือ มวลแห้งของสารดูดซับความชื้น (g)

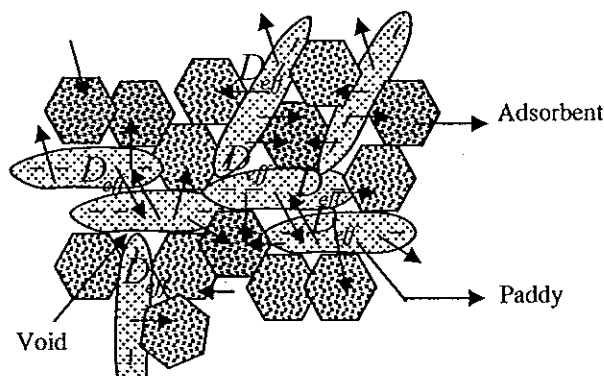
เมื่อ W คือ มวลเปียก (g)
 M_w คือ ความชื้น (% wet-basis)
 ΔM_{eq} คือ ซีสเทอร์ซิส (% dry-basis)

สัญลักษณ์กำกับล่าง

p คือ ข้าวเปลือก A คือ สารดูดซับความชื้น
 w คือ มาตรฐานเปียก d คือ มาตรฐานแห้ง

หมายเหตุ :

ΔM_{eq} ที่ใช้ในการคำนวณค่าความชื้นสมมูลของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นตามสมการ (5.15) และ (5.16) เป็นของสารดูดซับความชื้นแต่ละชนิด ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.1.1 ซึ่งแตกต่างจากงานของ Inoue *et al.* (2002) ที่พิจารณา ΔM_{eq} ของข้าวเปลือก เนื่องจากต้องการศึกษาหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสารดูดซับความชื้นแทนข้าวเปลือกที่มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางกว่า



ภาพประกอบที่ 5.1 ผิวสัมผัสระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นในระบบบอบแห้ง

5.1.3 การคำนวณอัตราส่วนความชื้น

การทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นทำได้โดยอาศัยความแตกต่างของความดันไอน้ำและความเข้มข้นของความชื้นที่ผิวของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นจนระบบอบแห้งเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งไม่มีการถ่ายเทความชื้นระหว่างผิวของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นอีกต่อไป เมื่อสมมติว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นมีค่าคงที่ จะสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นได้ด้วยกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิค (Fick's second law of diffusion) ที่มีสมการทั่วไป ดังนี้ (Crank, 1975)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = DV^2M \quad (5.17)$$

เมื่อ	M	คือ ความชื้น (% dry-basis)
	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)
	t	คือ เวลา (s)

เมื่อถือว่าความชื้นที่ออกจากข้าวเปลือกสามารถถูกดูดซับได้ด้วยสารดูดซับความชื้นทั้งหมด จึงเลือกพิจารณาเฉพาะอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสารดูดซับความชื้นตามลักษณะรูปทรงต่าง ๆ คือ แกลบพิจารณาเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก ทางใบสาकुและกาบมะพร้าวพิจารณาเป็นทรงลูกบาศก์และซิลิกาเจลพิจารณาเป็นทรงกลม โดยอาศัยหลักการถ่ายโอนมวลน้ำหรือความชื้นระหว่างผิวของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของความเข้มข้นของความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้น จะสามารถคำนวณอัตราส่วนความชื้นที่เวลาต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) สำหรับสารดูดซับความชื้นที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก ดังภาพประกอบที่ 5.2 ซึ่งมีความเข้มข้นของความชื้นเท่ากับ M และถือว่าการแพร่ความชื้นมีได้เฉพาะผิวหน้าตัดทั้งสองด้านเท่านั้น (แนวแกน $\pm z$) กล่าวคือ จะไม่พิจารณาการแพร่ความชื้นที่บริเวณด้านข้างทั้ง 4 ด้าน ซึ่งถือว่ามีระยะเป็นอนันต์หรือมีการแพร่ความชื้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการแพร่ความชื้นที่ผิวหน้าตัดทั้ง 2 ด้าน ทำให้อธิบาย อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าคงที่ได้ด้วยกฎข้อที่ 2 ของฟิค โดยการพิจารณาภาพประกอบที่ 5.2 และสมการ (5.17) จะสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า (Crank, 1975)

$$D \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} = \frac{\partial M}{\partial t} \quad (5.18)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial z} &= 0 & \text{ที่ } z = 0 & \text{สำหรับ } t \text{ ใดๆ} \\ M &= M_0 & \text{ที่ } t = 0 & \text{สำหรับ } -l < z < l \\ -\frac{\partial M}{\partial z} &= \frac{k_c}{DK}(M - M_{eq}) & \text{ที่ } z = \pm l & \text{สำหรับ } t > 0 \end{aligned}$$

ทำให้ได้ผลเฉลยของสมการ (5.18) ที่แสดงอัตราส่วนความเข้มข้นของความชื้นในสารดูดซับความชื้นที่เป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก ดังนี้

$$\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha \cos\left[\beta_n\left(\frac{z}{l}\right)\right]}{\beta_n^2(\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha) \cos \beta_n} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{l^2}\right) \quad (5.19)$$

เมื่อ β_n คือ รากที่เป็นบวกของสมการ $\beta_n \tan \beta_n = \alpha$ ดังแสดงไว้ในตารางภาคผนวกที่ ก. 3-1

โดยการอินทิเกรตสมการ (5.19) เทียบกับ z จาก 0 ถึง l จะได้สมการที่ใช้คำนวณค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของความชื้นเฉลี่ยในสารดูดซับความชื้นที่เป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมากที่เวลาใดๆ (Anthony and Robert, 1985; Crank, 1975) ดังนี้

$$\frac{M_0 - M_t}{M_0 - M_{eq}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha^2}{\beta_n^2(\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{l^2}\right) \quad (5.20a)$$

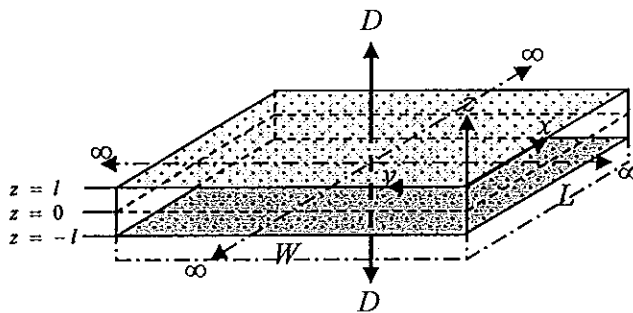
$$1 - \frac{M_0 - M_t}{M_0 - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha^2}{\beta_n^2(\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{l^2}\right) \quad (5.20b)$$

$$\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha^2}{\beta_n^2(\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{l^2}\right) \quad (5.20c)$$

กำหนดให้ $\overline{MR}_t = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}$ จะได้

$$\overline{MR}_t = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha^2}{\beta_n^2(\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{l^2}\right) \quad (5.20d)$$

เมื่อ	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)
	M	คือ ความชื้น (% dry-basis)
	M_t	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (% dry-basis)
	M_0	คือ ความชื้นเริ่มต้น (% dry-basis)
	M_{eq}	คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis)
	\overline{MR}_t	คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ (decimal)
	z	คือ ระยะตามแนวแกน z ของแผ่นแบบซึ่งกว้างและยาวมาก (m)
	l	คือ ความหนาจากจุดกึ่งกลางถึงผิวนอกของแผ่นแบบซึ่งกว้างและยาวมาก (m)
	t	คือ เวลา (s)
	n	คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ..., ∞
	β_n	คือ รากของเบสเซลฟังก์ชัน (-)
	α	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (kg/m^2s)
	k_c	คือ สัมประสิทธิ์การพามวล (m^2/s)
	K	คือ ค่าคงที่การแพร่กระจาย (m^2/s)

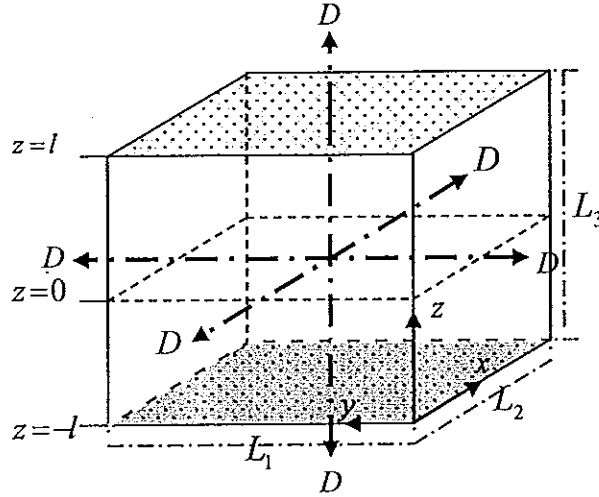


ภาพประกอบที่ 5.2 การแพร่ความชื้นในสารดูดซับความชื้นที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก

หมายเหตุ:

การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นหรือการถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน นั้น จะคิดระยะทางจากจุดกึ่งกลางมายังผิวนอกของสารดูดซับความชื้นที่เป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก แต่กรณีที่มีผิวของสารดูดซับความชื้นข้างใดข้างหนึ่งถูกปิดหรือความชื้นไม่สามารถแพร่ผ่านไปได้ ทำให้การแพร่ผ่านความชื้นเกิดขึ้นได้เฉพาะด้านใดด้านหนึ่งเท่านั้น จะคิดระยะทางจากความหนาทั้งหมดของแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก

2) สำหรับสารดูดซับความชื้นที่มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์สามารถพิจารณาได้จากสารดูดซับความชื้นที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมากโดยพิจารณาการแพร่ความชื้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง 6 ด้าน ทำให้กลายเป็นทรงสี่เหลี่ยมด้านขนาน ดังภาพประกอบที่ 5.3 จะทำให้สามารถเขียนสมการ (5.20d) ได้ (Anthony and Robert, 1985) ดังนี้



ภาพประกอบที่ 5.3 การแพร่ความชื้นในสารดูดซับความชื้นที่มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์

$$\overline{MR}_t \text{ parallele piped} = \overline{MR}_t \text{ flat-plate } L_1 \cdot \overline{MR}_t \text{ flat-plate } L_2 \cdot \overline{MR}_t \text{ flat-plate } L_3 \quad (5.21)$$

ซึ่งจะได้สมการที่ใช้คำนวณค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของความชื้นเฉลี่ยในสารดูดซับความชื้นที่เป็นทรงลูกบาศก์ที่เวลาใด ๆ ดังนี้

$$\overline{MR}_t = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2\alpha^2}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)} \right]^3 \exp\left(-3 \frac{\beta_n^2 Dt}{l^2}\right) \quad (5.22)$$

3) สำหรับสารดูดซับความชื้นที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ดังภาพประกอบที่ 5.4 พิจารณาโดยสมมติว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นภายในสารดูดซับความชื้นมีค่าคงที่ จึงเขียนสมการการแพร่ตามกฎข้อที่ 2 ของฟิค สำหรับทรงกลม ได้ดังนี้

$$\text{จาก } r^2 \frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (5.23)$$

$$\text{จะได้ } \frac{\partial M}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (5.24)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial r} &= 0 & \text{ที่ } r=0 & \text{สำหรับ } t \text{ ใดๆ} \\ M &= M_0 & \text{ที่ } t=0 & \text{สำหรับ } r < R \\ -\frac{\partial M}{\partial r} &= \frac{k_c}{DK} (M - M_{eq}) & \text{ที่ } r=R & \text{สำหรับ } t > 0 \end{aligned}$$

ทำให้ได้ผลเฉลยของสมการ (5.24) ที่แสดงอัตราส่วนความเข้มข้นของความชื้นในสารดูดซับความชื้นที่เป็นทรงกลม ดังนี้

$$\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{2\alpha R}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \left[\beta_n \left(\frac{r}{R} \right) \right]}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + \alpha^2 - \alpha) \sin \beta_n} \exp \left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{R^2} \right) \quad (5.25)$$

เมื่อ β_n คือ รากของสมการ $\beta_n \cot \beta_n + \alpha - 1 = 0$ ดังแสดงไว้ในตารางภาคผนวกที่ ก. 3-2

โดยการอินทิเกรตสมการ (5.25) เทียบกับ r จาก 0 ถึง R จะได้สมการที่ใช้คำนวณค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของความชื้นเฉลี่ยในสารดูดซับความชื้นที่เป็นทรงกลมที่เวลาใดๆ (Anthony and Robert, 1985; Crank, 1975) ดังนี้

$$\frac{M_0 - M_t}{M_0 - M_{eq}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6\alpha^2}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + \alpha^2 - \alpha)} \exp \left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{R^2} \right) \quad (5.26a)$$

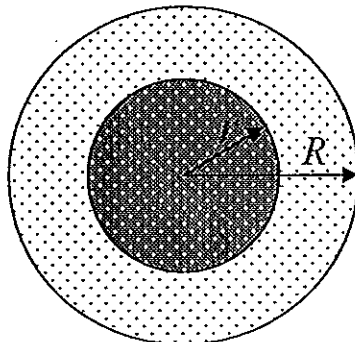
$$1 - \frac{M_0 - M_t}{M_0 - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6\alpha^2}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + \alpha^2 - \alpha)} \exp \left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{R^2} \right) \quad (5.26b)$$

$$\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6\alpha^2}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + \alpha^2 - \alpha)} \exp \left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{R^2} \right) \quad (5.26c)$$

กำหนดให้ $\overline{MR}_t = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}$ จะได้

$$\overline{MR}_t = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6\alpha^2}{\beta_n^2(\beta_n^2 + \alpha^2 - \alpha)} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{R^2}\right) \quad (5.26d)$$

เมื่อ	R	คือ รัศมีทรงกลม (m)
	r	คือ ระยะตามแนวรัศมี (m)
	l	คือ ความหนา (m)
	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)
	M	คือ ความชื้น (% dry-basis)
	M_t	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (% dry-basis)
	M_0	คือ ความชื้นเริ่มต้น (% dry-basis)
	M_{eq}	คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis)
	\overline{MR}_t	คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ (decimal)
	t	คือ เวลา (s)
	n	คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ..., ∞
	β_n	คือ รากของเบสเซลฟังก์ชัน (-)
	α	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (kg/m^2s)
	k_c	คือ สัมประสิทธิ์การพามวล (m^2/s)
	K	คือ ค่าคงที่การแพร่กระจาย (m^2/s)



ภาพประกอบที่ 5.4 การแพร่ความชื้นในสารดูดซับความชื้นที่มีลักษณะเป็นทรงกลม

5.1.4 การคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น

อาศัยสมการ (5.1) ถึง (5.26) จะสามารถคำนวณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดระยะเวลาการทดลองอบแห้งได้ ดังนี้ (ปรับปรุงจาก Inoue *et al.*, 2002)

- 1) อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาต่าง ๆ คำนวณได้ดังนี้

$$M_p(t) = (M_{0,p} - EMC_p) \sum_{i=1}^n \overline{MR}_i + EMC_p \quad (5.27)$$

- 2) อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสารดูดซับความชื้นที่เวลาต่าง ๆ คำนวณได้ ดังนี้

$$M_A(t) = (M_{0,A} - EMC_A) \sum_{i=1}^n \overline{MR}_i + EMC_A \quad (5.28)$$

เมื่อ

$M_p(t)$	คือ ความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาใด ๆ (% dry-basis)
$M_A(t)$	คือ ความชื้นของสารดูดซับความชื้นที่เวลาใด ๆ (% dry-basis)
$M_{0,p}$	คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (% dry-basis)
$M_{0,A}$	คือ ความชื้นเริ่มต้นของสารดูดซับความชื้น (% dry-basis)
EMC_p	คือ ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก (% dry-basis)
EMC_A	คือ ความชื้นสมดุลของสารดูดซับความชื้น (% dry-basis)
\overline{MR}_i	คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ (decimal)
i	คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ..., n
n	คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ..., ∞

5.2 การทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงขึ้น ทำได้โดยอาศัยพารามิเตอร์บางประการจากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสารดูดซับความชื้น ได้แก่ ความหนาแน่น

ปรากฏ ความชื้นสมดุล จลนศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้นทั้ง 4 ชนิด (บทที่ 4 หัวข้อ 4.1 ถึง 4.2) โดยมีขั้นตอนและวิธีการ ดังนี้

5.2.1 หลักการคำนวณ

การคำนวณค่าต่าง ๆ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงขึ้น เพื่อทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งของข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น แสดงได้ ดังภาพประกอบที่ 5.5 โดยการกำหนดข้อมูลและเงื่อนไขเริ่มต้นที่สอดคล้องกับการทดลองจริง ได้แก่

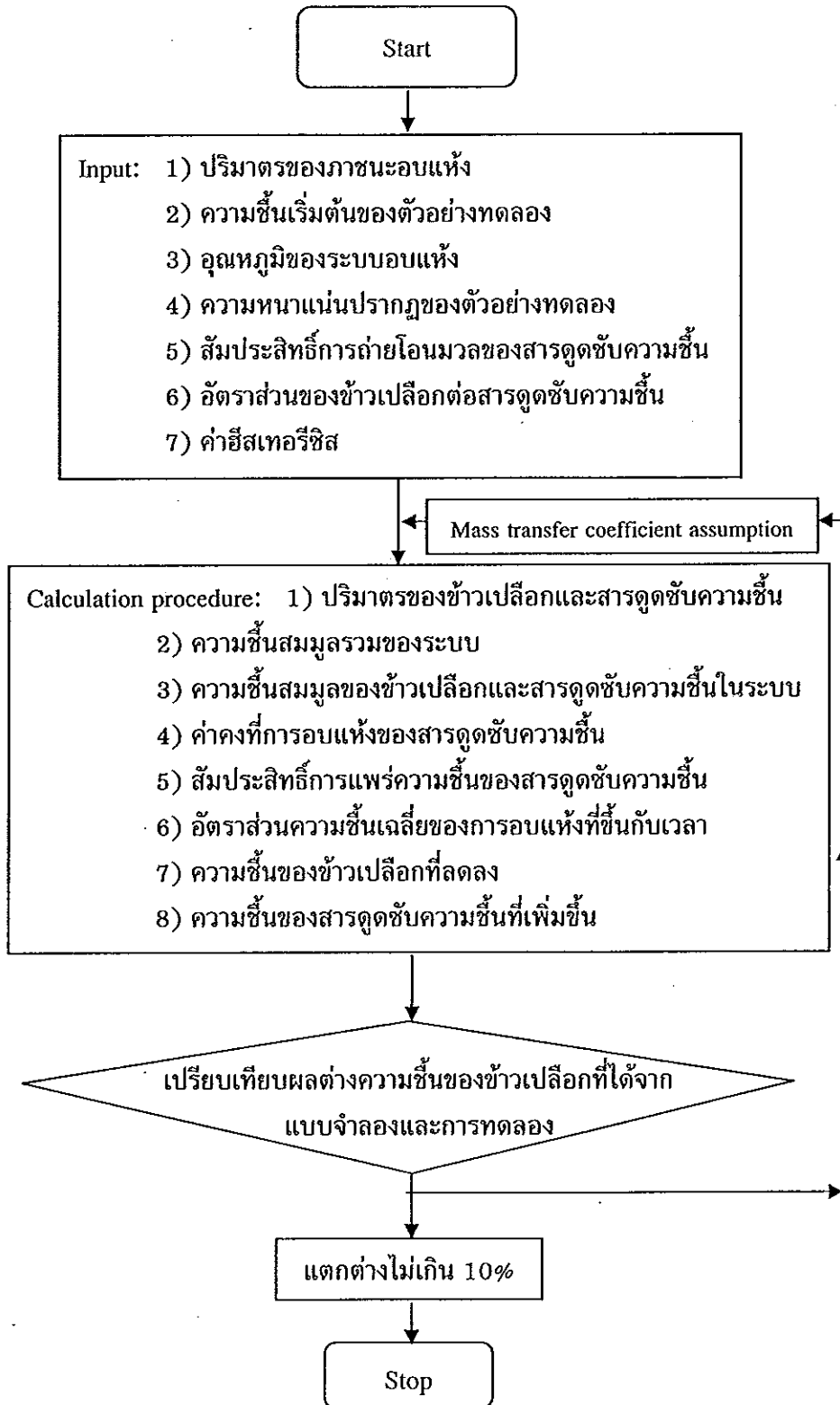
- (1) ปริมาตรของภาชนะอบแห้ง
- (2) ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างทดลอง
- (3) อุณหภูมิของระบบอบแห้ง
- (4) ความหนาแน่นปรากฏของตัวอย่างทดลอง
- (5) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารดูดซับความชื้น
- (6) อัตราส่วนของข้าวเปลือกต่อสารดูดซับความชื้น
- (7) ค่าสี่สเทอร์ริชิส

เมื่อทำการกำหนดข้อมูลและเงื่อนไขเริ่มต้นที่สอดคล้องกับการทดลองจริงข้างต้น เรียบร้อยแล้ว แบบจำลองจะคำนวณค่าต่าง ๆ ออกมา ได้แก่

- (1) ปริมาตรของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่ใช้
- (2) ความชื้นสมมูลรวมของระบบอบแห้ง
- (3) ความชื้นสมมูลของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นในระบบ
- (4) ค่าคงที่การอบแห้งของสารดูดซับความชื้น
- (5) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของสารดูดซับความชื้น
- (6) อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของการอบแห้งที่ขึ้นกับเวลา
- (7) แสดงการทำนายความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงและความชื้นของสารดูดซับความชื้นที่เพิ่มขึ้นที่เวลาต่าง ๆ ตามระยะเวลาของการทดลองอบแห้ง

หมายเหตุ :

การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารดูดซับความชื้นนั้นจะต้อง สมมติค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งสอดคล้องกับผลจากการทดลองมากที่สุดดังรายละเอียดตามตารางที่ 5.1



ภาพประกอบที่ 5.5 ขั้นตอนการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

5.2.2 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงขึ้นเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในการอบแห้งข้าวเปลือก สายพันธุ์เล็บมือนางที่ด้วยเวลาที่อัตราส่วนผลสมเท่ากับ 1:1.5 โดยปริมาตร โดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น เช่น ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและแกลบ ปริมาตรของถังอบแห้งและอุณหภูมิในของผลสม เป็นต้น

1.1 กำหนดปริมาตรของถังอบแห้ง	
Materials condition	
Total volume (cm ³)	20000.00
Initial moisture content of paddy (% wet-basis, % dry-basis)	18.97 23.41
Initial moisture content of rice husk (% wet-basis, % dry-basis)	5.58 5.91
Drying temperature (°C)	29.70
1.2 กำหนดความชื้นเริ่มต้น	
1.3 กำหนดอุณหภูมิในของผลสม	

ขั้นตอนที่ 2: คำนวณค่าคงที่ต่าง ๆ เช่น ค่าคงที่ของการอบแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน ความหนาแน่นปรากฏและซีลเทอริส เป็นต้น

Property	Equation / Model	Value	Unit	Notes
Drying rate constant of rice husk	MR = exp(-k _d t) ; Newton model	142.057		จากกรอบแห้งชั้นบาง
	k _d = c * exp(-d/T _p)	2121.778		
	(s ⁻¹)			
	D = k*(L ₂ ²)/π ²			
Parameter constant of rice husk		1.97667E-06	m ² /hr	2.2 คำนวณ
		5.49076E-10	m ² /s	
Hysteresis of rice husk	ΔM = M _{eq, Des.} - M _{eq, Ads.} = a - b*T	10.051		2.4 นำไปใช้คำนวณในขั้นตอนต่อไป
	ρ = a - b*M	80.804		
Bulk density of rice husk		9.0641	% dry-basis	2.3 คำนวณ
		88.0508	kg/m ³	

2.1 คำนวณ

ได้จากทดลองหา M_{eq}

ได้จากทดลองหา ρ

2.4 นำไปใช้คำนวณในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 3: คำนวณหาปริมาตรข้าวเปลือกและกลีบ ความชื้นสมมูลรวม ความชื้นสมมูลของข้าวเปลือกและกลีบในระบบอบแห้ง เป็นต้น

Ratio (by volume)	Volume (cm ³)		Weight (g)		EMC (% dry-basis)		
	Paddy	Rice husk	Paddy	Rice husk	Paddy	Rice husk	System
0.5	13333.33	6666.67	7739.33	587.00	21.885030	13.662026	21.990120
1.0	10000.00	10000.00	8044.50	880.51	20.588202	13.079972	20.782598
1.5	8000.00	12000.00	4643.60	1056.61	19.472559	12.579240	19.743782
2.0	6666.67	13333.33	3869.67	1174.01	18.502610	12.143898	18.840628
2.5	5714.29	14285.71	3316.86	1257.87	17.651563	11.761924	18.048188

$$3.1 \frac{V_{total}}{(1+Ratio)} = \frac{20000}{(1+1.5)}$$

$$3.2 \frac{V_{total} \times Ratio}{(1+Ratio)} = \frac{20000 \times 1.5}{(1+1.5)}$$

$$3.3 \frac{\rho_{paddy} \times V_{paddy}}{1000}$$

$$3.4 \frac{\rho_{rice\ husk} \times V_{rice\ husk}}{1000}$$

$$3.6 \text{ คำนวณตามสมการ (5.15)}$$

$$3.7 \text{ คำนวณตามสมการ (5.16)}$$

$$3.5 \text{ คำนวณตามสมการ (5.14)}$$

หมายเหตุ : ที่อัตราส่วนผสมอื่น ๆ ก็คำนวณได้เหมือนกัน

ขั้นตอนที่ 4: คำนวณหาอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย (\overline{MR}_i) ที่เวลาการอบแห้งต่าง ๆ

4.2 ค่าคงที่ของสมการ (5.20d); $A_n = \frac{2\alpha^2}{\beta_n^2(\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)}$

4.3 MR ที่เวลาต่าง ๆ คำนวณตามสมการ (5.20d)

n	β_n	A_n	Drying time (min)											
			30	300	480	600	840	960	1080	1320	1440			
1	1.0769	0.963482	0.637331	0.015455	0.001295	0.000248	9.09E-06	1.74E-06	3.33E-07	1.22E-08	2.34E-09			
2	3.6436	0.034881	0.000308	9.93E-23	4.67E-35	2.83E-43	1.03E-59	6.25E-68	3.78E-76	1.38E-92	8.4E-101			
3	6.5783	0.003911	7.85E-10	4.18E-70	2.7E-110	4.5E-137	1.2E-190	1.9E-217	3.1E-244	8.3E-298	0			
4	9.6296	0.000892	3.98E-18	2.8E-147	2.2E-233	8.6E-291	0	0	0	0	0			
5	12.7223	0.000298	2.66E-29	9.6E-255	0	0	0	0	0	0	0			
6	15.8336	0.000125	1.99E-43	0	0	0	0	0	0	0	0			
	$\sum_{i=1}^n \overline{MR}_i$		0.637639	0.015455	0.001295	0.000248	9.09E-06	1.74E-06	3.33E-07	1.22E-08	2.34E-09			

4.1 รากของสมการ $\beta_n \tan \beta_n = \alpha$ ตามตารางภาคผนวกที่ ก. 1-1 ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามค่า α และค่าคงที่ n

ขั้นตอนที่ 5: ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกและเกลบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของการอบแห้ง

Ratio (by volume)	Moisture content (% dry-basis)		Drying time (min)										ΔM	
	0	30	300	600	840	960	1080	1320	1440					
1:1.5	Paddy	23.4110	21.9839	19.5334	19.4735	19.4725	19.4725	19.4725	19.4725	19.4725	19.4725	19.4725	19.4725	3.93
	Rice husk	5.9120	8.32795	12.4762	12.5775	12.5791	12.5792	12.5792	12.5792	12.5792	12.5792	12.5792	12.5792	6.66

5.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก ปริมาณตามสมการ (5.27)

5.3 ความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงเมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง

5.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเกลบ ปริมาณตามสมการ (5.28)

5.4 ความชื้นของเกลบที่เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงขึ้นเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกและเกลบนี้จะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นตามสภาพการทดลองที่แท้จริงจะทำให้การคำนวณค่าต่าง ๆ ดังภาพประกอบที่ 5.5 ทำได้อย่างถูกต้อง โดยตัวอย่างการคำนวณที่แสดงนี้เป็นกรอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปีตตามีด้วยเกลบซึ่งการคำนวณสามารถทำได้ตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 5 โดยในขั้นตอนที่ 4 จะเป็นการคำนวณอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยซึ่งจะต้องมีการสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (α) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมซึ่งพิจารณาได้จากกรอบเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้ในขั้นตอนที่ 5 กับผลการทดลองจริงต้องมีความผิดพลาดน้อยที่สุดและไม่เกิน 10% (Boquet et al., 1978)

สำหรับการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นที่นอกเหนือจากนี้ก็ใช้การคำนวณในทำนองเดียวกัน โดยเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองให้เป็นไปตามชนิดของข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่ใช้ทดลองจริง

5.3 ผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้ง

5.3.1 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลต่อการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้ง

เนื่องจากการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงขึ้น จะต้องสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass transfer coefficient, α) ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลจากการทำนายใกล้เคียงกับผลจากการทดลองมากที่สุด โดยการวิเคราะห์ทางสถิติแล้วพิจารณาว่า Root mean square error (RMSE) และ Mean relative percentage error (E%) ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงขึ้นกับผลจากการทดลอง ซึ่งค่า RMSE และ E% ที่ต่ำ หมายถึง ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงขึ้นผิดพลาดจากการทดลองน้อย และค่า E% ที่พิจารณาต้องมีค่าไม่เกิน 10% จึงจะยอมรับได้ (Andrieu et al., 1985; Boquet et al., 1978; Lopes Filho et al., 2002; McLaughlin and Magee, 1998) ซึ่งนิยาม RMSE และ E% ได้ดังสมการ (5.29) และ (5.30) ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์ค่า RMSE และ E% ระหว่างจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงขึ้นกับผลจากการทดลอง

สารดูดซับความชื้น	α (kg/m ² s)	ข้าวเปลือกสายพันธุ์ เล็บนกปัดตานี		ข้าวเปลือกสายพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105	
		RMSE	E%	RMSE	E%
แกลบ	1.5	0.818	3.44	0.895	3.23
	1.8	0.800	3.36	0.832	3.12
	1.9	0.794	3.32	0.811	3.06
	2.0	0.790	3.26	0.791	2.99
	2.1	0.798	3.30	0.804	3.04
	2.2	0.805	3.34	0.815	3.08
	2.5	0.821	3.41	0.835	3.15

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

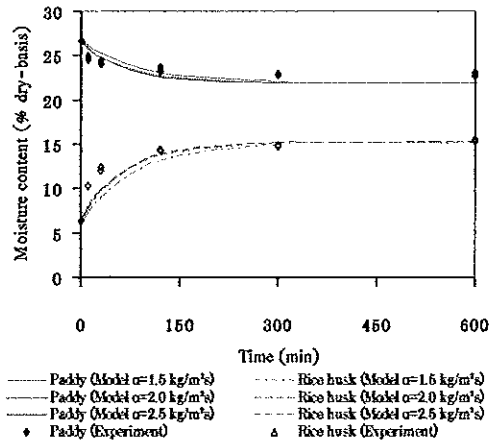
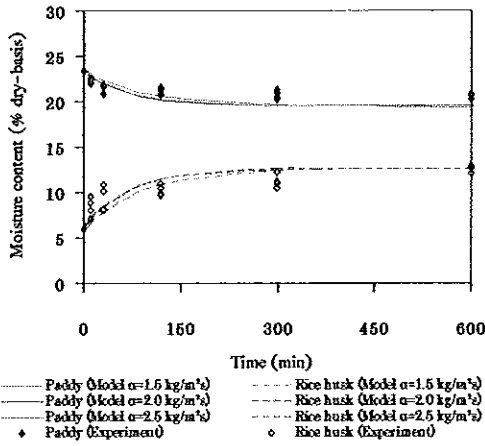
สารดูดซับ ความชื้น	α (kg/m ² s)	ข้าวเปลือกสายพันธุ์ เล็บนกปัตตานี		ข้าวเปลือกสายพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105	
		RMSE	E%	RMSE	E%
ทางใบสาคุ	1.5	0.663	2.020	0.358	1.160
	1.8	0.545	1.620	0.328	1.100
	1.9	0.498	1.550	0.311	1.060
	2.0	0.452	1.460	0.310	1.040
	2.1	0.481	1.530	0.351	1.160
	2.2	0.505	1.600	0.349	1.170
	2.5	0.552	1.720	0.358	1.200
กาบ มะพร้าว	1.5	0.930	2.900	1.101	3.430
	1.8	0.732	2.310	0.865	2.820
	1.9	0.656	2.060	0.773	2.560
	2.0	0.580	1.930	0.679	2.290
	2.1	0.626	2.050	0.734	2.440
	2.2	0.665	2.140	0.747	2.570
	2.5	0.741	2.350	0.866	2.800
ชิลิกาเจล	1.5	1.430	5.220	2.420	9.510
	1.8	1.100	4.340	1.990	7.890
	1.9	1.030	4.240	1.840	7.720
	2.0	1.000	4.090	1.700	7.490
	2.1	1.090	4.510	1.830	7.940
	2.2	1.180	4.880	1.930	8.330
	2.5	3.570	15.800	2.850	13.310

$$E\% = \frac{|E_i - P_i|}{E_i} \times 100 \quad (5.29)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - P_i)^2 \right]^{1/2} \quad (5.30)$$

เมื่อ	$E\%$	คือ Mean relative percentage Error
	RMSE	คือ Root mean square error
	E_i	คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง (% dry-basis)
	P_i	คือ ค่าที่ได้จากการทำนาย (% dry-basis)
	N	คือ จำนวนข้อมูลการทดลอง
	i	คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ..., N

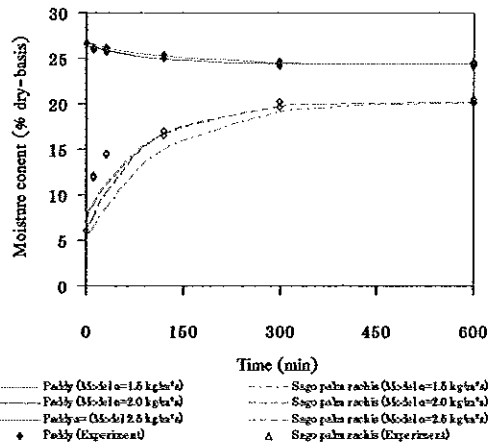
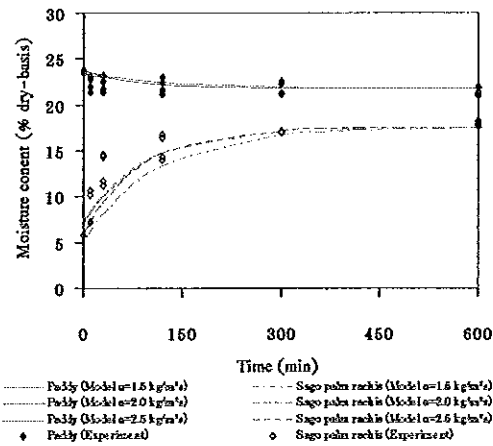
จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงขึ้นจะให้ค่า RMSE และ $E\%$ แตกต่างกันเมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลต่าง ๆ กัน ดังได้แสดงกราฟการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งไว้ในภาพประกอบที่ 5.6 ถึง 5.9 ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลต่ำกว่า $2.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ และสูงกว่า $2.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ จะส่งผลให้การทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งมีค่าแตกต่างจากผลการทดลองมากขึ้น กล่าวคือ เมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลต่ำกว่า $2.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ จะทำให้ผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งดำเนินไปช้ากว่าผลที่ได้จากการทดลอง แต่เมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่มากกว่า $2.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ จะทำให้ผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งดำเนินไปเร็วกว่าผลที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากการถ่ายโอนมวลของวัสดุเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะบ่งชี้ว่าจลนศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุนั้น ๆ จะเกิดขึ้นเร็วหรือช้า ในที่นี้ก็คือการถ่ายโอนมวลในรูปของความชื้นจากข้าวเปลือกไปยังสารดูดซับความชื้น เช่น เมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ $1.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ และ $2.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ จะเห็นว่าจลนศาสตร์ของการอบแห้งจะดำเนินไปแตกต่างกันเพราะการสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ต่ำเสมือนทำให้การถ่ายโอนความชื้นจากข้าวเปลือกไปยังสารดูดซับความชื้นเป็นไปอย่างช้า ๆ ในทางกลับกันเมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่สูงกว่าก็จะเปรียบเสมือนการทำให้เกิดการถ่ายโอนความชื้นจากข้าวเปลือกไปยังสารดูดซับความชื้นมากขึ้น ทำให้ได้ผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งเร็วกว่าผลจากการทดลอง แต่การสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่สูงหรือต่ำมากเกินไปก็จะทำให้เกิดการถ่ายโอนความชื้นจากข้าวเปลือกไปยังสารดูดซับความชื้นที่มากหรือน้อยเกินความเป็นจริงทำให้ผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งผิดพลาดจากความเป็นจริงของการทดลองได้เช่นเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกขึ้นด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงขึ้น จะสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุดเมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ $2.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ แกลบ ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและ ซิลิกาเจลเป็นสารดูดซับความชื้น



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เสี้ยนกปัตตานี
 ความชื้นเริ่มต้น $23.4 \pm 0.1\%$ dry-basis

ข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
 ความชื้นเริ่มต้น $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis

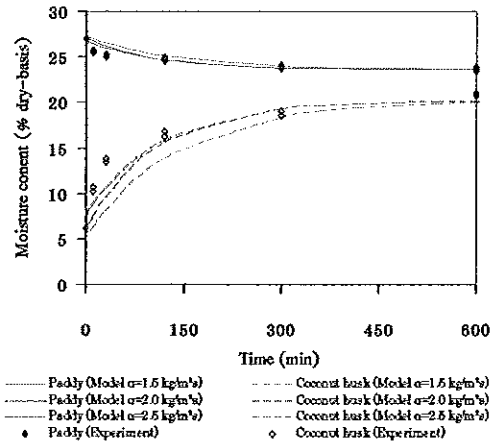
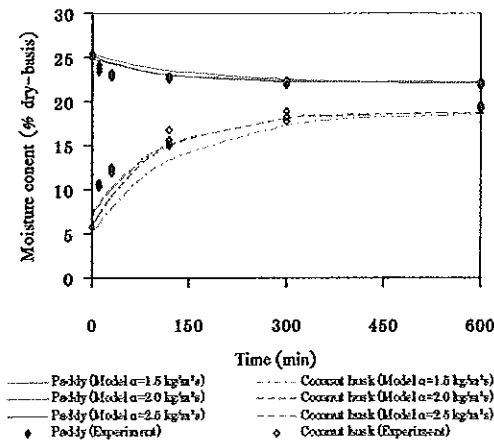
ภาพประกอบที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยแถบที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.1 \pm 0.2\%$ dry-basis เมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ 1.5, 2.0 และ $2.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เสี้ยนกปัตตานี
 ความชื้นเริ่มต้น $23.6 \pm 0.2\%$ dry-basis

ข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
 ความชื้นเริ่มต้น $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis

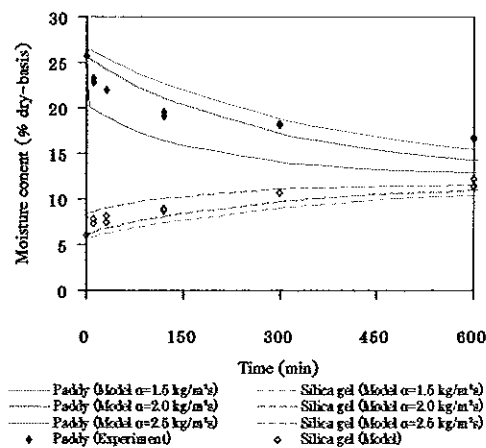
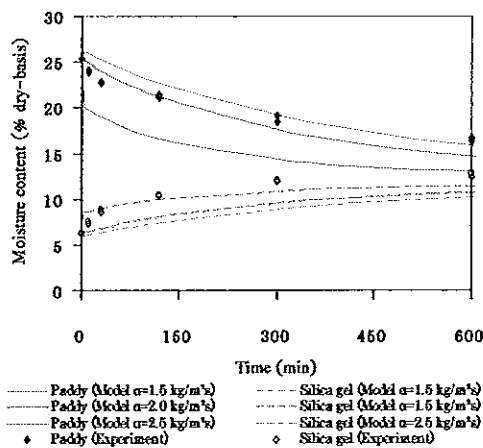
ภาพประกอบที่ 5.7 เปรียบเทียบผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยทางใบสาकुที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis เมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ 1.5, 2.0 และ $2.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
 ความชื้นเริ่มต้น $25.2 \pm 0.2\%$ dry-basis

ข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
 ความชื้นเริ่มต้น $26.9 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วย
 กาบมะพร้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.9 \pm 0.2\%$ dry-basis ตามลำดับ
 เมื่อสมมติค่าประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ 1.5, 2.0 และ 2.5 $\text{kg/m}^2\text{s}$



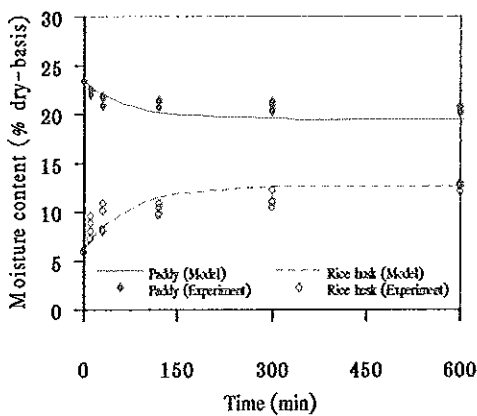
ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
 ความชื้นเริ่มต้น $25.4 \pm 0.1\%$ dry-basis

ข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
 ความชื้นเริ่มต้น $25.7 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 5.9 เปรียบเทียบผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วย
 ซิลิกาเจลที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.1 \pm 0.2\%$ dry-basis เมื่อสมมติ
 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ 1.5, 2.0 และ 2.5 $\text{kg/m}^2\text{s}$

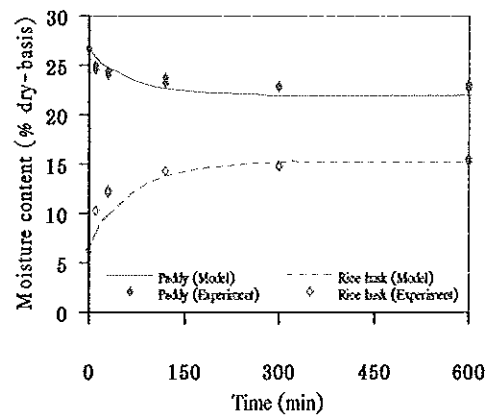
5.3.2 เปรียบเทียบผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงขึ้นกับผลจากการทดลอง

การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น ได้แสดงตัวอย่างการคำนวณในหัวข้อ 5.2.2 โดยการสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่เหมาะสมตามหัวข้อ 5.3.1 คือ $2.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ จะได้ผลการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองดังภาพประกอบที่ 5.10 ถึง 5.13 ซึ่งจะเห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกได้ดี โดยเฉพาะการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ทางใบสาकुและกามะพร้าว โดยจะมีอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทำนายในช่วง 0-100 นาที แรกช้ากว่าอัตราการอบแห้งจากการทดลอง แต่หลังจากนั้นผลการทำนายอัตราการอบแห้งจะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจนสิ้นสุดระยะเวลาของการอบแห้ง ส่วนการทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งที่ใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดซับความชื้นนั้นจะได้ผลการทำนายอัตราการอบแห้งที่ลดลงเร็วและมากกว่าผลที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี

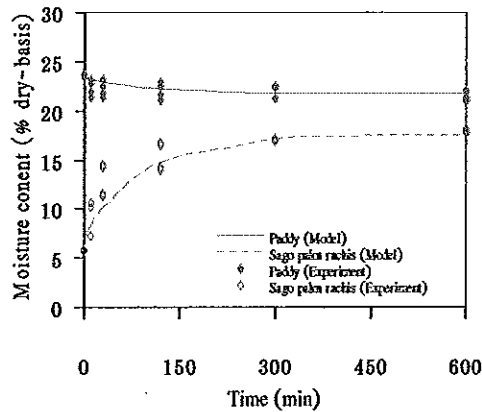
ความชื้นเริ่มต้น $23.4 \pm 0.1\%$ dry-basis



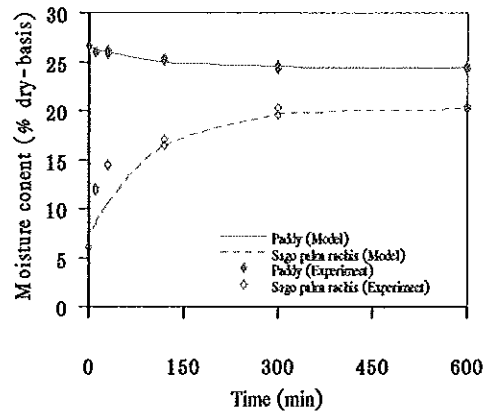
ข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

ความชื้นเริ่มต้น $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 5.10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่ออบแห้งด้วยแกลบที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.1 \pm 0.2\%$ dry-basis

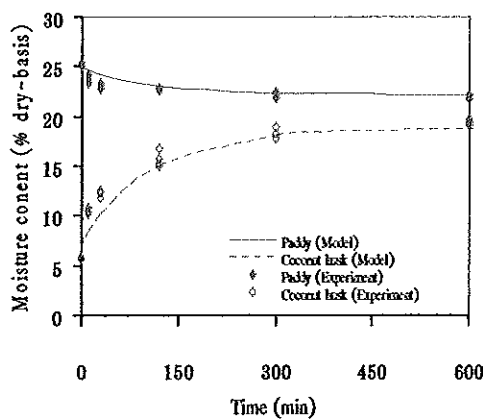


ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
ความชื้นเริ่มต้น $23.6 \pm 0.2\%$ dry-basis

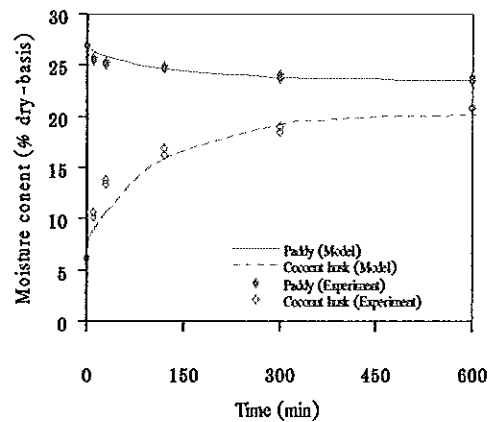


ข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
ความชื้นเริ่มต้น $26.6 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 5.11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่ออบแห้งด้วยทางใบสาคุ
ที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $5.9 \pm 0.2\%$ dry-basis

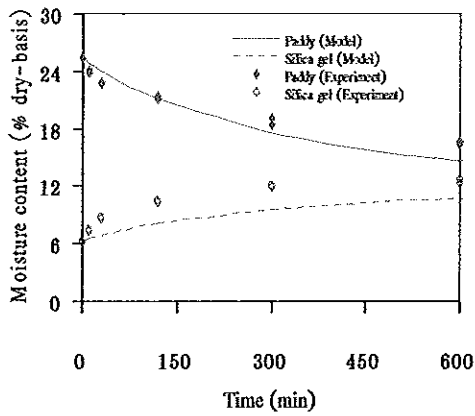


ข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี
ความชื้นเริ่มต้น $25.2 \pm 0.2\%$ dry-basis

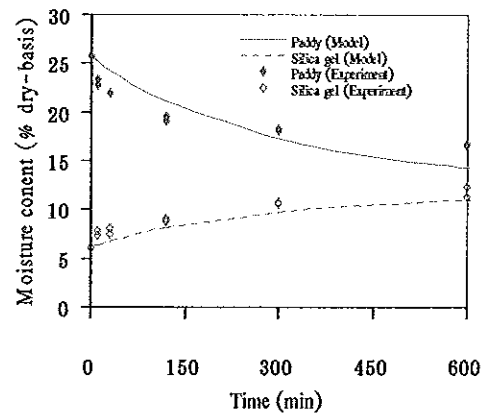


ข้าวเปลือกสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
ความชื้นเริ่มต้น $26.9 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 5.12 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่ออบแห้งด้วยกาบมะพร้าว
ที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.9 \pm 0.2\%$ dry-basis



ข้าวเปลือกสายพันธุ์เสีบนกปัตตานี
ความชื้นเริ่มต้น $25.4 \pm 0.1\%$ dry-basis



ข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
ความชื้นเริ่มต้น $25.7 \pm 0.1\%$ dry-basis

ภาพประกอบที่ 5.13 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่ออบแห้งด้วยซิลิกาเจล
ที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $6.2 \pm 0.1\%$ dry-basis

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนเบื้องต้นของสารดูดซับความชื้น

- 1) ความหนาแน่นปรากฏจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นตรงกับความชื้น โดยความหนาแน่นปรากฏจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น
- 2) เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นตรงกับความชื้น โดยจะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น
- 3) ความจุความร้อนจำเพาะจะเป็นฟังก์ชันกับความชื้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น โดยที่แกลบ ทางใบสาครและกาบมะพร้าวจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับความชื้น ในขณะที่ชิลิกาเจลจะเป็นฟังก์ชันแบบเอกซ์โปเนนเชียลกับความชื้น
- 4) ความชื้นสมดุลจะเป็นฟังก์ชันกับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิสัมบูรณ์ โดยที่อุณหภูมิคงที่ความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น และที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ความชื้นสมดุลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson (1952) สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด

6.1.2 จลนศาสตร์ของการอบแห้งสารดูดซับความชื้น

- 1) อัตราการอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้นจะมีเฉพาะช่วงของอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น โดยการอบแห้งจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาการอบแห้งผ่านไปประมาณ 15-20 นาที และแบบจำลองแบบเอมพิริคัลของ Page (1949) สามารถอธิบายผลการทดลองอบแห้งสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้ดีที่สุด ส่วนชิลิกาเจลแบบจำลองแบบเอมพิริคัลของ Modified Page (White *et al.*, 1978) สามารถอธิบายอัตราการอบแห้งได้ดีที่สุด โดยมีความแตกต่างกับแบบจำลองของ Page (1949) อยู่ประมาณ 0.2%
- 2) สมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิโดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล และทางใบสาครจะมีสมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงสุด รองลงมาคือ กาบมะพร้าว ชิลิกาเจลและแกลบ ตามลำดับ

6.1.3 การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม

กรณีที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเท่ากับ $30.4 \pm 0.9\%$ dry-basis จะได้อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นที่เหมาะสมคือ 1:1.0 โดยปริมาตร ส่วนกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกเท่ากับ $23.9 \pm 0.8\%$ dry-basis นั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1.5 โดยปริมาตร สำหรับสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ส่วนซิลิกาเจลอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ 1:1.0 โดยปริมาตร และการอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 250-300 นาที

6.1.4 การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นระดับสาธิตการใช้งาน

1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นสามารถนำมาใช้ปฏิบัติได้ โดยกาบมะพร้าวและแกลบมีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นสารดูดซับความชื้น รองลงมาคือ ทางใบสาคุและซิลิกาเจล ตามลำดับ

2) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงขึ้นเพื่อทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งสามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุดเมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ $2.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ โดยมีค่า E% อยู่ในช่วง 1.040-3.26 สำหรับสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ส่วนสารดูดซับความชื้นที่เป็นซิลิกาเจลจะมีค่า E% อยู่ในช่วง 4.090-7.90

3) อุณหภูมิในระบบอบแห้งจะเพิ่มสูงขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ $1.5-3.5^\circ\text{C}$ ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก

4) เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ของการอบแห้ง พบว่า ทางใบสาคุ กาบมะพร้าวและซิลิกาเจล สามารถใช้เป็นสารดูดซับความชื้นในการอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี ได้ดีกว่าข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ยกเว้นแกลบที่สามารถใช้เป็นสารดูดซับความชื้นในการอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้ดีกว่าข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานี

6.1.5 การทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก

ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ร้อยละการงอก และร้อยละความขาวของข้าวเปลือกที่ผ่านการทดลองอบแห้งมีความแตกต่างกัน้อยมากเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกอ้างอิงและข้าวเปลือกควบคุมคือ ประมาณ $\pm 3\%$ จึงถือได้ว่า การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลเพิ่มเติมที่นอกเหนือจากแบบจำลองของ Chung & Pfof (1967), Halsey (1948), Henderson (1952) และ Modified BET (1938) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพราะอาจจะได้แบบจำลองอื่น ๆ ที่สามารถใช้อธิบายผลการทดลองหาความชื้นสมดุลได้ดีกว่า
2. ควรศึกษาหาขนาดของสารดูดซับความชื้นที่เหมาะสมก่อนนำมาใช้เป็นสารดูดซับความชื้นในการดูดซับความชื้นออกจากข้าวเปลือก
3. การเก็บสารดูดซับความชื้นที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 5-10% dry-basis ควรเก็บในภาชนะที่ปิดสนิทหรือใช้ถุงพลาสติกที่ใช้ยางรัดมัดปากถุงแล้วเก็บไว้ในกระบะตั้งที่อุณหภูมิแวดล้อมจะเก็บได้ประมาณ 1 สัปดาห์
4. การแยกตัวอย่างสารดูดซับความชื้นออกจากข้าวเปลือกเพื่อไปหาความชื้นควรทำอย่างรวดเร็วและชั่งน้ำหนักทันทีเพื่อป้องกันการดูดซับความชื้นจากอากาศแวดล้อมระหว่างการแยก
5. เมื่อการอบแห้งดำเนินไปนานขึ้นซิลิกาเจลจะเกิดการแตก โดยซิลิกาเจลที่ใช้อบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเท่ากับ $30.4 \pm 0.9\%$ dry-basis จะแตกมากกว่าซิลิกาเจลที่ใช้ อบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเท่ากับ $23.9 \pm 0.8\%$ dry-basis
6. การแยกซิลิกาเจลออกจากข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง ไม่สามารถแยกได้โดยใช้ลมเป่า เพราะซิลิกาเจลมีน้ำหนักใกล้เคียงกับข้าวเปลือกและแตกหักเมื่อใช้เวลาเกิน 300 นาที จึงควรศึกษาเพื่อหาวิธีการแยกที่เหมาะสม
7. ในการอบแห้งชั้นบางสารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจะต้องรีบชั่งน้ำหนักทันทีเมื่อถึงเวลาที่กำหนดและต้องระมัดระวังไม่ให้สารดูดซับความชื้นตกหล่นหรือปลิวออกจากตะแกรง
8. การเทตัวอย่างทดลองลงในแคลอรีมิเตอร์เพื่อหาความจุความร้อนจำเพาะจะต้องทำอย่างรวดเร็วและรีบปิดฝาให้แน่นสนิท ตั้งไว้ประมาณ 3-5 นาที จึงวัดอุณหภูมิแล้วบันทึกค่าไว้
9. หากต้องการทำเป็นระดับขยายสเกลเพื่อใช้งานจริงควรมีอุปกรณ์ที่ใช้แยกข้าวเปลือกและสารดูดซับความชื้นออกจากกันแทนการคัดแยกด้วยมือและควรมีอุปกรณ์ที่ใช้ตัดหรือบดสารดูดซับความชื้นให้มีขนาดที่เหมาะสมในปริมาณที่มากพอกับความต้องการใช้งานในแต่ละครั้งด้วย

บรรณานุกรม

- กฤษณ์ เทียรฆประสิทธิ์ และ ศิริพร พงศ์สันติสุข. 2545. การกำจัดคราบน้ำมันในน้ำโดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ. ว. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ภาษาไทย) 1 (2): 26-31.
- กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ สมเกียรติ ปรัชญาวารากร อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2547. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เกลบเป็นตัวกลางในการดูดซับ. รายงานการสัมมนา นวัตกรรมทางวิศวกรรมเกษตรเพื่อเพิ่มผลผลิต ครั้งที่ 5 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน 26-27 เมษายน 2547 หน้า 15-21.
- งามชื่น คงเสรี. กิตติยา กิจจวรรตี. กุสุมา นวลวัฒน์ และ กัญญา เชื้อพันธ์. 2545. คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวปนในข้าวหอมมะลิไทย, 115 หน้า. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- จวงจันทร์ ดวงพัตรา. 2541. หลักการผลิตพืช, 258 หน้า. กรุงเทพฯ: ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิณณจารย์ เศรษฐสุข. 2531. การเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองโดยใช้สารดูดความชื้นภายในภาชนะปิดผนึก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชอบ ลายทอง. 2530. การศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ความร้อนของข้าวเปลือก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชาญ มงคล. 2536. ข้าว, 149 หน้า. กรุงเทพฯ : หน่วยศึกษานิเทศก์กรมการฝึกหัดครู การศาสนา กรมศาสนา.
- ธวัชชัย สุวรรณวงศ์. 2547. การศึกษาจลนศาสตร์ของการอบแห้งยางแห้งเอสทีอาร์ เบอร์ 20, 65 หน้า. โครงการวิทยาศาตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ประพาส วีระแพทย์. 2531. ความรู้เรื่องข้าว, 108 หน้า. กรุงเทพฯ: กองการข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ภาวิกา วงศ์แก้ว. 2547. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เกลบเป็นสารดูดซับความชื้น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ลือพงษ์ ลือนาม, วินิต ชินสุวรรณ, ธวัชชัย ทิวาวรรณวงศ์ และ สมนึก ชูศิลป์. 2545. การศึกษาวิธีชะลอการเสื่อมคุณภาพข้าวเปลือกความชื้นสูง โดยการดูดระบายอากาศออกจากกองข้าว. ว. วิจัย มข. (บศ.) 2 (ฉบับฉบับพิเศษ): 33-38.
- ละมุล วิเศษ. 2541. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- วันชัย จันทร์ประเสริฐ. 2542. เทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์พืชไร่, 276 หน้า. กรุงเทพฯ: ภาควิชาพืชไร่ฯ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วันพุทธ แซ่ฉั่ว. 2544. การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบปรับอากาศในประเทศไทยโดยใช้สารดูดความชื้น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2543. เทคนิคที่เหมาะสม สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก. ว. วิทยาศาสตร์ 54 (5): 288-292.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, 338 หน้า. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมศักดิ์ เหล่าเจริญสุข. 2530. การใช้ลำต้นสาकुเลี้ยงสัตว์. ว. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2 (1-3): 35-40.
- สุภวรรณ ภูริระวิชย์กุล, ยุทธนา ภูริระวิชย์กุล, ไพโรจน์ ศิริรัตน์, สมคิด จีนาพงษ์ และ วีระ ไทยสยาม. 2536. อุปกรณ์ศึกษาอัตราการอบแห้งเมล็ดพืชชั้นบาง. รายงานการวิจัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- สุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และ อรไท สุขเจริญ. 2543. การดูดซับตะกั่ว(+2) โดยใช้หญ้าสลาบลางและไส้สับปะรส. ว. วิทยาศาสตร์ มศว 16 (2): 91-98.
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. 2547. *ประมวลข้อมูลสถิติที่สำคัญของประเทศไทย พ.ศ. 2547 (ฉบับพิเศษ)*. 223 หน้า. กรุงเทพฯ: หจก. บางกอกบล๊อค.
- อรวรรณ ศิริโชติ. 2543. *เคมีเชิงฟิสิกส์เบื้องต้น*, 330 หน้า. สงขลา: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์, หล่อ ทองคำ และ ชาญณรงค์ ยิ้มแก้ว. 2545. การดูดซับไอออนเหล็กตะกั่วและแคดเมียม จากสารละลายด้วยตัวดูดซับประเภทเส้นผม. ว. วิศวกรรมศาสตร์ มช. 10 (1): 85-88.
- เอกสงวน ชูวิสิฐกุล. 2544. *เทคโนโลยีการผลิตข้าวพันธุ์ดี*, 137 หน้า. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร.
- Abe, T. and Basunia, M.A. 1996. Simulation of temperature and moisture changes during storage of rough rice in cylindrical bins owing to weather variability. *J. of Agricultural Engineering Research*. 65: 223-233.
- Acquaah, G. 2005. *Principles of crop production: Theory, Techniques, and Technology*. (2th edition), 740 pp. New Jersey: Pearson prentice Hall.
- AOAC. 2000. *Official methods of analysis* (17th edition), Washington, D.C., Association of official analytical chemists.

- Altuntas, E., Ozgoz E. and Taser F.O. 2005. Some physical properties of fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.) seeds. *J. of Food Engineering*. 71: 37-43.
- Andrieu, J., Stamatopoulos, A. and Zafiropoulos, M. 1985. Equation for fitting desorption of durum wheat pasta. *J. of Food Technology*. 20: 651-657.
- Anthony, L.H. and Robert, N.M. 1985. *Mass transfer fundamental and application*, 542 pp. New Jersey: Prentice hall, Inc.
- ASHRAE, 1981. *Fundamentals handbook*, Atlanta, American society of heating refrigerating and air-conditioning engineers, INC.
- Bala, B.K. 1997. *Drying and storage of cereal grains*, 302 pp. Oxford & IBH Publishing.
- Basunia, M.A. and Abe, T. 1999. Moisture adsorption isotherms of rough rice. *J. of Food Engineering*. 42: 235-242.
- Basunia, M.A. and Abe, T. 2005. Thin layer rewetting of rough rice at low and high temperatures. *Stored Products Research J.* 41: 163-173.
- Boquet, R., Chirife, J. and Iglesias, H. A. 1978. Equations for fitting water sorption isotherms of foods. II. Evaluation of various two parameter models. *Journal of Food Technology*. 13: 319-327.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. 1981. *Drying cereal grains* (3rd edition), 265 pp. Westport, Connecticut: The AVI publishing company, Inc.
- Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E. 1938. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *J. Amer. Chem. Soc.* 6: 309-319.
- Chakraverty, A. and Paul, S.R. 2001. *Postharvest technology: Cereals, pulses, fruits and vegetables*, 356 pp. New Hampshire USA: Science publishers, Inc.
- Chung, D.S. and Pfost, H.B. 1967. Adsorption and Desorption of Water Vapor by Cereal Grain and Their Products. *Trans. ASAE*. 10: 549-557.
- Chunjula P. 1999. Sago palm : The interesting local plant in the south. *Thai agricultural research J.* 17 (2): 213-221.
- Crank, J. 1975. *The Mathematics of Diffusion* (2nd edition), 414 pp. Oxford: Clarendon Press.
- De Datta, S.K. 1981. *Principle and practices of rice production*, 618 pp. John Wiley & Sons, Inc.
- Ghate, S.R. and Chhinnan, M.S. 1983. Pecan drying with silica gel. *Energy in Agriculture*. 2: 11-20.
- Halsey, G. 1948. Physical Adsorption on Non-Uniform Surface. *J. Chem. Phys.* 16: 83-92.

- Henderson, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*. 17: 1167-1172.
- Henderson, S.M.A. 1952. Basic Concept of Equilibrium Moisture. *Agril. Eng.* 3: 29-32.
- Henderson, S.M. and Pabis, S. 1961. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficients. *J. of Agricultural Engineering Research*. 6: 169-1747.
- Iguaz, A., Arroqui, C. Esnoz, A. and Virseda, P. 2004. Modelling and validation of heat transfer in stored rough rice without aeration. *Biosystems Engineering*. 88 (4): 429-439.
- Iguaz, A., San Martin, M.B., Mate, J.I., Fernandez, T. and Virseda, P. 2003. Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (*Lido cultivar*) at low drying temperatures. *J. of Food Engineering*. 59: 253-258.
- Imoudu, P.B. and Olufayo, A.A. 2000. The effect of sun-drying on milling yield and quality of rice. *Bioresource Technology*. 74: 267-269.
- Inoue, K., Tirawanichakul, Y., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. 2002. Analysis of dry processing of paddy in Thailand. *Presented on Annual Meeting of Japanese Society of Agricultural Machinery*, pp. 469-470.
- ISTA. 2003. *The germination test 5A-1*. The international seed testing association, Basserdorf, CH-Switzerland.
- Jan, E.G.V.D., Martien, J.A.V.D.O., Wouter, T., Edwin, R.P.K., Aurora, G.P. 2004. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk part 1: Lignin as intrinsic thermosetting binder resin. *Industrial Crops and Products*. 19: 207-216.
- Karababa, E. 2006. Physical properties of popcorn kernels. *J. of Food Engineering*. 72: 100-107.
- Karathanos, V.T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *J. of Food Engineering*. 39: 337-344.
- Lopes Fiho, J.F., Romanelli, P.E., Barboza, S.H.R., Gabas, A.L. and Telis-Romero, J. 2002. Sorption isotherms of Alligator's Meat (*Caiman crocodiles yacare*). *J. of Food Engineering*. 52: 201-206.
- Luikov, A.V. 1966. *Heat and mass transfer in capillary porous bodies*, Pergamon press. London.
- Malik, P.K. 2003. Use of activated carbon prepared from sawdust and rice husk for adsorption of acid dyes: A case study of acid yellow 36. *Dyes and Pigment*. 56: 239-249.

- Manju, G.N., Raji, C. and Anirudhan, T.S. 1998. Evaluation of coconut husk carbon for the removal of arsenic from water. *Wat. Res.* 32 (10): 3062-3070.
- McLaughlin, C. P. and Magee, T. R. A. 1998. The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. *J. of Food Engineering*: 35: 267-280.
- Mujumdar, A.S. 1987. *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker.
- Nakbanpote, W, Thiravetyan, P. and Kalambaheti, C. 2002. Comparison of gold adsorption by chlorella vulgaris, Rice husk and activated carbon. *Minerals Engineering J.* 15: 549-552.
- Oswin, G.R. 1946. The kinetics of package life. III. The isotherm. *J. Chem. Ind. (London)* 64: 419.
- Page, G.E. 1949. *Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layer*. M.S. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana. USA.
- Soponronnarit, S., Srisubati, N. and Yoovidhya, T. 1998. Effect of temperature and relative humidity on yellowing rate of paddy. *J. Stored Prod. Res.* 34 (4): 323-330.
- Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J.L. and Hamdy, M.Y. 1980. A model for ear corn drying. *Transaction of the ASAE.* 23: 1261-1271.
- Sturton S.L., W.K Bilanski, and D.R. Menzies. 1981. Drying of cereal grains with the desiccant bentonite. *Can. Agric. Eng.* 23: 101-103.
- Sturton S.L., W.K Bilanski, and D.R. Menzies. 1983. Moisture exchange between corn and the desiccant bentonite in an intimate mixture. *Can. Agric. Eng.* 25: 139-141.
- Tirawanichakul, S., Prachayawarakon, S., Tungtrakul, P., warayanond, W. and Soponronnarit, S. 2002. Effect of drying temperature on physical property of high and low amylase content paddy. *Proceedings of the International conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering, Asian Institute of Technology, Bangkok, 11-13 Dec. 2002, pp. 467-480.*
- Tirawanichakul, Y., Soponronnarit, S. and Prachayawarakon, S., 2001. Simulation of paddy yellowness behaviour in deep bed drying. *Proc. The 20th ASEAN/2nd APEC Seminar on Postharvest Technology, Chiang Mai, Thailand, Sep. 2001, pp. 97-105.*
- Tirawanichakul, Y., Prachayawarakon, S., Inoue, K. and Soponronnarit, S. 2003. Field experience on drying of paddy under tropical climate. In *Proc. The Technical*

Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 13-14 March 2003, pp. 255-268.

- Tirawanichakul, Y., Prachayawarakon, S., Tungtrakul, P., Chaiwatpongskon, W. and Soponronnarit, S. 2003. Experiments on In-store paddy drying under tropical climate: Simulation and product quality. *Drying Technology-An International Journal*. 21 (6): 1049-1064.
- Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B. and Wratten, F.T. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transaction of the ASAE*. 28: 296-301.
- Wang, C.Y. and Singh, R.P. 1978. A single layer drying equation for rough rice. ASAE, paper no. 78-3001, St. Joseph, Miami, USA.
- White, G. M. Bridges, T. C., Loewer, O.J. and Ross, I. J. 1978. Seed coat damage in thin layer drying of soybeans as affected by drying conditions. ASAE, paper no. 3052.
- Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A. and Cagatay, F. 1999. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In: A. Bascetincelik (Ed.), *Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy*. Adana, Turkey: Faculty of Agriculture, Cukurova University, 1999, pp. 565-569.
- Yaldiz, O. and Ertekin, C., and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*. 26: 457-465.
- Yamaguchi and Kawasaki. 1994. Basic research for rice drying with silica gel. *Drying Technology*. 12 (5): 1053-1067.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

- ก. 1 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล
- ก. 2 ตัวอย่างสารละลายเกลืออิมิตัว

ก. 1 สัมประสิทธิ์ของการถ่ายโอนมวล (Crank, 1975)

ตารางภาคผนวกที่ ก. 1-1 Root of $\beta_n \tan \beta_n = \alpha$

α	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
0.00	0	3.1416	6.2832	9.4248	12.5664	15.7080
0.01	0.0998	3.1448	6.2848	9.4258	12.5672	15.7086
0.10	0.3111	3.1731	6.2991	9.4354	12.5743	15.7143
0.20	0.4328	3.2039	6.3148	9.4459	12.5823	15.7207
0.50	0.6533	3.2923	6.3616	9.4775	12.6060	15.7397
1.00	0.8603	3.4256	6.4373	9.5293	12.6453	15.7713
2.00	1.0769	3.6436	6.5783	9.6296	12.7223	15.8336
5.00	1.3138	4.0336	6.9096	9.8928	12.9352	16.0107
10.00	1.4289	4.3058	7.2281	10.2003	13.2142	16.2594
100.00	1.5552	4.6658	7.7764	10.8871	13.9981	17.1093
∞	1.5708	4.7124	7.8540	10.9956	14.1372	17.2788

ตารางภาคผนวกที่ ก. 1-2 Root of $\beta_n \cot \beta_n + \alpha = 1$

α	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
0.00	0	4.4934	7.7253	10.9040	14.0662	17.2208
0.01	0.1730	4.4956	7.7265	10.9050	14.0669	17.2213
0.10	0.5423	4.5157	7.7382	10.9133	14.0733	17.2266
0.20	0.7593	4.5379	7.7511	10.9225	14.0804	17.2324
0.50	1.1656	4.6042	7.7899	10.9499	14.1017	17.2498
1.00	1.5708	4.7124	7.8540	10.9956	14.1372	17.2788
2.00	2.0288	4.9132	7.9787	11.0856	14.2075	17.3364
5.00	2.5704	5.3540	7.3029	11.3349	14.4080	17.5034
10.00	2.8363	5.7172	8.6587	11.6532	14.6870	17.7481
100.00	3.1102	6.2204	9.3309	12.4414	15.5522	18.6633
∞	3.1416	6.2832	9.4248	12.5664	15.7080	18.8496

ก. 2 ตัวอย่างสารละลายเกลืออิมตัว (Bala, 1997)

ตารางภาคผนวกที่ ก. 2-1 ตัวอย่างสารละลายเกลืออิมตัวบางชนิดที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกัน

สารละลายเกลืออิมตัว	อุณหภูมิ (%)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
CaCl ₂ ·6H ₂ O	5.0	39.8
	20.0	32.3
	24.4	31.0
KNO ₃	20.0	93.2
	30.0	90.7
	40.0	87.9
	50.0	85.0
LiCl·H ₂ O	20.0	12.4
	30.0	11.8
	40.0	11.6
	50.0	11.4
LiCl	20.0	11.2
	25.0	11.2
	30.0	11.2
	37.8	11.2
MgCl ₂	22.8	32.9
	30.0	32.4
	37.8	31.9
MgCl ₂ ·6H ₂ O	20.0	33.6
	30.0	32.8
	40.0	32.1
	50.0	31.4
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	20.0	54.9
	30.0	52.0
	40.0	49.2
	50.0	46.3
NaCl	20.0	75.5
	30.0	75.6
	40.0	75.4
	50.0	74.5

ภาคผนวก ข

- ข. 1 การแบ่งชนิดของข้าว
- ข. 2 ข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ที่ปลูกในประเทศไทย

ข. 1 การแบ่งชนิดของข้าวตามหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกต่าง ๆ (งามชื่น และคณะ, 2545; ชาญ, 2546; ประพาส, 2531) สามารถแบ่งได้ดังนี้

ข. 1-1 แบ่งตามชนิดของเนื้อแป้งในเมล็ด สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1) ข้าวเหนียว (Glutinous rice, Waxy rice, Sticky rice) : ข้าวเหนียวจะมีแป้งชนิดแอมิโลเปคติน (Amylopectin) เป็นส่วนใหญ่ ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยมีแป้งแอมิโลส (Amylose) ในปริมาณน้อยมาก บางครั้งไม่มีเลย มีเมล็ดสีขาวขุ่น เมื่อนำมาึ่งหรือหุงสุกแล้วข้าวจะจับตัวติดกันและมีลักษณะใส่ประชาชนในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยใช้บริโภคเป็นอาหารหลัก

2) ข้าวเจ้า (Non-glutinous rice, Non-sticky rice, Non-waxy rice) : ข้าวเจ้าจะประกอบด้วยแป้ง (Starch) ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ เป็นแป้งแอมิโลส (Amylose) ประมาณ 7-33 เปอร์เซ็นต์ และแป้งแอมิโลเปคติน (Amylopectin) ประมาณ 60-90 เปอร์เซ็นต์ เมล็ดจะมีสีขาวใส เมื่อกึ่งหรือนำมาึ่งสุกจะมีสีขาวขุ่นและร่วนกว่าข้าวเหนียว ประชาชนส่วนใหญ่ในภาคกลางและภาคใต้ของประเทศไทยใช้บริโภคเป็นอาหารหลัก

ข. 1-2 แบ่งตามนิเวศการปลูก สามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

1) ข้าวไร่ (Upland rice) : ข้าวไร่เป็นข้าวที่ขึ้นได้ตามไหล่เขาโดยไม่ต้องมีน้ำขัง มีความทนแล้งได้ดีกว่าข้าวประเภทอื่น ๆ ปลูกในที่ราบสูงของไทยคิดเป็นเนื้อที่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อที่ปลูกข้าวทั่วประเทศ

2) ข้าวนาสวน (Lowland rice) : เป็นข้าวที่ขึ้นได้ดีในที่ที่มีน้ำขังแต่น้ำลึกไม่เกิน 50 เซนติเมตร มีปลูกมากแทบทุกภาคในประเทศไทย คิดเป็นเนื้อที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อที่ปลูกข้าวทั่วประเทศ

3) ข้าวน้ำลึก : ข้าวน้ำลึกจะปลูกในที่ที่มีระดับน้ำมากกว่า 50 เซนติเมตรแต่ไม่เกิน 100 เซนติเมตร โดยจะต้องอยู่ในน้ำในระดับดังกล่าวเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 1 เดือน

4) ข้าวขึ้นน้ำหรือข้าวนาเมือง (Floating rice) : เป็นข้าวที่ต้องปลูกในน้ำที่ลึกมากกว่า 100 เซนติเมตร เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 1 เดือน ส่วนมากปลูกในแถบจังหวัดอุษายา ลพบุรี อ่างทองและสิงห์บุรี เป็นต้น คิดเป็นเนื้อที่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อที่ปลูกข้าวทั่วประเทศ

ข. 1-3 แบ่งตามความไวต่อช่วงแสง สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1) ข้าวไวต่อช่วงแสง (Photoperiod sensitive rice) : เป็นชนิดข้าวที่มีการกำหนดการออกดอกแน่นอนแม้จะปลูกเวลาต่างกัน จัดเป็นพืชวันสั้นจะมีการออกดอกในเวลาที่ยาววันสั้นกว่ากลางวัน จะปลูกในฤดูนาปี (ฤดูฝน) เพื่อให้ดอกออกทันฤดูหนาวหรือระหว่างฤดูหนาวซึ่งจะมีช่วงของกลางวันสั้นกว่า 12 ชั่วโมง แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1.1) ข้าวเบา (Early variety) : เป็นข้าวที่ออกดอกประมาณเดือน กันยายน-ตุลาคม

1.2) ข้าวกลาง (Medium variety) : เป็นข้าวที่ออกดอกระหว่างปลายเดือนตุลาคม-

พฤศจิกายน

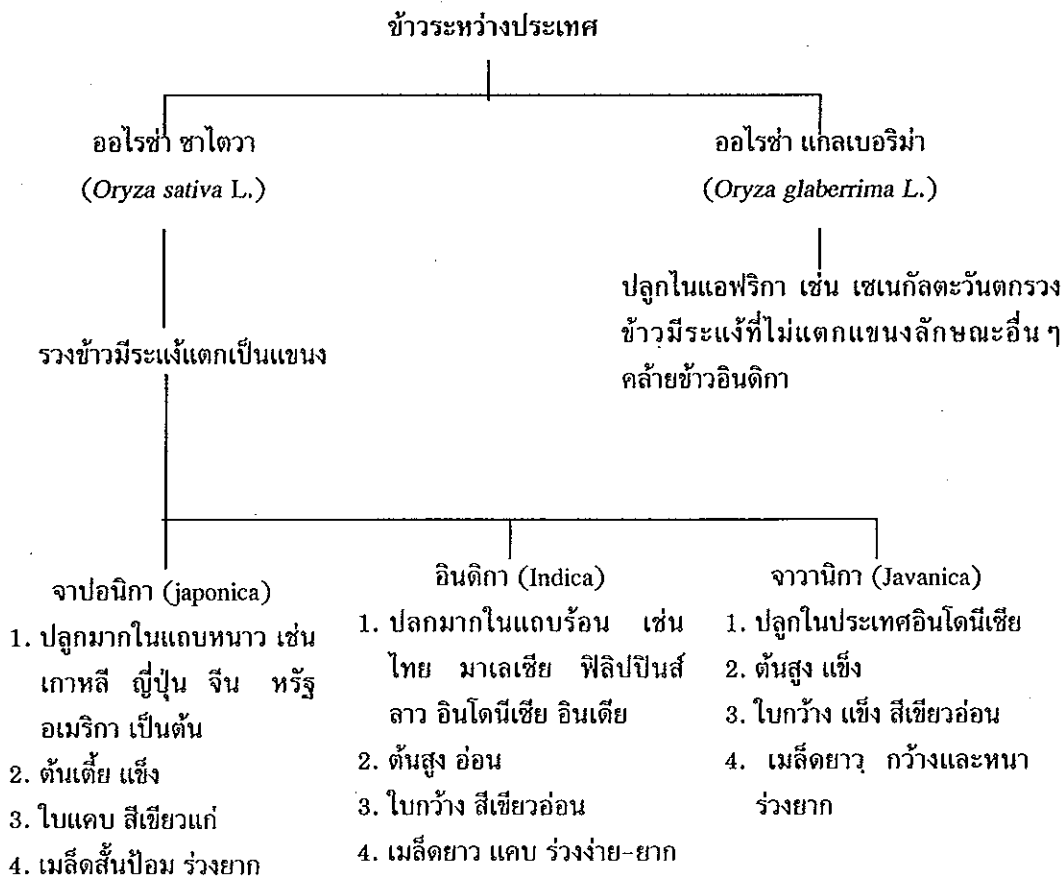
1.3) ข้าวหนัก (Late variety) : เป็นข้าวพื้นเมืองของไทย (เกือบทุกพันธุ์) ซึ่งจะมีการออกดอกประมาณเดือนธันวาคม-กุมภาพันธ์

2) ข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง (Photoperiod insensitive rice) : เป็นข้าวที่มีการออกดอกตามอายุ สามารถปลูกได้ตลอดปีเมื่อมีน้ำ แต่จะให้ผลดีกว่าเมื่อปลูกในฤดูนาปรัง (ฤดูร้อน) เพราะมีแสงแดดมาก จะมีอายุประมาณ 110-150 วัน

ข. 1-4 เปรียบเทียบลักษณะสำคัญของข้าวกา จาปอนิกา และจาวานิกา

ลักษณะ \ ชนิด	Indica	Japonica	Javanica
ใบ	กว้างสีเขียวอ่อน	แคบ สีเขียวแก่	กว้าง เข้ม สีเขียวอ่อน
เมล็ด	ยาว ค่อนข้างแบน	สั้น กลม	กว้าง หนา
การแตกกอ	แตกกอมาก	แตกกอปานกลาง	แตกกอน้อย
ต้น	สูง อ่อน	เตี้ย แข็ง	สูง แข็ง
หางของเมล็ด	สั้นมาก	สั้นมาก-ยาว	สั้นมาก-ยาว
ขนของข้าวเปลือก	สั้น	ขนมากและยาว	ขนยาว
การร่วงของเมล็ด	เมล็ดร่วงง่าย	เมล็ดร่วงยาก	เมล็ดร่วงยาก
เปอร์เซ็นต์แอมิโลส	23-31	20-25	10-24

ข. 1-5 เปรียบเทียบประเภทของข้าวระหว่างประเทศ



ข. 1-6 แบ่งตามอายุ สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด คือ

- 1) ข้าวเบา (Early variety) : เป็นข้าวที่มีระยะเวลาการงอกถึงการเก็บเกี่ยวไม่เกิน 100 วัน
- 2) ข้าวกลาง (Medium variety) : เป็นข้าวที่มีระยะเวลาการงอกถึงการเก็บเกี่ยวประมาณ 100-130 วัน
- 3) ข้าวหนัก (Late variety) : เป็นข้าวที่มีระยะเวลาการงอกถึงการเก็บเกี่ยวมากกว่า 130 วัน

ข. 1-7 แบ่งตามฤดูการปลูก สามารถแบ่งได้ดังนี้

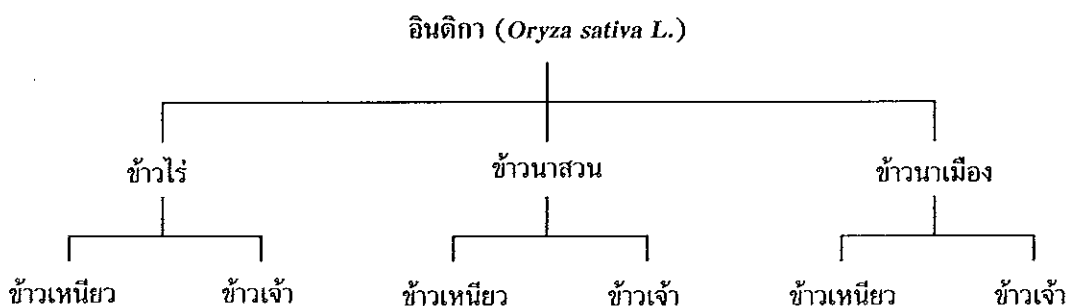
- 1) ข้าวนาปี หรือข้าวหน้าน้ำฝน (Rainfed rice) : เป็นข้าวที่ปลูกในฤดูการทำนาปกติ สำหรับประเทศไทยเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคมและเก็บเกี่ยวเสร็จสิ้นไม่เกินเดือนกุมภาพันธ์ของทุกปี
- 2) ข้าวนาปรัง (Off-season rice) : เป็นข้าวที่ปลูกนอกฤดูการทำนาปี เริ่มเดือนมกราคมและเก็บเกี่ยวไม่เกินเดือนเมษายนของทุกปี นิยมปลูกในพื้นที่ที่มีการชลประทานดี

ข. 2 ประเภทและพันธุ์ข้าวที่ปลูกในประเทศไทย (ประพาส, 2531)

ข. 2-1 ข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ที่ปลูกในประเทศไทย

- 1) ข้าวที่สามารถปลูกได้ทุกภาค เช่น ข้าวนาชลประทาน ข้าว กข 7 ข้าว กข 23 ข้าวสุพรรณบุรี 60 ข้าวสุพรรณบุรี 90 ข้าวพิษณุโลก 60-2 ข้าวชัยนาท 1 ข้าวสุพรรณบุรี 1 ข้าวสุพรรณบุรี 2 ข้าวคลองหลวง 1 ข้าวหอมสุพรรณบุรี ข้าวปทุมธานี 1 ข้าวพิษณุโลก 1 ข้าวพิษณุโลก 2 ข้าวสุรินทร์ 1 ข้าวหน้าน้ำฝน 1 เป็นต้น
- 2) ข้าวที่ปลูกในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น ข้าวขาวหอมดอกมะลิ 105 ข้าว กข 6 ข้าว ข้าวตาแห้ง 17 ข้าวปากหม้อ 148 ข้าวหน้าน้ำฝน 2 เป็นต้น
- 3) ข้าวที่ปลูกในภาคกลาง เช่น ข้าวเหลืองประทิว 123 ข้าวน้ำสะกูด 19 ข้าวพิษณุโลก 60-1 ข้าวชุมแพ 60 ข้าวพิษณุโลก 1 ข้าวพิษณุโลก 3 ข้าว กข 15 ข้าวหน้าน้ำฝน 3 ข้าวขาวตาแห้ง 17 ข้าว กข 27 ข้าวปทุมธานี 60 เป็นต้น
- 4) ข้าวที่ปลูกในภาคใต้ เช่น ข้าวนางพญา 132 ข้าวแก่นจันทร์ ข้าวพัทลุง 60 ข้าวลูกแดง ปัตตานี ข้าวเล็บนกปัตตานี ข้าวเฉียงพัทลุง ข้าวชันนาและข้าวน้ำลึก ข้าวปิ่นแก้ว 56 ข้าวเล็บมือนาง 111 ข้าวหัตตรา 60 เป็นต้น

ข. 2-2 ประเภทของพันธุ์ข้าวในประเทศไทย



ภาคผนวก ค

ค. 1 การวิเคราะห์ความชื้น

ค. 1 การวิเคราะห์ความชื้น ตามวิธีมาตรฐานของ AOAC (2000)

การวิเคราะห์หาค่าความชื้นของเมล็ดพืชอาจแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

- 1) วิธีโดยตรง เช่น การใช้ตู้อบ การกลั่น การใช้สารดูดซับความชื้นในห้องสูญญากาศ
- 2) วิธีโดยอ้อม คือ การหาความชื้นโดยการวัดสมบัติบางอย่างที่ขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุ เช่น ความต้านทานทางไฟฟ้า หรือวัดสมบัติ ทางไดอิเล็กตริก เป็นต้น

สำหรับการหาความชื้นโดยวิธีตรงตามมาตรฐาน Association of official agricultural chemists (AOAC, 2000) นั้น สามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างวัสดุที่ต้องการหาความชื้นประมาณ 30-40 กรัม บันทึกค่าไว้
2. นำตัวอย่างวัสดุไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 72-96 ชั่วโมง
3. เมื่อครบตามกำหนดเวลา 72-96 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างวัสดุออกจากตู้อบแล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 30-40 นาที เพื่อให้ตัวอย่างวัสดุมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม
4. นำตัวอย่างวัสดุไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง แล้วบันทึกค่าไว้ โดยถือว่าน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 72-96 ชั่วโมง นี้ เป็นน้ำหนักแห้ง
5. คำนวณค่าความชื้นตามสมการ ดังต่อไปนี้

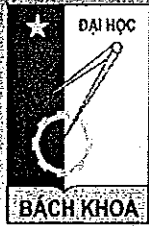
5.1 ความชื้นมาตรฐานแห้ง คำนวณจาก
$$M_d = \frac{W-d}{d} \times 100$$

5.2 ความชื้นมาตรฐานเปียก คำนวณจาก
$$M_w = \frac{W-d}{W} \times 100$$

เมื่อ	M_d	คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% dry-basis)
	M_w	คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% wet-basis)
	d	คือ มวลแห้ง (kg)
	W	คือ มวลเปียก (kg)

ภาคผนวก ง

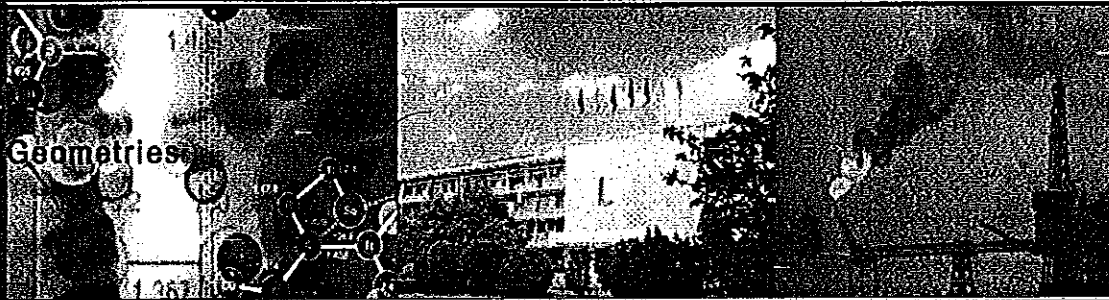
ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่จากวิทยานิพนธ์



RSCE 2005



*Regional Symposium
on Chemical Engineering 2005*



**New Trends in Technology
towards Sustainable Development**

Proceedings

November 30th - December 2nd, 2005

Hanoi University of Technology
In collaboration with
Ho Chi Minh City University of Technology



SCIENCE AND TECHNICS PUBLISHING HOUSE

Novel Moisture Removal of Paddy by Agricultural Residue

Eleeyah Saniso^a, Supawan Tirawanichakul^b and Yutthana Tirawanichakul^{c*}

^{a,c}Department of Physics, Faculty of Science,

^bDepartment of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,

Prince of Songkla University, Songkhla Thailand 90112

*Corresponding e-mail address: yutthana.t@psu.ac.th,

Abstract

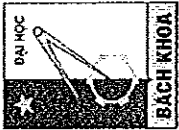
The main objective of this work is to investigate the equilibrium moisture content (EMC) of three biomass residues, which was used for paddy drying and to study of moisture desorption of paddy by rice husk, sago palm rachis and coconut husk at various volumetric ratios. The equilibrium moisture contents of these adsorbents are determined by static method under the conditions of 30–50°C and of 12–85% RH. The four popular EMC equations were determined and presented. They are evaluated for their ability to fit the experimental data based on two following error parameters [root mean square error analysis (RMSE) and standard deviation (S.E.)]. The results show that the modified Henderson's equation is the most appropriate equation for describing the EMC adsorption isotherms of adsorbents. In addition, the adsorption ability of adsorbent has proportional relation to the air temperatures at constant relative humidity.

To determine the diffusion coefficient of all adsorbents, desorption kinetic of thin-layer drying of adsorbent was set-up and the experimental data was simulated by Non-linear regression analysis. The thin layer drying equation was formulated and the simulated results are in good agreement to the experimental data.

Keywords : *Desorption isotherm, Diffusion coefficient, Equilibrium moisture content, Paddy drying.*

RSCE 2005

Regional Symposium
on Chemical Engineering



“New Trends in Technology towards Sustainable Development”

Hanoi University of Technology
in Collaboration with
Ho Chi Minh City University of Technology

presents this

Certificate of Attendance

to

Eliya Sniso

as

Participant

during the Regional Symposium on Chemical Engineering
Hanoi Horizon Hotel, Vietnam
November 30th - December 2nd, 2005

Prof. Ha Duyen Tu
Chairman, Organizing Committee

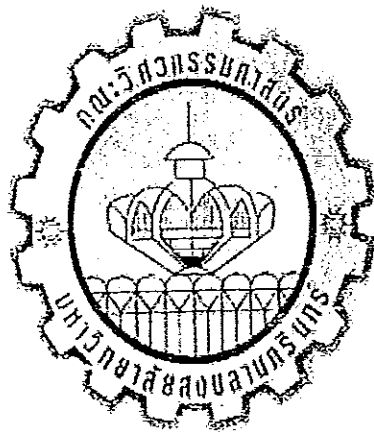
Prof. Hiroe Niiyama
Chairman, International Advisory Board

การประชุมวิชาการ

เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 19

19 - 21 ตุลาคม 2548
ณ โรงแรม เดอะ รอยัล พาราไดส์ จังหวัดภูเก็ต

Mechanical Engineering Network
of Thailand the 19th Conference
October 19-21, 2005



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Thin-Layer Drying and Mathematical Model of Some Agriculture residue

Tirawanichakul, Y.^{1*}, Tirawanichakul, S.² and Saniso, E.³

^{1,3}Department of Physics, Faculty of Science,

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,

Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

*E-mail: yutthana.t@psu.ac.th

Abstract

This research work is to present the drying kinetic modeling of same agriculture residues which are used for new suitable drying technique of grain. The equilibrium moisture content (EMC) of these residues is determined by standard static method under the condition of 30-50°C and the relative humidity of 12-85%. Rice husk, sago palm rachis and coconut husk are used as adsorbents in the experiments. For determining EMC, the results show that the EMC increases with increase of the relative humidity under the environmental condition of 30-50°C. In addition, Modified Henderson's model is the best fitting model for the experiments. To investigate drying kinetic of the adsorbents, the adsorbent are rewetted as 15, 20 and 27% dry-basis. The results indicate that drying rate is dependent on drying temperature of 30-70°C, 1.58 m/s drying air velocity. Then the evolution of moisture profile is empirical fitted in various form. The conclusion is that simulation data of the Modified Henderson and Pabis model is reasonable to experimental data. The diffusion coefficient describes with drying time and increase with increase of the drying temperature.

Keywords : *Drying / Agriculture residue / Equilibrium moisture content / Diffusion coefficient / Moisture ratio.*

การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 4
(The 4th PSU Symposium on Graduate Research)



31 มีนาคม 2549

ณ ศูนย์ปาลูกตาประดิษฐ์ เขยจิตร

จัดโดย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 4 : 31 มีนาคม 2549
The 4th PSU Symposium on Graduate Research : March 31, 2006

**Moisture Removal of Paddy by Agricultural Residues :
Fundamental Parameter and Drying Kinetic Modeling**

Tirawanichakul, Y.^{1*}, Saniso, E.² and Tirawanichakul, S.³

¹Department of Physics, Faculty of Science,

³Department of Chemical Engineering,

²M.Sc. Student Department of Physics, Faculty of Science,

Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

*E-mail: yutthana.t@psu.ac.th

Abstract

This research is to study physical parameters of agricultural residues and there parameters is used for prediction of drying kinetics of paddy using agricultural residues. From the results, they show that the equilibrium moisture content is function of drying temperature and relative humidity whilst the bulk density is function of initial moisture content. The diffusion coefficient and drying constant of empirical equation is function of temperature. The mixing ratio between paddy and desiccant of 1:1.5 by volume is suitable condition for this drying technique. The simulation result is corresponded to the experimental results.

Keywords : *Paddy / Adsorbent / Fundamental Parameters.*



บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

มอบเกียรติบัตรนี้ให้

นายอสิลหะ สนใจ

ผู้ได้ปฏิบัติงานในตำแหน่งของงานวิจัยดีเด่น ภาควิชาภาษาไทยและภาษาในเอเชีย
ในการประชุมสัมมนาของงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยศิลปากร ครั้งที่ ๔
ขอใช้ทำนุพระสิริแก่คุณครู คุณแม่ศรีบุญ ๑๑๑๑๑

ทำไว้ ณ วันที่ ๑๑ มีนาคม ๒๕๕๙

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเวศน์ ใต้ถัมพะ)
ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม ฯ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัต อภิรักษ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายอีลีหัยะ สนิโซ	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4722103	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
การศึกษาระดับบัณฑิต (วิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยทักษิณ	2546

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Saniso, E., Tirawanichakul, S. and Tirawanichakul, Y. 2005. Novel Moisture Removal of Paddy by Agricultural Residue. *Regional Symposium on Chemical Engineering 2005*, Hanoi Horizon Hotel, Hanoi, Vietnam, 30th November - 2nd December 2005, pp. 21-26.

ยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล, สุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล และ อีลีหัยะ สนิโซ. 2548. การอบแห้งชั้นบางวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19* จังหวัดภูเก็ต 19-21 ตุลาคม 2548 บทความย่อ หน้า 182.

ยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล, อีลีหัยะ สนิโซ และ สุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล. 2549. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. *การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 4* ณ ศูนย์ปาร์กกาประดิษฐ์ เซยจิตร (ตึกฟักทอง) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ 31 มีนาคม 2549 บทความย่อ หน้า 74.