

ผลกระทบของช่วงการพัก ความเร็วอากาศ และอุณหภูมิอากาศ
ต่ออัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก
แบบข้าวหล่นอิสระ

นายสุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2551

**EFFECTS OF RESTING PERIOD, AIR VELOCITY AND
AIR TEMPERATURE ON DRYING RATE OF
THE FREE-FALL PADDY DRYER**

Supitchar Meesukjaosumrun

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2008

ผลกระทบของช่วงการพัก ความเร็วอากาศ และอุณหภูมิอากาศต่ออัตราการอบแห้ง
ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.กীরติ สุลักษณ์)

กรรมการ

(อ. ดร.พยุงค์ศักดิ์ จุลยุเสนา)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ : ผลกระทบของช่วงการพัก ความเร็วอากาศ และอุณหภูมิอากาศ ต่ออัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ (EFFECTS OF RESTING PERIOD, AIR VELOCITY AND AIR TEMPERATURE ON DRYING RATE OF THE FREE-FALL PADDY DRYER) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, 140 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบระยะเวลาพัก อุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่ออัตราอบแห้ง อัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพผลิตผลหลังการอบแห้ง เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ โดยทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40, 60, 100, 130 และ 150°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2 และ 3 m/s สำหรับระยะเวลาพักข้าวเปลือกเลือกใช้ 1, 2 และ 4 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งที่สูงทำให้อบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะลงได้มาก (พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะรวมกับพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ) โดยความเร็วอากาศอบแห้งจะให้ผลมากที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากไม่เกิดการอันด้วยการแพร่ความชื้นภายในเมล็ด ส่วนการพักนั้นถ้าอุณหภูมิเมล็ดข้าวสูงเกินกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว การพักที่นานกว่าจะให้อัตราอบแห้งที่สูงกว่าเสมอ ซึ่งในภาพรวมการพักสามารถลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยระยะเวลาพักมากกว่าหรือเท่ากับ 1 นาทีจะมีปริมาณข้าวต้นและความขาวของข้าวสารใกล้เคียงกับตัวอย่างอ้างอิงและแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกที่อบแห้งอย่างต่อเนื่อง เพราะการพักช่วยคลายความเค้นที่กระทำกับเมล็ด จึงไม่เกิดการแตกหักขณะทำการขัดสี อีกทั้งเพราะระยะเวลาอบแห้งที่สั้นสลับกับการพัก อุณหภูมิสะสมของเมล็ดจึงต่ำ ด้วยเหตุนี้แม้ใช้อุณหภูมิตอบแห้งสูง ก็ยังคงรักษาความขาวของข้าวสารได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าว ช่วงการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระควรเป็นช่วงที่อากาศอบแห้งมีอุณหภูมิประมาณ 130°C โดยใช้อากาศความเร็วสูง 3 m/s และระยะเวลาพัก 4 นาที เพราะทำให้สามารถอบแห้งได้รวดเร็ว ใช้พลังงานน้อย ได้ปริมาณข้าวต้นสูง และความขาวของข้าวสารอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

SUPITCHAR MEESUKJAOSUMRUN : EFFECTS OF RESTING PERIOD,
AIR VELOCITY AND AIR TEMPERATURE ON DRYING RATE OF THE
FREE-FALL PADDY DRYER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
TAWIT CHITSOMBOON, Ph.D., 140 PP.

FREE-FALL DRYER/ PADDY DRYER/ RESTING PERIOD

The objectives of this research are to study the effects of resting period, drying air temperature and air velocity on drying rate, specific energy consumption and product quality when using the free-fall dryer. Conditions used in the experiment were: drying air temperatures at 40, 60, 100, 130 and 150°C; drying air speeds at 1, 2 and 3 m/s and resting periods at 1, 2 and 4 min. The experimental results indicated that the higher drying air temperature and velocity, the faster the drying rate which significant by reduced the total specific energy consumption. Drying air velocity was more effective at high air temperature because of the diffusion-limited moisture transfer at low temperature. About resting period, at the kernel temperature higher than glass transition temperature, longer resting period gave better drying rate and moderately reduced total specific energy. Head rice yield and whiteness of paddy which dried at resting period not lower than 1 min. were near to reference sample and showed much better results when compared with continuous drying because of more stress relaxation on kernel and low kernel temperature. The optimum operating conditions recommended for the free-fall dryer are: air temperature 130°C, air velocity 3 m/s and resting period 4 min. because these conditions give fast drying rate, low energy consumption, high head rice yield and good whiteness.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และ ด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตา เอาใจใส่ อบรมดูแล และอดทนต่อผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง ผู้วิจัยจึงสามารถสำเร็จการศึกษานี้ได้ กระผมขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ด้วยความเคารพเป็นอย่างยิ่งครับ

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ขำนิประศาสน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล และอาจารย์โศรฎา แจ่มการ อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอักษรวิทยา คุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร และคุณวันเพ็ญ สืบสาย เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณจ่านงค์ ผายสระน้อย คุณคมสัน ภายเดช คุณวิชาญ วิรัชสุนทร คุณคมสันต์ ต่ายทรัพย์ และคุณสมยง พิมพ์พรม เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณศรารุช ราชบุรี คุณพรพิไล กิติรัตน์ตระการ คุณเกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว คุณชัยยุทธ ปรีชา คุณปราโมทย์ สิงห์ทอง คุณชัยฤกษ์ เชื้อประสาทคุณปรีชา อ่อนสกุล คุณพิเชษฐ พรหมมา และทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาที่มีได้มีรายชื่อข้างต้น ตลอดจนครูอาจารย์ในอดีตทุกท่านที่ได้สั่งสอน อบรม และให้ความรู้

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุน งานวิจัยและทุนเดินทางนำเสนอผลงานวิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด แม้จะด้วยความยากลำบากสักเพียงใด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตได้ ขอบพระคุณครับ

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 คำจำกัดความและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความชื้นวัสดุ	4
2.2 ประเภทของความชื้น.....	4
2.3 ความชื้นสัมพัทธ์.....	5
2.4 ความชื้นสมดุลของวัสดุ.....	5
2.5 การถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้ง.....	6
2.5.1 การถ่ายเทความร้อน	6
2.5.2 การถ่ายเทมวล	9
2.6 หลักการอบแห้ง.....	11
2.7 กลไกการแพร่ความชื้นภายในเมล็ด.....	11
2.8 อัตราการอบแห้ง.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่	13
2.10 การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งลดลง	13
2.11 การพักในที่อับอากาศ (Tempering)	14
2.12 Glass Transition Temperature	14
2.13 ลักษณะทางกายภาพของข้าว	17
2.13.1 น้ำหนักเมล็ด.....	17
2.13.2 ขนาดรูปร่างเมล็ด	17
2.13.3 ความขาวของข้าวสาร	17
2.13.4 คุณภาพการสี.....	17
2.14 ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย	18
2.15 การลดความชื้นข้าวเปลือก	19
2.15.1 วิธีธรรมชาติ	19
2.15.2 การใช้เครื่องอบ	20
2.16 วิธีการหาค่าความชื้น	20
2.16.1 การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง.....	20
2.16.2 การหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม.....	21
3 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
3.1 ผลของการพักระหว่างการอบแห้งที่มีต่อ อัตราอบแห้งและการใช้พลังงาน	22
3.2 ผลของการพักระหว่างการอบแห้งที่มีต่อ เครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ.....	24
3.3 ผลของ Glass Transition Temperature ที่มีต่อ อัตราอบแห้งและการใช้พลังงาน	27
3.4 ผลของการพักระหว่างการอบแห้งที่มีต่อ คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง	29
3.5 ผลของ Glass Transition Temperature และการพักที่มีต่อ คุณภาพข้าวเปลือก.....	31
3.6 งานวิจัยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ	33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7	บทสรุปปริทัศน์วรรณกรรมถึงสมมุติฐานงานวิจัย	35
4	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ใช้ในงานวิจัย	37
4.1	รายละเอียดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ	37
4.2	หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ	38
5	วิธีดำเนินการวิจัย	45
5.1	ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น	45
5.2	ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบมีการพักระหว่างรอบการอบแห้ง	45
5.3	ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่อง	46
5.4	ขั้นตอนการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก	47
5.4.1	เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน	48
5.4.2	การหาค่าความชื้นโดยวิธีการใช้ตู้อบ	48
5.5	ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว	49
5.5.1	การทำความสะอาด	49
5.5.2	การกะเทาะเปลือก	49
5.5.3	การขัดขาว	49
5.5.4	การคัดแยกปลายข้าว	49
5.5.5	การวิเคราะห์คุณภาพข้าว	50
5.6	ขั้นตอนการหาพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ	50
5.7	ขั้นตอนการหาค่าพลังงานรวมจำเพาะ	50
5.8	สถานที่ทำการวิจัย	51
5.9	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	51
5.10	วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	51
5.11	การเก็บรวบรวมข้อมูล	51
5.12	การวิเคราะห์ข้อมูล	52
6	ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	53
6.1	อัตราอบแห้งข้าวเปลือก	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1.1	ลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก 53
6.1.2	ผลกระทบอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่มีต่อ อัตราอบแห้งข้าวเปลือกเฉลี่ย 54
6.1.3	ผลกระทบความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่อ อัตราอบแห้งข้าวเปลือกเฉลี่ย 58
6.1.4	ผลกระทบระยะเวลาพักที่มีต่อ อัตราอบแห้งข้าวเปลือกเฉลี่ย 58
6.2	อัตราลิ้นเปลืองพลังงานในเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกหล่นอิสระ 64
6.2.1	ผลกระทบอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่อ อัตราอบแห้งที่มีต่อพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะ 64
6.2.2	ผลกระทบระยะเวลาพักที่มีต่อพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะ 65
6.2.3	ผลกระทบอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่อ พลังงานรวมจำเพาะ 70
6.2.4	ผลกระทบระยะเวลาพักที่มีต่อพลังงานรวมจำเพาะ 71
6.2.5	ผลกระทบอุณหภูมิ ความเร็วอากาศอบแห้ง และระยะเวลาพัก ที่มีต่อพลังงานรวมจำเพาะและอัตราอบแห้ง 75
6.3	คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง 78
6.3.1	ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และระยะเวลาพักที่มีต่อ ปริมาณข้าวตันหลังการอบแห้ง 78
6.3.2	ผลของความชื้นข้าวเปลือกขณะขัดสีที่มีต่อ ปริมาณข้าวตันหลังการอบแห้ง 81
6.3.3	ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และระยะเวลาพักที่มีต่อ ดัชนีความขาวของข้าวสาร 82
7	สรุปและข้อเสนอแนะ 85
7.1	สรุปผลการวิจัย 85
7.2	สรุปปัญหาจากการทดลอง 87
7.3	ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป 87

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การพิสูจน์สมการ	92
ก.1 สมการคำนวณค่าอัตราอบแห้งเฉลี่ย	93
ก.2 สมการคำนวณหาค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ ที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก.....	94
ก.3 สมการคำนวณหาค่าพลังงานหุติยภูมิจำเพาะและ พลังงานรวมจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก.....	97
ก.4 สมการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ข้าวคืนและ ค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร.....	99
ภาคผนวก ข. ข้อมูลเครื่องมือทดสอบ.....	100
ข.1 เครื่องทำความร้อน.....	101
ข.2 Orifice plate.....	104
ข.3 เครื่องเป่าลม.....	108
ข.4 ความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ย.....	110
ข.5 อัตราการไหลข้าวเปลือก.....	111
ข.6 การใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลม และกะป้อดำเลี้ยง.....	114
ภาคผนวก ค. ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก.....	115
ประวัติผู้เขียน	140

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ข.1	แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง อุณหภูมิเฉลี่ย และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอากาศแวดล้อม..... 101
ข.2	แสดงข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน, อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 23°C..... 104
ข.3	ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม กับผลต่างความดันตกคร่อม orifice plate วัดด้วยหัววัดความดัน (pressure probe testo 0638.1445 C) ขณะที่มีข้าวเปลือกไหลสวนทางกับอากาศในท่ออบแห้ง..... 108
ข.4	ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม, ความเร็วอากาศที่ตำแหน่งคอคอดแผ่น orifice plate และความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้ง ขณะที่มีข้าวเปลือกไหลสวนทางกับอากาศในท่ออบแห้ง..... 109
ข.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้ง, ระยะเวลาที่ ข้าวเปลือกไหลผ่านท่ออบแห้ง และความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ย..... 111
ข.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้ง, ความชื้นภายในข้าวเปลือกและอัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย..... 112
ข.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้ง กับการใช้พลังงานไฟฟ้าเครื่องเป่าลม..... 114
ข.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนข้าวเปลือกของกะพ้อลำเลียง กับการใช้พลังงานไฟฟ้าของกะพ้อลำเลียง..... 114
ค.1	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40°C..... 116
ค.2	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C..... 117
ค.3	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C..... 119

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.4	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C..... 121
ค.5	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C..... 123
ค.6	แสดงระยะเวลารวมในท่ออบแห้ง(resident time) และอัตราอบแห้งเฉลี่ย 125
ค.7	แสดงค่าพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ และค่าที่ใช้ในการคำนวณพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ 128
ค.8	แสดงค่าพลังงานหุติยาเฉพาะ พลังงานรวมเฉพาะ และค่าที่ใช้ในการคำนวณพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ 132
ค.9	แสดงอุณหภูมิสูงสุดของข้าวเปลือก คุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสี ในด้านปริมาณข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าวสาร 136
ค.10	แสดงคุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสี ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง แบบถาด โดยใช้อากาศแวดล้อมในการอบแห้ง 138
ค.11	แสดงคุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสี ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง แบบหมุนอิสระต่อเนื่อง(ไม่มีระยะเวลาพัก) 139

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะทั่วไปของเส้นความขึ้นสมมูลไอโซเทอมแบบคายน้ำ สำหรับวัสดุทางการเกษตร6
2.2	การแพร่ของมวลจากเมล็ดของแข็งไปยังของไหล 9
2.3	การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่และลดลง 12
2.4	ผลทดสอบข้าวกล้อง (พันธุ์ Drew, 14.4% w.b.) ด้วยเทคนิค TMA (Sun et al., 2002) 15
2.5	Glass transition temperature กับความชื้นข้าวกล้อง (Perdon et al., 2000; Sun et al., 2002)..... 16
4.1	แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกหล่นอิสระที่ใช้ในงานวิจัย 39
4.2	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง 40
4.3	เครื่องเป่าลม (blower) ของ Makita รุ่น UB1100 41
4.4	Variac ของ yamabishi รุ่น s-260-10M 41
4.5	Orifice plate และ U-tube manometer ที่ใช้ในงานวิจัย 42
4.6	เครื่องทำความร้อน 42
4.7	เครื่องแสดงค่าและควบคุมอุณหภูมิ..... 43
4.8	ถังพักข้าวเปลือกด้านบน 43
4.9	ถังพักข้าวเปลือกด้านล่าง..... 44
4.10	เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger) ของ Hioki รุ่น 8420-01..... 44
6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้ง กับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40°C..... 55
6.2	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้ง กับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C..... 55
6.3	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้ง กับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C..... 56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.4	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้ง กับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C..... 56
6.5	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้ง กับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C..... 57
6.6	ผลของระยะพัก อุณหภูมิ และความเร็วอากาศอบแห้ง ต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย..... 57
6.7	อุณหภูมิสูงสุดของกองข้าวเปลือก เมื่อใช้ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s..... 61
6.8	อุณหภูมิสูงสุดของกองข้าวเปลือก เมื่อใช้ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s..... 61
6.9	อุณหภูมิสูงสุดของกองข้าวเปลือก เมื่อใช้ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s..... 62
6.10	อุณหภูมิข้าวเปลือกขณะลดความชื้นเทียบกับค่า Glass transition temperature ที่อากาศอบแห้ง อุณหภูมิ 100°C, ความเร็ว 3 m/s..... 62
6.11	อุณหภูมิข้าวเปลือกขณะลดความชื้นเทียบกับค่า Glass transition temperature ที่อากาศอบแห้ง อุณหภูมิ 100°C, ความเร็ว 2 m/s..... 63
6.12	ผลของระยะเวลาพักกับอุณหภูมิสูงสุดของกองข้าวเปลือก ที่มีต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย 63
6.13	พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ เมื่อใช้ระยะเวลาพัก 1 นาที 65
6.14	พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 100°C..... 67
6.15	พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 130°C..... 68
6.16	พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 150°C..... 69
6.17	พลังงานรวมจำเพาะ เมื่อใช้ระยะเวลาพัก 1 นาที 71
6.18	พลังงานรวมจำเพาะ เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 100°C..... 72
6.19	พลังงานรวมจำเพาะ เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 130°C..... 73
6.20	พลังงานรวมจำเพาะ เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 150°C..... 74
6.21	พลังงานรวมจำเพาะเทียบกับอัตราการอบแห้งเฉลี่ย เมื่อใช้ระยะเวลาพัก 1 นาที..... 76
6.22	พลังงานรวมจำเพาะเทียบกับอัตราการอบแห้งเฉลี่ย เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 100 °C 76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.23	พลังงานรวมจำเพาะเทียบกับอัตราอบแห้งเฉลี่ย เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 130 °C 77
6.24	พลังงานรวมจำเพาะเทียบกับอัตราอบแห้งเฉลี่ย เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 150 °C 77
6.25	ปริมาณข้าวคั่ว เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 40°C..... 79
6.26	ปริมาณข้าวคั่ว เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60°C..... 79
6.27	ปริมาณข้าวคั่ว เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 100°C..... 80
6.28	ปริมาณข้าวคั่ว เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 130°C..... 80
6.29	ปริมาณข้าวคั่ว เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 150°C..... 81
6.30	ปริมาณข้าวคั่วกับความชื้นข้าวเปลือกสุกท้าย (บุญส่ง, 2532) 83
6.31	ปริมาณข้าวคั่วกับความชื้นข้าวเปลือกสุกท้าย..... 83
6.32	ดัชนีความขาวของข้าวสารกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง..... 84
ข.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยกับความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ของอากาศแวดล้อม ในช่วงที่ทำการทดลอง..... 103
ข.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนกับ อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ออกจากเครื่องทำความร้อน กรณีความเร็ว อากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 23°C 104
ข.3	แผนภาพแสดงลักษณะของท่อ orifice plate และ จุดต่อสำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดัน แบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps)..... 107
ข.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม กับความเร็วอากาศเฉลี่ยภายในท่ออบแห้ง ขณะที่ ข้าวเปลือกไหลสวนทางกับอากาศในท่ออบแห้ง..... 109
ข.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้ง กับความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ย..... 110
ข.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นภายในข้าวเปลือก กับอัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย..... 113

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

β	=	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter ratio = d/D)
ε	=	สภาพเปล่งรังสี, สัมประสิทธิ์การขยายตัว (expansion coefficient)
σ	=	Stefan-Boltzmann constant, $W/(m^2 \cdot K^4)$
ρ_a	=	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3
ϕ	=	ความชื้นสัมพัทธ์, %
μ	=	ความหนืด (dynamic viscosity), $Pa \cdot s$
ω	=	ความเร็วเชิงมุม, $rad./s$
%BRY	=	ปริมาณข้าวกล้อง, %
%HRY ₁	=	ปริมาณข้าวคั้นทั่วไป (รวมน้ำหนักแกลบ), %
%HRY ₂	=	ปริมาณข้าวคั้นแบบใหม่ (ไม่รวมน้ำหนักแกลบ), %
%Husk	=	ปริมาณแกลบ, %
A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งและของไหล, พื้นที่ผิวของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พื้นที่หน้าตัดที่อบแห้ง, m^2
a^*	=	ความเป็นสีแดง-เขียว, %
b^*	=	ความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน, %
C_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร
C_{AS}	=	ความเข้มข้นของมวลสารที่อิ่มตัว
C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, $kJ/(kg \cdot K)$
C_d	=	สัมประสิทธิ์อัตราไหล (discharge coefficient)
C_v	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, $kJ/(kg \cdot K)$
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, mm
D_{AB}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่, $kg/(m \cdot hr)$
D_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดของแข็ง, mm
d	=	มวลของวัสดุแห้ง, kg, เส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice plate, mm
E_p	=	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ, MJ/kg น้ำที่ระเหย
E_s	=	พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ, MJ/kg น้ำที่ระเหย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

E_{SB}	=	พลังงานทฤษฎีจําเพาะที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องเป่าลม, MJ/kg น้ำที่ระเหย
E_{SC}	=	พลังงานทฤษฎีจําเพาะที่ใช้ขับเคลื่อนกะพ้อลำเลียง, MJ/kg น้ำที่ระเหย
E_T	=	พลังงานรวมจําเพาะ, MJ/kg น้ำที่ระเหย
E_{SC}	=	พลังงานทฤษฎีจําเพาะที่ใช้ขับเคลื่อนกะพ้อลำเลียง, MJ/kg น้ำที่ระเหย
e	=	ความหนาของแผ่น orifice plate, mm
g	=	แรงโน้มถ่วง, m/s^2
$h_{dryertube}$	=	ความยาวท่ออบแห้ง, m
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, J/kg
h'	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient), $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
h'_D	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, $kg/(m^2 \cdot hr)$
Δh	=	ผลต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer, mm
I_B	=	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมขณะอบแห้ง, amp
I_C	=	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กะพ้อลำเลียงขณะอบแห้ง, amp
k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัตถุ (thermal conductivity), $W/(m \cdot ^\circ C)$
		specific heat ratio
L^*	=	ความเป็นสีขาว-ดำ, %
L_e	=	ความยาวท่อสมมูล, m
\bar{M}	=	อัตราอบแห้งเฉลี่ย, % w.b./sec.
MC	=	ความชื้นภายในข้าวเปลือก, % wet basis or % w.b.
M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, % dry basis or % d.b.
M_e	=	ความชื้นสมดุล, % dry basis or % d.b.
M_f	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย, % w.b.
M_i	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น, % w.b.
M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก, % wet basis or % w.b.
\dot{m}_a	=	อัตราไหลมวลของอากาศ, kg/s
\bar{m}_p	=	อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย kg/min.
N	=	จำนวนครั้งที่เก็บตัวอย่างข้าวเปลือก
N_A	=	ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท, kg/hr

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

N_{DP}	=	จำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านเข้าสู่ท่ออบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นสู่ความชื้นสุดท้ายที่พิจารณา, รอบ
Nu	=	Nusselt number
Pr	=	Prandtl number
Δp	=	ผลต่างความดันตกคร่อมที่แผ่น orifice plate, Pa
Q	=	พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้ง, MJ, อัตราไหลปริมาตร, m^3/s
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
Re	=	Reynolds number
Re_D	=	Reynolds number ภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D
RH	=	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ, %
Sc	=	Schmidt number
Sh	=	Sherwood number
Δt	=	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min.
Δt_B	=	ระยะเวลาอบแห้งรวม เฉพาะช่วงที่มีข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง, sec.
Δt_C	=	ระยะเวลารวมที่ใช้ในการลำเลียงข้าวเปลือกตลอดช่วงการอบแห้ง, sec.
T_∞	=	อุณหภูมิของกระแสของไหล, อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม, °C, K
T_a	=	อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, °C
T_g	=	Glass transition temperature, °C
T_{in}	=	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน, °C
$T_{max\ paddy}$	=	อุณหภูมิสูงสุดของข้าวเปลือก, °C
T_{out}	=	อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อน, °C
T_{paddy}	=	อุณหภูมิข้าวเปลือก, °C
T_S	=	อุณหภูมิที่ผิวของเมล็ดของแข็ง, อุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, °C, K
T_{wb}	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียก, °C
$t_{one\ pass}$	=	เวลาที่กองข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้งในแต่ละรอบการเทข้าวเปลือก
t_{Paddy}	=	ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง, sec.
t_{RP}	=	เวลาที่ข้าวเปลือก 1 เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้ง ใน 1 รอบการอบแห้ง, sec.

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

t_{TR}	=	เวลารวมที่ข้าวเปลือก 1 เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้งตลอดช่วงกระบวนการอบแห้งที่พิจารณา, sec.
V	=	ปริมาตรของน้ำ, m^3
\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ยกระแสอากาศในท่ออบแห้ง, m/s
\bar{V}_{avg1}	=	ความเร็วอากาศเฉลี่ย ณ ตำแหน่งแผ่น orifice, m/s
\bar{V}_{avg2}	=	ความเร็วอากาศเฉลี่ยในท่ออบแห้ง, m/s
V_B	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมขณะอบแห้ง, volt
V_C	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กะพ้อลำเลียงขณะอบแห้ง, volt
\bar{V}_{Paddy}	=	ความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ย, m/s
W_a	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง (ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ), kg/kg-dry air
WI	=	Whiteness index
\bar{w}_i	=	มวลข้าวเปลือกเฉลี่ย, kg
w	=	มวลของวัสดุชื้น, kg
w_i, w_f	=	มวลข้าวเปียกเริ่มต้นและสุดท้าย ตามลำดับ, kg
x	=	พิกัดมวลสาร, m
x_w	=	เศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศ
x_{ws}	=	เศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัว
Z	=	ระดับจากจุดอ้างอิง, m
$\frac{dT}{dx}$	=	ความชันของอุณหภูมิในเนื้อวัตถุ, $^{\circ}C/m$

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจและเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรระบุว่า ในปี พ.ศ. 2550 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวรวมถึง 70,187 พันไร่ และได้ผลผลิต 32.1 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าได้ 368,309 ล้านบาท จากการประเมินของสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตรพบว่าการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวข้าวประมาณ 30% คิดเป็นมูลค่าการสูญเสียถึง 110,492 ล้านบาท จะเห็นว่าการสูญเสียนี้มีมูลค่ามหาศาล ดังนั้นการจัดการข้าวหลังการเก็บเกี่ยว ตั้งแต่ การเก็บเกี่ยว การนวด การลดความชื้น และการเก็บรักษา จึงควรได้รับการพัฒนาเพื่อลดการสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ

เพื่อลดความสูญเสียจากการร่วงหล่นของเมล็ดข้าวขณะเกี่ยวนวดและเพื่อให้ได้ข้าวที่มีคุณภาพการสีสูง (ได้ข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวมาก) ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการเก็บเกี่ยวข้าวจะอยู่ในช่วง 28-30 วันหลังข้าวออกดอก ในระยะนี้เมล็ดจะมีความชื้นสูง อยู่ในช่วง 22-25% มาตรฐานเปียก ดังนั้นหลังจากเก็บเกี่ยวและนวดจะต้องรีบลดความชื้นเมล็ดให้แห้งโดยเร็วที่สุดเพื่อรักษาคุณภาพ ซึ่งระดับความชื้นที่เหมาะสมของเมล็ดข้าวต่อการเก็บรักษาอยู่ในช่วง 12-14% มาตรฐานเปียก (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

การลดความชื้นสามารถทำได้โดย การตากบนลานตาก หรือการอบด้วยเครื่องอบแห้ง สำหรับการตากบนลานตากนั้นมีข้อเสียคือการลดความชื้นของข้าวเปลือกขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ ใช้เวลา แรงงานและพื้นที่เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ข้าวเปลือกมีการปนเปื้อนและมีความเสียหายปริมาณสูง การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการลดการสูญเสียเนื่องจากการลดความชื้นของข้าว ลดความเสี่ยงเนื่องจากสภาพภูมิอากาศ ประหยัดเวลา (เพิ่มกำลังการผลิต) และช่วยรักษาระดับคุณภาพข้าว (ขุนพล สังข์อารีกุล, 2544)

ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งมีหลากหลายรูปแบบ ที่เป็นที่นิยมในเชิงพาณิชย์ เช่น เครื่องอบแห้งแบบไหลตกกล้า (LSU) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง และเครื่องอบแห้งสเปาเต็คเบด เป็นต้น ซึ่งแต่ละชนิดมีระดับการใช้พลังงาน ระยะเวลาอบแห้ง ช่วงการทำงานที่เหมาะสม และคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งที่แตกต่างกัน

เมื่อปี พ.ศ. 2543 ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้คิดค้นเครื่องอบแห้งแบบใหม่ เรียกว่า เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ (free-fall paddy dryer) มีหลักการทำงานคือ พัดลมเป่าลมผ่านขดลวดความร้อนทางด้านล่างของท่ออบแห้งที่ตั้งในแนวตั้งเพื่อสร้างลมร้อน แล้วเคลื่อนที่ออกทางด้านบน สวนทางกับข้าวเปลือกขึ้นที่ตกจากถังพักด้านบนอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน และความชื้นระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศร้อนภายในท่ออบแห้งอย่างรวดเร็ว โดยวิธีการพาแบบบังคับ (forced convection) เพราะการไหลตัวของข้าวเปลือกมีความพรุนจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อนและความชื้น อีกทั้งข้าวเปลือกตกอย่างอิสระจึงมีความเร็วสูงทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าสูงกว่าเครื่องอบแห้งทั่วไป ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทมวลสูงขึ้น และเนื่องจากข้าวเปลือกมีระยะเวลาในการสัมผัสอากาศร้อนในแต่ละรอบน้อยส่งผลให้อุณหภูมิผิวเมล็ดข้าวต่ำ ซึ่งช่วยลดการแตกร้าว และสีหมองคล้ำ

ในทางปฏิบัติเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระไม่สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกลงสู่ระดับที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บได้ใน 1 รอบที่ผ่านท่ออบแห้ง ดังนั้นจึงต้องลำเลียงข้าวเปลือกเข้าสู่ท่ออบแห้งหลายครั้งจนได้ระดับความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดช่วงเวลาระหว่างการอบแห้งแต่ละรอบขึ้น นั่นคือระยะเวลาตั้งแต่ข้าวเปลือกออกจากท่ออบ เข้าสู่ถังพัก และถูกลำเลียงขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้เรียกช่วงเวลานี้ว่า ช่วงการพัก (resting period) จากการศึกษางานวิจัยด้านการอบแห้งที่ผ่านมามีพบว่าลักษณะการพักระหว่างกระบวนการสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งทั้งในด้านเพิ่มอัตราการอบแห้ง ลดการใช้พลังงาน และเพิ่มปริมาณข้าวคืนหลังการคัดสีข้าวเปลือกได้ แต่เนื่องจากลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระที่แตกต่างจากเครื่องทั่วไป คือ ข้าวเปลือกสัมผัสกับลมร้อนในท่ออบแห้งเพียงระยะเวลานั้น ๆ สลับกับการพักตัว ซึ่งเป็นเช่นนี้หลายรอบการอบแห้ง อีกทั้งมีลักษณะการพักในสภาพอากาศแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งแตกต่างจากขั้นตอนการพักในงานวิจัยอื่น ๆ ที่จัดเก็บข้าวเปลือกในที่อับอากาศที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งเรียกลักษณะการพักนี้ว่าการพักในที่อับอากาศ (tempering)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ เพื่อศึกษาผลกระทบของ ระยะเวลาการพักข้าวเปลือก อุณหภูมิและความเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้งที่มีต่ออัตราการอบแห้ง โดยวิเคราะห์ผลของเวลาพักข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพข้าวที่ได้ จากนั้นนำผลการศึกษาที่ได้หาแนวโน้มเพื่อพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ เมื่อมีการปรับระยะเวลาการพักข้าวเปลือก อุณหภูมิ และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง

1.2.2 วิเคราะห์หาแนวโน้มของระยะเวลาการพักข้าวเปลือกที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระต้นแบบ ที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทดลองอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อลดความชื้นเมล็ดจากระดับความชื้นที่เก็บเกี่ยวถึงระดับที่สามารถเก็บรักษาได้ (ประมาณ 14% มาตรฐานเปียก) ด้วยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40, 60, 100, 130 และ 150°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2 และ 3 m/s โดยใช้ระยะเวลาพักระหว่างการอบแห้ง 1, 2 และ 4 นาที สำหรับอัตราการป้อนข้าวเปลือกจะให้อัตราคงที่ เพื่อศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการพักข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง อุณหภูมิ และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ที่มีต่ออัตราการอบแห้ง พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ พลังงานรวมจำเพาะ และคุณภาพข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้ง ในการวิเคราะห์จะพิจารณาอิทธิพลของแต่ละตัวแปรและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เพื่อหาแนวทางการพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบผลกระทบของเวลาการพักข้าวเปลือก อุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ที่มีต่อกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

1.4.2 ได้จุดปฏิบัติการที่ดีที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

1.4.3 ได้แนวทางการพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกสำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

บทที่ 2

คำจำกัดความและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและคำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยแบ่งเป็น ความชื้น วัสดุ ประเภทของความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นสมดุลของวัสดุ การถ่ายเทความร้อนและมวล ในการอบแห้ง หลักการอบแห้ง กลไกการแพร่ความชื้นภายในเมล็ด อัตราการอบแห้ง การพักในที่ อับอากาศ Glass Transition Temperature ลักษณะทางกายภาพของข้าว ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย การลดความชื้นข้าวเปลือก และวิธีการหาค่าความชื้น

2.1 ความชื้นวัสดุ

ความชื้นเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ความชื้นใน วัสดุสามารถแสดงได้ 2 แบบคือ

2.1.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก เป็นค่าที่นิยมใช้กันในวงการค้า

$$M_w = \frac{(w-d)}{w} \quad (2.1)$$

2.1.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง เป็นค่าที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทาง ทฤษฎี เนื่องจากมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ w = มวลของวัสดุชื้น, kg
 d = มวลของวัสดุแห้ง, kg

2.2 ประเภทของความชื้น

ความชื้นเมล็ดพันธุ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำ และเมล็ดพันธุ์ ดังนี้

2.2.1 ความชื้นเกาะที่ผิวเมล็ดพันธุ์ เป็นความชื้นที่เกินจุดอิ่มตัวของเมล็ดที่จะสามารถดูดซับไว้ได้ (เกินกว่า 24% w.b.) จึงระเหยออกไปได้ง่าย

2.2.2 ความชื้นภายในเมล็ด เป็นความชื้นที่เมล็ดสามารถดูดซับไว้ภายในได้ จึงระเหยได้ยากกว่า อัตราการระเหยหรืออัตราการคายความชื้นขึ้นอยู่กับระดับความชื้นภายในเมล็ด ลักษณะหรือชนิดของเมล็ด อุณหภูมิ และปริมาณลมร้อนที่ใช้ในการลดความชื้น

2.2.3 ความชื้นซึ่งไม่สามารถทำให้ระเหยออกได้ เป็นความชื้นในเมล็ดซึ่งโมเลกุลของน้ำยึดติดแน่นกับโมเลกุลของแป้ง และ โปรตีนซึ่งเป็นส่วนประกอบของเมล็ด (ต่ำกว่า 2% w.b.) (ไมตรี แนวนพนิช, ม.ป.ป.)

2.3 ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์คือ อัตราส่วนของเศษส่วนเชิงโมล (mole fraction) หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศต่อเศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 0-100%

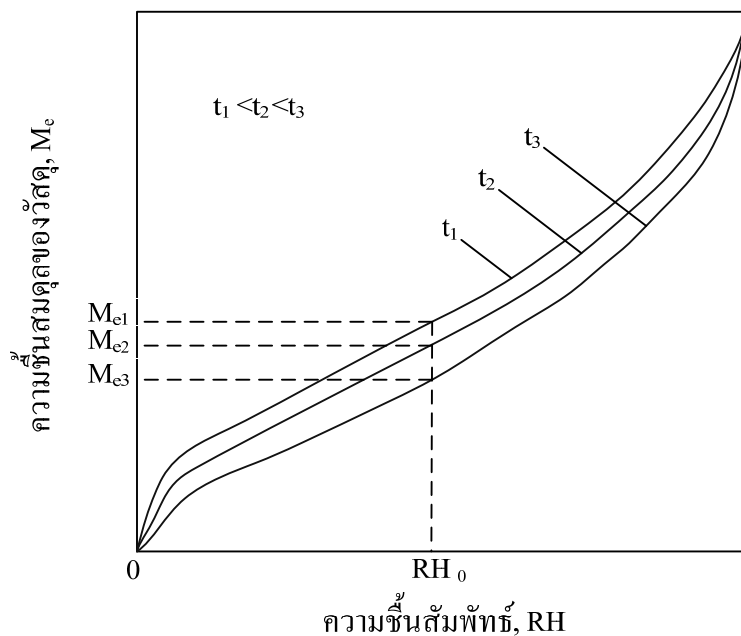
$$\phi = \frac{x_w}{x_{ws}} \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ x_w = เศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศ
 x_{ws} = เศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัว

ค่าความชื้นสัมพัทธ์บ่งบอกถึงศักยภาพในการรับความชื้นของอากาศขณะนั้น หากอากาศที่ใช้ออบแห้งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงถึงระดับหนึ่งอากาศจะไม่สามารถรับความชื้นเพิ่มจากเมล็ดได้อีก (สอดคล้องกับค่าความชื้นสมดุลของวัสดุ) ดังนั้นจึงไม่เกิดการอบแห้งขึ้น

2.4 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุล หมายถึง ความชื้นในวัสดุที่มีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุล และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งเรียกว่าเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอร์ม (equilibrium moisture isotherm) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอร์มแบบคายน้ำ สำหรับวัสดุทางการเกษตร

พิจารณาในด้านการอบแห้ง ค่าความชื้นสมดุลบ่งบอกถึงระดับความชื้นเมล็ดต่ำสุดที่สภาวะอากาศอบแห้งนั้นจะสามารถทำได้ ตัวอย่างเช่น การอบแห้งเมล็ดที่มีความชื้นสูงด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิ t_1 และความชื้นสัมพัทธ์ RH_0 พิจารณาตามรูปที่ 2.1 พบว่าค่าความชื้นสมดุลในกรณีนี้เท่ากับ Mc_1 ดังนั้นเมื่อเมล็ดมีความชื้นลดลงเท่ากับ Mc_1 แล้ว หลังจากนั้นหากอบแห้งด้วยสภาวะอากาศอบแห้งเดิม จะไม่สามารถลดความชื้นเมล็ดเพิ่มได้อีก เนื่องจากเกิดความสมดุลระหว่างความดันไอภายในเมล็ดกับความดันของความชื้นในอากาศอบแห้งจึงไม่เกิดการถ่ายเทมวลความชื้นขึ้นระหว่างเมล็ดกับอากาศ

2.5 การถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้ง

2.5.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนระหว่างสองสิ่งใด ๆ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ทิศทางการถ่ายเทความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ และอัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับระดับความแตกต่างของอุณหภูมิ แบ่งได้เป็นการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

2.5.1.1 การนำความร้อน (conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างโมเลกุลของสารชนิดหนึ่งที่อยู่ติดกัน สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ถ้าเกิดขึ้นใน

ของเหลวหรือก๊าซอาจเรียกว่า การแพร่ แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อน ได้ดังสมการ Fourier's law of heat conduction

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

เมื่อ	q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
	k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัตถุ, W/(m·°C)
	A	=	พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน, m ²
	$\frac{dT}{dx}$	=	ความชันของอุณหภูมิในเนื้อวัตถุ, °C/m

2.5.1.2 การพาความร้อน (convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ เป็นผลจากการนำความร้อนหรือการแพร่ที่บริเวณผิวของแข็งกับของไหล และการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านของแข็ง อัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นสัดส่วนกับความเร็วของของไหล แสดงได้ดังสมการ Newton's law of cooling

$$q = h' A (T_s - T_\infty) \quad (2.5)$$

เมื่อ	q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากวัตถุแข็ง, W
	h'	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/(m ² ·°C)
	A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง และของไหล, m ²
	T_s	=	อุณหภูมิที่ผิวของเม็ดของแข็ง, °C
	T_∞	=	อุณหภูมิของกระแสของไหล, °C

2.5.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนของวัตถุในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่ต้องอาศัยตัวกลางดังเช่นการนำความร้อน และการพาความร้อน สามารถส่งถ่ายพลังงานได้เร็วเท่ากับความเร็วแสง อัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการ Stefan-Boltzmann law

$$q = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.6)$$

เมื่อ	q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, W
	ε	=	สภาพเปล่งรังสี (emissivity) มีค่าในช่วง ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)
	σ	=	Stefan-Boltzmann constant = 5.67×10^{-8} W/(m ² · K ⁴)
	A	=	พื้นที่ผิวของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, m ²
	T_s	=	อุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, K
	T_∞	=	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม, K

พิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นฉนวน เมื่อระบบอยู่ในสมดุล และสมมติว่าการแผ่รังสีความร้อนน้อยมาก อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาจากกระแสการไหลจะมีค่าเท่ากับการนำความร้อนที่ผิวของแข็ง จะได้ว่า

$$h' A (T_s - T_\infty) = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง D_p และจัดเทอมใหม่จะได้ว่า

$$\frac{h' D_p}{k} = - \frac{D_p}{(T_s - T_\infty)} \frac{dT}{dx} \quad (2.8)$$

เทอม $\frac{h' D_p}{k}$ นี้เรียกว่าตัวเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number, Nu) ซึ่งเป็นสัดส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการพาความร้อนจากกระแสของไหลกับการนำความร้อนในเม็ดของแข็ง สำหรับอุณหภูมิในกระแสของไหลยอมขึ้นกับขนาดการไหลและคุณสมบัติทางกายภาพของระบบทั้งหมด เมื่อกระจายเทอมด้านขวาของสมการแล้วสามารถแสดงในเทอมของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) และตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl number, Pr) จากการศึกษาโดยการวิเคราะห์เทอมไม่มีหน่วย มักได้ความสัมพันธ์ของตัวเลขต่างดังนี้ (สมชาติ, 2540)

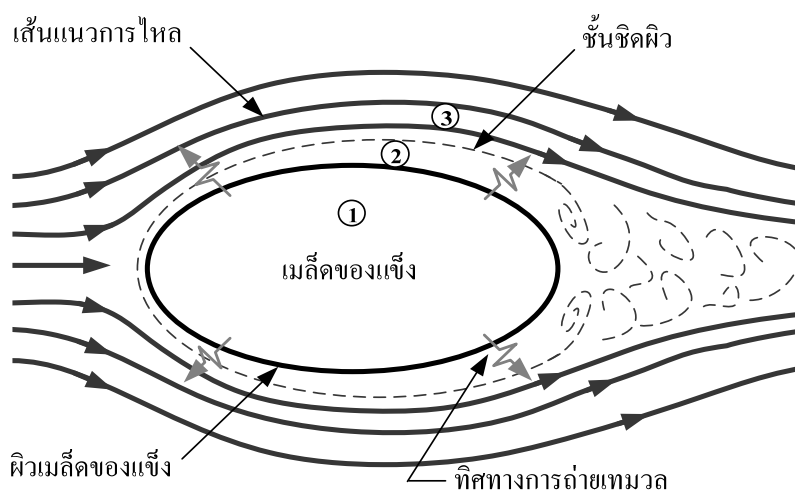
$$Nu = Nu_0 + a Re^m Pr^n \quad (2.9)$$

เมื่อ Nu_0 = ค่าตัวเลขนัสเซิลต์จากการถ่ายเทแบบการนำเพียงอย่างเดียว

2.5.2 การถ่ายเทมวล

ทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวของแข็ง และของไหลนั้น ปริมาณการถ่ายเทจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร ที่ใดมีมวล และความเข้มข้นมากกว่าจะแพร่กระจายไปยังที่ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า

ที่ความเร็วขนาดหนึ่ง ของไหลจะไหลผ่านบริเวณใกล้เคียงกับเมล็ดของแข็ง บริเวณนี้เรียกว่าชั้นซิดผิว (boundary layer) ชั้นซิดผิวจะหนาน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับขนาดความเร็วของไหลที่ไหลผ่านเข้ามาภายในอาณาบริเวณชั้นซิดผิวนี้ การถ่ายเทมวลสารเป็นไปอย่างช้า ๆ เป็นสัดส่วนกับอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุล แต่ที่ตำแหน่งเหนือชั้นซิดผิว การถ่ายเทมวลสารจะเป็นลักษณะการพามวลด้วยกำลังบังคับ (forced convection mass transfer) กรณีมวลจากของแข็งละลายหรือแพร่กระจายในกระแสของไหลดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในกรณีนี้ความเข้มข้นของสารในกระแสของไหลต้องต่ำกว่าความเข้มข้นที่ขอบชั้นซิดผิว และความเข้มข้นภายในชั้นซิดผิวต้องต่ำกว่าความเข้มข้นที่ผิวของเมล็ดของแข็ง



รูปที่ 2.2 การแพร่ของมวลจากเมล็ดของแข็งไปยังของไหล

อัตราการแพร่ของมวลที่ผิวของเมล็ดของแข็งที่เป็นแบบการฟุ้งกระจายของโมเลกุลแสดงได้ดังสมการ Fick's law of diffusion

$$N_A = -D_{AB}A \frac{dC_A}{dx} \quad (2.10)$$

เมื่อ	N_A	=	ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท, kg/s
	D_{AB}	=	สัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจาย, m^2/s
	A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง และของไหล, m^2
	C_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร A ต่อหนึ่งปริมาตร, kg/m^3
	x	=	ระยะทางที่มวลสารเคลื่อนที่ไป, m

การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นซิดผิวของเม็ดของแข็งสู่กระแสของไหล สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์คล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังนี้

$$N_A = h'_D A (C_{AS} - C_A) \quad (2.11)$$

เมื่อ	N_A	=	ปริมาณของมวลสาร A ที่ถ่ายเท, kg/s
	h'_D	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, $kg/(m^2 \cdot s)$
	A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง และของไหล, m^2
	C_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร A ในของไหล
	C_{AS}	=	ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว

เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลปริมาณมวลสารในสมการ (2.11) เท่ากับปริมาณมวลสารในสมการ (2.10) จะได้ว่า

$$h'_D A (C_{AS} - C_A) = -D_{AB} A \frac{dC_A}{dx} \quad (2.12)$$

เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง D_p และจัดเทอมใหม่จะได้ว่า

$$\frac{h'_D D_p}{D_{AB}} = - \frac{D_p}{(C_{AS} - C_A)} \frac{dC_A}{dx} \quad (2.13)$$

เทอม $\frac{h'_D D_p}{D_{AB}}$ นี้เรียกว่า ตัวเลขเชอร์วูด (Sherwood number, Sh) ซึ่งเป็นสัดส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการฟุ้งกระจายที่ผิวของแข็งกับการถ่ายเทมวลด้วยการพาในกระแสของไหล สำหรับค่าความเข้มข้นของสาร A ในกระแสของไหลในเทอมด้านขวาของสมการ

ยอมขึ้นกับขนาดการไหลและคุณสมบัติทางกายภาพของระบบทั้งหมด ดังนั้นเมื่อกระจายแล้ว สามารถแสดงในเทอมของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) และตัวเลขชมิคต์ (Schmidt number, Sc) จากการศึกษาโดยการวิเคราะห์เทอมไม่มีหน่วย มักได้ความสัมพันธ์ของตัวเลขต่าง ๆ ดังนี้ (สมชาติ, 2540)

$$Sh = Sh_0 + a Re^m Sc^n \quad (2.14)$$

เมื่อ Sh_0 = ค่าตัวเลขเชอร์วูดจากการถ่ายเทแบบฟุ้งกระจายของโมเลกุลอย่างเดียว

2.6 หลักการอบแห้ง

การอบแห้งคือการประยุกต์ใช้ความร้อนภายใต้เงื่อนไขที่ถูกควบคุมเพื่อเคลื่อนย้ายน้ำในวัสดุด้วยการระเหย ซึ่งจุดประสงค์หลักของการอบแห้งก็เพื่อยืดอายุและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยการลดความชื้นภายในวัสดุให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา อันเป็นการช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาต่างๆที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพ ในการอบแห้งโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางจะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลขึ้นพร้อมๆกัน โดยเริ่มจากอากาศที่มีอุณหภูมิสูงไหลผ่านวัสดุที่มีความชื้น ความร้อนถูกถ่ายเทไปยังผิว ความร้อนที่ได้รับถูกใช้เพื่อให้ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ ใอน้ำจะแพร่ผ่านชั้นผิวบางของอากาศร้อนและถูกลำเลียงออกด้วยอากาศร้อนที่เคลื่อนที่ จึงเกิดขอบเขตที่มีความดันไอน้ำต่ำที่บริเวณผิวของวัสดุ และทำให้เกิดความชันของความดันไอน้ำจากภายในวัสดุไปยังอากาศอบแห้ง ความชันนี้ทำให้เกิดแรงขับเพื่อเคลื่อนย้ายน้ำจากภายในวัสดุ ซึ่งหลากหลายทฤษฎีถูกนำเสนอเพื่ออธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุระหว่างการอบแห้ง

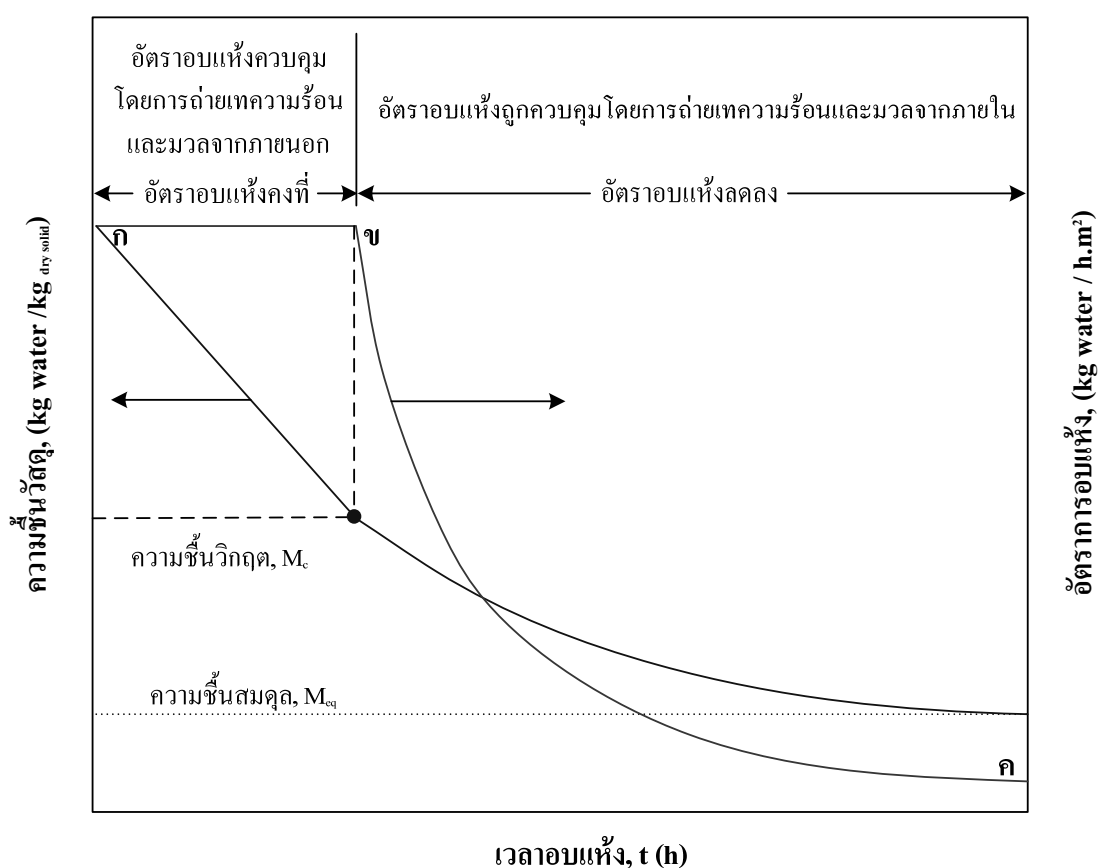
2.7 กลไกการแพร่ความชื้นภายในเมล็ด

การส่งผ่านความชื้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน แม้ในปัจจุบันก็ยังไม่เป็นที่กระจ่างชัดเต็มที่ ทฤษฎีมากมายจึงถูกนำเสนอเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุทางการเกษตร การลำเลียงความชื้นในวัสดุอาจเกิดด้วยกลไกการถ่ายเทมวลดังต่อไปนี้ (ซึ่งอาจมีได้มากกว่าหนึ่งกลไก)

1. การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากแรงแคปิลารีซึ่งเป็นผลจากแรงดึงผิว
2. การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างความเข้มข้นของความชื้น
3. การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็ก ๆ
4. การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม
5. การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

2.8 อัตราการอบแห้ง

การอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลาง ความร้อนจะถ่ายเทจากอากาศไปยังผิววัสดุ ในช่วงระยะเวลาอันสั้น ผิววัสดุจะมีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ในการระเหยน้ำที่ผิวของวัสดุตามสมการ (2.5) ในขณะเดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิววัสดุมายังอากาศซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.11) ถ้าผิววัสดุมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะคงที่ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการระเหยคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ช่วงการอบแห้งดังกล่าวจะดำเนินตามแนวเส้น (กข) เรียกช่วงนี้ว่าช่วงอัตราอบแห้งคงที่



รูปที่ 2.3 การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่และลดลง

ต่อมาเมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้ว อุณหภูมิจะสูงขึ้น และความเข้มข้นจะลดลง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการระเหยลดลง ซึ่งแสดงตามแนวเส้น (ขค) เรียกช่วงนี้ว่าช่วงอัตราอบแห้งลดลง (falling rate period) โดยนิยมเรียกค่าความชื้นที่จุด (ข) ว่าค่าความชื้นวิกฤตของวัสดุ (critical moisture content, M_c) เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นของช่วงอัตราอบแห้งลดลง

2.9 การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่

ในช่วงอัตราอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆผิววัสดุเท่านั้น สังเกตได้จากผิววัสดุจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ในช่วงนี้ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราอบแห้งคือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วอากาศ โดยที่สมการอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่แสดงดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h' A (T_a - T_{wb})}{h_{fg}} \quad (2.15)$$

เมื่อ	$\frac{dM}{dt}$	=	อัตราการอบแห้ง, kg/s
	h'	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
	A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง และของไหล, m^2
	T_a	=	อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, $^\circ C$
	T_{wb}	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียก, $^\circ C$
	h_{fg}	=	ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, J/kg

จากสมการพบว่าอัตราการอบแห้งสามารถเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งกระทำได้ด้วยการเพิ่มความเร็วอากาศ อันส่งผลให้ความหนาของชั้นซิดผิวรอบวัสดุลดลง ดังนั้นการพาความร้อนจึงดียิ่งขึ้น หรือการเพิ่มอุณหภูมิอากาศ (T_a) ซึ่งทำให้ผลต่างอุณหภูมิ ($T_a - T_{wb}$) มีค่ามากขึ้น หรือทำให้วัสดุพรุนตัวหรือมีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัส (A)

2.10 การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งลดลง

ช่วงอัตราอบแห้งลดลงเป็นช่วงที่กระบวนการระเหยเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในวัสดุที่ถูกอบแห้ง และน้ำต้องแพร่ผ่านชั้นวัสดุแห้งไปยังอากาศอบแห้ง (ซึ่งแสดงถึงข้อจำกัดที่ผิววัสดุไม่สามารถส่งผ่านความชื้นอิสระที่เพียงพอจะทำให้อากาศที่สัมผัสวัสดุมีความชื้นอิ่มตัว) ทำให้อัตราอบแห้งในช่วงนี้ขึ้นกับกลไกการแพร่ความชื้นจากภายในสู่ผิววัสดุ โดยทั่วไปช่วงอัตราอบแห้งลดลงมักเป็นช่วงที่ใช้เวลานานที่สุดในกระบวนการอบแห้งของวัสดุชีวภาพ ถ้าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต เส้นแนวการอบแห้งที่ได้จะพบเพียงช่วงอัตราอบแห้งลดลงเท่านั้น

2.11 การพักในที่อับอากาศ (Tempering)

การทำ tempering เป็นขั้นตอนหนึ่งที่ยอมรับในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก เป็นการนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาทำการพักทันทีในที่ปิดสนิทไม่มีการแลกเปลี่ยนอากาศกับสิ่งแวดล้อม เช่นในถังหรือตู้อบ และควบคุมอุณหภูมิถังหรือตู้อบให้เท่ากับอุณหภูมิข้าวเปลือกหลังจากออกจากเครื่องอบแห้งตลอดระยะเวลาพัก

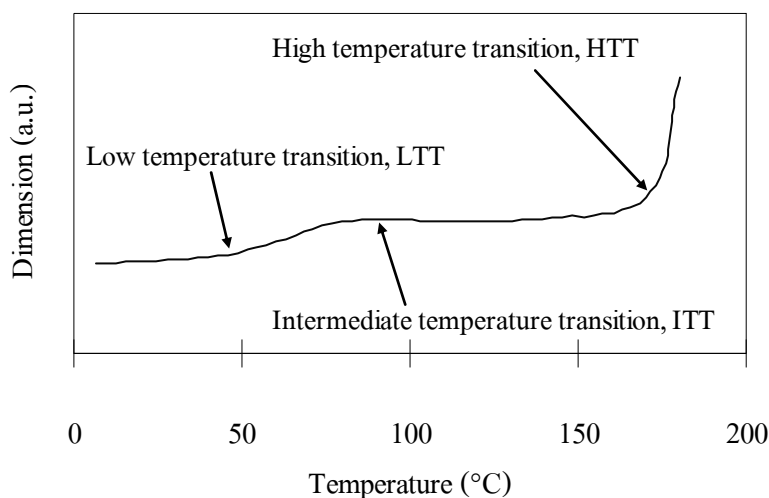
เนื่องจากการอบแห้งทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นภายในกับที่ผิวเมล็ดชื้น (moisture content gradient : ความชันความชื้น) ด้วยเหตุนี้ในช่วง tempering เมล็ดจะใช้ช่วงเวลาดังกล่าวในการแพร่ความชื้นจากภายในมาสู่ที่ผิวเมล็ด ทำให้เกิดความสม่ำเสมอของความชื้นตลอดทั่วทั้งเมล็ด การกระจายความชื้นจะเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ทำให้การขยายตัวของเนื้อเมล็ด (เนื่องด้วย ความชื้น) ในแต่ละชั้นมีขนาดใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ขนาดความเค้นเนื่องจากการขยายตัวลดลง ทำให้ไม่เกิดการแตกร้าวภายในเนื้อเมล็ด และเนื่องจากเป็นการพักในที่อับอากาศ จึงสามารถประมาณได้ว่าไม่เกิดการลดลงของความชื้นเมล็ดในช่วง tempering แต่มีข้อดีคือช่วยเพิ่มอัตราอบแห้งภายหลังการทำ tempering ได้

2.12 Glass Transition Temperature

เมล็ดข้าวเป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากพอลิเมอร์ชีวภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบด้วยแป้ง (starch) ที่เป็นส่วนผสมของอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) กับโปรตีน และไขมันเล็กน้อย โดยมีความชื้นทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลเนื่องจากความร้อนได้มากมายหลายสถานะเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างและรูปร่างลักษณะของเมล็ดข้าวเป็นอย่างยิ่ง ข้อมูลเหล่านี้จะช่วยเสริมความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและคุณสมบัติของเมล็ดข้าวขณะทำการอบแห้ง ด้วยเหตุนี้จึงช่วยพัฒนากระบวนการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วัสดุพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) กล่าวคือไม่เป็นผลึกเมื่ออยู่ที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุพอลิเมอร์อสัณฐานจะมีความแข็งและมีเนื้อคล้ายแก้ว (glassy) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง พอลิเมอร์จะอ่อนตัว เพราะโครงสร้างอสัณฐานของวัสดุพอลิเมอร์เปลี่ยนจากสภาพแข็งคล้ายแก้วเป็นสภาพยืดหยุ่นคล้ายยาง (rubbery) เรียกว่าช่วงการเปลี่ยนเนื้อแก้วไปเป็นเนื้อยืดหยุ่นคล้ายยาง (glass-rubber transition region) และเรียกอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสภาพนี้ว่า อุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว (glass transition temperature, T_g) ที่อุณหภูมิดังกล่าวพอลิเมอร์จะมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเพิ่มสูงขึ้นทันที แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนไหวของโมเลกุลในสายโซ่ที่เพิ่มขึ้น (Cowie, 1991)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลเนื่องจากความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์สามารถศึกษาได้ด้วยหลากหลายเทคนิคเช่น Differential Scanning Calorimeter (DSC), High-Resolution Nuclear Magnetic Resonance (NMR), Thermomechanical Analysis (TMA) และอื่น ๆ ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด 3 ช่วงคือ การเปลี่ยนที่อุณหภูมิต่ำ (LTT) เกิดขึ้นที่ประมาณ 45°C, การเปลี่ยนที่อุณหภูมิปานกลาง (ITT) เกิดขึ้นที่ประมาณ 90°C และการเปลี่ยนที่อุณหภูมิสูง (HTT) เกิดขึ้นที่ประมาณ 180°C



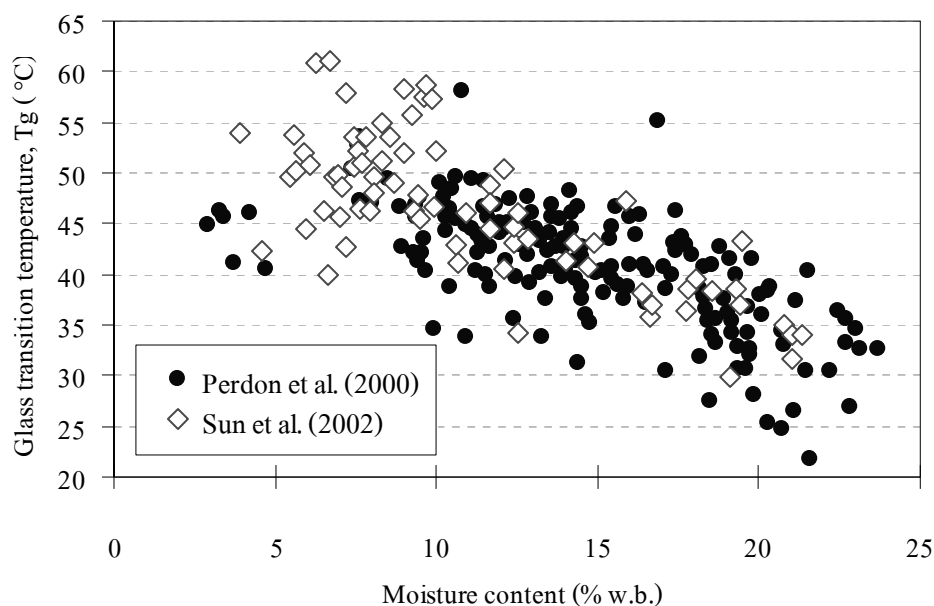
รูปที่ 2.4 ผลทดสอบข้าวกล้อง (พันธุ์ Drew, 14.4% w.b.) ด้วยเทคนิค TMA (Sun et al., 2002)

โดยจุดเปลี่ยนทั้ง 3 เปลี่ยนแปลงตามความชื้นภายในเมล็ด จากการศึกษพบว่าตำแหน่ง HTT คือจุดสลายตัวของโครงสร้างผลึกในแป้งของข้าว และตำแหน่ง ITT คืออุณหภูมิที่ความชื้นระเหยได้รวดเร็วที่สุด ขณะที่ตำแหน่ง LTT คือช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้ว (glass transition temperature, T_g) เนื่องจากผลการทดสอบด้วย TMA พบว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง LTT นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนที่อุณหภูมิต่ำ (LTT) เป็นผลจากอิทธิพลของแป้งในเมล็ดข้าวเป็นหลัก โดยรูปที่ 2.5 แสดงค่า T_g ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ของข้าวเมล็ดยาวปานกลาง (พันธุ์ Bengal) และข้าวเมล็ดยาว (พันธุ์ Cypress) กับผลทดสอบด้วยเทคนิค TMA ของข้าวเมล็ดยาว (พันธุ์ Drew) ซึ่งพบว่าเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วมีค่าคล้ายกัน ยกเว้นในช่วงความชื้นต่ำ Sun et al. (2002) นำเสนอความสัมพันธ์ของ T_g กับความชื้นภายในของข้าวพันธุ์ Drew ได้ตามสมการ (2.16)

$$T_g = 59.47 - 1.17MC, \quad R^2 = 0.57 \quad (2.16)$$

โดย MC คือ ความชื้นข้าวในหน่วย % w.b.

ขณะที่เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิต่ำกว่า T_g แป้งภายในจะมีโครงสร้างคล้ายแก้ว (glassy state) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว ค่าปริมาตรจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าต่ำ เมื่อเมล็ดมีอุณหภูมิสูงกว่า T_g แป้งภายในเมล็ดจะเปลี่ยนโครงสร้างจากสภาพคล้ายแก้วเป็นสภาพคล้ายยาง (rubbery state) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว ค่าปริมาตรจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าเดิมมาก และเนื่องจากในกระบวนการอบแห้ง เมล็ดข้าวส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิและความชื้นอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ดังนั้นแผนภาพ glass transition temperature จึงมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ทั้งในด้านการวิเคราะห์ผลและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเช่นการขยายปริมาณและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะของชั้นเมล็ดข้าวระหว่างช่วง glass transition temperature ซึ่งมีผลต่อการเกิดรอยร้าวของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้ง ขณะที่การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่มีผลอย่างยิ่งต่ออัตราการอบแห้งและการ tempering ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3



รูปที่ 2.5 Glass transition temperature กับความชื้นข้าวกล้อง (Perdon et al., 2000; Sun et al., 2002)

2.13 ลักษณะทางกายภาพของข้าว

ลักษณะทางกายภาพเป็นคุณสมบัติต่าง ๆ ที่สามารถมองเห็น ชั่ง หรือตวงวัดได้ เช่น น้ำหนักเมล็ด ขนาดรูปร่างเมล็ด ความขาวของข้าวสาร คุณภาพการสี เป็นต้น

2.13.1 น้ำหนักเมล็ด (grain weight) เป็นลักษณะที่ควบคุมโดยพันธุกรรม และจะแปรปรวนไปตามสภาพแวดล้อม เช่น ชนิดของดิน การใส่ปุ๋ย ความชื้น และสภาพภูมิอากาศ น้ำหนักเมล็ดสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบคือ

- น้ำหนักต่อปริมาตร ประเมินเป็น กรัมต่อลิตร หรือกิโลกรัมต่อถัง
- น้ำหนักต่อจำนวนเมล็ด ประเมินเป็น น้ำหนัก 100 เมล็ด หรือน้ำหนัก 1000 เมล็ด

2.13.2 ขนาดรูปร่างเมล็ด (grain dimension) ได้แก่ ความยาว (length) ความกว้าง (width) ความหนา (thickness) และรูปร่าง (shape) ของเมล็ด ขนาดรูปร่างของพันธุ์ข้าวเป็นลักษณะประจำพันธุ์ มีลักษณะแตกต่างกันตามพันธุ์ และพื้นที่ปลูก เช่น ข้าวจำพวก Indica จะมีเมล็ดยาว รูปร่างเรียวยาว ข้าวจำพวก Japonica จะมีเมล็ดสั้นรูปร่างป้อม และข้าวจำพวก Javanica จะมีเมล็ดยาวปานกลาง แต่หนากว่าพวก Indica (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

ขนาดเมล็ด สามารถจำแนกได้ตามความยาวของเมล็ด ดังนี้

ยาวมาก	ยาวกว่า 7.5	mm
ยาว	6.6-7.5	mm
ปานกลาง	5.5-6.6	mm
สั้น	สั้นกว่า 5.5	mm

รูปร่างเมล็ด จำแนกโดยใช้สัดส่วนความยาว/ความกว้าง ดังนี้

เรียวยาว	มากกว่า 3.0
ปานกลาง	2.0-3.0
สั้น	น้อยกว่า 2.0

2.13.3 ความขาวของข้าวสาร (milled rice whiteness) ข้าวที่ผ่านการขัดสีจนเป็นข้าวสารจะมีสีขาวเพราะเหลือเฉพาะส่วนที่เป็นแป้งของเมล็ด ความขาวของข้าวสารจะต่างกัน โดยขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับการสี องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวเปลือก เป็นต้น ความขาวของข้าวสารซึ่งจำแนกโดยระดับการสีจะเป็นตัวกำหนดชั้นของข้าว เช่น ข้าว 100% จะมีระดับการสีพิเศษคือ สีเอาสีต่าง ๆ ออกหมด ไม่มีรำติดอยู่เลย หรือข้าว 45% มีชั้นของการสีข้าวธรรมดา สีขาวปานกลาง เป็นต้น

2.13.4 คุณภาพการสี (milling quality) สามารถประเมินได้จากข้าวเต็มเมล็ด และข้าวตัน ข้าวที่มีคุณภาพการสีดีจะมีข้าวเต็มเมล็ด และข้าวตันสูง โดยต้องมีข้าวเต็มเมล็ด และข้าวตันมากกว่า 50% มีการกำหนดขนาดของข้าวเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาคุณภาพการสีดังนี้คือ ข้าวเต็มเมล็ด

(มีขนาด 10 ส่วน), ข้าวต้น มีขนาดความยาว 8-9.9 ส่วน, ข้าวหักใหญ่ มีขนาดความยาว 5-7.9 ส่วน, ข้าวหัก มีขนาดความยาว 2.5-4.9 ส่วน และปลายข้าว มีขนาดความยาวน้อยกว่า 2.5 ส่วน

คุณภาพการสีของข้าวขึ้นกับปริมาณการแตกตัวของเมล็ดข้าว ซึ่งมีสาเหตุจาก

- การเก็บเกี่ยว และการนวดอย่างไม่เหมาะสม
- การลดความชื้นเมล็ดด้วยอัตราเร็วที่ไม่เหมาะสม
- ข้าวที่แห้งแล้วได้รับความชื้นซ้ำ (rewetting) เนื่องจากขณะที่เมล็ดมีความชื้น

ลดลงจะเกิดการหดตัว แต่เมื่อได้รับความชื้นอีกครั้งจะเกิดการขยายตัว พฤติกรรมเช่นนี้ทำให้เกิดการแตกข้าวได้ เช่น การผสมข้าวที่มีความชื้นสูงกับข้าวที่มีความชื้นต่ำ, ข้าวที่แห้งแล้วเปียกฝนหรือน้ำค้าง, การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ กลางวันร้อนแต่กลางคืนเย็น และการจับตัวหรือกลายเป็นหยดน้ำของไอน้ำในการเก็บรักษา (กิตติยา กิจควรดี, 2547)

กระบวนการสีข้าวประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 4 ขั้นตอน ได้แก่

- การทำความสะอาด (cleaning) เพื่อกำจัดขยะใบข้าว (ระแงคือ กิ่งก้านที่แยกจากแกนกลางของรวงข้าว), เมล็ดลีบ, เมล็ดวัชพืช และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจากข้าวเปลือก
- การกะเทาะ (shelling หรือ hulling) เป็นการทำให้เปลือกข้าวหลุดออกจากเมล็ด สิ่งที่ได้จากขั้นตอนนี้คือ ข้าวกล้อง และแกลบ โดยมีแกลบประมาณ 20-24% ของข้าวเปลือก
- การขัดขาว (whitening) เพื่อให้รำหลุดจากเมล็ดข้าวกล้อง สิ่งที่ได้จากขั้นตอนนี้จะเป็นรำ ประมาณ 8-10% ของข้าวเปลือก และข้าวสารประมาณ 66-72% ของข้าวเปลือก
- การคัดแยก (grading) เพื่อคัดแยกข้าวเต็มเมล็ด ข้าวต้น และข้าวหักขนาดต่าง ๆ ออกจากกัน (กัญญา เชื้อพันธุ์, 2547)

2.14 ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย

ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นพันธุ์ ชัยนาท 1 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวเจ้าที่ได้รับการผสม 3 ทางระหว่างลูกผสมชั่วที่ 1 ของคู่ผสม IR 13146-158-1 กับสายพันธุ์ IR 15314-43-2-3-3 และ BKN 6995-16-1-1-2 ที่สถานีทดลองพันธุ์ข้าวชัยนาท เมื่อ พ.ศ. 2525 แล้วปลูกคัดเลือกจนได้สายพันธุ์ CNTBR 82075-43-2-1 จนกระทั่งวันที่ 9 กันยายน 2536 คณะกรรมการวิจัยและพัฒนากรมวิชาการเกษตร มีมติให้เป็นข้าวพันธุ์รับรอง โดยข้าวพันธุ์ ชัยนาท 1 มีลักษณะเด่นประจำสายพันธุ์ ดังนี้

- ต้นข้าวสูงประมาณ 133 cm
- เป็นพันธุ์ข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง
- อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 121-130 วัน (ฤดูแล้ง) และ 119 วัน (ฤดูฝน)
- ทรงกอตั้ง ใบสีเขียว ใบธงค่อนข้างยาว ตั้งตรง คอรวงสั้น รวงยาว และแน่น ระแง

ค่อนข้างถี่ ฟางแข็ง

- เมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง บางเมล็ดกันมีจุด
- ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์
- เมล็ดข้าวกล้อง กว้าง×ยาว×หนา ประมาณ = $2.1 \times 7.7 \times 1.7$ mm
- ปริมาณ อะไมโลส 26-27%
- คุณภาพข้าวสุก ร่วน และแข็ง
- ปริมาณผลผลิตประมาณ 740 กิโลกรัมต่อไร่ (ศูนย์ข้อมูลการเกษตร, 2550)

2.15 การลดความชื้นข้าวเปลือก

หลังจากเก็บเกี่ยวแล้วนวดข้าว จะได้ข้าวเปลือกที่ยังมีความชื้นในเมล็ดสูง เมล็ดพืชเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีการหายใจ การลดความชื้นจึงมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา อัตราการเสื่อมคุณภาพ ปริมาณเชื้อรา การเข้าทำลายของแมลงศัตรูในโรงเก็บ ดังนั้นหลังจากเก็บเกี่ยวจึงต้องรีบตากหรือลดความชื้นเมล็ดให้แห้งโดยเร็วที่สุด เพื่อลดอัตราการหายใจของเมล็ดพืช

Wimberly (1983) รายงานเกี่ยวกับความชื้นที่เหมาะสมของเมล็ดข้าวเปลือกที่เก็บรักษาไว้ในสภาพที่ไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมหรืออุณหภูมิพบว่า หากต้องการเก็บข้าวเปลือกไว้นาน 2-3 เดือน เมล็ดควรมีความชื้น 13-14% w.b. หากต้องการเก็บไว้นานกว่านั้นต้องลดความชื้นให้มีค่าประมาณ 12-12.5% w.b. จากเหตุผลข้างต้นจะเห็นว่าการลดความชื้นมีความสำคัญมากในการเก็บรักษาทั้งระยะสั้น และระยะยาว

วิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกมี 2 วิธีคือ

2.15.1 วิธีธรรมชาติ (natural drying) ได้แก่ การใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ และลมเป็นตัวช่วยพาความชื้นออกจากเมล็ด เป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศกำลังพัฒนา เพราะประหยัด ไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อจำกัดและข้อเสียคือ ในฤดูฝนจะต้องใช้ระยะเวลาตากนาน จึงต้องใช้พื้นที่ตากและแรงงานมาก รวมทั้งไม่สามารถควบคุมคุณภาพของข้าวได้ โดยเฉพาะเมื่อตากข้าวไว้ในแปลงนาจะมีการสูญเสียจากการทำลายของ นก หนู และแมลง การลดความชื้นโดยวิธีธรรมชาติที่เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมใช้จะแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

2.15.1.1 ตากข้าวทิ้งไว้ในนาหลังจากเก็บเกี่ยว (ตากทิ้งรวงก่อนนำไปนวด) โดยจะทำการตากข้าวทิ้งไว้ในนาเป็นระยะเวลาหนึ่ง (2-3 วัน) เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนแรงงาน และพื้นที่ตาก แต่วิธีการนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียต่อข้าวอย่างมาก ทั้งเนื่องจากสัตว์ แมลงศัตรูพืชทำลาย และเกิดการร่วงหล่นขณะตาก และขนย้ายไปนวด คุณภาพการสี และคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ต่ำลงมาก เพราะการตากข้าวทิ้งไว้ในนาจะได้รับผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น การเปียกน้ำค้างในตอนกลางคืน การเปียกฝนขณะตากสลับกับการลดความชื้นจากการได้รับความร้อนในตอนกลางวัน ทำให้เกิดการแตกตัวของข้าวเมื่อนำไปนวดหรือขัดสี จากการวิจัยพบว่า

ระยะเวลาการตากข้าวทิ้งไว้ใบนานจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับการลดลงของคุณภาพการสีข้าว (กิตติยา กิจวรรดี, 2547)

2.15.1.2 การตากในลานหลังนวดข้าวเสร็จแล้ว (ตากเป็นเมล็ดหลังจากนวด) เป็นการลดความชื้นของข้าวหลังจากที่ผ่านการนวด เพราะในปัจจุบันนิยมใช้รถเกี่ยวนวด จากนั้นจะขายข้าวเปลือกสด (ชื้น) ทันที แต่หากยังไม่ขายจะนำไปตากลดความชื้นบนลาน เพื่อให้ได้ราคาที่สูงขึ้น และช่วยลดการสูญเสียคุณภาพของเมล็ด ดังที่กล่าวข้างต้น การตากข้าวเพื่อให้ได้ผลดีที่สุดมีแนวปฏิบัติดังนี้

- ควรมีวัสดุที่สะอาด และแห้งรองรับ เช่น ฝาใบหรือเสื่อที่สานด้วยไม้ไผ่ ไม่ควรตากกับพื้นโดยตรง เพราะเมล็ดอาจได้รับความร้อนจากพื้นสูงเกินไป และมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกรณีพื้นซีเมนต์ หรือได้รับความชื้นสูงในกรณีพื้นลานดินทำให้เมล็ดที่ติดกับผิวดินมีความชื้นสูง
- ความหนาของกองข้าวเปลือกควรมีค่าประมาณ 5-10 cm เพราะหากการตากบางเกินไปอุณหภูมิข้าวที่ตากจะสูง ทำให้เกิดการแตกข้าวเมื่อนำไปสี ส่วนถ้าตากหนาเกินไปการระบายอากาศในกองข้าวจะไม่ดี ข้าวแห้งช้า ระหว่างการตากควรกลับกองข้าวทุก ๆ 2 ชั่วโมง หรือวันละ 4 ครั้ง เพื่อช่วยลดความชื้นให้เร็ว และสม่ำเสมอ ซึ่งจะทำได้ข้าวคุณภาพดี
- ในเวลากลางคืนควรมีวัสดุปกคลุมกองข้าวเพื่อป้องกันน้ำค้างหรือฝน
- ไม่ควรตากข้าวนานเกินไป โดยควรให้ความชื้นข้าวมีค่าประมาณ 12-14% w.b. จึงหยุดตาก สำหรับข้าวที่ต้องการเก็บไว้ทำพันธุ์ควรลดความชื้นให้มีค่าประมาณ 9-10% w.b. จึงนำไปเก็บรักษา โดยปกติใช้เวลาตากประมาณ 3-4 แดด จะมีค่าความชื้นในระดับที่ต้องการ

2.15.2 การใช้เครื่องอบ (artificial drying) เป็นการใช้เครื่องอบแห้งในการลดความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งในปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งมากมายหลายแบบ เช่น เครื่องอบแบบถาด เครื่องอบแบบฟลูอิดไดซ์เบด เครื่องอบแบบสเปาเต็ดเบด เครื่องอบแบบคอลัมน์ เครื่องอบแบบอุโมงค์ เครื่องอบแบบตู้ เป็นต้น การใช้เครื่องอบมีข้อดีคือ สามารถใช้ได้ทุกสภาวะอากาศไม่ว่าฝนตกหรือแสงแดดน้อย ไม่เปลืองพื้นที่ และสามารถควบคุมการลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้อย่างเหมาะสม ใช้ระยะเวลาการลดความชื้นน้อยกว่าวิธีธรรมชาติ และป้องกันความเสียหายต่อคุณภาพข้าวได้ดีกว่า แต่มีข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่ายสูง มีข้อปฏิบัติที่ยุ่งยากซับซ้อน

2.16 วิธีการหาค่าความชื้น

การหาค่าความชื้นของเมล็ดสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

2.16.1 การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง (direct measurement) สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกลั่น การใช้สารดูดความชื้นในสูญญากาศ การใช้รังสีอินฟราเรด และการใช้ตู้อบ (oven method) เป็นต้น การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรงมีความเที่ยงตรงสูงแต่ใช้ระยะเวลานาน และเป็นวิธีพื้นฐาน

เพื่อสอบเทียบเครื่องมือวัดค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง มีวิธีการดังนี้ 1) ทำการชั่งน้ำหนักของข้าวที่ต้องการหาความชื้น (มวลของวัสดุชื้น) 2) นำข้าวไปอบให้น้ำในเมล็ดระเหยออกไปจนหมด 3) นำข้าวที่อบเสร็จแล้ว ทิ้งให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้น 4) นำข้าวไปชั่งอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักของเมล็ดแห้ง (มวลของวัสดุแห้ง) 5) คำนวณความชื้นตามสมการหาความชื้นวัสดุ (หัวข้อ 2.1) โดยมาตรฐานของแต่ละสถาบันจะกำหนดอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้อบแห้งแตกต่างกันไป งานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานของ American Association of Cereal Chemists ด้วยการอบหาความชื้นแบบเมล็ดเต็ม ไม่บดละเอียดเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นเมล็ดในขั้นตอนบดละเอียด อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 103°C ระยะเวลา 72 ชั่วโมง (AACC,1995)

2.1.6.2 การหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม (indirect measurement) ใช้วิธีการวัดคุณสมบัติบางอย่างของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับความชื้น เช่น ความต้านทานไฟฟ้า (resistance) หรือการเก็บประจุไฟฟ้า (capacitance) การหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อมเป็นวิธีที่ทำได้รวดเร็วไม่ซับซ้อน ใช้ตัวอย่างทดสอบน้อย จึงเป็นที่นิยมใช้ในวงการค้าทั่วไปแต่จะต้องตรวจสอบเครื่องมือ และสอบเทียบกับการหาค่าความชื้นวิธีตรงก่อน เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนตามชนิดของพันธุ์ พื้นที่ปลูก ความชื้น อุณหภูมิ ความหนาแน่นของการบรรจุ ตลอดจนวิธีการใช้เครื่องมืออย่างถูกต้องเหมาะสม (อารีย์ ทิมินกุล และ นิตส์นั ดั้งพินิจกุล, 2547)

บทที่ 3

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพักข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้ง และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพโครงสร้างคล้ายแก้ว ที่มีผลต่ออัตราอบแห้ง การใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง และคุณภาพข้าวเปลือกหลังผ่านกระบวนการอบแห้ง อีกทั้งนำเสนองานวิจัยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ผ่านมา เพื่อนำไปสู่สมมุติฐานของการพักข้าวเปลือก อุณหภูมิและความเร็วอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

3.1 ผลของการพักระหว่างการอบแห้งที่มีต่ออัตราอบแห้งและการใช้พลังงาน

K.J.Chua, A.S. Mujumdar, and S.K. Chou (2003) นำเสนอภาพรวมการอบแห้งวัสดุชีวภาพด้วยวิธีการอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่องเป็นช่วง ๆ (intermittent drying) วิธีการนี้เป็นการให้ความร้อนเปลี่ยนแปลงตามเวลาปรับปรุงให้สอดคล้องกับจลนศาสตร์การอบแห้งของวัสดุที่ต้องการอบแห้ง การให้ความร้อนเป็นช่วงๆมีประโยชน์กับวัสดุที่การอบแห้งในช่วงแรกมีลักษณะเป็นแบบช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) ในช่วงนี้อัตราการอบแห้งทั้งหมดถูกควบคุมด้วยการแพร่ความร้อนและความชื้นภายในวัสดุ ในช่วงที่ไม่มีการให้ความร้อนหรือให้เพียงเล็กน้อยเป็นช่วงเวลาที่เกิดการพักตัวของวัสดุ (tempering period) เพื่อให้ความร้อนและความชื้นแพร่ภายในวัสดุอย่างทั่วถึง การพักตัวดังกล่าวทำให้ความชื้นภายในวัสดุ (moisture content) ที่ผิวของวัสดุชีวภาพเพิ่มขึ้น เมื่อถึงช่วงให้ความร้อนกับวัสดุ อัตราการอบแห้งของวัสดุที่ผ่านการพักตัวจะสูงกว่าวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการพักตัว และด้วยกระบวนการพักตัวจึงเป็นไปได้ที่จะควบคุมความร้อนที่ให้กับวัสดุ ซึ่งทำให้วัสดุมีอุณหภูมิผิวไม่สูงเกินที่จะนำไปสู่ความเสียหาย เนื่องจากความร้อน (thermal damage) ผลโดยตรงของกระบวนการพักตัวก็คือลดการใช้พลังงานความร้อนด้วยการลดมวลของอากาศร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งด้วยการพาความร้อน (convective drying) ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการอบแห้งจึงสูงขึ้นตามไปด้วย

A. Iguaz, M. Rodriguez, and P. Virseda (2006) ศึกษาผลกระทบการอบแห้งต่อเนื่อง, การอบแห้งเป็นช่วง ๆ ด้วยการ tempering ที่อุณหภูมิแวดล้อม และการอบแห้งอย่างต่อเนื่องต่อด้วยการ tempering ด้วยอุณหภูมิ 60°C โดยใช้ระยะเวลา tempering เท่ากับ 8 เท่าของระยะเวลาอบแห้ง ใช้

อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 53, 60 และ 80°C ลดความชื้นจากข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 16-18% w.b. ถึงความชื้นสุดท้าย 11-13% w.b. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งเป็นช่วง ๆ มีผลต่อจลศาสตร์การอบแห้งของข้าวเปลือกอย่างเด่นชัด ได้อัตราอบแห้งที่สูงกว่าและระยะเวลาอบแห้งรวมสามารถลดลงได้ ซึ่งผลของการ tempering ระหว่างช่วงการอบแห้งอาจเทียบได้กับการเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ในกรณีอบแห้งอย่างต่อเนื่อง (ซึ่งเป็นส่วนช่วยลดการใช้พลังงาน)

Abhay Kumar Thakur, and A.K. Gupta (2006) ศึกษาการอบแห้งแบบชั้นบาง (thin layer drying) 2 ช่วงโดยใช้การพักในที่อับอากาศ (ถังแก้ว) ชั้นกลางระหว่าง 2 ช่วงการอบแห้ง โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิขณะพัก ใช้ระยะเวลาพัก 30, 60 และ 120 min. ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ทั้ง 2 ช่วงการอบแห้ง ความเร็วได้ชั้นเบด 4.5 m/s โดยใช้ข้าวเปลือก 500 g ชั้นเบดหนา 3 cm ผลการศึกษาพบว่า อัตราอบแห้งและสภาพการแพร่ความชื้นในช่วงอบแห้งที่ 2 เพิ่มขึ้นหลังการพัก และพบว่าความชื้นข้าวเปลือกก่อนการพัก ($MR_{rest}=0.715$) และระยะเวลาพักที่เหมาะสม (75-90 min.) สามารถประหยัดพลังงานได้ 21-44% เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง

J. Aquerreta, A. Iguaz, C. Arroqui, and P. Virseda (2007) ทำการศึกษาจำนวนรอบการอบแห้งที่สอดคล้องกับอุณหภูมิ tempering ที่แตกต่างกัน โดยทดลองอบแห้งแบบชั้นบางด้วยอากาศอุณหภูมิ 60°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 4% สลับกับการ tempering ที่อุณหภูมิแวดล้อม, อุณหภูมิ 40 หรือ 60°C ด้วยระยะเวลา tempering 8 เท่าของระยะเวลาอบแห้ง ซึ่งพบว่ากรณีลดความชื้นในปริมาณที่เท่ากัน (จาก 18 ถึง 12% w.b.) การ tempering ด้วยอุณหภูมิ 60°C หลังการอบแห้งสามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้ถึง 38% เมื่อเทียบกับการ tempering ด้วยอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิ 40°C เนื่องจากปริมาณความชื้นที่ผิวเมล็ดหลังการ tempering มากกว่าจึงทำให้อัตราอบแห้งในรอบถัดมาสูงกว่า

Yoshio Nishiyama, Wei Cao, and Baoming Li (2006) พัฒนาแบบจำลองอบแห้งรูปทรงกลมอย่างง่ายเพื่อทำนายความชื้นเฉลี่ยและความชื้นที่ผิวเมล็ดข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งแบบเป็นช่วง ๆ (intermittent drying) แบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วย 3 ตัวแปรหลักคือ surface mass transfer coefficient H , dynamic equilibrium moisture content Me และ drying constant K โดยค่าตัวแปรทั้ง 3 ได้จากข้อมูลการทดลองอบแห้งชั้นผิวบางแบบต่อเนื่องของข้าวสาลี (พันธุ์ Tohoku206), ข้าวเปลือกเมล็ดยาว (พันธุ์ L201) และข้าวเปลือกเมล็ดสั้น (พันธุ์ Akitakomachi) ที่ใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 30-50°C ความเร็ว 0.5 m/s โดยจำลองการอบแห้งแบบเป็นช่วง ๆ ด้วยแบบจำลองดังกล่าว ด้วยอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 30-50°C ระยะเวลาอบแห้งแต่ละรอบ 60 min. และระยะเวลา tempering แต่ละรอบ 60 min. ทำการอบแห้งสลับกับการ tempering จากความชื้นเริ่มต้น 35% d.b. จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 16% d.b. พบว่าความชื้นที่ผิวของเมล็ดลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้งและมีค่าต่ำกว่าความชื้นเฉลี่ยของเมล็ด โดยขณะที่ tempering ความชื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าใกล้เคียงกับความชื้นเฉลี่ยหากมีระยะเวลา tempering ที่เพียงพอ ส่งผลให้อัตราอบแห้งในการอบแห้งรอบต่อมาเพิ่ม

สูงขึ้น แสดงถึงประโยชน์ของการกระจายตัวของความชื้น และพบว่าอุณหภูมิ tempering ที่สูงกว่าทำให้ค่าคงที่การอบแห้งสูงกว่า ความชื้นจึงเคลื่อนย้ายมาสู่ผิวเมล็ดได้เร็วกว่า อัตราอบแห้งในรอบถัดมาจึงมีค่าสูงกว่าที่ระยะเวลา tempering เดียวกัน โดยที่ข้าวเปลือกเมล็ดยาวต้องการระยะเวลา tempering น้อยกว่าข้าวเปลือกเมล็ดสั้น

Renjie Dong, Zhanhui Lu, Zhuqing Liu, Yoshio Nishiyama, and Wei Cao (2009) นำเสนอวิธีการหาความชื้นที่ระดับต่าง ๆ ภายในเมล็ด ในขณะที่อบแห้งและ tempering ด้วยแบบจำลองอบแห้งรูปทรงกลมกับข้าวเปลือกพันธุ์เมล็ดยาว (พันธุ์ L201) และพันธุ์เมล็ดสั้น (พันธุ์ Akitakomachi) โดยใช้สภาพอบแห้งอุณหภูมิ 30, 40 และ 50°C ระยะเวลาอบแห้ง 60 min. ใช้อุณหภูมิ tempering 30, 40 และ 50°C เป็นเวลา 0-300 min. ตามเงื่อนไขการจำลอง ผลการจำลองพบว่าในช่วง tempering ความชื้นจะแพร่จากกึ่งกลางไปยังผิวเมล็ดเนื่องจากผลของความชื้นความชื้นหลังการอบแห้ง และเมื่อจำลองสภาพการอบแห้งหลังข้าวเปลือกผ่านการ tempering พบว่าความชื้นในแต่ละชั้นของเมล็ดจะลดลงโดยตลอดการอบแห้ง ขณะที่ข้าวที่ไม่ผ่านการ tempering ที่ชั้นด้านนอกของเมล็ดเกิดการลดลงของความชื้นน้อยมาก อัตราอบแห้งจึงต่ำกว่า และผลการจำลองการอบแห้งสลับกับการ tempering เป็นรอบ ๆ พบว่าใน ความชื้นที่ชั้นด้านในของเมล็ดจะลดลงตลอดเวลาทั้งช่วงการอบแห้งและการ tempering ดังนั้นการ tempering จึงช่วยประหยัดพลังงานได้เนื่องจากเกิดการลดความชื้นโดยไม่ได้ให้พลังงานในช่วงดังกล่าว

3.2 ผลของการพักระหว่างการอบแห้งที่มีต่อเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ

เครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน (batch re-circulating dryer) มีลักษณะการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องโดยมีการอบแห้งสลับกับการ tempering เป็นช่วง ๆ เพื่อศึกษาเครื่องอบแห้งชนิดนี้ Hung-Jung Shei, and Yi-luen Chen (1998) ได้นำเสนอสมการอบแห้งเพื่อประยุกต์ใช้กับเครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน (batch re-circulating dryer) โดยใช้สมการอบแห้งชั้นบางของ Newman สัมประสิทธิ์ในสมการดังกล่าวได้จากข้อมูลการทดลองอบแห้งชั้นผิวบางของข้าวเปลือกจำนวน 108 การทดลอง ซึ่งระยะเวลาอบแห้ง (5-15 min.), ระยะเวลา tempering (40-120 min.), ความชื้นสัมบูรณ์ (10-26 g/kg) และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง (35-65°C) คือตัวแปรควบคุมในการทดลอง ผลการจำลองสมการแสดงว่าค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant, k) ตามสมการจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้น, ระยะเวลาอบแห้งต่อรอบสั้นลงหรือระยะเวลา tempering ต่อรอบนานขึ้น ซึ่งสามารถลดระยะเวลาอบแห้งข้าวเปลือกในส่วนอบแห้งได้

ต่อมาในปี 2002 Hung-Jung Shei, and Yi-luen Chen พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน (batch re-circulating dryer) ซึ่งประกอบด้วยสมการอบแห้งชั้นผิวบางที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ ภายใต้เงื่อนไขการจำลอง อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 35-65°C, ความชื้นสัมบูรณ์ 10-26 g/kg และความเร็ว 0.25 m/s ด้วยระยะเวลาอบแห้ง 5-15 min. ระยะเวลา

tempering 40-120 min. ผลการจำลองแสดงว่า อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูงขึ้นและหรือความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลง ทำให้อัตราอบแห้งโดยรวมและส่วนอบแห้งเพิ่มขึ้น ขณะที่การลดระยะเวลาอบแห้งในแต่ละรอบและหรือการเพิ่มระยะเวลา tempering ทำให้ระยะเวลาอบแห้งโดยรวมเพิ่มขึ้น แต่ช่วยเพิ่มอัตราอบแห้งในส่วนอบแห้งได้ ซึ่งทำให้การใช้พลังงานต่ำกว่า

Ponciano S. Madamba, and Richard P. Yabes (2004) ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเครื่องอบแห้งแบบถัง โดยใช้การอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่องเป็นช่วง ๆ (intermittent drying) เพื่อศึกษาการพัสดัวของข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศร้อน การออกแบบการทดลองใช้ three level three-factor fraction factorial design และมุ่งเป้าหมายไปที่การหาค่าอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง ความเร็วลม และเวลาในการพัสดัวที่ดีที่สุด เพื่อให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งด้านเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งที่ดี อุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งอยู่ระหว่าง 35-55°C ความเร็วอากาศอบแห้งอยู่ในช่วง 0.4-0.6 m/s ระยะเวลาการพัสดัวอยู่ในช่วง 0-4 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง ในขณะที่ความเร็วอากาศอบแห้งแทบไม่มีผลต่อเวลาและคุณภาพของข้าวเปลือก โดยที่ระยะเวลาการพัสดัวข้าวเปลือกมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญ การหาจุดการทำงานที่ดีที่สุดใช้หลักการ Response Surface Methodology (RSM) วิเคราะห์หาพบว่าเงื่อนไขการอบแห้งที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป็นช่วง ๆ สำหรับเครื่องอบแห้งแบบถัง คือที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C และเวลาการพัสดัวข้าวเปลือก 2 ชั่วโมง

เพื่อหาระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมหลังการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เซชันที่อุณหภูมิสูง Nattapol Poomsa-ad, Somchart Soponronnarit, Somkiat Prachayawarakorn, and Apichit Terdyothin (2002) ใช้สมการการแพร่ความชื้นภายในเมล็ดเชิงอนุพันธ์ย่อย จำลองการลดลงของความชื้นเมล็ดข้าวเปลือก 1 เมล็ดที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบระดับห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการอบแห้งเป็น 2 ช่วง และทำการ tempering ระหว่างช่วงการอบแห้ง ใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 110-170°C ความเร็ว 2.2 m/s ชั้นข้าวเปลือกหนา 1.5 cm ระยะเวลาอบแห้ง 0-10 min. โดยข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้น 29.5% w.b. ผลการทดลองที่ได้เป็นข้อมูลสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นกับอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นหลัก การทำนายจึงใช้รูปแบบสมการ Arrhenius ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้เป็นตัวขับเคลื่อนที่สำคัญของสมการอนุพันธ์ย่อย ทำให้สามารถจำลองการกระจายตัวของความชื้นภายในเมล็ดที่ระยะเวลาอบแห้งและระยะเวลา tempering ต่าง ๆ ได้ ผลการจำลองแสดงว่าขณะที่ทำการ tempering ความชื้นภายในเมล็ดที่สูงกว่าจะแพร่มาสู่ที่ผิวเมล็ด ทำให้อัตราอบแห้งในช่วงที่ 2 สูงขึ้น และพบว่าระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมขึ้นกับความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และระยะเวลาอบแห้ง โดยอุณหภูมิที่สูงทำให้ระยะเวลา tempering ที่

เหมาะสมลดลง เนื่องจากการแพร่ความชื้นภายในที่รวดเร็วกว่า งานวิจัยนี้ใช้ tempering index, I_c เป็นตัวชี้วัดระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมซึ่งพบว่าที่ค่า $I_c = 0.95$ มีความเหมาะสมเพียงพอเนื่องจากทำให้การอบแห้งในช่วงที่ 2 หลังการ tempering มีอัตราอบแห้งที่สูง โดยระยะเวลา tempering ที่ทำให้ $I_c = 0.95$ คือตั้งแต่ 35 min. ขึ้นไป

Nattapol Poomsa-ad, Apichit Terdyothin, Somkiat Prachayawarakorn, and Somchart Soponronnarit (2005) วิเคราะห์กระบวนการอบแห้งบนพื้นฐานการทดลองและการจำลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBD), ความชื้นข้าวเปลือก และระยะเวลา tempering ที่มีต่อปริมาณข้าวต้นและเวลาทำงานรวม การทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 35, 30 และ 25% d.b. อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 110, 130, 150 และ 170°C ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 min. ใช้ระยะเวลา tempering 0, 15, 30 และ 45 min. และระบายอากาศในกองข้าวด้วยอากาศแวดล้อม พบว่าเพื่อให้ได้คุณภาพข้าวเปลือกที่ดีไม่ควรลดความชื้นด้วย FBD ต่ำกว่า 21% d.b. และต้องตามด้วยการ tempering ดังนั้นระยะเวลาทำงานรวมจึงขึ้นกับปัจจัยทั้ง 2 เพราะถ้าลดความชื้นข้าวเปลือกในส่วน FBD ให้น้อย จะต้องใช้เวลานานในการระบายความชื้นด้วยการเป่าอากาศแวดล้อม ซึ่งการลดความชื้นด้วยอากาศแวดล้อมจะเป็นไปอย่างเชื่องช้ามาก จึงทำให้ระยะเวลาทำงานรวมมากกว่า จากผลการจำลองพบว่าจุดพอดีระหว่างปริมาณข้าวต้นและระยะเวลาทำงานรวมคือ อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ใน FBD เท่ากับ 150°C และความชื้นข้าวเปลือกที่ออกจาก FBD ไม่ควรต่ำกว่า 22.5% d.b. โดยใช้ระยะเวลา tempering อย่างน้อย 25 min.

การจัดลำดับการอบแห้งที่เหมาะสม ย่อมนำมาซึ่งประสิทธิภาพที่ดีของกระบวนการอบแห้งด้วยเหตุนี้ Somkiat Prachayawarakorn, Nattapol Poomsa-ad, and Somchart Soponronnarit (2005) จึงศึกษาผลของลำดับการอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBD), การทำ tempering และ การระบายอากาศในกองข้าวด้วยอากาศแวดล้อม (AAV) โดยทำการทดลอง 3 ระบบ ซึ่งระบบที่ 1 อบแห้งด้วย FBD ตามด้วยการ tempering และเป่าด้วย AAV ขณะที่ระบบที่ 2 ประกอบด้วย การอบแห้งย่อยด้วย FBD 2 ช่วง ซึ่งหลังการอบแห้งย่อยแต่ละช่วงจะตามด้วยการ tempering และเป่าด้วย AAV โดยเพิ่มการ tempering ก่อนการอบแห้งย่อยช่วงที่ 2 การอบแห้งระบบที่ 3 ประกอบด้วย การอบแห้งย่อยด้วย FBD 2 ช่วงเช่นกัน ตามด้วยการ tempering หลังการอบแห้งย่อยแต่ละช่วง และสิ้นสุดกระบวนการด้วย AAV ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการ tempering ก่อนการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม ทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงมากกว่า เมื่อเทียบกับกรณีไม่ tempering เนื่องจากความชันความชื้นที่ลดลงน้ำจึงเคลื่อนที่ได้โดยง่ายเมื่อเป่าด้วยอากาศแวดล้อม ซึ่งเป็นประโยชน์ในแง่ประหยัดการใช้พลังงาน นอกจากนี้ผู้ศึกษาฯ ยังได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินศักยภาพของระบบอบแห้งแบบต่าง ๆ ซึ่งพบว่าระบบที่ 2 สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ถึง 4 เท่าเมื่อเทียบกับระบบที่ 1 เนื่องจากขณะ tempering ความชื้นจะแพร่กระจายสู่ผิวเมล็ดทำให้ช่วงอบแห้งย่อยที่ 2 มีอัตราอบแห้งสูงกว่า จึงอบแห้ง

ได้รวดเร็วและประหยัดพลังงานกว่า โดยสามารถลดการใช้พลังงานของระบบที่ 1 จาก 7.32 MJ/kg น้ำที่ระเหย เหลือเพียง 4.75 MJ/kg น้ำที่ระเหย โดยการอบแห้งด้วยระบบที่ 2

เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็คเบคประกอบด้วยส่วนสเปาต์ซึ่งเป็นช่วงอบแห้งและส่วนคาน์คัมเมอร์ซึ่งเป็นช่วงพักระหว่างรอบการอบแห้ง โดยฐานันท์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสณธรรมฤทธิ์ (2546) ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งสเปาเต็คเบคแบบสองมิติที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเข้าคาน์คัมเมอร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 110, 130 และ 150°C โดยปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าคาน์คัมเมอร์เป็น 0, 10, 20 และ 30% ในแต่ละอุณหภูมิอบแห้ง ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีอัตราอบแห้งเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และความสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้นทุกค่าอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าอัตราอบแห้งค่อนข้างคงที่ เนื่องจากผลของการพัดตัวในบริเวณคาน์คัมเมอร์ช่วยให้ความชื้นในเมล็ดข้าวมีเวลาเคลื่อนตัวมาที่ผิวมากขึ้นทำให้การระเหยน้ำบริเวณสเปาต์ในแต่ละรอบค่อนข้างคงที่ และเมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าคาน์คัมเมอร์เพิ่มขึ้นอัตราอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพราะอากาศที่เข้าสู่คาน์คัมเมอร์ให้ความร้อนเบื้องต้นกับข้าวเปลือกก่อนที่จะเข้าสู่ส่วนสเปาต์ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกขณะพักที่บริเวณคาน์คัมเมอร์มีสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงขึ้นจึงช่วยให้ความชื้นในเมล็ดข้าวเคลื่อนตัวมาที่ผิวมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณสเปาต์จึงเกิดการระเหยน้ำได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังมีการลดความชื้นในส่วนคาน์คัมเมอร์ซึ่งเป็นผลมาจาก evaporative cooling อีกด้วย เมื่อพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะในการอบแห้งพบว่าแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศเข้าคาน์คัมเมอร์ โดยกรณีที่อากาศเวียนกลับ 67% มีค่าอยู่ในช่วง 6.7-9.0 MJ/kg น้ำที่ระเหย ของข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 33-34% d.b. และความชื้นสุดท้าย 12-19% d.b. แต่ในกรณีที่อากาศเวียนกลับ 75% มีแนวโน้มตรงข้าม โดยมีค่าในช่วง 4.5-6.5 MJ/kg น้ำที่ระเหย ของข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 26-27% d.b. และความชื้นสุดท้าย 15-17% d.b. เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบคในระดับห้องปฏิบัติการ อัตราการอบแห้งที่พิจารณาต่อหน่วยปริมาตรของเครื่องอบแห้งในการทดสอบมีค่ามากกว่าเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบคประมาณ 1.4 เท่า อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะ ด้วยเทคนิคสเปาเต็คเบคมีค่าต่ำกว่า เมื่อพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งข้าวเปลือกมีระดับความชื้นที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา

3.3 ผลของ Glass Transition Temperature ที่มีต่ออัตราอบแห้งและการใช้พลังงาน

Zhenhua Sun, Wade Yang, Terry Siebenmorgen, Annemieke Stelwagan, and Auke Cnossen (2002) ทดสอบข้าวเมล็ดยาวพันธุ์ Drew ด้วยเทคนิค TMA และ DSC เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงเชิงกล

เนื่องจากความร้อน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าช่วง glass transition temperature, T_g เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60°C ที่ความชื้นข้าวเปลือก 5% w.b. จนถึงอุณหภูมิ 30°C ที่ความชื้นข้าวเปลือก 20% w.b.

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้อธิบายถึงความสำคัญของ T_g ที่มีต่อการอบแห้งข้าวเปลือกดังนี้ ในขณะที่อบแห้ง ถ้าเมล็ดข้าวมีอุณหภูมิต่ำกว่า T_g แป้งในข้าวจะอยู่ในสภาพของแข็งคล้ายแก้ว โดยเมล็ดแป้งในข้าวจะเรียงตัวค่อนข้างแน่นจึงทำให้น้ำที่จับตัวกับแป้งเคลื่อนที่ได้ยาก ดังนั้นการแพร่ของความชื้นภายในเมล็ดข้าวจึงเป็นไปอย่างเชื่องช้า (low diffusivity) ด้วยเหตุนี้จึงใช้เวลานานในการอบแห้งให้ได้ความชื้นภายในที่ต้องการ ถ้าอุณหภูมิที่เมล็ดข้าวสูงกว่าค่า T_g แป้งในเมล็ดข้าวจะอยู่ในสภาพคล้ายยาง ซึ่งโมเลกุลขนาดใหญ่ของแป้งจะมีปริมาตรอิสระมากขึ้น แป้งสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ความชื้นสามารถแพร่ออกจากเมล็ดข้าวได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (high diffusivity)

W. Yang, T.J. Siebenmorgen, T.P.H. Thielen, and A.G. Cnossen (2003) หาค่าการนำความร้อนข้าวเปลือกในช่วงความชื้นภายใน 9.2-17.0% w.b. และอุณหภูมิ $3-69^{\circ}\text{C}$ ด้วยวิธีการแหล่งความร้อนเชิงเส้น (line heat source method) ประกอบกับวิธีความชันสูงสุด (maximum slope method) ผลการทดสอบพบว่าค่าการนำความร้อนที่ได้อยู่ในช่วง $0.080-0.138 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ และค่าที่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นของเมล็ดข้าว โดยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีหลังจากอุณหภูมิเมล็ดข้าวสูงกว่า glass transition temperature, T_g ซึ่งทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า ขณะที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า T_g ถึงประมาณ 25°C ค่าการนำความร้อนค่อนข้างคงที่ ($0.01-0.11 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) และจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 25°C

A.G. Cnossen, T.J. Siebenmorgen, and W. Yang (2002) ศึกษาผลของความชื้นความชื้นขณะทำการอบแห้ง ที่ทำให้ระดับความชื้นในแต่ละชั้นของเมล็ดข้าวเปลือกไม่เท่ากัน จึงอาจส่งผลให้โครงสร้างแต่ละชั้นภายในเมล็ดมีสภาพโครงสร้างที่แตกต่างกันเมื่อใช้ค่าอุณหภูมิต่ำกว่า glass transition temperature, T_g จึงทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบชั้นบาง ด้วยข้าวเมล็ดยาว (พันธุ์ Cypress) และข้าวเมล็ดยาวปานกลาง (พันธุ์ Bengal) ที่มีความชื้นเริ่มต้น 20.5 และ 17.2% w.b. ตามลำดับ อากาศอบแห้งมีอุณหภูมิ 40, 45, 50, 55 และ 60°C ปรับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่สอดคล้องกับค่าความชื้นสมดุลเท่ากับ 5.8, 6.7, 7.6, 8.5 และ 9.4% w.b. โดยพิจารณาอัตราอบแห้งจากค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant, k) และปริมาณความชื้นที่ลดลง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ด้วยอุณหภูมิสูงกว่า T_g ของข้าว มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มอัตราอบแห้ง เมื่อเทียบกับกรณีอุณหภูมิต่ำกว่า T_g และกรณีอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50, 55 และ 60°C พบว่าเมื่อใช้อากาศความชื้นน้อย ซึ่งทำให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าต่ำ ผิวของเมล็ดจะเปลี่ยนกลับจากสภาพยางเป็นสภาพแก้ว ส่งผลให้ที่ผิวเมล็ดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง ดังนั้นอัตราการอบแห้งจึงช้ากว่ากรณีอากาศอบแห้งอุณหภูมิเดียวกันซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงกว่าแต่ที่ผิวเมล็ดยังคงสภาพคล้ายยาง อย่างไรก็ตามเมื่อขยายช่วงเวลาอบแห้งออกไปผลของสภาพโครงสร้างที่ผิวจะน้อยลง โดยปัจจัยสำคัญที่จำกัดอัตราอบแห้งคือการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเมล็ด

3.4 ผลของการพักระหว่างการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

Y.B. Li, C.W. Cao, Q.L. Yu, and Q.X. Zhong (1999) ศึกษาการร้าวภายในข้าวเปลือกที่เกิดขึ้นหลังการอบแห้งแบบเป็นไม่ต่อเนื่องเป็นช่วง ๆ (intermittent drying) ด้วยการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข กระจายตัวของความชื้นภายในเมล็ดได้จากแบบจำลองการแพร่ โดยวิเคราะห์ที่ความชื้นความชื้นเพื่อหาค่าความเค้นภายในเมล็ดที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งและการ tempering ใช้เงื่อนไขการอบแห้งอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 35, 45, 50 และ 60°C ความเร็ว 2.6 และ 3.4 m/s ระยะเวลาอบแห้งแต่ละช่วง 5, 10 และ 15 min. โดย intermittent ratio เท่ากับ 0, 2 และ 8 min./min. ใช้ข้าวเปลือกของ Beijing ที่มีความชื้นเริ่มต้น 18.5% w.b. ผลการทดลองและการจำลองแสดงให้เห็นว่าการร้าวของข้าวโดยส่วนมากเกิดขึ้นในช่วงสั้น ๆ ภายหลังการอบแห้ง ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 4 ชั่วโมงแรก โดยการลดระยะเวลาอบแห้งแต่ละช่วงและหรือเพิ่มระยะเวลา tempering สามารถช่วยลดความเค้นภายในเมล็ดข้าวได้ ทำให้เปอร์เซ็นต์รอยร้าวลดลง ซึ่งระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมประมาณ 8 เท่าของระยะเวลาอบแห้ง

Abhay Kumar Thakur, and A.K. Gupta (2006) ศึกษาการอบแห้งแบบชั้นบาง 2 ช่วงโดยใช้การพักในที่อับอากาศ (ถังแก้ว) ชั้นกลางระหว่าง 2 ช่วงการอบแห้ง โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิขณะพัก ใช้ระยะเวลาพัก 30, 60 และ 120 min. ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ทั้ง 2 ช่วงการอบแห้ง ความเร็วได้ขึ้นเบด 4.5 m/s โดยใช้ข้าวเปลือก 500 g ชั้นบนหนา 3 cm ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มระยะเวลาพักจาก 30 ถึง 60 min. สามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นหลังการอบแห้งได้

A. Iguaz, M. Rodriguez, and P. Virseda (2006) ศึกษาคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งต่อเนื่อง, การอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่องแบ่งเป็น 2 ช่วงโดยทำการ tempering ระหว่างช่วงการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศแวดล้อม และการอบแห้งแบบต่อเนื่อง ที่ต่อด้วยการ tempering ด้วยอุณหภูมิ 60°C โดยงานวิจัยนี้ใช้ระยะเวลา tempering เท่ากับ 8 เท่าระยะเวลาอบแห้ง ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 53, 60 และ 80°C ลดความชื้นจากข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 16-18% w.b. ถึงความชื้นสุดท้าย 11-13% w.b. ผลการทดลองแสดงว่าการอบแห้งแบบต่อเนื่องด้วยอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิและความจุความชื้นสูง ทำให้ออบแห้งได้อย่างรวดเร็วประหยัดเวลา แต่เป็นผลเสียกับปริมาณข้าวต้น ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการ tempering ที่อุณหภูมิ 60°C หลังการอบแห้ง หรืออีกวิธีหนึ่งคือการอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งสามารถลดความเค้นในเมล็ดข้าว ทำให้เปอร์เซ็นต์รอยร้าวลดลงได้

J. Aquerreta, A. Iguaz, C. Arroqui, and P. Virseda (2007) ทำการศึกษาจำนวนรอบการอบแห้งข้าวเปลือกที่สอดคล้องกับการอบแห้ง tempering ที่แตกต่างกัน โดยทดลองอบแห้งแบบชั้นบางด้วยอากาศอุณหภูมิ 60°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 4% ซึ่งแบ่งออกเป็น 1, 2 และ 3 ช่วงการอบแห้ง สลับกับการ tempering ที่อุณหภูมิแวดล้อม, อุณหภูมิ 40°C หรือ 60°C ด้วยระยะเวลา tempering 8 เท่าของระยะเวลาอบแห้ง พบว่ากรณีลดความชื้นในปริมาณที่เท่ากัน (จาก 18 ถึง 12% w.b.) การอบแห้งที่แบ่ง

ออกเป็น 2 และ 3 ช่วงสามารถลดจำนวนเมล็ดที่มีรอยร้าวได้ แต่อุณหภูมิ tempering ที่สูงจะมีผลดีต่อปริมาณข้าวต้นและลดจำนวนรอยร้าวของข้าวได้มากกว่า และพบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือการอบแห้งแบบ 2 ช่วงที่มีการ tempering ด้วยอุณหภูมิ 60°C หลังการอบแห้งแต่ละช่วง ซึ่งจะทำให้คุณภาพข้าวที่ดีและประหยัดพลังงาน

Renjie Dong, Zhanhui Lu, Zhuqing Liu, Yoshio Nishiyama, and Wei Cao (2009) นำเสนอวิธีการหาความชื้นที่ระดับต่าง ๆ ภายในเมล็ด ในขณะที่อบแห้งและ tempering ด้วยแบบจำลองอบแห้งรูปทรงกลมกับข้าวเปลือกพันธุ์เมล็ดขาว (พันธุ์ L201) และพันธุ์เมล็ดสี (พันธุ์ Akitakomachi) โดยใช้สภาพอบแห้งอุณหภูมิ 30, 40 และ 50°C ระยะเวลาอบแห้ง 60 min. ใช้อุณหภูมิ tempering 30, 40 และ 50°C เป็นเวลา 0-300 min. ตามเงื่อนไขการจำลอง ผลการจำลองเทียบกับการทดลองในเงื่อนไขอบแห้งเดียวกันพบว่า เมื่อระยะเวลา tempering เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์รอยร้าวที่ได้ลดลงสอดคล้องกับความชื้นความชื้นที่ลดลงตามผลการจำลอง โดยระยะเวลา tempering ที่ 60 min. สามารถลดความชื้นความชื้นได้ 50% และลดได้ทั้งหมดทุกกรณีศึกษาที่ระยะเวลา tempering ที่ 240 min.

Nattapol Poomsa-ad, Apichit Terdyothin, Somkiat Prachayawarakorn, and Somchart Soponronnarit (2005) วิเคราะห์กระบวนการอบแห้งบนพื้นฐานการทดลองและการจำลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBD), ความชื้นข้าวเปลือก และระยะเวลา tempering ที่มีต่อปริมาณข้าวต้นและเวลาทำงานรวม การทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 35, 30 และ 25% d.b. อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 110, 130, 150 และ 170°C ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 min. ใช้ระยะเวลา tempering 0, 15, 30 และ 45 min. และระบายอากาศในกองข้าวด้วยอากาศแวดล้อม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณข้าวต้นคือความชื้นสุดท้ายหลังจาก FBD และอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ได้ โดยข้าวเปลือกที่ถูกลดความชื้นต่ำกว่า 24% d.b. (หลังจาก FBD) จะมีปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ต่ำลง ซึ่งสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยเทคนิค tempering ที่ระยะเวลา 30 min.

Somkiat Prachayawarakorn, Nattapol Poomsa-ad, and Somchart Soponronnarit (2005) ศึกษาผลของลำดับการอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBD), การ tempering และ การระบายอากาศในกองข้าวด้วยอากาศแวดล้อม (AAV) โดยทำการทดลอง 3 ระบบ ซึ่งระบบที่ 1 อบแห้งด้วย FBD ตามด้วยการ tempering และเป่าด้วย AAV ขณะที่ระบบที่ 2 ประกอบด้วยการอบแห้งย่อยด้วย FBD 2 ช่วง ซึ่งหลังการอบแห้งย่อยแต่ละช่วงจะตามด้วยการ tempering และเป่าด้วย AAV โดยเพิ่มการ tempering ก่อนการอบแห้งย่อยช่วงที่ 2 การอบแห้งระบบที่ 3 ประกอบด้วยการอบแห้งย่อยด้วย FBD 2 ช่วงเช่นกัน ตามด้วยการ tempering หลังการอบแห้งย่อยแต่ละช่วง และสิ้นสุดกระบวนการด้วย AAV โดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 130 และ 150°C ความเร็ว 2.3 m/s ชั้นเมล็ดหนา 10 cm ระยะเวลาอบแห้ง 1-4 min. ใช้อุณหภูมิ tempering เท่ากับอุณหภูมิเมล็ดหลังการอบแห้ง ด้วยระยะเวลา tempering 15-45 min.

โดยอากาศแวดล้อมที่ใช้มีความเร็ว 0.125 m/s ระยะเวลา 20-30 min. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วย FBD ต้องมีการ tempering เพื่อรักษาปริมาณข้าวต้นเพราะความชื้น เนื่องจากความชื้นในเมล็ดลดลง โดยระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมคือ 30 min. และควรเป่าด้วยอากาศแวดล้อมหลังการ tempering เพื่อหยุดการสร้างรังควันเชื้อเหือง เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไมใช่เอนไซม์ ซึ่งทำให้ข้าวสารที่ได้มีสีเหลือง โดยระบบที่ 2 ให้คุณภาพที่ดีที่สุดใกล้เคียงกับระบบที่ 1

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณฤทธิ (2546) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งสเปาเต็คเบดแบบสองมิติที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 110, 130 และ 150°C โดยปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์เป็น 0, 10, 20 และ 30% ในแต่ละอุณหภูมิต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณข้าวต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้งเมื่อใช้อุณหภูมิต่างกันและความชื้นเริ่มต้นสูง เนื่องจากเกิดกระบวนการเจลลาคิในเซชันบางส่วนภายในเมล็ดกระบวนการเจลลาคิในเซชันของแป้งในข้าวเปลือกจะช่วยเชื่อมรอยร้าวภายในเมล็ดได้ ทำให้เมล็ดแข็งแรงมากขึ้น ปริมาณข้าวต้นที่ได้จึงสูง โดยอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อการเกิดเจลสำหรับข้าวเปลือกคือ 73-86°C และ 24-25% w.b. ตามลำดับ (Rordprapat et al., 2005) แต่เมื่อปริมาณความชื้นลดลงเกินกว่า 5-8% d.b. ที่ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 27-35% d.b. ปริมาณข้าวต้นที่ได้จะลดลงเนื่องจากความชื้นความชื้นที่สูง ความเค้นตักภายในเมล็ดจึงมีค่ามากขึ้น การแตกหักเสียหายจึงเกิดขึ้นตามมา สำหรับความขาวของข้าวสารที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

3.5 ผลของ Glass Transition Temperature และการพักที่มีต่อคุณภาพข้าวเปลือก

ในเชิงทฤษฎีกล่าวว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าค่า glass transition temperature, T_g ทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้ความชื้นความชื้นภายในเมล็ดมีค่าสูงมาก เพราะผิวเมล็ดแห้งเร็วกว่าส่วนด้านในเมล็ด ความแตกต่างความชื้นจึงทำให้เกิดความเค้นภายในเมล็ด เมื่อความเค้นดังกล่าวสูงกว่าค่าความต้านทานแรงดึงของเมล็ด หากไม่มีการทำ tempering หลังการอบแห้ง จะเกิดรอยร้าวขึ้นในเมล็ดข้าว

W. Yang, C.-C. Jia, T.J. Siebenmorgen, Z. Pan, and A.G. Cnossen (2003) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง glass transition temperature, T_g และความชื้นความชื้นที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง ที่มีต่อปริมาณข้าวต้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การถ่ายเทความร้อนและความชื้นภายในเมล็ด ด้วยวิธีทาง finite element ผลการจำลองพบว่าความชื้นความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้งและค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งทำให้ทราบระยะเวลาอบแห้งที่ความชื้นความชื้นมีค่าสูงสุดของแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง ประกอบกับผลการทดลองอบแห้งข้าวพันธุ์

Cypress ที่มีความชื้นเริ่มต้น 16.4 และ 21.4% w.b. ด้วยอากาศอุณหภูมิ 29-58°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 16.8-47% ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 0-180 min. โดยเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งเพื่อทดสอบปริมาณข้าวต้นที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้ง ผลทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งข้าวเปลือกในสภาพคล้ายแก้ว (ต่ำกว่า Tg) ปริมาณข้าวต้นที่ได้จะลดลงเพียงเล็กน้อยหลังการอบแห้ง แต่เมื่ออบในสภาพคล้ายยาง (สูงกว่า Tg) และข้าวเปลือกเย็นตัวทันทีหลังการอบแห้ง ปริมาณข้าวต้นที่ได้จะลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงเวลาอบแห้งที่ปริมาณข้าวต้นเริ่มลดลงสอดคล้องกับระยะเวลาที่ความชื้นความชื้นมีค่าสูงสุดตามผลการจำลอง

W. Yang, C.-C. Jia, and T.A. Howell (2003) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง ที่อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 60°C ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ Bengal ที่มีความชื้นเริ่มต้น 16.5% w.b. เก็บตัวอย่างและอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ตำแหน่งห่างจากช่องทางเข้าอากาศร้อนที่ 2.5, 7.6, 15.2, 22.9 และ 30.5 cm ตามระยะเวลาอบแห้ง ตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บได้ส่วนหนึ่งนำไปหาความชื้นและอีกส่วนหนึ่งทำการ tempering เป็นเวลา 4-4.5 ชั่วโมงแล้วจึงนำไปหาปริมาณข้าวต้น ผลการทดลองแสดงว่าข้าวเปลือกภายในชั้นต่าง ๆ ตามแนวการไหลของอากาศมีอุณหภูมิลดลงซึ่งมีผลต่อสภาพโครงสร้างที่แตกต่างกัน (สภาพคล้ายแก้วหรือคล้ายยาง) ข้าวที่ตำแหน่งต่างกันจึงถูกอบแห้งในบริเวณ glass transition ที่แตกต่างกัน หากข้าวมีอุณหภูมิต่ำกว่า Tg ซึ่งโครงสร้างข้าวมีสภาพคล้ายแก้ว ระยะเวลาอบแห้งที่นานจะไม่มีผลต่อปริมาณข้าวต้น แต่หากเมล็ดข้าวมีสภาพโครงสร้างคล้ายยาง และอบแห้งนานกว่าระยะเวลาที่ความชื้นความชื้นมีค่าสูงสุด จะทำให้ปริมาณข้าวต้นลดลงอย่างถาวรแม้จะทำการ tempering ด้วยอุณหภูมิเมล็ดข้าวเป็นระยะเวลานาน

A.G. Cnossen, M.J. Jimenez, and T.J. Siebenmorgen (2003) ศึกษาผลของการอบแห้งและ tempering ที่อุณหภูมิสูงและต่ำกว่า glass transition temperature, Tg ที่มีต่อรอยร้าวในเมล็ดข้าวและปริมาณข้าวต้นหลังการอบแห้ง อบแห้งด้วยเงื่อนไขอบแห้ง 3 แบบคือ (60°C, 17%), (60°, 50%) และ (40°C, 12%) โดยลดความชื้นครั้งละ 3.0, 4.5 และ 6.0% (percentage points of moisture removed in one pass of drying, PPMR) ตามด้วยการ tempering ด้วยอุณหภูมิเช่นเดียวกับขณะอบแห้ง ด้วยเวลา 0, 80, 160 และ 240 min. ต่อด้วยการลดความชื้นในถึงที่อุณหภูมิ 2°C, 15% เพื่อลดอุณหภูมิและลดจนได้ความชื้น 12.5% w.b. การศึกษานี้ใช้ข้าวเปลือก 2 พันธุ์คือ Bengal และ Cypress ที่มีความชื้นเริ่มต้น 17-21% w.b. ผลการทดลองแสดงว่าการ tempering ที่ 60°C หลังการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 60°C (สูงกว่า Tg) สามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นและลดจำนวนเมล็ดที่เกิดรอยร้าวได้ ขณะที่การอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 40°C (ต่ำกว่า Tg) การ tempering ที่ 40°C ไม่มีความจำเป็นเนื่องจากปริมาณข้าวต้นที่ได้เปลี่ยนแปลงน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลา tempering ที่ต้องการเพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวยาวนานกว่าเพื่อรักษาปริมาณข้าวต้น

Qingling Zhang, Wade Yang, and Canchum Jia (2003) ศึกษาการรักษาปริมาณข้าวต้นด้วยการ tempering ที่อุณหภูมิสูง ใช้ข้าวพันธุ์ Cypress ความชื้นเริ่มต้น 20.4% w.b. ทดลองอบแห้งแบบชั้นบางด้วยอากาศอุณหภูมิ 60°C, 17% ด้วยเวลา 0, 10, 30, 50, 70, 90 และ 120 min. หลังอบแห้งทำการ tempering ด้วยอุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C เป็นระยะเวลา 0, 20, 40, 60 และ 80 min. หลังการ tempering เก็บตัวอย่างในถังควบคุมอุณหภูมิ 21.7°C, 46.7% เป็นเวลา 2 สัปดาห์เพื่อลดความชื้นถึง 12.5% w.b. ใช้เปอร์เซ็นต์ข้าวขาวเต็มเมล็ดเป็นตัวกำหนดคุณภาพ ผลการทดลองแสดงว่าช่วงเวลาอบแห้งที่นานขึ้นต้องการระยะเวลาและอุณหภูมิ tempering ที่สูงขึ้น เพื่อรักษาปริมาณข้าวขาวเต็มเมล็ดให้อยู่ในระดับใกล้เคียงตัวอย่างควบคุมมากยิ่งขึ้น

ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการ glass transition temperature, T_g เพราะเมล็ดข้าวสามารถพิจารณาเป็นวัสดุยืดหยุ่นหนืดได้ (viscoelastic body) และด้วยผลของความชื้นความชื้นระหว่างการอบแห้งจึงทำให้เกิดความเค้นภายในเมล็ด นำไปสู่ความเครียดภายในเมล็ดข้าว ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือความเครียดเนื่องจากความยืดหยุ่น (elastic strain) และความเครียดเนื่องจากความหนืด (viscous strain) โดยความเครียดทั้ง 2 ส่วนจะเพิ่มขึ้นทันทีทันใดพร้อมกับความเค้นภายในที่เพิ่มขึ้นระหว่างการอบแห้ง ขณะที่ความเครียดส่วนยืดหยุ่นจะลดลงพร้อมกับความเค้นที่ลดลงในช่วง tempering แต่ความเครียดส่วนหนืดจะไม่หายไปทันทีตามความเค้นที่ลดลง เพื่อลดผลกระทบของความเครียดส่วนหนืด เมล็ดข้าวจึงต้องถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g ของ amorphous matrix ดังนั้นแล้วสายพอลิเมอร์จะสามารถเคลื่อนที่และคลายตัวไปยังสภาวะสมดุลพลังงานต่ำได้ จึงเป็นผลให้การ tempering ที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g สามารถรักษาปริมาณข้าวขาวเต็มเมล็ดหลังการอบแห้งได้ใกล้เคียงตัวอย่างควบคุมมากกว่า

3.6 งานวิจัยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสรฎา แข็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว (2549) ศึกษาผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ เครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้มีลักษณะเป็นแบบการไหลสวนทาง อากาศอบแห้งเคลื่อนตัวจากด้านล่างของท่ออบแห้งที่วางตัวในแนวตั้งขึ้นสู่ด้านบนสวนทางกับข้าวเปลือกชั้นที่ไหลตัวลงมาอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วง ข้าวเปลือกที่ไหลผ่านท่ออบแห้งมีความพรุนสูง และเนื่องจากการไหลแบบสวนทางจึงทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งมีค่าสูง เกิดการถ่ายเทความร้อน และความชื้นในท่ออบแห้งโดยวิธีการพาแบบบังคับ การทดสอบใช้อุณหภูมิอบแห้ง 80, 100 และ 120°C ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ย 6.642 m/s ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 23.75% d.b. ความชื้นสุดท้ายประมาณ 15.5% d.b. ปริมาณข้าวเปลือกชั้น 600 g ผลการทดสอบพบว่า ข้าวเปลือกใช้เวลาอยู่ในท่ออบแห้งประมาณ 1 วินาทีต่อรอบการอบแห้ง ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเป็น 20.6, 27.2 และ 29.1 sec. กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 80, 100 และ 120°C มีอัตราการ

สิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ 2.4, 3.14 และ 3.03 MJ/kg น้ำที่ระเหย ตามลำดับ เมื่อพิจารณาคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งพบว่ามีความขาว และปริมาณข้าวตอกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้อัตราการอบแห้งยังมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงตลอดการอบแห้งโดยไม่เกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่ความเร็วสัมพัทธ์สูงมากทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพาที่ผิวเมล็ดข้าวสูง และอัตราการแพร่ความร้อนของเมล็ดข้าวสูงเนื่องจากความชันของความชื้นที่ผิวสูง (moisture gradient) ทั้งนี้การศึกษาระทำภายใต้เงื่อนไขการทดลองดังนี้

- เป็นการศึกษาในย่านความชื้นต่ำซึ่งเป็นย่านที่มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าย่านความชื้นสูง
- เครื่องอบแห้งมีการทำงานเป็นขั้ว โดยแต่ละรอบการเทข้าวห่างกันประมาณ 1 min.
- ปริมาณข้าวที่ใช้คือ 600 g ซึ่งน้อยมาก ทำให้อากาศที่ทางออกยังมีศักยภาพในการอบแห้งได้ จึงสันนิษฐานได้ว่าถ้าเป็นการอบแห้งแบบต่อเนื่องจะสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งและประหยัดพลังงานได้มากขึ้น
- เมื่อทดลองใช้ข้าวเปลือก 1.5 kg ทดสอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 100°C ใช้เวลาอบแห้ง 32 sec. อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ 1.43 MJ/kg น้ำที่ระเหย ซึ่งต่ำกว่าการอบแห้งที่ใช้มวล 600 g

ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสรฎา แข็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว (2549) ศึกษาผลกระทบของลมหมุนวนต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ จากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของลมหมุนวนภายในท่ออบแห้งโดยใช้สภาวะการทดสอบเดียวกันพบว่า เมื่อทำให้อากาศอบแห้งภายในท่ออบแห้งหมุนวนจะทำให้เพิ่มระยะเวลาและพื้นที่สัมผัสอากาศระหว่างอากาศอบแห้ง และข้าวเปลือกทำให้การอบแห้งดีขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเป็น 24.2, 24.5 และ 18.3 sec. สำหรับลมหมุนวน และ 29.1, 27.2 และ 20.6 sec. สำหรับลมไม่หมุนวน กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 80, 100 และ 120°C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ 16.8, 9.9 และ 11.2% ตามลำดับ โดยพฤติกรรมการอบแห้งจะไม่เกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะเป็น 1.98, 2.81 และ 2.7 MJ/kg น้ำที่ระเหย สำหรับกรณีลมไม่หมุนวน และ 2.4, 3.14 และ 3.03 MJ/kg น้ำที่ระเหย สำหรับกรณีลมไม่หมุนวน ที่อุณหภูมิอบแห้ง 80, 100 และ 120°C ตามลำดับ ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ 17.5, 10.5 และ 10.89% ตามลำดับ โดยที่ความขาว และปริมาณข้าวตอกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2551) นำเสนอผลของความเร็วจานอบแห้งที่มีต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกและการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดเล็ก (ความยาวท่อ 115 cm, ขนาดท่อ 4.49 cm) งานวิจัยดังกล่าวทดลองอบแห้งข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องด้วยการลำเลียงข้าวเปลือกวนกลับด้วยกะพ้อลำเลียง ใช้อากาศ

อบแห้งอุณหภูมิ 90 และ 120°C ที่มีความเร็ว 1, 2, 3 และ 4 m/s โดยข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้น 26% w.b. ไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งด้วยอัตรา 15.37 kg/min. ผลการทดลองแสดงว่าอัตราอบแห้งแปรผันโดยตรงกับความเร็วอากาศอบแห้ง เพราะเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งจาก 1 เป็น 4 m/s ทำให้ระยะเวลาอบแห้งลดลง 68 และ 70 min. ในกรณีอุณหภูมิ 90 และ 120°C ตามลำดับ ขณะที่อัตราสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศอบแห้ง คือ 2.92-6.32 MJ/kg น้ำที่ระเหย และ 3.52-6.00 MJ/kg น้ำที่ระเหย ในกรณีอุณหภูมิ 90 และ 120°C ตามลำดับ

3.7 บทสรุปปรัทัศน์วรรณกรรมถึงสมมุติฐานงานวิจัย

จากงานวิจัยที่ได้นำเสนอมาแสดงให้เห็นว่าการพักระหว่างกระบวนการอบแห้งช่วยเพิ่มระยะเวลาที่ความชื้นภายในเมล็ดแพร่สู่บริเวณผิวเมล็ด การเคลื่อนที่ดังกล่าวเป็นผลจากความชื้นความชื้นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบแห้ง ทำให้เมล็ดที่ผ่านการพักที่เพียงพอมีการกระจายความชื้นภายในที่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลโดยตรงกับอัตราอบแห้งในการอบแห้งรอบต่อมา เพราะความชื้นที่ผิวมีปริมาณมากจึงระเหยได้โดยง่าย โดยปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการแพร่ความชื้นภายในเมล็ดก็คือ อุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น และระยะเวลาอบแห้ง ด้วยปัจจัยดังกล่าวทำให้ความชื้นความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดหลังการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อแรงขับเคลื่อนความชื้นขณะพัก

ข้าวมีคุณสมบัติคล้ายวัสดุจำพวกพอลิเมอร์ซึ่งสภาพ โครงสร้างและคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามระดับอุณหภูมิและความชื้น ดังนั้นอุณหภูมิเมล็ดและความชื้นภายในเมล็ดที่ระดับชั้นต่าง ๆ จะบ่งบอกถึงสภาพ โครงสร้างภายในเมล็ด โดยระดับอุณหภูมิเมล็ดที่มักพบในการอบแห้งจะอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่ำ คือช่วง glass transition temperature, (T_g) กรณีเมล็ดมีอุณหภูมิต่ำกว่า T_g สภาพ โครงสร้างภายในจะมีลักษณะคล้ายแก้ว การจัดเรียงตัวของเมล็ดแข็งค่อนข้างแน่น ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นต่ำ เมื่อเมล็ดมีอุณหภูมิสูงกว่า T_g สภาพ โครงสร้างจะเปลี่ยนจากสภาพคล้ายแก้วเป็นคล้ายยาง ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงขึ้นกว่ามาก จึงมีผลโดยตรงกับอัตราการแพร่ของความชื้นภายในเมล็ดขณะพัก

นอกจากแรงขับเคลื่อนความชื้นแล้วระยะเวลาพักที่เหมาะสมยังนำไปสู่การกระจายความชื้นที่เหมาะสมกับการอบแห้งในรอบถัดมา ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชื้นความชื้นเริ่มต้น แรงขับเคลื่อนความชื้น และการรักษาสภาพระหว่างการพัก จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการ tempering ที่มีการรักษาอุณหภูมิแวดล้อมให้คงที่ในระดับที่สูง มีผลทำให้การแพร่ความชื้นขณะพักรวดเร็ว ระยะเวลาพักที่เหมาะสมจึงลดลง และเนื่องจากการพักช่วยเพิ่มอัตราอบแห้งในรอบถัดมาได้จึงทำให้ลดระยะเวลาที่เมล็ดต้องสัมผัสอากาศร้อน ดังนั้นการใช้พลังงานจึง

ลดลงตามไปด้วย ในอีกแง่หนึ่งสามารถพิจารณาได้ว่า ขณะทำการพัก ชั้นภายในของเมล็ดมีการอบแห้งตลอดเวลา (ความชื้นลดลง) โดยไม่มีการให้พลังงาน ดังนั้นภาพรวมการใช้พลังงานจึงลดลง

คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้านปริมาณข้าวคืน พบว่ากระบวนการพักช่วยรักษาปริมาณข้าวคืนได้โดยตรง เพราะกระบวนการอบแห้งอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นภายในเมล็ด จึงทำให้การขยายตัวของแป้งในแต่ละชั้นไม่สม่ำเสมอเกินไป นำไปสู่ความเค้นที่กระทำกับเมล็ด หากเมล็ดที่ผ่านการอบถูกลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว การหดตัวและขยายตัวของชั้นภายในเมล็ดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่สม่ำเสมอ (เพราะอุณหภูมิและความชื้นภายในแต่ละชั้นของเมล็ดที่แตกต่างกัน) ทำให้เกิดรอยร้าวในเมล็ดข้าว เมื่อนำไปขัดสีปริมาณข้าวคืนที่ได้จึงต่ำลง การพักจะช่วยลดความชันความชื้นที่เกิดขึ้น ความเค้นที่กระทำจึงมีขนาดลดลง จึงสามารถรักษาปริมาณข้าวคืนได้ แต่เนื่องจากคุณสมบัติของข้าวที่เป็นวัสดุยืดหยุ่นหนืดจึงทำให้ผลของความเค้นจากการอบแห้งกระทำให้เกิดความเครียด 2 ส่วนคือความเครียดส่วนยืดหยุ่นและส่วนหนืด ซึ่งความเครียดส่วนยืดหยุ่นจะลดลงทันทีตามความชันความชื้นที่ลดลง ขณะที่ความเครียดส่วนหนืดต้องการอุณหภูมิขณะพักที่สูงกว่า T_g เพื่อให้สายของพอลิเมอร์เคลื่อนที่สามารถคลายตัวไปยังสถานะสมดุลพลังงานต่ำได้ ดังนั้นนอกจากระยะเวลาการพักที่เหมาะสมต่อการลดความชันความชื้นแล้ว อุณหภูมิขณะพักยังมีผลต่อปริมาณข้าวคืนที่ได้เช่นกัน นอกจากนี้การระบายอากาศกองข้าวที่มีอุณหภูมิสูงภายหลังการอบแห้งยังช่วยรักษาคุณภาพด้านความชื้นของเมล็ดได้อีกด้วย เนื่องจากอุณหภูมิสูงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลซึ่งทำให้ข้าวสารที่ได้มีสีเหลือง

การพักเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนอิสระ ซึ่งจากงานวิจัยที่ได้นำเสนอมาพบว่า การพักมีผลดีต่ออัตราอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพข้าวเปลือกที่ได้ และเนื่องจากลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ ซึ่งมีระยะเวลาสัมผัสอากาศร้อนสั้น สลับกับการพัก ซึ่งช่วยเพิ่มระยะเวลาการแพร่ความชื้นมาสู่ผิวเมล็ด โดยกระทำเป็นวงรอบเช่นนี้หลายสิบครั้ง ผนวกกับสัดส่วนระหว่างระยะเวลาพักต่อระยะเวลาสัมผัสความร้อนที่มาก ความชันความชื้นในเมล็ดจึงน่าจะต่ำ ด้วยเหตุผลและสมมุติฐานทั้งหมดการพักจึงน่าจะช่วยให้อัตราอบแห้งสูง การใช้พลังงานลดลงและได้ข้าวเปลือกคุณภาพดี นำมาสู่งานวิจัยนี้เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานดังกล่าวและศึกษาถึงผลกระทบเนื่องจากการพักที่มีต่อปัจจัยต่าง ๆ

บทที่ 4

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ

ในบทนี้จะอธิบายถึงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ใช้ในงานวิจัย โดยจะอธิบายถึง : องค์ประกอบและหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ

4.1 องค์ประกอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ

รายละเอียดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

4.1.1 เครื่องเป่าลม (blower) ของ Makita รุ่น UB1100 ขนาด 0.6 kW ความเร็วรอบมอเตอร์สูงสุด 16000 rpm ติดตั้งกับ variac ของ yamabishi รุ่น s-260-10M เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าและความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ สามารถทำความเร็วอากาศอบแห้งได้สูงสุดประมาณ 10 m/s แสดงดังรูปที่ 4.3-4.4

4.1.2 ตำแหน่งทางเข้าอากาศอบแห้งมีชุด orifice plate ซึ่งได้สร้างขึ้นโดยผู้วิจัย ออกแบบตามมาตรฐาน ISO 5167 เป็นแบบ concentric orifice plate (square edge) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice plate 2 cm จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างแบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps) เป็นระยะ 2.91 และ 1.455 cm ตามลำดับ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) และ U-tube manometer สำหรับวัดความเร็วอากาศที่ทางเข้า แสดงดังรูปที่ 4.5

4.1.3 เครื่องทำความร้อน (heater) ใช้ขดลวดความร้อนขนาด 1.54 kW แสดงดังรูปที่ 4.6 ติดตั้งควบคู่กับ variac ของ yamabishi รุ่น s-260-10M เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิอากาศค่าต่าง ๆ วัดค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งด้วย Thermocouple type K ต่อกับตัวปรับ และแสดงอุณหภูมิของ Shinko รุ่น GCS-300 วัดอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ตำแหน่ง 2.54 cm หลังจากอากาศผ่านเครื่องทำความร้อน แสดงดังรูปที่ 4.7 รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก

4.1.4 ท่ออบแห้ง เป็นท่อหลอดแก้วทนความร้อน หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.49 cm ยาว 115 cm วางตัวในแนวตั้ง ปลายด้านล่างต่อกับท่อส่งอากาศอบแห้งที่ผ่านเครื่องทำความร้อน ตำแหน่งที่ท่อส่งอากาศอบแห้งต่อเชื่อมกับท่ออบแห้งมีลักษณะเป็น nozzle ทำมุมเอียง 45° ทั้งนี้เพื่อต้องการให้อากาศอบแห้งที่ทางเข้ามีความเร็วสูง และมีความปั่นป่วน ซึ่งจะช่วยให้ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้ง โดยที่ความยาวท่ออบแห้งมีค่าเท่าเดิมและคาดว่า

จะช่วยลดเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ปลายด้านบนท่ออบแห้งต่อกับท่อสามทางที่มีท่อแขนงทำมุมเอียงประมาณ 45° กับแนวดิ่งเพื่อใช้เป็นทางออกอากาศอบแห้ง และปลายด้านบนของท่อสามทางต่อเข้ากับถังพักข้าวเปลือกด้านบน

4.1.5 ถังพักข้าวเปลือกด้านบน เป็นถังสังกะสีรูปกรวย ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กขนาด 5 cm และเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ขนาด 37 cm โดยผนังกรวยทำมุมเอียงกับแนวดิ่ง 30° มีความสูงรวม 28 cm โดยฝาด้านบนเปิดโล่ง แสดงดังรูปที่ 4.8

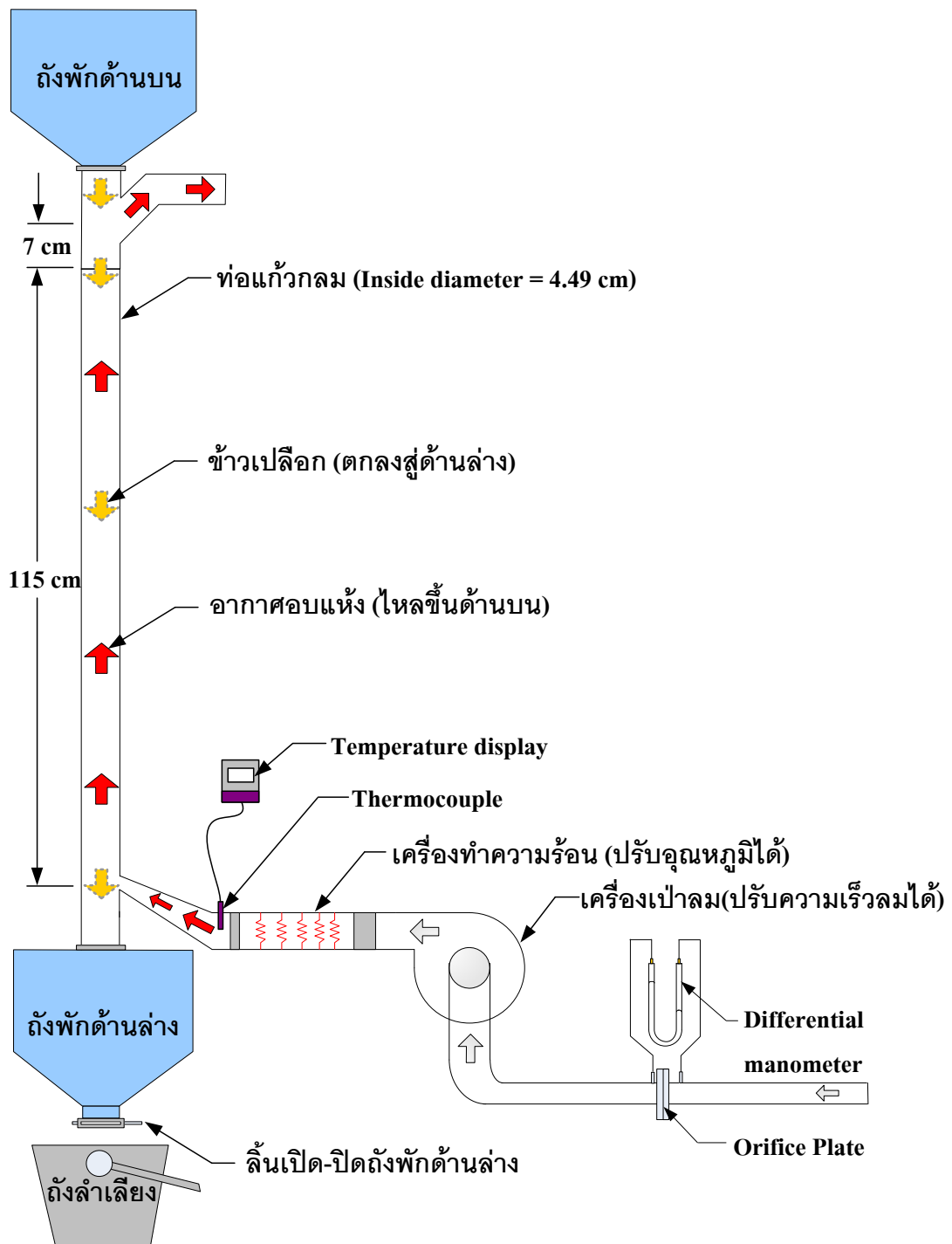
4.1.6 ถังพักข้าวเปลือกด้านล่าง มีขนาดเท่ากับถังพักข้าวเปลือกด้านบน มีการติดตั้งลิ้นปิดเปิดที่ทางออกด้านล่าง และมีแผ่นพลาสติกใส่ติดเป็นฝาด้านบนถังเพื่อสร้างแรงดันให้อากาศอบแห้งที่จะถูกกระแสน้ำไหลลงมาให้ไหลขึ้นสู่ด้านบนท่ออบแห้ง แสดงดังรูปที่ 4.9

4.1.7 ถังลำเลียงข้าวเปลือก เป็นถังพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 22 cm สูง 25 cm

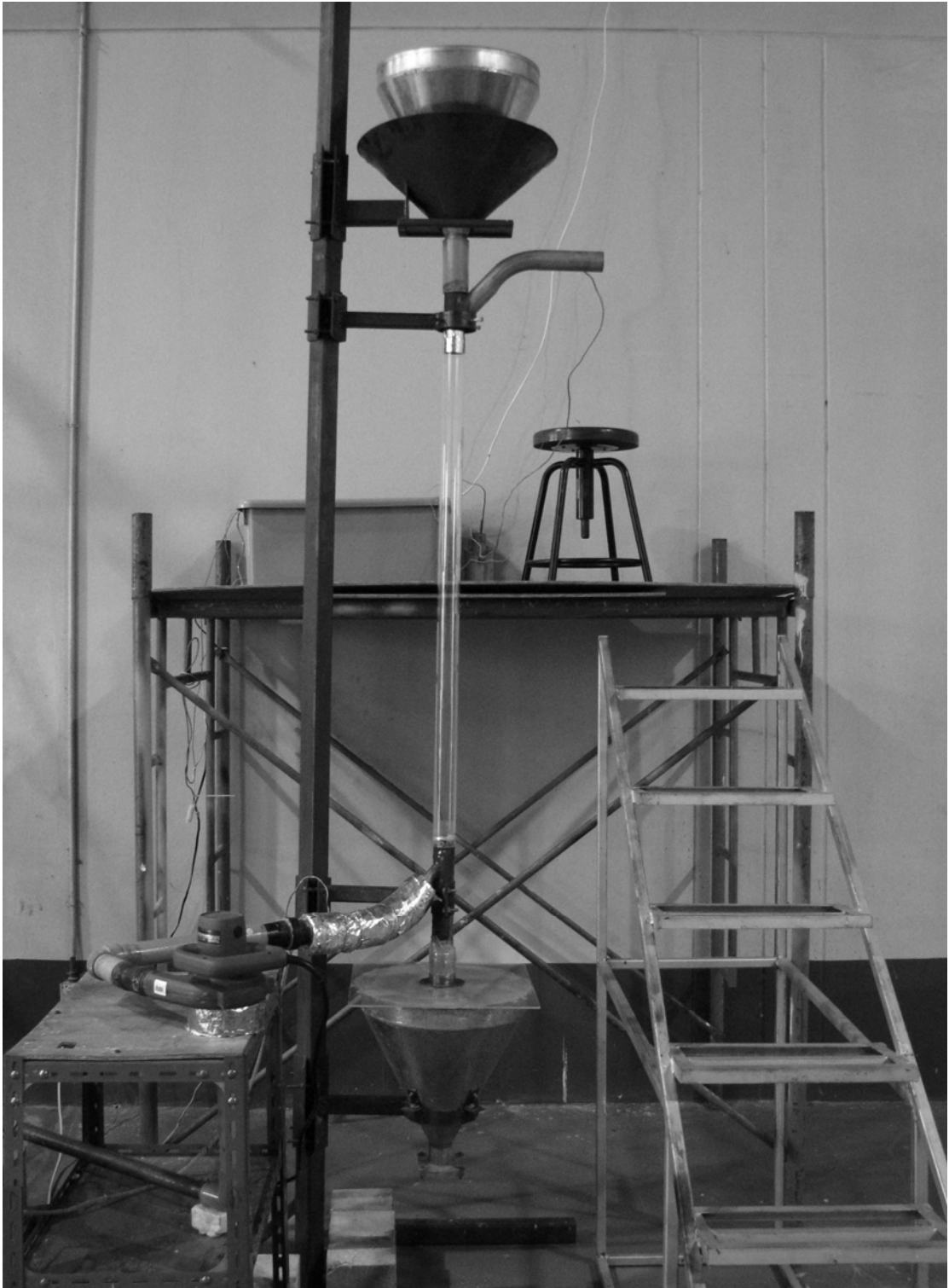
4.1.8 เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger) ของ Hioki รุ่น 8420-01 แสดงดังรูปที่ 4.10 ใช้สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ปลายทางออกท่อสามทาง และอุณหภูมิของข้าวเปลือกขณะพัก ตลอดกระบวนการอบแห้งทุก ๆ 5 sec.

4.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ

เครื่องเป่าลมที่ควบคุมความเร็วด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของ variac ดูดอากาศจากสิ่งแวดล้อมผ่านชุด orifice plate แล้วเข้าสู่เครื่องทำความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของ variac เช่นเดียวกัน จากนั้นอากาศอบแห้งจะเคลื่อนตัวผ่าน nozzle เพื่อเร่งความเร็วเข้าสู่ท่ออบแห้งที่วางตัวในแนวดิ่ง ข้าวเปลือกขึ้นที่ถูกลำเลียงจากถังพักข้าวเปลือกด้านล่างขึ้นสู่ถังพักข้าวเปลือกด้านบนด้วยถังลำเลียงข้าวเปลือก ข้าวเปลือกจะเคลื่อนตัวลงสู่ท่ออบแห้งอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วงโดยไม่มีการกีดขวางใด ๆ ข้าวเปลือกขึ้น และอากาศอบแห้งจะเคลื่อนที่สวนทางกัน (counter flow) ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน และความชื้นด้วยวิธีการพาแบบบังคับ (forced convection) อากาศอบแห้งที่ผ่าน nozzle จะมีความเร็วสูง และเกิดความปั่นป่วน ส่งผลให้เพิ่มระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้งประกอกับข้าวเปลือกที่เคลื่อนตัวลงมาอย่างอิสระจะมีความพรุนสูง พื้นที่สัมผัสอากาศอบแห้งมีมาก จึงคาดว่าจะช่วยลดระยะเวลาการอบแห้ง หรือทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น จากพฤติกรรมที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่สวนทางกับอากาศอบแห้งทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ของข้าวเปลือก มีค่าสูงเป็นผลให้อุณหภูมิข้าวเปลือกจะสูงเฉพาะในส่วนผิวเท่านั้น ซึ่งจะช่วยให้คุณภาพข้าวเปลือกทั้งความขาว และปริมาณข้าวตังมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.1 แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกหมุนอิสระที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.3 เครื่องเป่าลม (blower) ของ Makita รุ่น UB1100



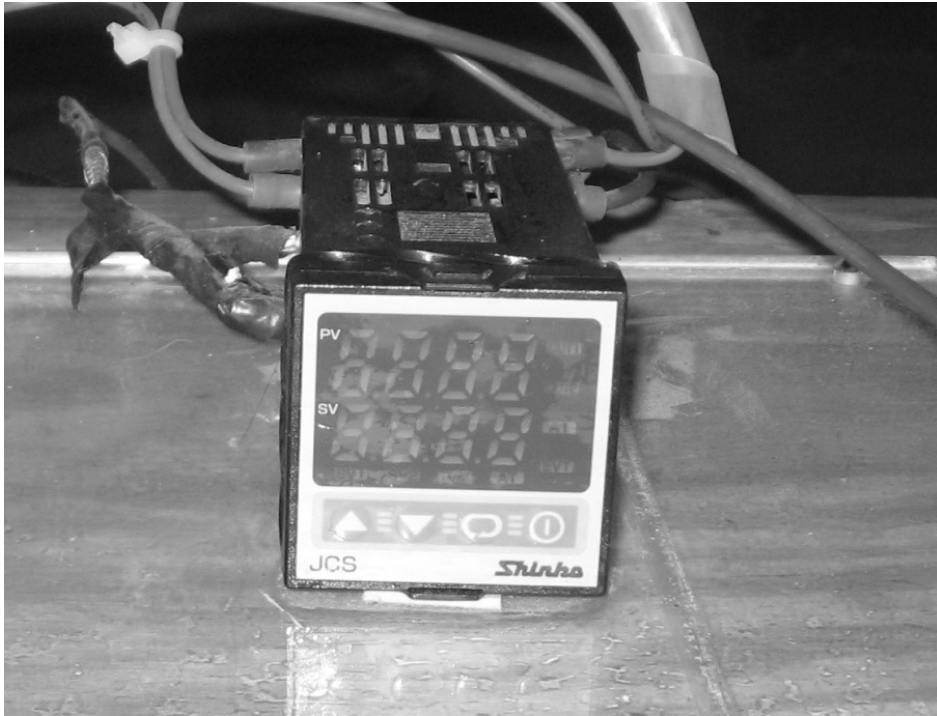
รูปที่ 4.4 Variac ของ yamabishi รุ่น s-260-10M



รูปที่ 4.5 Orifice plate และ U-tube manometer ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.6 เครื่องทำความร้อน



รูปที่ 4.7 เครื่องแสดงค่าและควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 4.8 ถังพักข้าวเปลือกด้านบน



รูปที่ 4.9 ถังพักข้าวเปลือกด้านล่าง



รูปที่ 4.10 เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger) ของ Hioki รุ่น 8420-01

บทที่ 5

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะอธิบายถึงวิธีดำเนินการวิจัย โดยจะแบ่งเป็นหัวข้อได้แก่ ขั้นตอนในการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น ขั้นตอนในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก ขั้นตอนในการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก ขั้นตอนในการวิเคราะห์คุณภาพข้าว และขั้นตอนการหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ ดังนี้

5.1 ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น

งานวิจัยนี้ใช้ข้าวพันธุ์ ชัยนาท 1 ที่เพาะปลูกในบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ทำการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวขนาด ในเดือนพฤษภาคม 2551 โดยนำข้าวเปลือกขึ้นที่ได้บรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท ถุงละ 3.3 kg และจัดเก็บในห้องแช่เย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 5°C (ชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อรา และรักษาคุณภาพข้าวเปลือก) ก่อนการทดลองจะนำถุงข้าวเปลือกออกจากห้องแช่เย็นและพักในสภาพอากาศแวดล้อมประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อมอย่างช้า ๆ โดยยังคงความชื้นเริ่มต้นและคุณภาพข้าวเปลือกที่ดี จากนั้นนำข้าวเปลือกไปคัดแยกเมล็ดเต็มออกจากเศษฟางและเมล็ดลีบด้วยเครื่องคัดแยก บรรจุข้าวเปลือกเมล็ดเต็มที่ได้ในถุงพลาสติกปิดสนิทไว้ในสภาพอากาศแวดล้อมอีกประมาณ 1 ชั่วโมง เพราะในระหว่างการคัดแยก ข้าวเปลือกจะต้องสัมผัสกับอากาศแวดล้อมที่ไหลผ่านช้า ๆ ระยะเวลาหนึ่ง จึงทำการพักเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของความชื้นในเมล็ดอย่างสม่ำเสมอ แล้วจึงเริ่มการทดลอง โดยข้าวเปลือกที่เตรียมได้มีน้ำหนัก 3 kg และมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 21% w.b.

5.2 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบมีการพักระหว่างรอบการอบแห้ง

ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก ประกอบด้วย

- 5.2.1 เปิดเครื่องเป่าลม (blower) และปรับให้มีค่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่ออบแห้งเป็น 1 m/s
- 5.2.2 เปิดเครื่องทำความร้อน (heater) และปรับอุณหภูมิให้มีค่า 150°C
- 5.2.3 เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger)
- 5.2.4 เทข้าวเปลือกขึ้นจากถุงพลาสติกในถังลำเลียงข้าวเปลือก
- 5.2.5 เก็บตัวอย่างเริ่มต้น 15 g ลงในถุงพลาสติกปิดสนิท
- 5.2.6 เสียบเทอร์โมคัปเปิลในกองข้าวเปลือกเพื่อวัดอุณหภูมิกองข้าวเปลือก

5.2.7 เทข้าวเปลือกจากถังลำเลียงในถังพักข้าวเปลือกด้านบนพร้อมกับเริ่มจับเวลา

5.2.8 รอจนกระทั่งข้าวเปลือกไหลจากถังพักด้านบนตกสวนกับอากาศอบแห้งจนหมดลงสู่ถังพักข้าวเปลือกด้านล่างแล้วเปิดลิ้นถังพักด้านล่างเพื่อให้ข้าวเปลือกไหลเข้าสู่ถังลำเลียง (เปิดฝาถังลำเลียงตลอดการพัก)

5.2.9 เสียบเทอร์โมคัปเปิลในกองข้าวเปลือกเพื่อวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากนั้นรอจนกระทั่งครบเวลาพัก 1 นาที แล้วจึงเทข้าวเปลือกจากถังลำเลียงข้าวเปลือกลงสู่ถังพักด้านบน

5.2.10 ทำการอบแห้งซ้ำเป็นวงรอบตามขั้นตอนที่ 5.2.7 ถึง 5.2.9 จนกระทั่งข้าวเปลือกได้ความชื้นประมาณ 14% w.b. จึงหยุดทำการทดลอง

5.2.11 ในขณะอบแห้งจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกทุก ๆ 10 ครั้งการเทข้าวเปลือก จำนวนตัวอย่างละ 15 กรัมในถุงพลาสติกปิดสนิทเพื่อนำไปหาค่าความชื้น

5.2.12 หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อนำไปทดสอบคุณภาพข้าวจำนวน 1 กิโลกรัมในถุงพลาสติกปิดสนิท

5.2.13 เปลี่ยนระยะเวลาพักเป็น 2 และ 4 นาที ตามลำดับ ทำตามขั้นตอนที่ 5.2.1-5.2.12

5.2.14 ปรับค่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่ออบแห้งเป็น 2 และ 3 m/s ตามลำดับ แล้วทำตามขั้นตอนที่ 5.2.2-5.2.13

5.2.15 ปรับค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็น 130, 100, 60, และ 40°C ตามลำดับ แล้วทำตามขั้นตอนที่ 5.2.1-5.2.14

5.2.16 นำตัวอย่างที่เก็บได้พักในอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 6 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกลดลง คลายความเครียดที่ผิวและเกิดการกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอตลอดเมล็ดข้าว

5.2.17 นำข้าวเปลือกไปวัดความชื้น และทดสอบคุณภาพข้าว รวมทั้งหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะต่อไป

หมายเหตุ : เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลา การทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40 และ 60°C จึงทดลองที่ระยะเวลาพัก 1 นาทีเท่านั้น

5.3 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่อง

เพื่อทดสอบคุณภาพข้าวเปลือกที่ได้จากการอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนอิสระที่ไม่มีระยะเวลาพักในกระบวนการ จึงจำลองการอบแห้งแบบต่อเนื่อง โดยให้ข้าวเปลือกกองตัวอยู่ในท่ออบแห้งตลอดเวลา และใช้ความเร็วอากาศอบแห้งเท่ากับความเร็วสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นจริงกับการทดลองก่อนหน้า (คล้ายว่าข้าวเปลือกตกด้วยแรงโน้มถ่วงตลอดเวลา) ดังนั้นจึงปรับเครื่องอบแห้งด้วยการติดตั้งตะแกรงที่ช่องทางออกท่ออบแห้งเพื่อกักให้ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้งตลอดเวลา โดยไม่มีระยะพักเกิดขึ้น (คล้ายเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด) และติดตั้งปลายท่ออบแห้งแบบมี

ตะแกรงที่ทางเข้าท่ออบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60, 100, 130 และ 150°C ใช้ค่าความเร็วเฉลี่ยในท่ออบแห้งเท่ากับความเร็วสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นในขณะอบแห้งปกติ การทดลองความเร็วข้าวเปลือกขณะตกในท่ออบแห้งที่ความเร็วอากาศเฉลี่ยค่าต่าง ๆ ได้แสดงผลการทดลองในภาคผนวก ข. ดังนั้นในกรณีนี้จึงใช้ค่าความเร็วเฉลี่ยในท่ออบแห้งเท่ากับ 4.5, 5.2 และ 5.93 m/s แทน 1, 2 และ 3 m/s โดยใช้ข้าวเปลือกเริ่มต้น 40 g ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกประกอบด้วย

- 5.3.1 เปิดเครื่องเป่าลม (blower) และปรับค่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่ออบแห้งเป็น 4.5 m/s
- 5.3.2 เปิดเครื่องทำความร้อน (heater) และปรับอุณหภูมิให้มีค่า 150°C
- 5.3.3 เก็บตัวอย่างเริ่มต้น 15 g ในถุงพลาสติกปิดสนิท
- 5.3.4 เทข้าวเปลือกขึ้นในท่ออบแห้ง ปิดปลายท่อทางเข้าด้วยตะแกรงพร้อมกับเริ่มจับเวลา
- 5.3.5 ใช้เวลาอบแห้ง (resident time) เท่ากับระยะเวลาอบแห้งจากผลการทดลองที่ 5.2
- 5.3.6 นำข้าวเปลือกออกจากท่ออบแห้ง พักข้าวเปลือกในตะแกรงเพื่อลดอุณหภูมิและระเหยความชื้นที่ผิว
- 5.3.7 ใช้เครื่องวัดความชื้นแบบความต้านทาน วัดความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย
- 5.3.8 หากข้าวเปลือกมีความชื้นสูงหรือต่ำเกินไป ให้ทำการทดลองใหม่ตามขั้นตอนที่ 5.3.1 โดยปรับระยะเวลาอบแห้งตามความเหมาะสม เพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ
- 5.3.9 หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อนำไปทดสอบความชื้นสุดท้าย 15 g และคุณภาพข้าวจำนวน 1 kg ในถุงพลาสติกปิดสนิท
- 5.3.10 ปรับค่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่ออบแห้งเป็น 5.2 และ 5.93 m/s ตามลำดับ แล้วทำตามขั้นตอนที่ 5.3.2-5.3.9
- 5.3.11 ปรับค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็น 130, 100 และ 60°C ตามลำดับ แล้วทำตามขั้นตอนที่ 5.3.1-5.2.10
- 5.3.12 นำตัวอย่างที่เก็บได้พักในอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 6 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกลดลง คลายความเครียดที่ผิวและเกิดการกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอตลอดเมล็ดข้าว
- 5.3.13 แล้วจึงนำข้าวเปลือกไปวัดความชื้นสุดท้าย และทดสอบคุณภาพข้าว

5.4 ขั้นตอนการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก

ในการหาค่าความชื้นข้าวเปลือกสามารถทำได้หลากหลายวิธีทั้งวิธีตรง และวิธีอ้อม สำหรับข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระจากการทดลองนี้จะใช้วิธีการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก 2 วิธีด้วยกันคือ เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน Grain Moisture Tester Riceter m401 เป็นการวัดค่าความชื้นวิธีอ้อม โดยเป็นเครื่องที่สะดวก ใช้เวลาน้อย

และเหมาะสำหรับการหาความชื้นของตัวอย่างที่มีจำนวนน้อย ในกรณีที่ตัวอย่างมีจำนวนมากจะใช้การหาค่าความชื้นโดยวิธีการใช้ตู้อบซึ่งเป็นการวัดค่าความชื้นวิธีตรง ซึ่งมีความถูกต้อง และสามารถใช้อ้างอิงได้ ในการทดลองนี้ใช้ตู้อบของ MCP HEK GmbH โดยนำข้าวเปลือกตัวอย่างเต็มเมล็ดไปไว้ในตู้อบอุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (AACC, 1995) ซึ่งแต่ละวิธีมีขั้นตอนดังนี้

5.4.1 เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน Grain Moisture Tester Riceter m401 มีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

- นำข้าวเปลือกตัวอย่างวางเรียงในถาดบรรจุตัวอย่าง โดยวางให้เต็มพื้นที่มากที่สุด และไม่ควรวางให้เมล็ดข้าวเปลือกซ้อนทับกัน
- เปิดเครื่องแล้วเลือกลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ โดยกดที่ปุ่ม paddy
- นำถาดบรรจุตัวอย่างใส่ในช่องด้านข้างของเครื่อง จากนั้นหมุนเกลียวลงมาจนสุดเพื่อให้สกรูปดข้าวเปลือกตัวอย่าง
- กดปุ่ม power รอประมาณ 2-3 sec. เครื่องจะแสดงค่าความชื้นของข้าวเปลือกตัวอย่างโดยแสดงค่าเป็น % w.b.

5.4.2 การหาค่าความชื้นโดยวิธีการใช้ตู้อบ มีขั้นตอนดังนี้

- นำกระป๋องเก็บตัวอย่างที่ทำจากอลูมิเนียมไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ขณะนำกระป๋องออกจากตู้อบใช้คีมคีบวางในถาดบรรจุอย่าใช้มือสัมผัสกระป๋อง)
- นำกระป๋องเก็บตัวอย่างไปวางให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้นประมาณ 30 min.
- ชั่งน้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่าง บันทึกค่าแล้วกด reset เพื่อให้ค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ จากนั้นใส่ตัวอย่างข้าวเปลือกเต็มเมล็ดในกระป๋องเก็บตัวอย่างประมาณ 15 g และบันทึกค่าน้ำหนักของข้าวเปลือกเปียก
- นำกระป๋องเก็บตัวอย่างเอาไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยไม่ต้องปิดฝา
- เมื่อครบเวลา ปิดฝากะป๋องเก็บตัวอย่างแล้วนำไปวางให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้นประมาณ 30 min.
- ปิดฝาแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ค่าที่ชั่งได้เป็นน้ำหนักของข้าวเปลือกแห้งรวมกับน้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่าง จากนั้นลบกับน้ำหนักของกระป๋องเก็บตัวอย่างจะได้เป็นน้ำหนักของข้าวเปลือกแห้ง
- นำค่ามาคำนวณหาค่าความชื้นข้าวเปลือก ตามสมการ (2.1)

5.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว

ในการวิเคราะห์คุณภาพข้าวจะต้องนำข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการอบแห้งไปขัดสีสำหรับการทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกตัวอย่างที่จะทำการขัดสีปริมาณ 100 g โดยมีขั้นตอนคือ การทำความสะอาด การกะเทาะเปลือก การขัดขาว และการคัดแยก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.5.1 การทำความสะอาด

เครื่องทำความสะอาดโดยใช้ตะแกรง และแรงลมเพื่อแยกสิ่งเจือปนกับเมล็ดข้าวเปลือก ตะแกรงจะถูกลงซ้อนกัน 3 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมีขนาดของรูตะแกรง 6.5, 3.0 และ 1.75 mm เรียงลำดับจากด้านบนลงด้านล่าง ที่ชั้นล่างสุดจะมีลมเป่าเพื่อแยกฝุ่นที่เบาว่าเมล็ดข้าวเปลือกเป็นขั้นสุดท้าย

5.5.2 การกะเทาะเปลือก

เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก (Rice Huller) ที่ใช้เป็นของห้างหุ้นส่วนจำกัด เจริญช่างสด มีความจุประมาณ 100 g โดยประกอบด้วยลูกกลิ้งโลหะหุ้มด้วยยาง 2 ลูกหมุนเข้าหากันด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันเพื่อให้เกิดแรงดึงแยกส่วนเปลือกออกจากเมล็ดด้านใน ซึ่งเมื่อผ่านการกะเทาะเปลือกจะได้ข้าวกล้อง และแกลบ ข้อควรระวังสำหรับการใช้เครื่องกะเทาะเปลือกคือ การตั้งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง ถ้าตั้งระยะชิดเกินไปจะทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกหักจำนวนมากเนื่องจากการบดทับของลูกกลิ้ง หากตั้งระยะห่างเกินไปจะทำให้ปริมาณข้าวกล้องที่ได้น้อยเนื่องจากเปลือกหลุดออกจากเมล็ดน้อย สำหรับการทดลองนี้ตั้งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งไว้ที่ประมาณ 1 mm โดยทำการทดสอบก่อนที่จะทดลองจริง และให้ปริมาณข้าวกล้องสูง

5.5.3 การขัดขาว

เครื่องขัดขาว (Rice Miller) ที่ใช้เป็นของห้างหุ้นส่วนจำกัด เจริญช่างสด มีความจุประมาณ 100 กรัม ข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะเปลือกจะนำมาขัดขาวซึ่งจะทำการขัดสีเอารำออก และได้ข้าวขาวกับรำออกมา หลักการทำงานของเครื่องขัดขาวจะประกอบด้วยแกนเหล็กขัดขาวที่มีใบมีดติดอยู่และวางตัวในแนวระดับ ด้านล่างของแกนมีตะแกรงขัดขาวที่มีรูลักษณะเป็นรูปวงรีเพื่อให้เมล็ดข้าวอยู่ภายในรู และใบมีดที่ติดกับแกนเหล็กทำการขัดเอารำออก

5.5.4 การคัดแยกปลายข้าว

เครื่องคัดแยกปลายข้าว (Cylinder Separator) ที่ใช้เป็นของห้างหุ้นส่วนจำกัด เจริญช่างสด มีความจุประมาณ 100 กรัม เครื่องคัดแยกปลายข้าวจะเป็นลักษณะทรงกระบอกกลวง โดยที่ผิวด้านในของทรงกระบอกจะเป็นหลุมรูปทรงกระบอกกระจายเต็มพื้นผิว เมื่อทำการหมุน และใส่ข้าวที่ผ่านการขัดขาวลงไป ข้าวเต็มเมล็ดที่มีน้ำหนักมากกว่าจะเคลื่อนตัวไปอยู่ภายในหลุมบริเวณด้านข้างของทรงกระบอก ส่วนปลายข้าวที่มีน้ำหนักเบากว่าเคลื่อนตัวออกมาทางช่องทางออก จะทำให้สามารถแยกข้าวต้น และปลายข้าวจากกันได้

5.5.5 การวิเคราะห์คุณภาพข้าว

เมื่อผ่านกระบวนการคัดแยกปลายข้าวเรียบร้อยแล้วจะนำข้าวขาวมาพิจารณาคุณภาพข้าวใน 2 กรณีคือ

- ปริมาณข้าวตัน สามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักข้าวตัน และปลายข้าวที่ได้จากการขัดสีของทุกกรณีแล้วหาเป็นค่าร้อยละเพื่อนำไปวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ตามภาคผนวก ก.4
- ความขาวของข้าว จะนำข้าวตันมาทำการวัดสีด้วยเครื่องวัดสีของ Minolta รุ่น CR-300 w/DP-301 โดยในกรณีศึกษาที่ใช้มาตรฐานสี $L^*a^*b^*$ ซึ่งความขาวแทนด้วยค่า $+L^*$ และความดำแสดงด้วยค่า $-L^*$ ค่าสูงสุดจะมีค่า 100 ทั้งด้านบวก และด้านลบ ค่า $+a^*$ แทนค่าสีแดง ส่วน $-a^*$ แทนค่าสีเขียว และ $+b^*$ แทนค่าสีเหลือง ส่วน $-b^*$ แทนค่าสีน้ำเงิน ซึ่งค่า a^* และ b^* มีค่าสูงสุด 60 ทั้งด้านบวก และด้านลบ ในการวิเคราะห์ความขาวของข้าวสารที่ได้จะใช้ค่าดัชนีความขาว (whiteness index, WI) เป็นตัวชี้วัด ซึ่งได้แสดงสมการการคำนวณตามภาคผนวก ก.5

5.6 ขั้นตอนการหาพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ

พลังงานปฐมภูมิจำเพาะหมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้งตลอดระยะเวลาการอบแห้งกับปริมาณน้ำที่ระเหยจากข้าวเปลือกในการอบแห้ง เป็นค่าที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากสามารถใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังสมการด้านล่าง ซึ่งสามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก.

$$E_p = \frac{\rho_a AV [(1 - W_a) C_a + C_v W_a] (T_{out} - T_{in})}{\left(\frac{w_i}{w_i} \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \right)} \cdot \left(60 N_{DP} \left(\frac{\bar{w}_i}{\dot{m}_p} \right) \right) \quad (5.1)$$

5.7 ขั้นตอนการหาค่าพลังงานรวมจำเพาะ

ค่าพลังงานรวมจำเพาะเป็นผลรวมระหว่างพลังงานปฐมภูมิจำเพาะกับพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ โดยค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะหาได้จากพลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องทำความร้อนของเครื่องอบแห้งตามสมการ (5-1) ขณะที่ค่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลักคือพลังงานขับพัดลมและพลังงานขับกะพ้อลำเลียง ซึ่งในงานวิจัยนี้วิเคราะห์หาค่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะทั้ง 2 ส่วนในรูปกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ขับเคลื่อน สามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก.

5.8 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยบัณฑิตศึกษาศาखाวิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

5.9 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ประกอบด้วย

- เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ
- เครื่องวัดความเร็ว ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของ Testo 445
- Orifice plate และ U-tube manometer
- เครื่องวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ Metrix รุ่น PX 110
- เครื่องคอมพิวเตอร์
- เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger) ของ Hioki รุ่น 8420
- นาฬิกาจับเวลา
- เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน Grain Moisture Tester Riceter m401
- ตู้อบความร้อน MCP HEK GmbH
- เครื่องทำความสะอาดด้วยตะแกรง และแรงลม
- เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก (Rice Huller)
- เครื่องขัดข้าว (Rice Miller)
- เครื่องคัดแยกปลายข้าว (Cylinder Separator)
- เครื่องวัดสีข้าวสารของ Minolta รุ่น CR-300 w/DP-301

5.10 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เพาะปลูกในบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ทำการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวขนาด ในเดือนพฤษภาคม 2551

5.11 การเก็บรวบรวมข้อมูล

จัดทำเป็นตาราง ประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

- แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง อุณหภูมิเฉลี่ยและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอากาศแวดล้อม
- อุณหภูมิและความเร็วของอากาศภายในท่ออบแห้ง
- ความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ยขณะมีอากาศไหลสวนทาง

- อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยระดับที่ความชื้นและความเร็วอากาศต่าง ๆ
- ระยะเวลารวมในท่ออบแห้ง (resident time) และอัตราอบแห้งเฉลี่ย
- พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ พลังงานหุติยภูมิจำเพาะ และพลังงานรวมจำเพาะ
- อุณหภูมิสูงสุดของข้าวเปลือก ปริมาณข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าวสาร

5.12 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองจะถูกรวบรวม และวิเคราะห์ แล้วนำเสนอในรูปแบบของตาราง และรูปภาพ ที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอุณหภูมิ ความเร็วอากาศอบแห้ง และระยะเวลาพัก ที่มีต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ พลังงานรวมจำเพาะ ปริมาณข้าวต้น และความขาวของข้าวที่ขัดสี

บทที่ 6

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ โดยใช้อุณหภูมิอบแห้งข้าวเปลือก 5 ค่า คือ 40, 60, 100, 130 และ 150°C และปรับความเร็วอากาศอบแห้ง 3 ค่าคือ 1, 2 และ 3 m/s ขณะที่ใช้ระยะเวลาพัก 1, 2 และ 4 นาที ผลการทดลองจะแสดงอัตราอบแห้งข้าวเปลือก อัตราสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้ง และคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

6.1 อัตราอบแห้งข้าวเปลือก

6.1.1 ลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก

การทดลองจะปรับค่าอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งให้คงที่ จากนั้นปรับระยะเวลาพักข้าวเปลือกเป็น 1, 2 และ 4 นาที แล้วจึงเปลี่ยนความเร็วอากาศอบแห้งเป็น 1, 2 และ 3 m/s ตามลำดับ จากนั้นจึงปรับอุณหภูมิกอากาศอบแห้งให้ครบทั้ง 5 ค่า โดยในกรณีอุณหภูมิกอากาศอบแห้ง 40 และ 60°C จะใช้ระยะเวลาพักเพียง 1 นาทีเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลาการทดลอง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.1-6.5 โดยแกนนอนเป็นจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านเข้าสู่ท่ออบแห้ง (ซึ่งแปรผันโดยตรงกับเวลาอบแห้ง) และแกนตั้งเป็นความชื้นข้าวเปลือก ณ ขณะนั้น

จากรูปจะเห็นว่าลักษณะการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิกอากาศอบแห้ง 40°C ดังรูปที่ 6.1 มีการลดลงของอัตราอบแห้งในช่วงท้ายของการอบ (กราฟเกิดการงอตัว) แต่ที่อุณหภูมิกอากาศอบแห้งสูงมากขึ้นพบว่าอัตราอบแห้งอยู่ในรูปเส้นตรงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิกอากาศอบแห้ง 130 และ 150°C ดังรูปที่ 6.4 และ 6.5 ซึ่งกราฟมีลักษณะการลดลงของความชื้นเป็นเส้นตรงในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง แสดงถึงอัตราอบแห้งที่คงที่ตลอดช่วงการศึกษา สอดคล้อง กับงานวิจัยของ ทวิช และคณะ (2549) ที่นำเสนอผลการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ โดยใช้อุณหภูมิกอากาศอบแห้งในช่วง 80-120°C ลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 19 ถึง 14% w.b. ผลการทดลองงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงอัตราอบแห้งที่คงที่ตลอดช่วงการศึกษาเช่นกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวแตกต่างอย่างเด่นชัดกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Poomsa-ad et al., 2002) ที่มีลักษณะการลดลงของความชื้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบและจะค่อยๆชะลอตัวลงในช่วงกลางและท้ายของการอบแห้ง โดยการลดลงของความชื้นเป็นลักษณะเอ็กซ์โพเนนเชียล ขณะที่พฤติกรรมของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบสเปาเต็คเบด (ฐานิตย์ และ สมชาติ, 2546) ที่มีการพัก

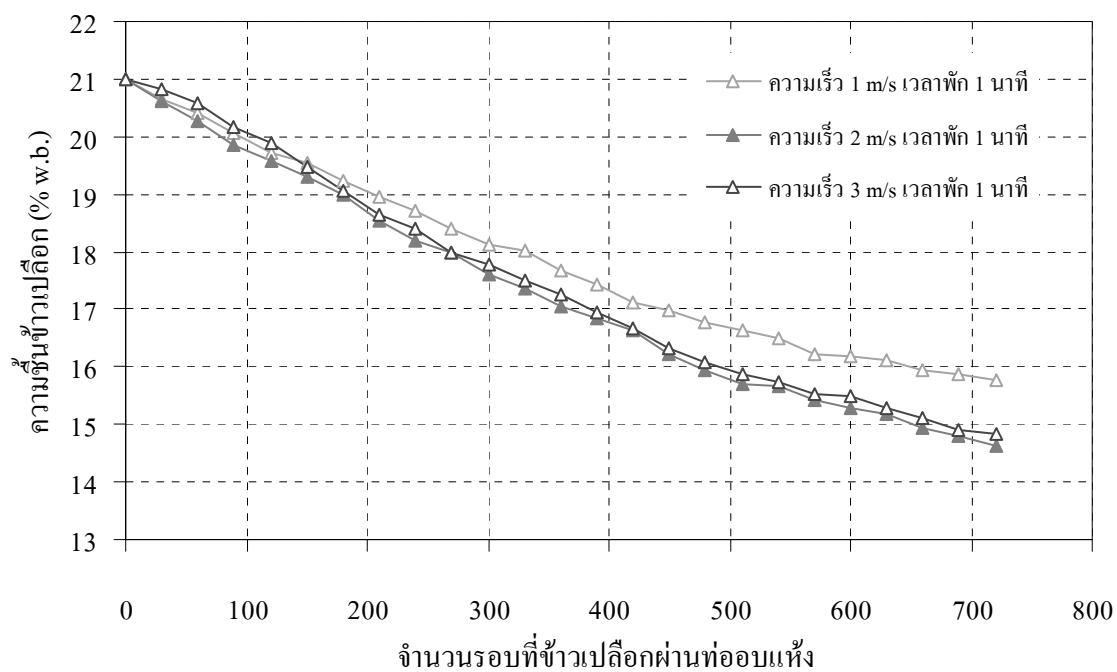
ข้าวเปลือกในส่วนของคาน์คัมเมอร์เป็นเวลาประมาณ 1 นาทีในแต่ละรอบของการอบแห้ง จะมีลักษณะการลดลงของความชื้นค่อนข้างคงที่เช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งที่ศึกษา

6.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ยของข้าวเปลือก

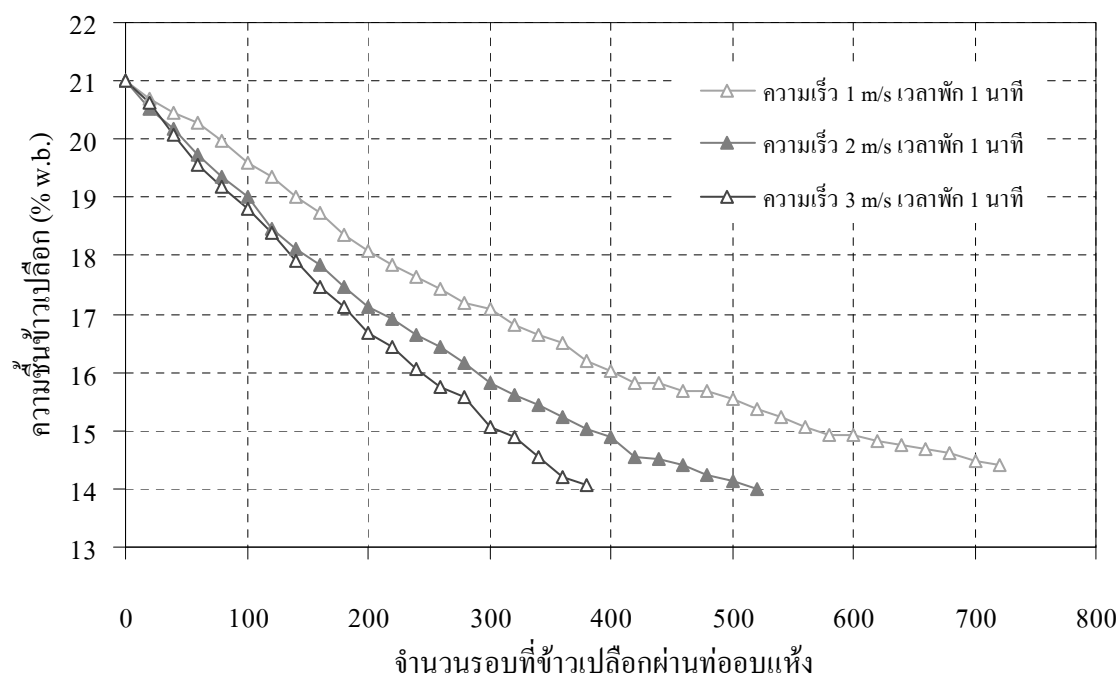
เนื่องจากเครื่องอบแห้งที่ศึกษามีลักษณะอัตราอบแห้งที่รวดเร็วแบบคงที่ตลอดช่วงดังที่นำเสนอในหัวข้อ 6.1.1 ดังนั้นเพื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราอบแห้งเทียบกับปัจจัยอื่น ๆ จึงนำข้อมูลผลการทดลองในหัวข้อ 6.1.1 มาวิเคราะห์ในรูปอัตราอบแห้งเฉลี่ย (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก.) ดังแสดงในรูปที่ 6.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มอัตราอบแห้งเฉลี่ยอย่างชัดเจน โดยเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นอัตราอบแห้งเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นในทุกความเร็วอากาศอบแห้ง เช่นในกรณีช่วงอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40-150°C ที่ระยะเวลาพักข้าวเปลือก 1 นาที ช่วงอัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มจาก 0.0112-0.0593, 0.0160-0.0967 และ 0.0161-0.1353 (% w.b./sec) ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2 และ 3 m/s ตามลำดับ ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งเฉลี่ยได้ถึง 5.29, 6.04 และ 8.40 เท่าในกรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2 และ 3 m/s ตามลำดับ

การเพิ่มขึ้นของอัตราอบแห้งตามอุณหภูมิสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากอัตราการแพร่ของความชื้นจากในเมล็ดสู่ผิวข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นตามสมการ Fick's law of diffusion ดังที่ได้แสดงในสมการ (2.10) ของบทที่ 2 โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามสมการดังกล่าวเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิเมล็ดเป็นหลัก ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิเมล็ดขณะอบแห้งสูงมากขึ้นตามไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จึงมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความชื้นภายในเมล็ดสามารถแพร่มาสู่ผิวได้ง่ายและมีปริมาณมากกว่า ทำให้ข้าวเปลือกสามารถคายความชื้นในแต่ละรอบการอบแห้งได้มากยิ่งขึ้น อัตราอบแห้งเฉลี่ยจึงสูงขึ้น

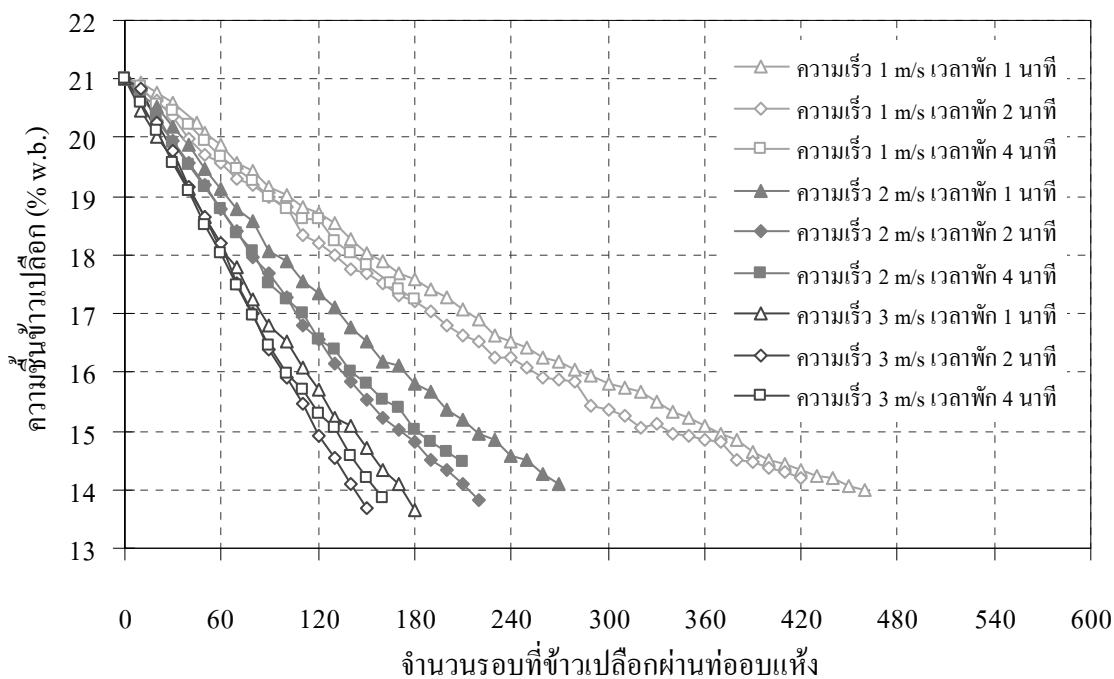
อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศโดยรอบข้าวเปลือกมีค่าลดลง อากาศที่อุณหภูมิสูงจึงมีศักยภาพในการดึงความชื้นจากผิวข้าวเปลือกได้มากกว่าอากาศที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบกับการที่ข้าวเปลือกไหลในท่ออบแห้งด้วยแรงโน้มถ่วงอย่างอิสระ โดยไม่มีการขวางการไหลจึงทำให้มีความพรุนสูง และพื้นที่สัมผัสอากาศมาก การถ่ายเทความชื้นที่ผิวข้าวเปลือกจึงเกิดขึ้นโดยง่าย เมื่อความชื้นที่ผิวข้าวเปลือกลดลงจึงเกิดความแตกต่างของระดับความชื้นที่ผิวข้าวเปลือก และภายในเมล็ดข้าวเปลือก (moisture gradient) ความชื้นที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวเปลือกก็จะเคลื่อนตัวมาแทนที่



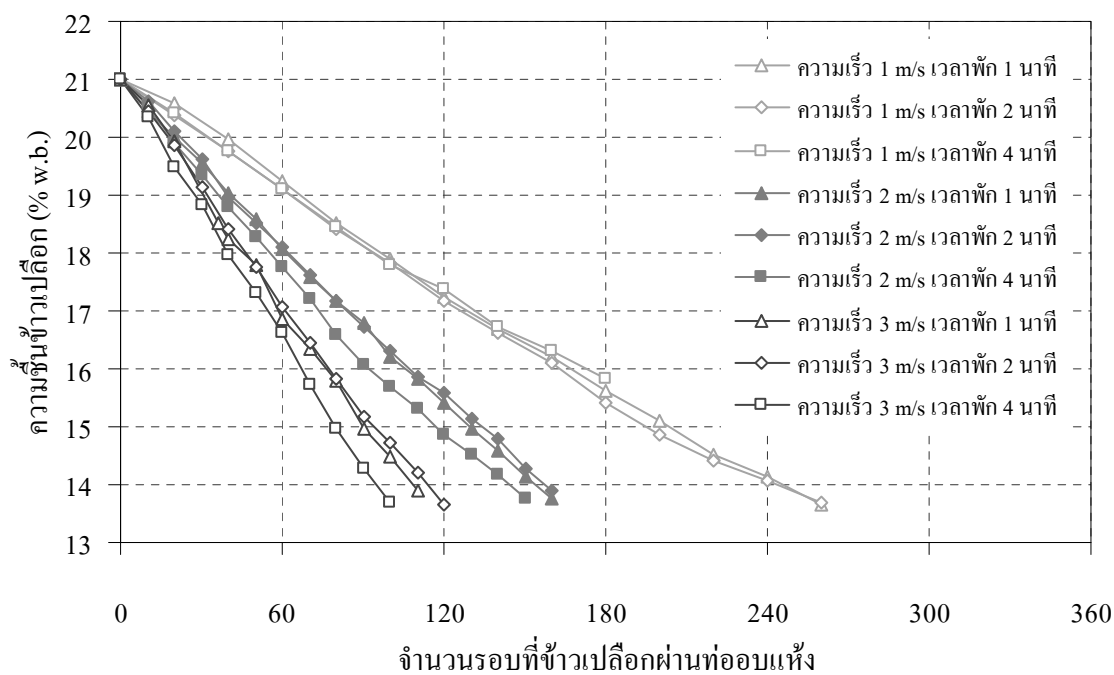
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40°C



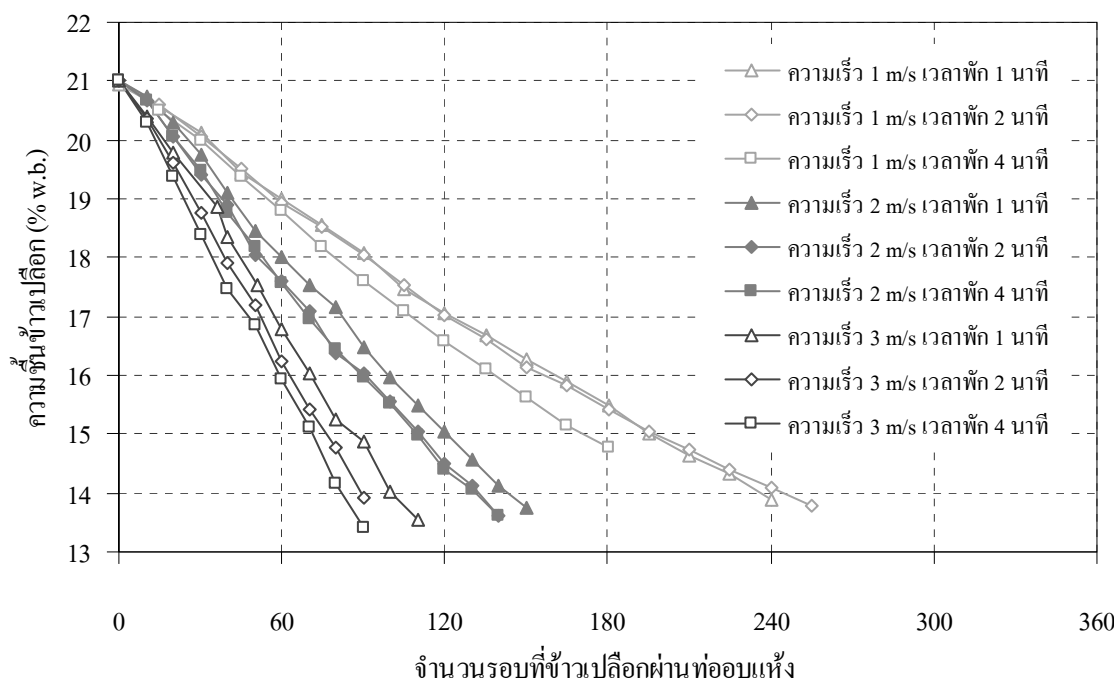
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C



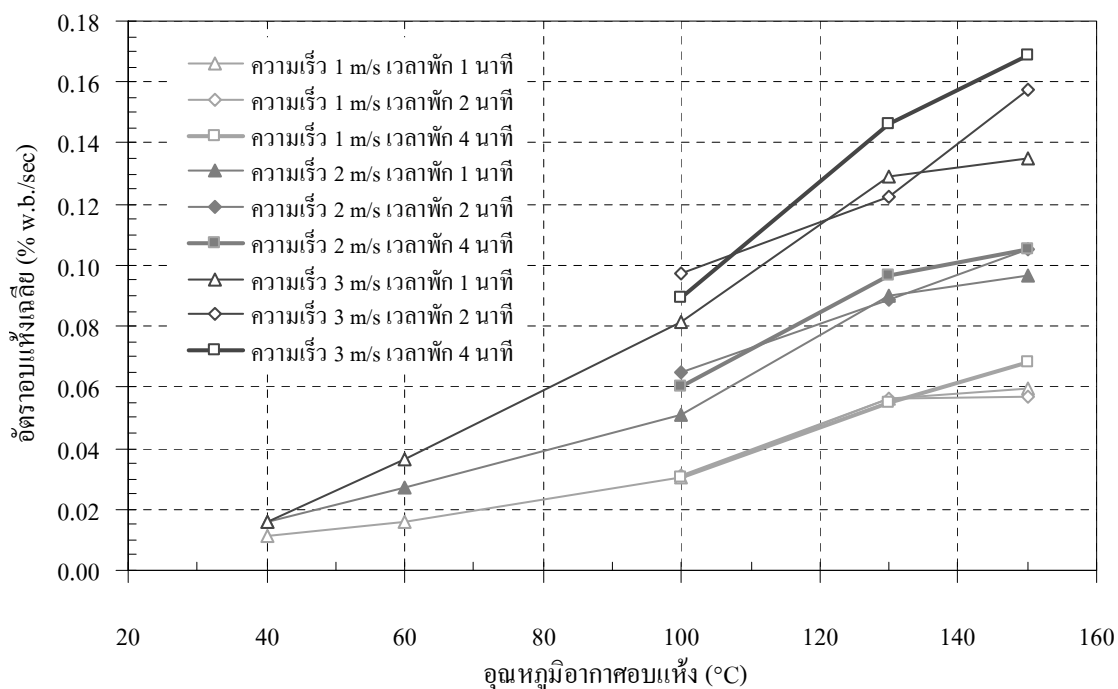
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C



รูปที่ 6.6 ผลของระยะพัก อุณหภูมิ และความเร็วอากาศอบแห้งต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย

6.1.3 ผลกระทบของความเร็วจานอบแห้งต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ยของข้าวเปลือก

เมื่อพิจารณาผลกระทบของความเร็วจานอบแห้งตามรูปที่ 6.6 พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วจานสูงขึ้นสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งเฉลี่ยได้มากเช่นเดียวกัน ซึ่งแนวโน้มเป็นไปเช่นเดียวกับงานวิจัยของเกรียงไกร (2551) ซึ่งได้อธิบายว่า ความเร็วจานอบแห้งที่สูงขึ้นสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้เนื่องจาก การแลกเปลี่ยนความร้อน และความชื้นที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นลักษณะการพาแบบบังคับ (forced convection) และเนื่องจากเครื่องอบแห้งนี้เป็นแบบการไหลสวนทางจึงทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างเมล็ดข้าวกับอากาศอบแห้งมีค่าสูง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และความชื้นมีค่าสูงขึ้น เพราะค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่าความเร็ว คือ

$$\text{การถ่ายเทความร้อน} \quad \text{Nusselt number} : \quad \text{Nu} = f(\text{Re}^a, \text{Pr}^b)$$

$$\text{การถ่ายเทมวล} \quad \text{Sherwood number} : \quad \text{Sh} = f(\text{Re}^a, \text{Sc}^b)$$

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความชื้นลดลงได้อย่างรวดเร็วเพิ่มขึ้น

แต่เนื่องเพราะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ำนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนจากภายในเมล็ดมีค่าต่ำ จึงส่งผลให้การส่งผ่านความชื้นที่อุณหภูมิเมล็ดข้าวต่ำอาจเกิดการอื่นด้วยกระบวนการแพร่จากภายในเมล็ด (diffusion limited transfer) เช่นในกรณี อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40°C ระยะเวลาพักข้าวเปลือก 1 นาที อัตราอบแห้งเฉลี่ยสามารถเพิ่มขึ้นจาก 0.0112 เป็น 0.0160 (% w.b./sec) เมื่อเพิ่มความเร็วจานอบแห้งจาก 1 เป็น 2 m/s แต่เมื่อเพิ่มความเร็วจานอบแห้งจาก 2 เป็น 3 m/s อัตราอบแห้งเฉลี่ยที่ทำได้มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.0160 และ 0.0161 (% w.b./sec) ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการอื่นด้วยกระบวนการแพร่ดังที่กล่าวข้างต้น

6.1.4 ผลกระทบของระยะเวลาพักต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ยของข้าวเปลือก

ผลของระยะเวลาพักกรณี 1, 2 และ 4 นาที ตามรูปที่ 6.6 พบว่าการพักสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งเฉลี่ยได้ในบางกรณี (โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง) แต่ในบางกรณีการพักก็ไม่เพิ่มอัตราอบแห้ง และยังเกิดกรณีลดอัตราอบแห้งอีกด้วย ถึงแม้ว่าระดับการเพิ่มอัตราอบแห้งเนื่องจากการพักจะไม่มากเช่นเดียวกับความเร็วและอุณหภูมิ แต่เนื่องจากการพักสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งได้โดยไม่ต้องเพิ่มการใช้พลังงานจึงถือได้ว่าการพัก อาจเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

เมื่อพิจารณาผลของการพักตามรูปที่ 6.6 เทียบกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ว่าระยะเวลาการพักที่มากกว่าจะส่งผลให้อัตราอบแห้งสูงกว่า พบว่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C ที่ระยะเวลาพัก 2 นาทีมีอัตราอบแห้งสูงกว่าการพักที่ระยะเวลา 4 นาที แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งมากขึ้นเป็น 130 และ 150°C พบว่าระยะเวลาพัก 4 นาทีมีผลต่อการเพิ่มอัตราอบแห้งอย่างชัดเจนมากขึ้น และมีอัตราอบแห้งที่รวดเร็วกว่าการพัก 2 นาที แสดงว่าอุณหภูมิมิมีผลแทรกซ้อนกับระยะเวลาพัก

โดยอุณหภูมิที่ศึกษาคืออุณหภูมิของข้าวเปลือก จากผลการเก็บค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกตลอดช่วงการอบแห้งพบว่าในทุกกรณีศึกษาของข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้งและอัตราเพิ่มอุณหภูมิจะลดลงจนประมาณได้ว่าข้าวเปลือกมีอุณหภูมิกงที่ค่าหนึ่งไปตลอดการอบแห้ง โดยระยะเวลาที่ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิกงที่นี้เป็นระยะเวลาส่วนใหญ่ของการอบแห้ง (ประมาณ 75% ของระยะเวลาอบแห้งรวม) เมื่อนำผลอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแต่ละกรณีอบแห้งมาเปรียบเทียบกัน ได้ดังรูปที่ 6.7, 6.8 และ 6.9 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาพักที่นานมากขึ้นทำให้อุณหภูมิกงข้าวเปลือกสูงสุดลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งค่าอุณหภูมิเมล็ดข้าวมีผลต่ออัตราการแพร่ไอน้ำภายในเมล็ด เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ไอน้ำในเมล็ดจะแปรผันตามอุณหภูมิของเมล็ดนั่นเอง (Poomsa-ad et al., 2002), (ฐานิตย์ และ สมชาติ, 2546) นอกจากนี้ยังมีผลต่อการเปลี่ยนสภาพโครงสร้างของเมล็ดข้าวอีกด้วย

จากรูปที่ 6.8 และ 6.9 อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C ที่ระยะเวลาพัก 2 และ 4 นาที เมล็ดมีอุณหภูมิกงอยู่ในช่วง $37-43^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอาจเป็นช่วงอุณหภูมิกงเปลี่ยนแก้ว (glass transition temperature, T_g) ที่มีการเปลี่ยนสภาพโครงสร้างภายในเมล็ดพอลิ คือเปลี่ยนจากสภาพแก้ว (glassy state) ไปเป็นสภาพยาง (rubbery state), (Perdon, 1999) เหตุเพราะเมื่อโครงสร้างข้าวเปลือกเปลี่ยนเป็นสภาพยาง เมล็ดจะมีความหนาแน่นลดลงอย่างรวดเร็ว (ปริมาตรเพิ่มขึ้น) จึงทำให้ความสามารถในการแพร่ความชื้นจากภายในเพิ่มขึ้น (Cnossen et al., 2002) ทำให้อัตราการแพร่ของความชื้นในกรณีการพัก 2 นาที (อาจอยู่ในสภาพยาง) สูงกว่ากรณีการพัก 4 นาที (อาจอยู่ในสภาพแก้ว) เป็นอย่างมาก แม้ว่าความชื้นจากภายในจะมีเวลาในการเคลื่อนที่มาสู่ผิวมากกว่าก็ตาม ดังนั้นกรณีการพัก 2 นาที ข้าวเปลือกที่เข้าสู่ที่อบแห้งจึงมีปริมาณความชื้นที่ผิวมากกว่า อัตราอบแห้งที่ได้จึงมีค่าสูงกว่านั่นเอง สำหรับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ใช้ในการวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการสำรวจวัดช่วงอุณหภูมิกงที่แน่ชัด ดังนั้นช่วงอุณหภูมิกงที่นำเสนอจึงเป็นเพียงการประมาณจากผลการทดลองและงานวิจัยข้าวพันธุ์อื่น (Sun et al., 2002)

รูปที่ 6.10 นำเสนออุณหภูมิกงเมล็ดข้าวตลอดช่วงระยะเวลาอบแห้ง ในกรณีอบแห้งด้วยอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 100°C ที่มีความเร็ว 3 m/s โดยพล็อตเทียบกับเส้น glass transition temperature, T_g ของข้าวเปลือกพันธุ์ Drew (Sun et al., 2002) จากรูปพบว่ากรณีระยะเวลาพัก 1 และ 2 นาที โครงสร้างข้าวส่วนใหญ่เป็นสภาพคล้ายยางตลอดช่วงการอบแห้ง แต่ในกรณีระยะเวลาพัก 4 นาที ส่วนใหญ่มีสภาพคล้ายแก้วหรือซ้อนทับกับช่วงเปลี่ยนสภาพ ด้วยสภาพขณะอบแห้งดังที่กล่าว กรณีระยะเวลาพัก 2 นาที จึงมีอัตราการแพร่ภายในที่สูงกว่า กรณีระยะเวลา 4 นาที จึงทำให้แม้ระยะเวลาในการเคลื่อนตัวของความชื้นขณะพักจะมากกว่า แต่ปริมาณความชื้นที่บริเวณผิวกลับน้อยกว่า อัตราอบแห้งในกรณีการพักที่ 4 นาทีจึงมีค่าน้อยกว่ากรณีการพักที่ 2 นาที ซึ่งในกรณี

อบแห้งด้วยอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 100°C ที่มีความเร็ว 2 m/s ดังแสดงในรูปที่ 6.11 ก็สามารถอธิบายได้ในทางเดียวกัน

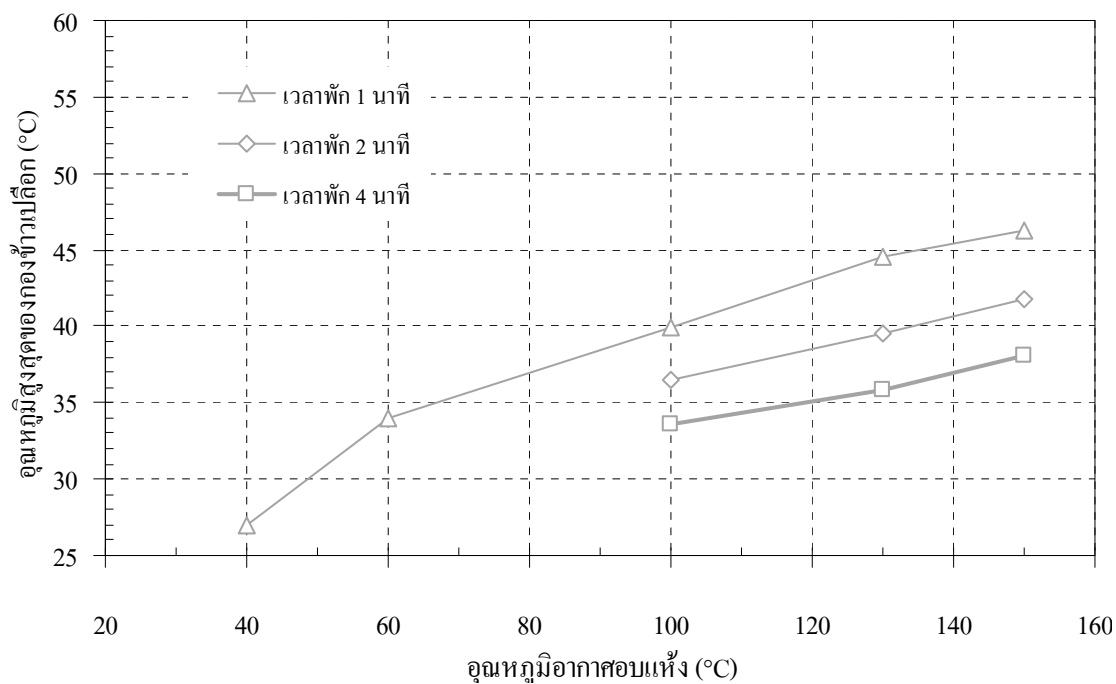
ลำดับต่อมาเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็น 130 และ 150°C พบว่าอัตราอบแห้งเมื่อมีการพัก 4 นาที มากกว่ากรณี 2 นาที ก็เนื่องจากว่าที่ระดับนี้อุณหภูมิข้าวเปลือกในทุกกรณีได้สูงขึ้นเกินช่วงวิกฤตแล้ว ทำให้เปลี่ยนสภาพโครงสร้างจนอยู่ในสถานะเดียวกันแล้ว ดังนั้นการพักที่นานขึ้นจึงช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งแม้ว่าอุณหภูมิเมล็ดข้าวจะต่ำกว่าก็ตาม เพราะการพักที่นานขึ้นเป็นการเพิ่มระยะเวลาให้เมล็ดแพร่ความชื้นจากภายในออกมาสู่ผิวเพื่อรอการลดความชื้นในรอบต่อไปได้มากกว่า

รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกและระยะเวลาพัก ที่มีต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย ซึ่งโดยภาพรวมพบว่าที่อุณหภูมิข้าวเปลือกเท่ากันระยะเวลาการพักที่มากขึ้นมีแนวโน้มทำให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงขึ้นตามไปด้วย

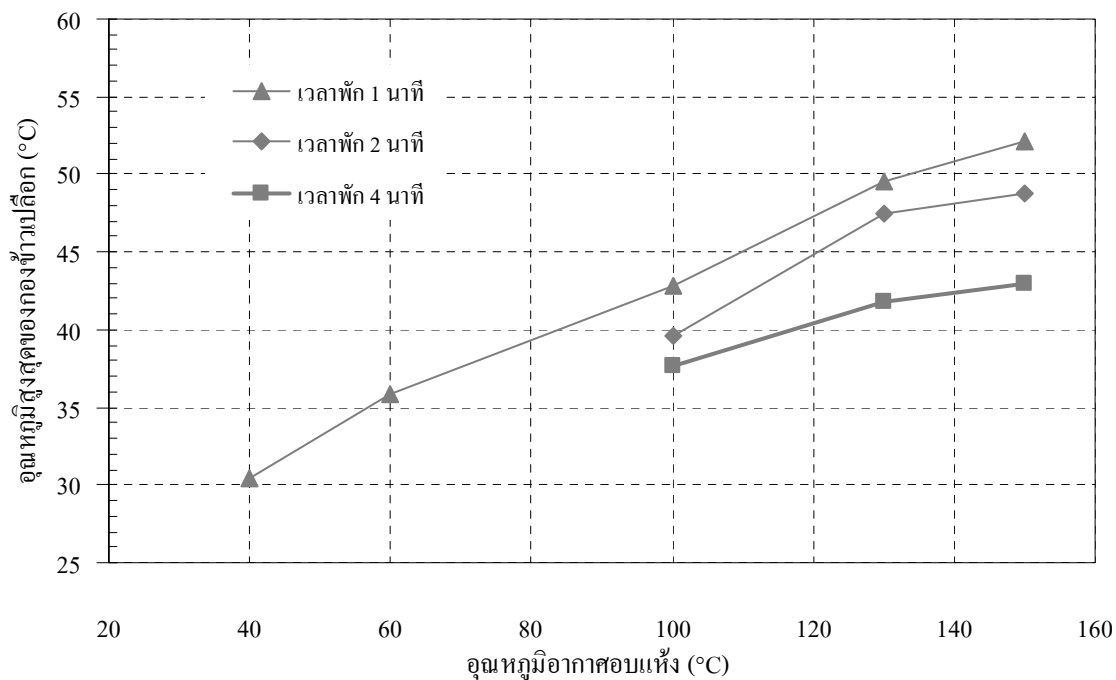
จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มอัตราอบแห้งด้วยการพักนั้นนอกจากการเพิ่มระยะเวลาพักแล้ว ต้องควบคุมอุณหภูมิเมล็ดให้อยู่ในระดับที่สูงด้วย เพื่อให้อัตราการแพร่ภายในเมล็ดมีระดับที่สูงเกินค่าอุณหภูมิ T_g ตลอดการอบแห้ง

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบชั๊ก แต่ในสภาวะการใช้งานจริงของเครื่องอบแห้งที่ทำงานอย่างต่อเนื่องจะมีการไหลเข้าของเมล็ดข้าวเปลือกสู่ถังพักขนาดใหญ่ตลอดเวลา ซึ่งน่าจะทำให้ระดับอุณหภูมิข้าวเปลือกในถังพักอยู่ในระดับที่สูงกว่าการทดลองนี้ อีกทั้งระยะเวลาการพักก็จะนานกว่า 4 นาที (อาจพักเป็นชั่วโมงในกรณีถังพักขนาดใหญ่มาก) ดังนั้นการทดสอบนี้จึงเป็นเพียงการแสดงแนวโน้มในห้องทดลองเท่านั้น ซึ่งอาจต่างจากความจริงของเครื่องขนาดใหญ่ในเชิงพาณิชย์

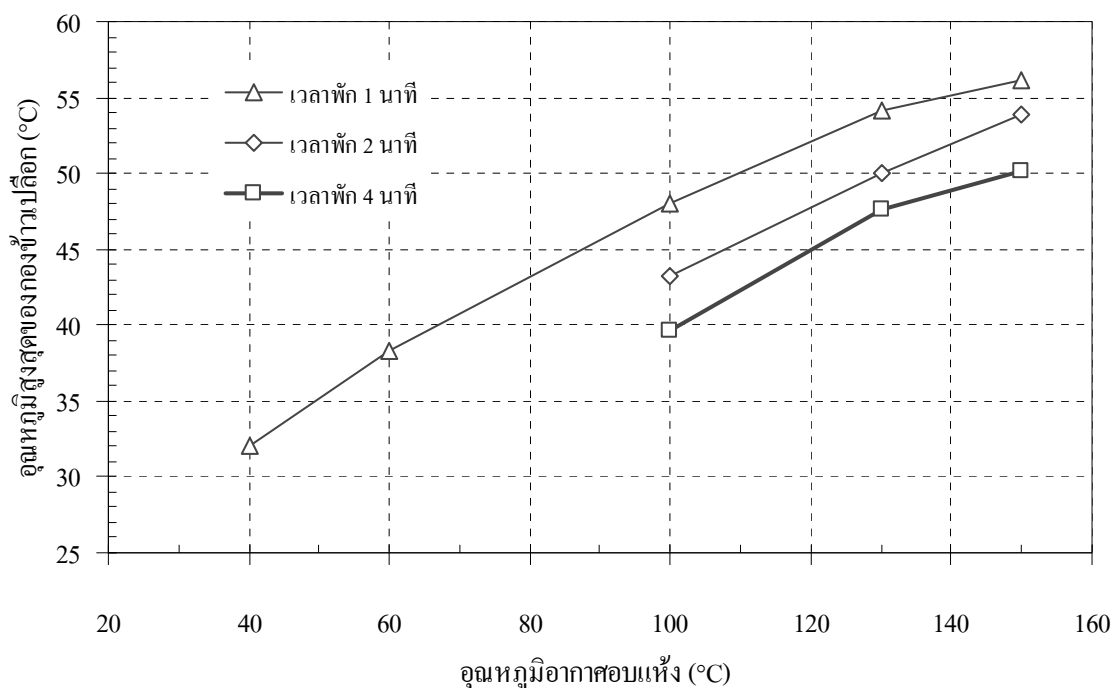
โดยสรุปแล้วผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความเร็วอากาศอบแห้ง อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก และระยะเวลาการพัก ที่มีค่ามากขึ้นล้วนส่งผลให้อัตราอบแห้งสูงขึ้น โดยความเร็วอากาศอบแห้งจะให้ผลมากที่สุดที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงเนื่องจากไม่เกิดการอันด้วยการแพร่ความชื้นภายในเมล็ดเมื่ออุณหภูมิเมล็ดต่ำ ส่วนการพักนั้นถ้าอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกสูงเกินกว่าช่วงอุณหภูมิ T_g การพักที่นานกว่าจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าเสมอ



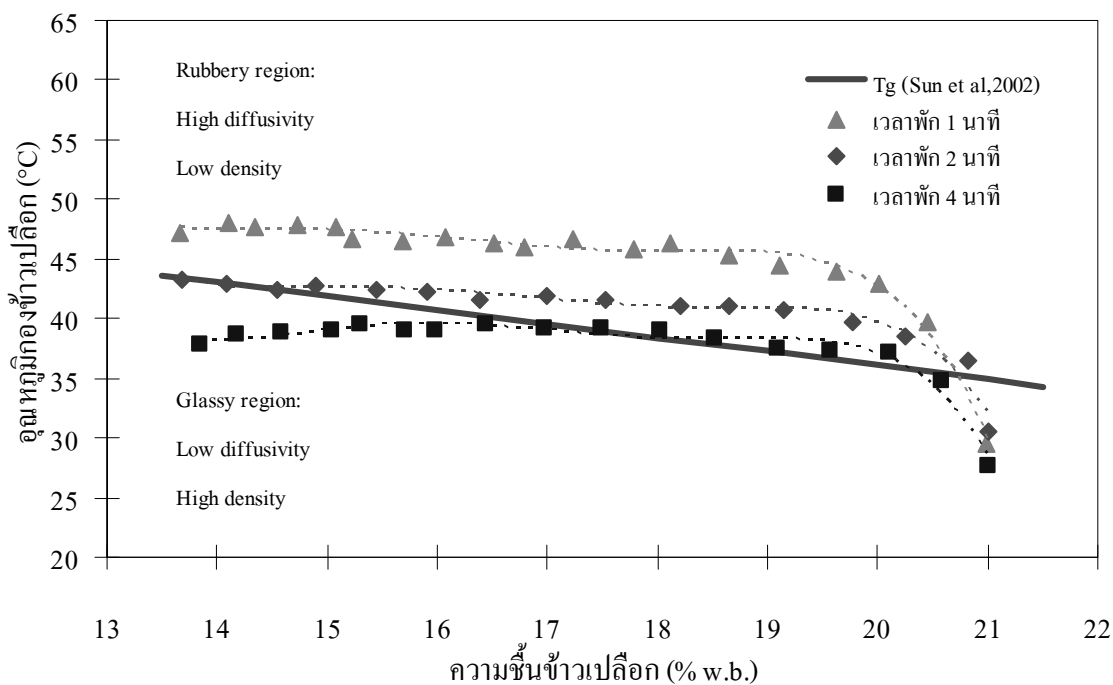
รูปที่ 6.7 อุณหภูมิสูงสุดของกอกข้าวเปลือก เมื่อใช้ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s



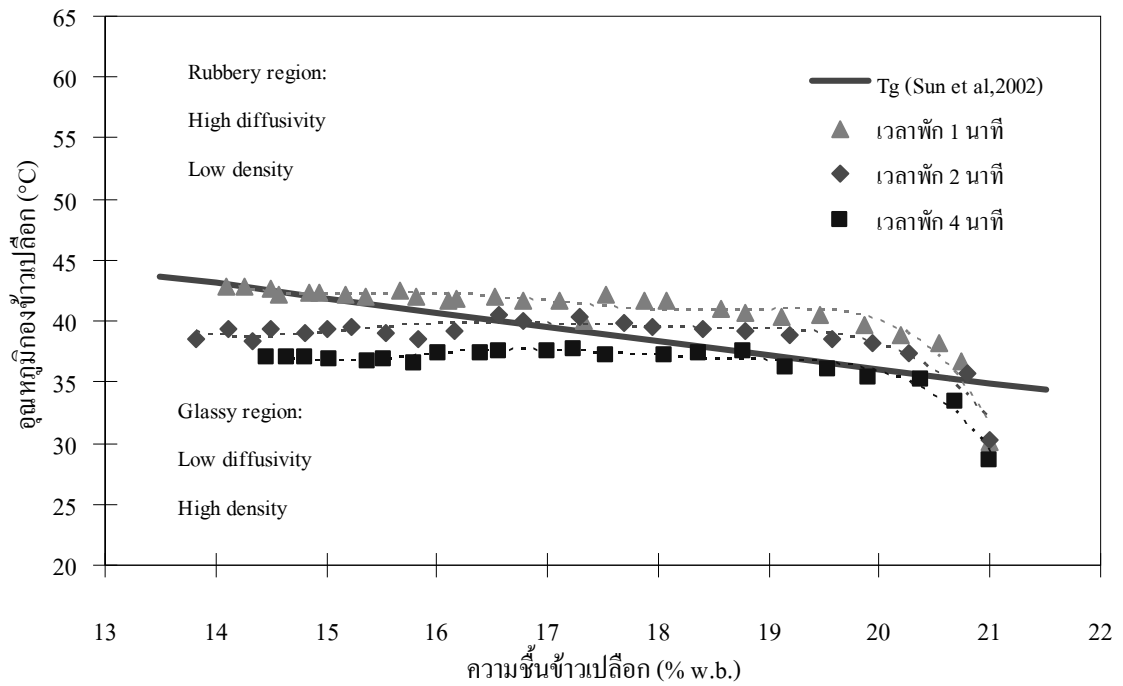
รูปที่ 6.8 อุณหภูมิสูงสุดของกอกข้าวเปลือก เมื่อใช้ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s



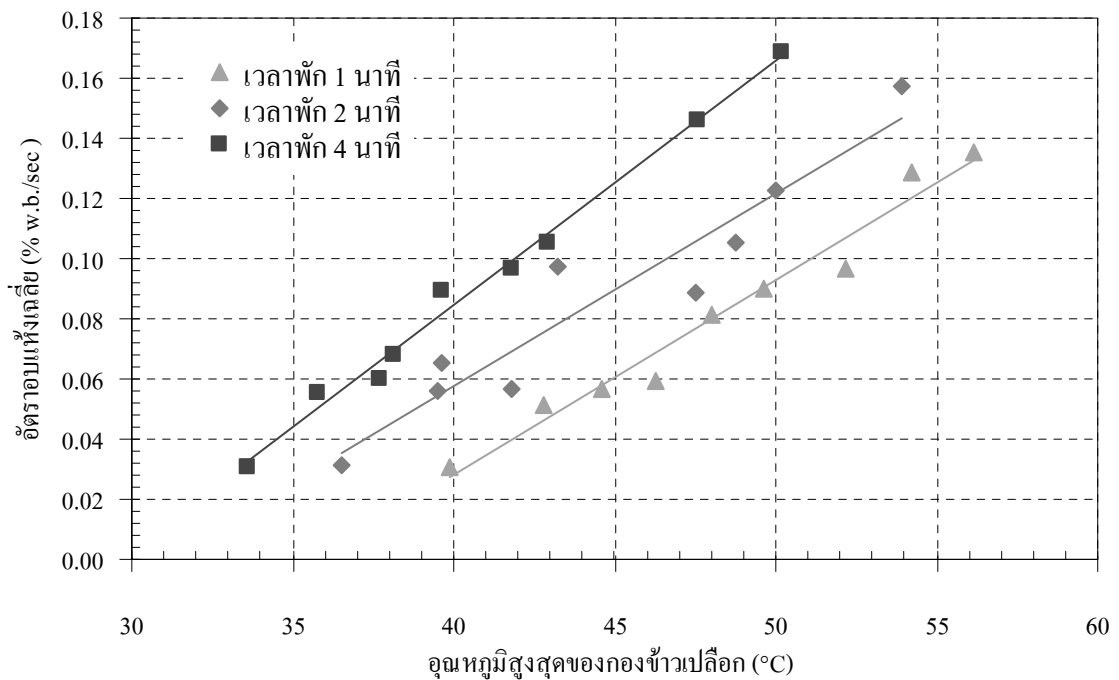
รูปที่ 6.9 อุณหภูมิสูงสุดของกึ่งแก้วเปลี่ยน เมื่อใช้ความเร็วอากาศรอบข้าง 3 m/s



รูปที่ 6.10 อุณหภูมิข้าวเปลือกขณะลดความชื้นเทียบกับค่า Glass transition temperature ที่อากาศรอบข้างอุณหภูมิ 100°C, ความเร็ว 3 m/s



รูปที่ 6.11 อุณหภูมิข้าวเปลือกขณะลดความชื้นเทียบกับค่า Glass transition temperature ที่อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 100°C, ความเร็ว 2 m/s



รูปที่ 6.12 ผลของระยะเวลาพักกับอุณหภูมิสูงสุดของกองข้าวเปลือก ที่มีต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย

6.2 อัตราสิ้นเปลืองพลังงานในเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกหล่นอิสระ

6.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ

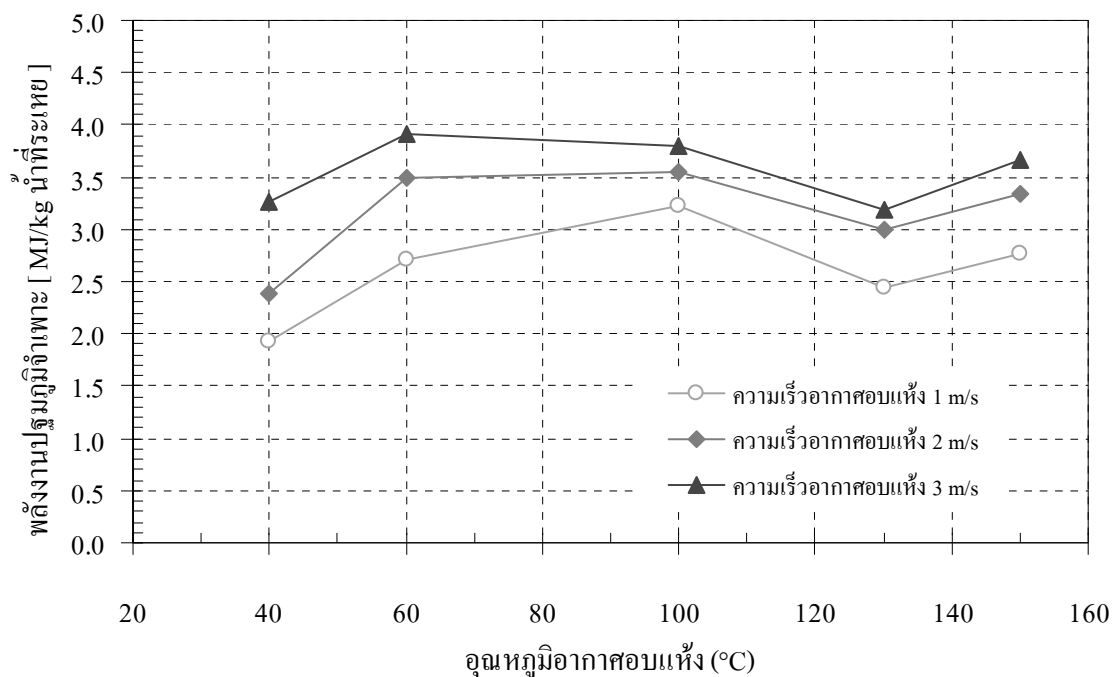
จากผลการทดลองดังในหัวข้อ 6.1.1 นำไปสู่พลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง ด้วยการคำนวณพลังงานความร้อนที่เครื่องทำความร้อนป้อนให้กับอากาศอบแห้ง ตามภาคผนวก ก.2 โดยพิจารณาช่วงเวลาที่ข้าวเปลือกถูกลดความชื้นจาก 21-14% w.b. ซึ่งรูปที่ 6.13 นำเสนอค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ ที่ระยะเวลาพัก 1 นาที

จากรูปที่ 6.13 พบว่าเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งสูงขึ้นจะใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะมากขึ้นตามไปด้วย แต่พลังงานที่เพิ่มมีลักษณะถดถอยเป็นบางช่วง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเกรียงไกร (2551) สำหรับผลของอุณหภูมิในแต่ละความเร็วอากาศนั้น เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานปฐมภูมิจำเพาะก็มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ก็มีลักษณะเป็นการเพิ่มที่ถดถอยในช่วง 60-100°C สำหรับในช่วง 100-130°C แนวโน้มกลับลดลง และเพิ่มขึ้นอีกในช่วง 130-150°C

ในภาพรวมระดับพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้ มีค่าอยู่ในช่วง 1.93-3.91 MJ/kg น้ำที่ระเหย จึงกล่าวได้ว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้ใช้พลังงานค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ ที่พบในวรรณกรรม อีกทั้งในช่วงการลดความชื้นที่พิจารณานี้ เป็นช่วงที่อัตราอบแห้งถดถอยซึ่งในวรรณกรรมส่วนใหญ่จะเป็นการอบในช่วงที่ความชื้นสูงกว่านี้ จึงทำให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงและคงที่ ซึ่งหากเครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกใช้ใน ช่วงความชื้นสูงกว่านี้ ก็อาจใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะต่ำกว่านี้ และหากที่อบแห้งยาวมากกว่านี้จะสามารถลดพลังงานปฐมภูมิจำเพาะได้อีกเนื่องจากท่อในระดับการทดลองนี้สั้นจึงทำให้ต้องทิ้งอากาศแห้งสู่บรรยากาศ ทั้งที่ยังมีศักยภาพในการอบแห้งได้อีกมาก

สำหรับการลดลงของพลังงานปฐมภูมิจำเพาะในช่วง 100-130°C เชื่อว่าเป็นเพราะอุณหภูมิเมล็ดข้าว (รูปที่ 6.7, 6.8 และ 6.9) อยู่เหนือช่วงอุณหภูมิ Tg (37-43°C) ทั้งหมดแล้ว จึงเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างภายในจากสภาพแก้ว (glassy state) ไปเป็นสภาพยาง (rubbery state) ซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มสูงขึ้นเป็นพิเศษ อัตราอบแห้งจึงสูงทำให้ลดการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะได้มากยิ่งขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.1

ที่อบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความยาวสั้น ดังนั้นความเร็วอาจเป็นปัจจัยแทรกซ้อนต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้ เนื่องจากเมื่อใช้อากาศที่มีความเร็วสูงขึ้น การสูญเสียศักยภาพอบแห้ง(พลังงาน) จะมากขึ้นตามไปด้วย เพราะปล่อยอากาศแห้งทิ้งไปมากกว่า ดังนั้นถ้าเป็นเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ ซึ่งท่อมีความยาว 5-10 m ความเร็วที่สูงขึ้นอาจให้ผลตรงข้าม



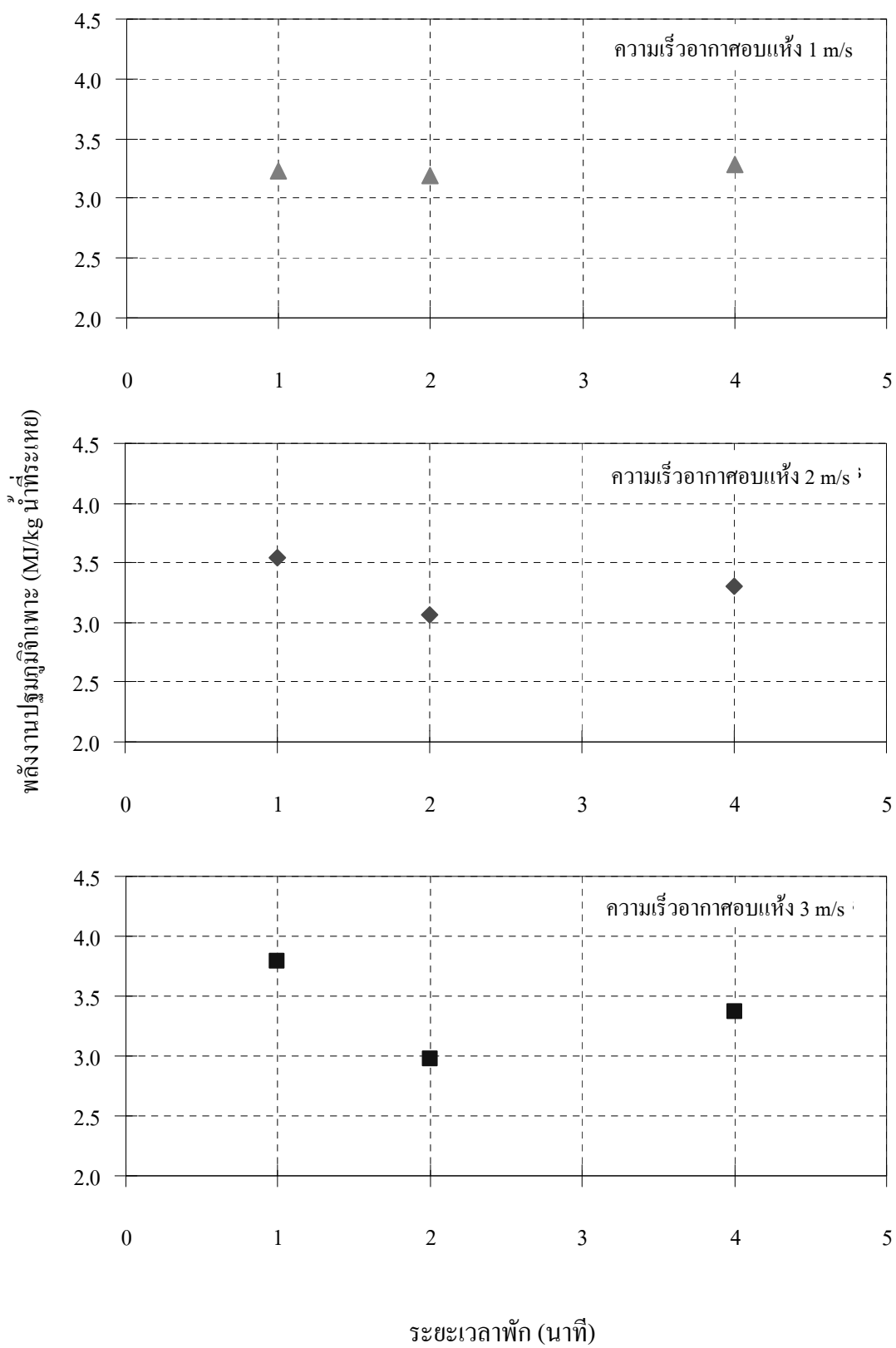
รูปที่ 6.13 พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ เมื่อใช้ระยะเวลาพัก 1 นาที

6.2.2 ผลกระทบของระยะเวลาพักต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ

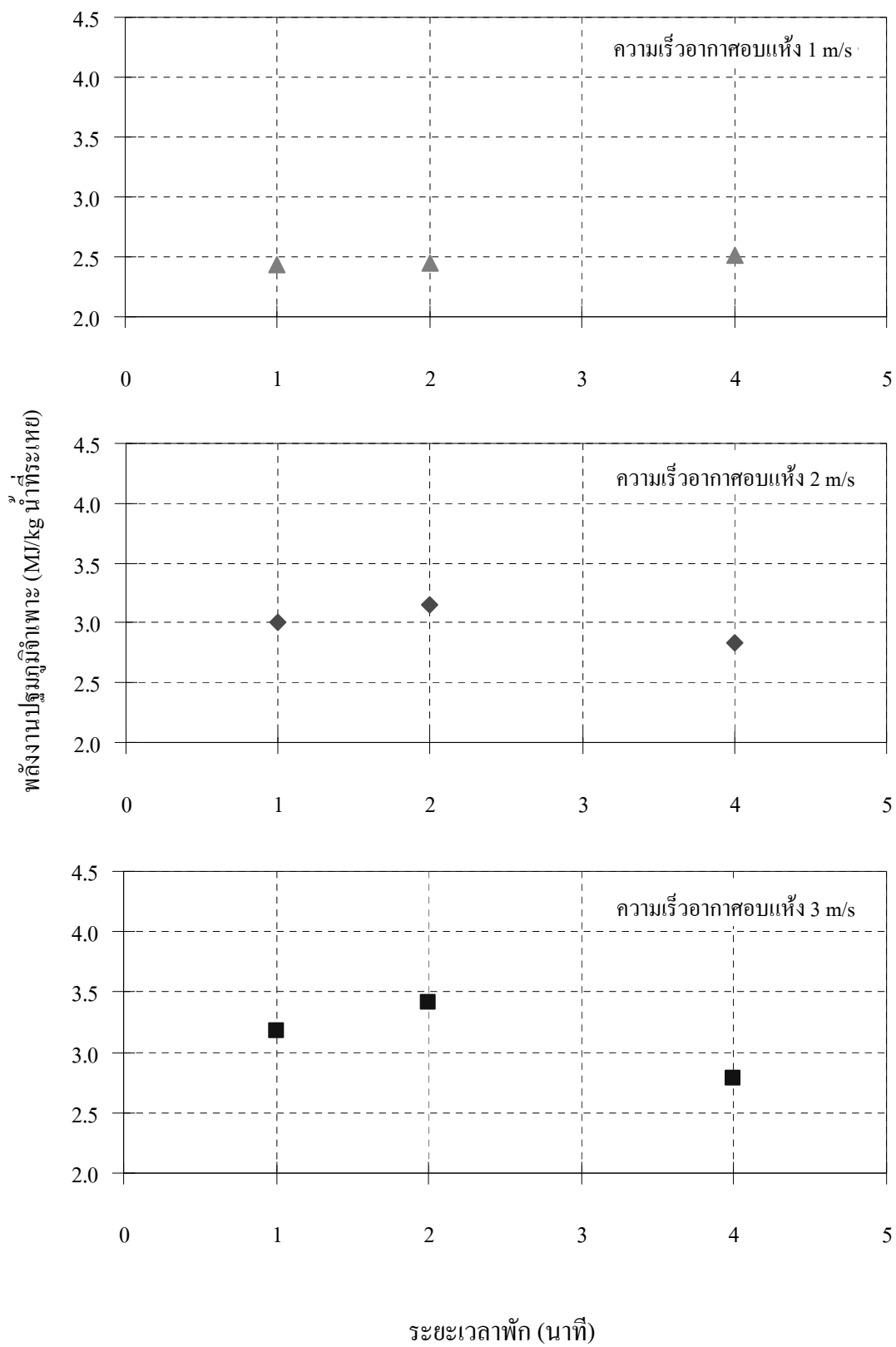
ระยะเวลาพักที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้ความชื้นภายในข้าวเปลือกมีระยะเวลามากขึ้นในการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดมาที่ผิวข้าวเปลือก โดยที่อัตราการแพร่ของน้ำภายในข้าวเปลือกจะขึ้นกับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นภายในซึ่งแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิเมล็ด (Nishiyama et al., 2006), (Poomsa-ad et al., 2002) ด้วยเหตุนี้การอบแห้งในรอบต่อมาข้าวเปลือกจึงมีความพร้อมในการระเหยน้ำมากขึ้น จึงสามารถลดความชื้นในแต่ละรอบการอบแห้งได้มากขึ้นกว่าการไม่พักข้าว ดังนั้นคะแนนได้ว่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ จะลดลงเมื่อระยะเวลาพักนานขึ้น หนึ่งในการใช้งานจริงของเครื่องอบแบบหล่นอิสระนี้ต้องมีการพักด้วยเสมอเนื่องจากข้าวเปลือกต้องพักอยู่ในถังพักเพื่อรอการเข้าท่ออบในรอบต่อไป ซึ่งการพักนี้อาจนานได้ในระดับชั่วโมงถ้าถังพักใหญ่มาก

ผลของระยะเวลาพักต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะแสดงในรูปที่ 6.14, 6.15 และ 6.16 ซึ่งพบว่าส่วนใหญ่การเพิ่มระยะพักมีแนวโน้มสามารถลดการใช้พลังงานได้ สอดคล้องตามหลักการที่อธิบายก่อนนี้ ยกเว้นในกรณีเงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 และ 3 m/s พบว่าที่ระยะพัก 4 นาที มีอัตราการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะสูงกว่าระยะพัก 2 นาที ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากอุณหภูมิเมล็ดที่มีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นดังที่กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 6.1.4 จึงทำให้อัตราอบแห้งในกรณีระยะพัก 2 นาทีสูงกว่ากรณีระยะพัก 4 นาที ดังนั้นพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้จึงต่ำกว่า

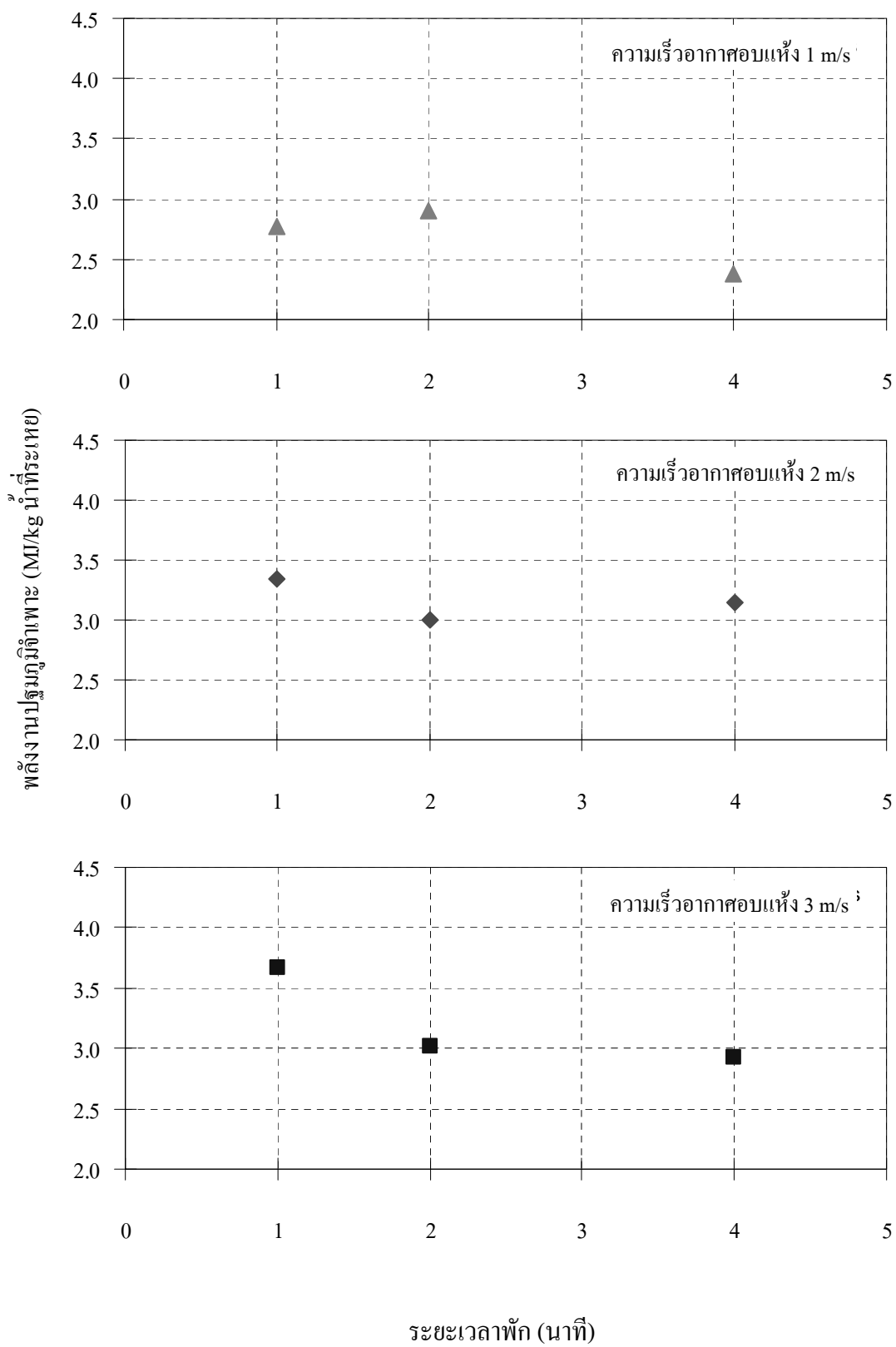
จากรูปที่ 6.15 กรณีเงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s พบว่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่การพัก 2 นาทีมีค่าสูงกว่าการพัก 1 นาที เมื่อพิจารณาลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกตามรูปที่ 6.4 รวมด้วยจะเห็นว่าในกรณีเงื่อนไขอบแห้งข้างต้น ลักษณะการลดลงของความชื้น ที่ระยะเวลาพัก 1 และ 2 นาทีค่อนข้างซ้อนทับกัน ตั้งแต่เริ่มการทดลอง แต่เกิดการแยกตัวในตอนท้ายเพียงเล็กน้อย ซึ่งการแยกตัวดังกล่าวอาจเกิดจากความแปรปรวนของการวัดค่าความชื้นข้าวเปลือก มิใช่เกิดเนื่องจากระยะเวลาพักที่แตกต่างกัน หากไม่พิจารณาการแยกตัวนี้ พลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ระยะเวลาพัก 1 และ 2 นาทีควรมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงสรุปว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s ระยะเวลาพัก 1 และ 2 นาทีใช้ค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะในการอบแห้งเท่ากัน ซึ่งในกรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s ที่ระยะเวลาพัก 1 และ 2 นาที ก็สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 6.14 พลังงานปฐมนุ้จําเพาะ เมื่อใช้อากาศสอบแห้งอุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 6.15 พลังงานปฐมนุ้มีจำเพาะ เมื่อใช้อากาศสอบแห้งอุณหภูมิ 130°C



รูปที่ 6.16 พลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 150°C

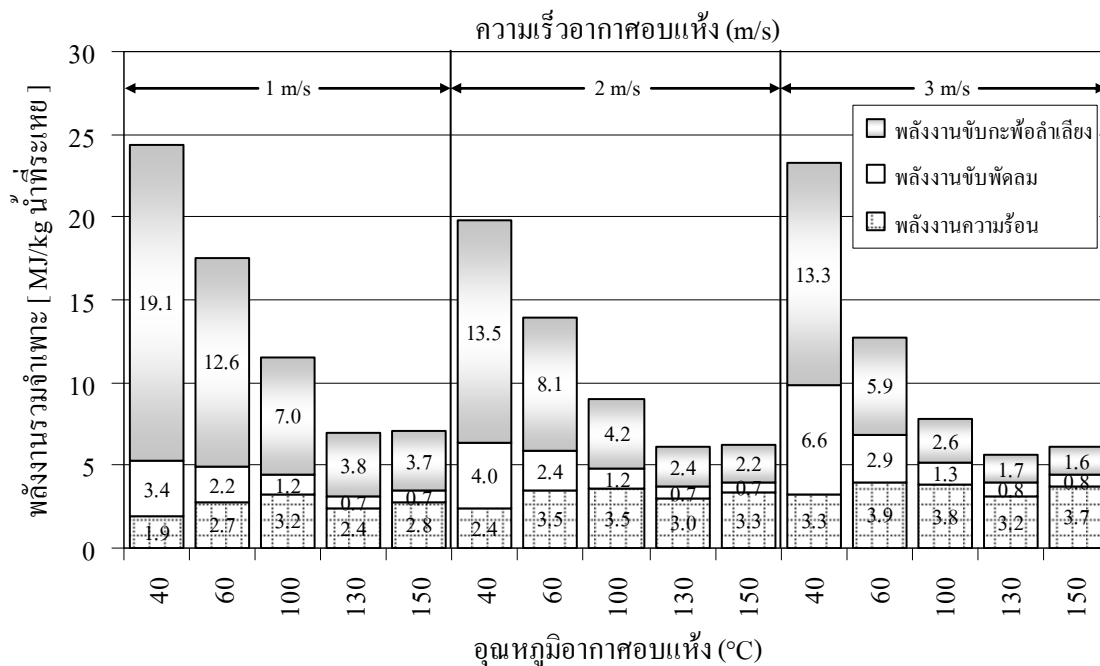
6.2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งต่อพลังงานรวมจำเพาะ

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกหล่นอิสระนอกจากการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะแล้ว มีพลังงานอีกส่วนหนึ่งที่มีผลต่อภาพรวมการใช้พลังงานของระบบ คือพลังงานทฤษฎีจำเพาะซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น พลังงานขับพัดลมเพื่อป้อนลมเข้าเครื่องอบแห้ง และพลังงานขับกะพ้อเพื่อลำเลียงข้าวเปลือกที่ออกจากท่ออบแห้งเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้ง จากการวัดพบว่าพัดลมที่สร้างลมเร็ว 1, 2 และ 3 m/s จะใช้กำลังไฟฟ้า 46.58, 78.28 และ 131.07 วัตต์ ตามลำดับ และมอเตอร์ที่ขับกะพ้อลำเลียงใช้กำลังไฟฟ้า 264 วัตต์ เพื่อลำเลียงข้าวเปลือกในอัตราเฉลี่ย 15.37 kg/min รายละเอียดการคำนวณพลังงานจำเพาะทั้งสาม แสดงในภาคผนวก ก. โดยสัดส่วนของพลังงานจำเพาะทั้งสามแสดงในรูปที่ 6.17

จากรูปที่ 6.17 พบว่าพลังงานรวมจำเพาะมีค่าอยู่ในช่วง 4.88-24.41 MJ/kg น้ำที่ระเหย โดยอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ำจะใช้พลังงานรวมจำเพาะสูงกว่าอุณหภูมิสูง เนื่องจากระดับการใช้พลังงานขับกะพ้อลำเลียงและพัดลมมีผลอย่างมากต่อการใช้พลังงานรวม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ำค่าทั้งสองยังมีสัดส่วนมากขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s พลังงานขับกะพ้อลำเลียงซึ่งมีสัดส่วนพลังงานสูงมากถึง 10 เท่าของพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ เหตุเพราะในช่วงดังกล่าวอัตราอบแห้งไม่สูงมากนัก จึงทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน การใช้พลังงานในส่วนทั้งสองจึงมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิสูงจึงมีนัยสำคัญในการลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะเป็นอย่างมาก เนื่องจากลดเวลาการอบแห้งลงได้มาก

นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งสามารถลดการใช้พลังงานรวมลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าจะเป็น การเพิ่มพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ แต่สามารถลดการใช้พลังงานในส่วนทฤษฎีลงได้มาก ยกเว้นในกรณีอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s ซึ่งมีค่าการใช้พลังงานรวมสูงกว่ากรณี 2 m/s เพราะผลการเพิ่มความเร็วอากาศไม่สามารถเพิ่มอัตราอบแห้งในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวได้ เชื่อว่าเป็นเพราะอุณหภูมิมล็ดข้าวต่ำทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำซึ่งทำให้กระบวนการส่งผ่านความชื้นเกิดการอื่นเนื่องจากการแพร่จากภายในเมล็ด (diffusion limited transfer) ดังที่อธิบายในหัวข้อ 6.1.5

ทั้งนี้เนื่องจากเป็นเครื่องทดลองขนาดเล็กในห้องวิจัยที่ยังไม่ได้ออกแบบให้ได้ประสิทธิภาพอุปกรณ์ที่ดีที่สุด อีกทั้งมอเตอร์พัดลมและกะพ้อลำเลียงได้ถูกปรับให้ทำงานตามเงื่อนไขการทดลองที่กว้าง ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพอุปกรณ์ต่ำกว่าปกติ

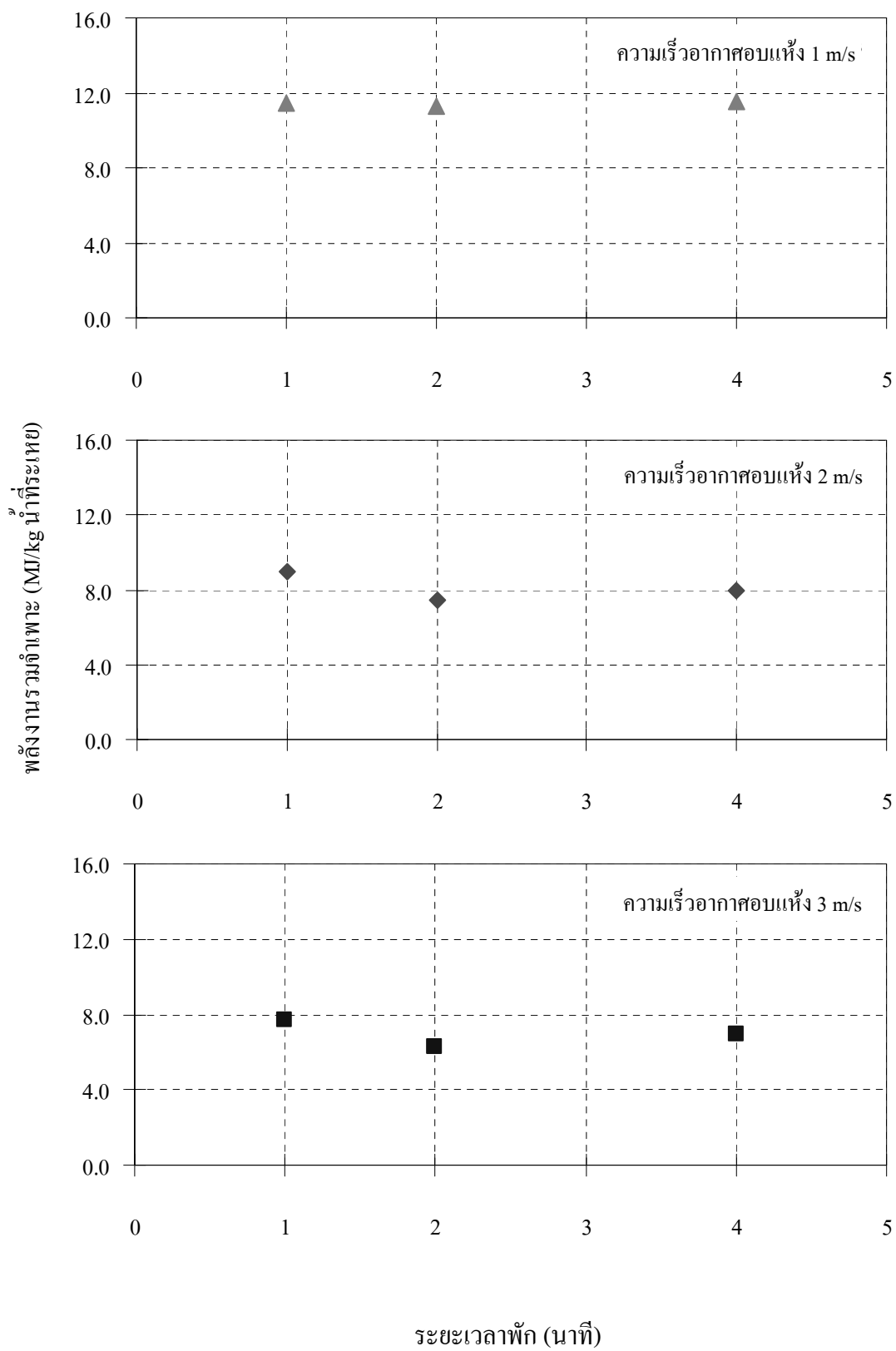


รูปที่ 6.17 พลังงานรวมจำเพาะ เมื่อใช้ระยะเวลาพัก 1 นาที

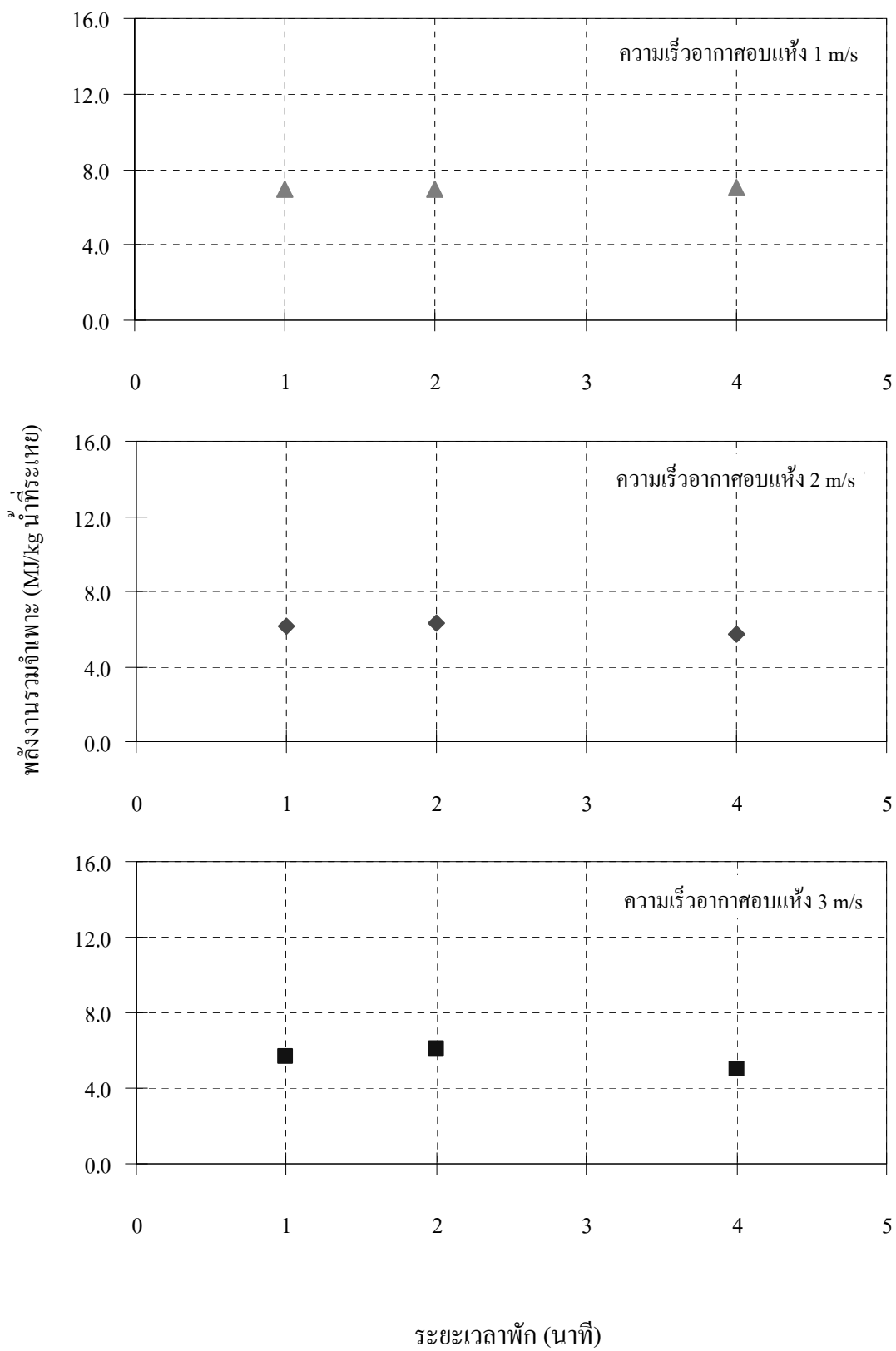
6.2.4 ผลกระทบของระยะเวลาพักต่อพลังงานรวมจำเพาะ

รูปที่ 6.18, 6.19 และ 6.20 แสดงค่าพลังงานรวมจำเพาะที่ระยะพัก 1, 2 และ 4 นาที และที่อุณหภูมิ 100, 130 และ 150°C เห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาพักและความเร็วอากาศอบแห้งสูงมากขึ้น พลังงานรวมจำเพาะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นแนวโน้มเช่นเดียวกับพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ เช่น ในกรณีอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 150°C, ความเร็ว 3 m/s, ระยะเวลาพัก 1 นาที จะใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ 6.1 MJ/kg น้ำที่ระเหย ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะพักเป็น 4 นาที สามารถลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะเหลือเพียง 4.88 MJ/kg น้ำที่ระเหย เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมของการศึกษานี้พบว่าผลของการพักที่มีต่อพลังงานรวมจำเพาะมีส่วนน้อย ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากอิทธิพลของพลังงานทฤษฎีจำเพาะมีนัยสำคัญต่อพลังงานรวมจำเพาะมากกว่าการพักมาก

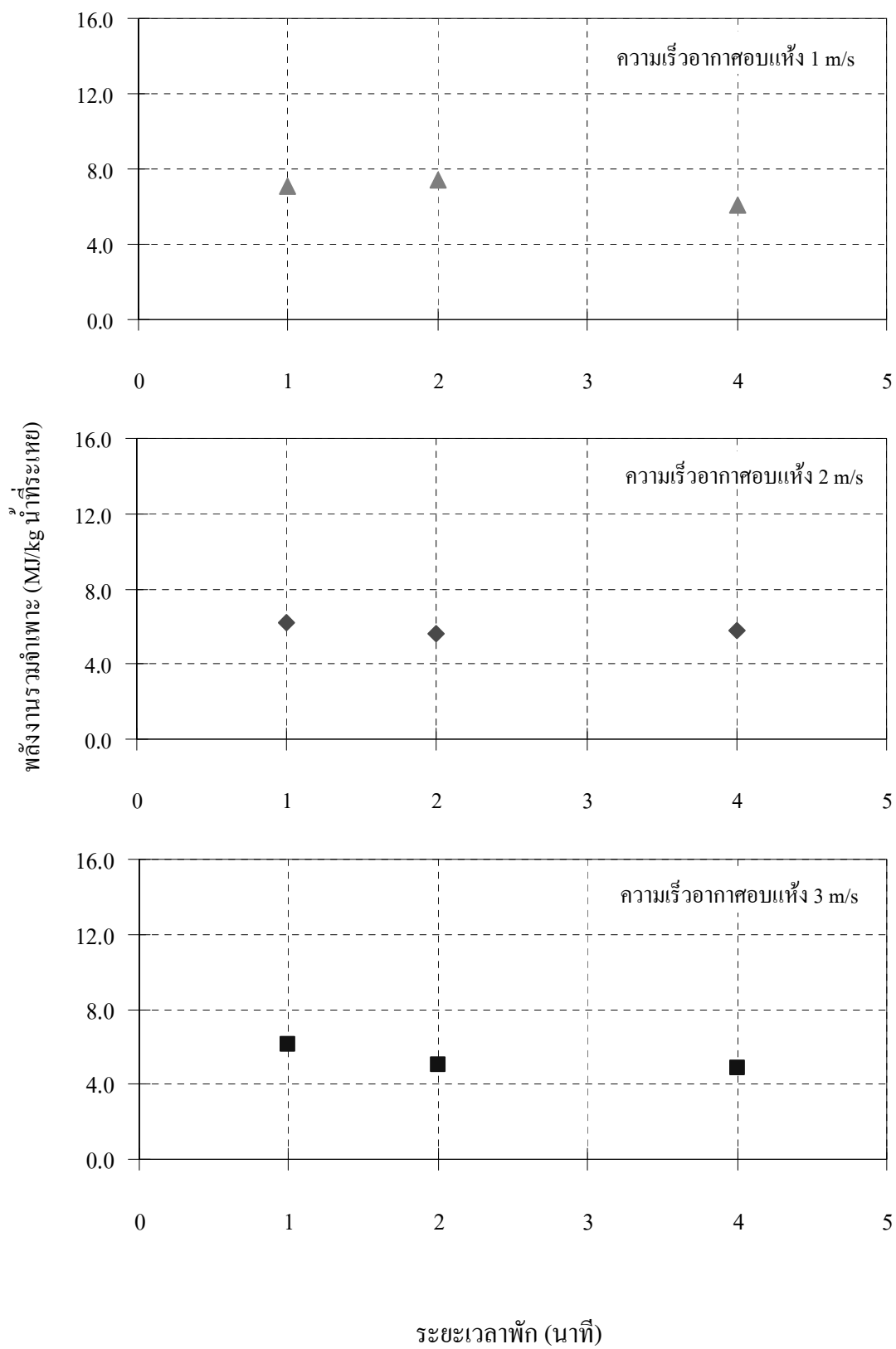
อนึ่งหากท่ออบยาวมากขึ้นกว่าเครื่องที่ใช้ในการวิจัยตามสภาพของเครื่องในอุตสาหกรรม เชื่อว่าจะลดพลังงานรวมจำเพาะที่ใช้ลงได้อีกมาก อาจลดลงได้ถึงประมาณ 2-3 เท่า จากค่าที่คำนวณได้นี้ ทั้งนี้เป็นเพราะที่ความเร็วและความร้อนสูงนั้นอากาศที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศยังมีศักยภาพเหลืออยู่มากในการอบแห้ง หากท่อยาวขึ้นก็จะทำให้ลดจำนวนครั้งในการอบลงได้มาก ซึ่งเป็นการลดการใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะและพลังงานทฤษฎีจำเพาะไปพร้อม ๆ กัน



รูปที่ 6.18 พลังงานรวมจำเพาะ เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 6.19 พลังงานรวมจำเพาะ เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 130°C



รูปที่ 6.20 พลังงานรวมจำเพาะ เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 150°C

6.2.5 ผลกระทบของอุณหภูมิ ความเร็วอากาศอบแห้งและระยะเวลาพักต่อพลังงานรวม จำเพาะและอัตราอบแห้ง

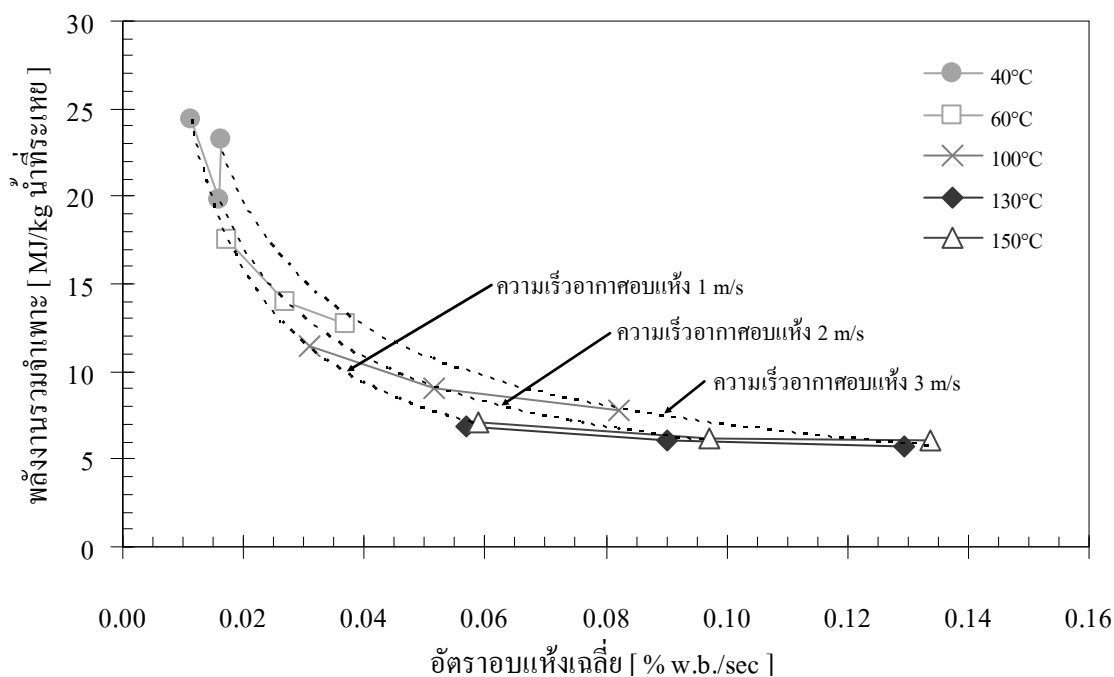
เนื่องจากการใช้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิและความเร็วสูงทำให้อัตราอบแห้งเพิ่มขึ้นดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจึงลดลง ซึ่งส่งผลให้การใช้พลังงาน ทฤษฎีจำเพาะลดลง ภาพรวมการใช้พลังงานจึงมีค่าลดลง เมื่อนำปริมาณการใช้พลังงานรวม จำเพาะที่ระยะเวลาพัก 1 นาทีพล็อตเปรียบเทียบกับอัตราอบแห้ง โดยมีอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็น ปัจจัยหลัก โดยที่เส้นแสดงความเร็วอากาศอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 6.21

จากรูปที่ 6.21 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 40-130°C มีนัยสำคัญในการลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะ และเพิ่มอัตราอบแห้งเป็นอย่างมาก (ยกเว้นในกรณีอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 40°C ความเร็วอากาศไม่ควรเกิน 2 m/s) ขณะที่อุณหภูมิ 130-150°C ค่าพลังงานรวมจำเพาะและอัตราอบแห้งที่ได้ไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นการใช้อุณหภูมิที่ 130°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s น่าจะเป็นจุดที่ดีที่สุด เพราะทำให้เมล็ดข้าวไม่ร้อน จนเกินไป แต่ยังสามารถอบได้ในเวลาอันรวดเร็วและใช้พลังงานรวมอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ

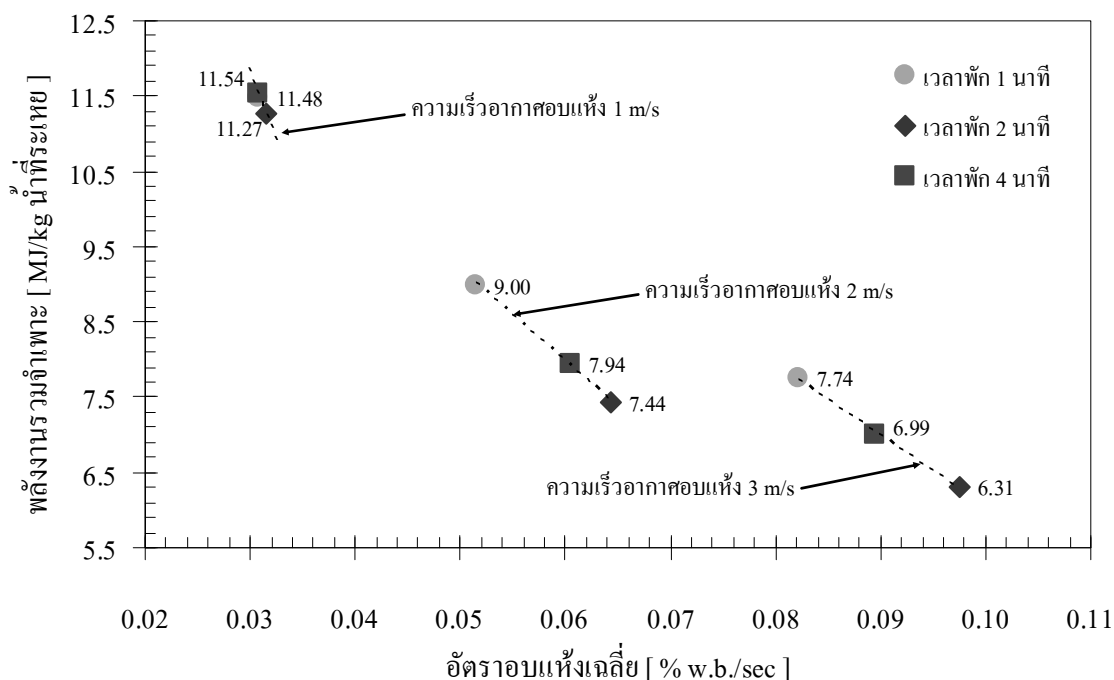
รูปที่ 6.22, 6.23 และ 6.24 แสดงผลของการพักที่อุณหภูมิ 100, 130 และ 150°C ต่อ การใช้พลังงานรวมจำเพาะและอัตราอบแห้งเฉลี่ย พบว่าในภาพรวมสามารถช่วยลดการใช้พลังงาน รวมจำเพาะและเพิ่มอัตราอบแห้งได้ในทุกกรณีศึกษา ยกเว้นในกรณีที่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมี อุณหภูมิต่ำกว่าค่าอุณหภูมิ T_g ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.1.4 ซึ่งทำให้อัตราอบแห้งต่ำกว่า จึงใช้ พลังงานรวมจำเพาะสูงกว่า

เมื่อพิจารณาผลของการพัก ในขอบเขตที่ศึกษาพบว่าที่เงื่อนไขการอบแห้งด้วย อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C ความเร็วอากาศ 3 m/s ด้วยระยะเวลาพัก 4 นาที จะใช้พลังงานรวม ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 4.88 MJ/kg น้ำที่ระเหย (ค่าต่ำที่สุดจากกรณีศึกษาทั้งหมด) และมีอัตราอบแห้ง สูงสุดเท่ากับ 0.1667 (% w.b. /sec)

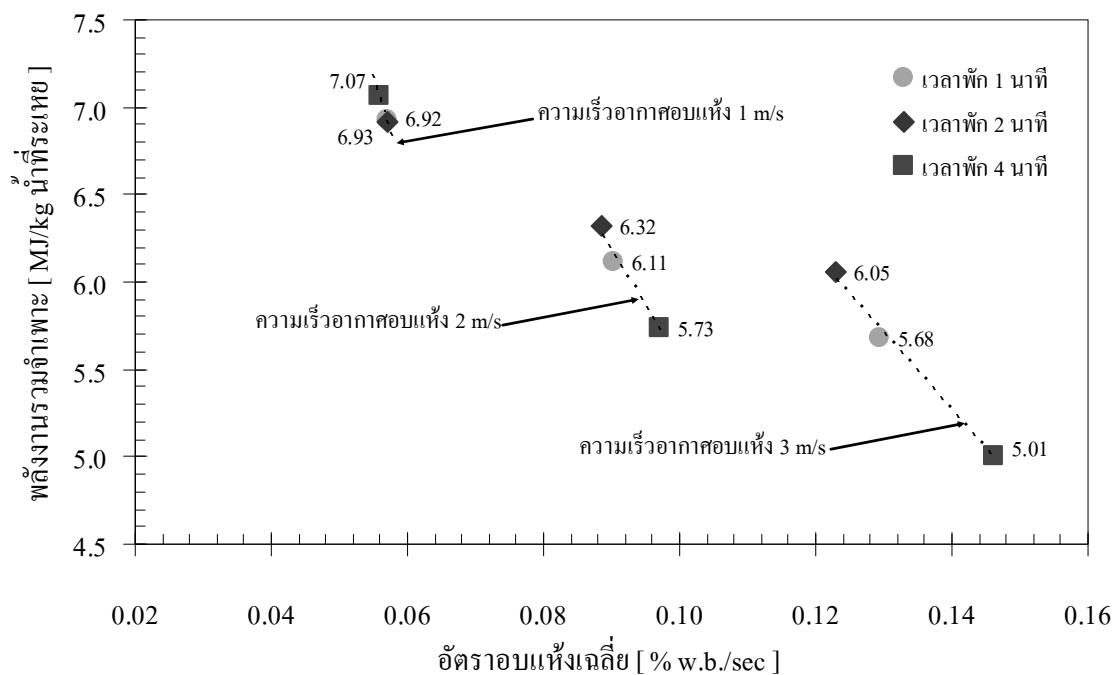
อย่างไรก็ดีผลกระทบเนื่องจากการพักไม่สูงเท่าผลเนื่องจากอุณหภูมิและความเร็ว อากาศอบแห้ง อีกทั้งหากมีการพักที่นานเกินไปจนทำให้อุณหภูมิลดต่ำกว่าค่าอุณหภูมิการเปลี่ยน สภาพยาง/แก้ว (glass transition temperature) ก็อาจเกิดผลเสียต่อการใช้พลังงานอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ ในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกเชิงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งระยะเวลาพักอาจนานเป็นชั่วโมง จึงต้อง ออกแบบให้มั่นใจได้ว่าอุณหภูมิกองข้าวเปลือกจะยังคงอยู่ในระดับที่ไม่ต่ำกว่าจุดวิกฤตของการ เปลี่ยนสภาพยาง/แก้ว เพื่อให้ได้อัตราอบแห้งที่สูงตลอดเวลา



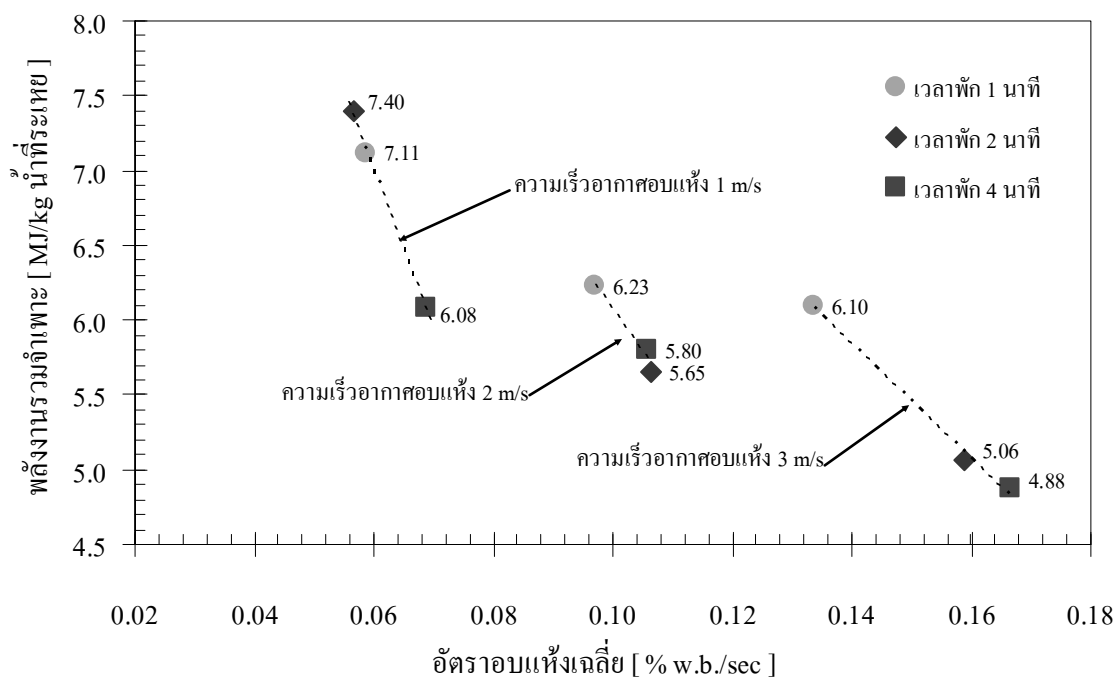
รูปที่ 6.21 พลังงานรวมจำเพาะเทียบกับอัตราอบแห้งเฉลี่ย เมื่อใช้ระยะเวลาพัก 1 นาที



รูปที่ 6.22 พลังงานรวมจำเพาะเทียบกับอัตราอบแห้งเฉลี่ย เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 6.23 พลังงานรวมจำเพาะเทียบกับอัตราอบแห้งเฉลี่ย เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 130°C



รูปที่ 6.24 พลังงานรวมจำเพาะเทียบกับอัตราอบแห้งเฉลี่ย เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 150°C

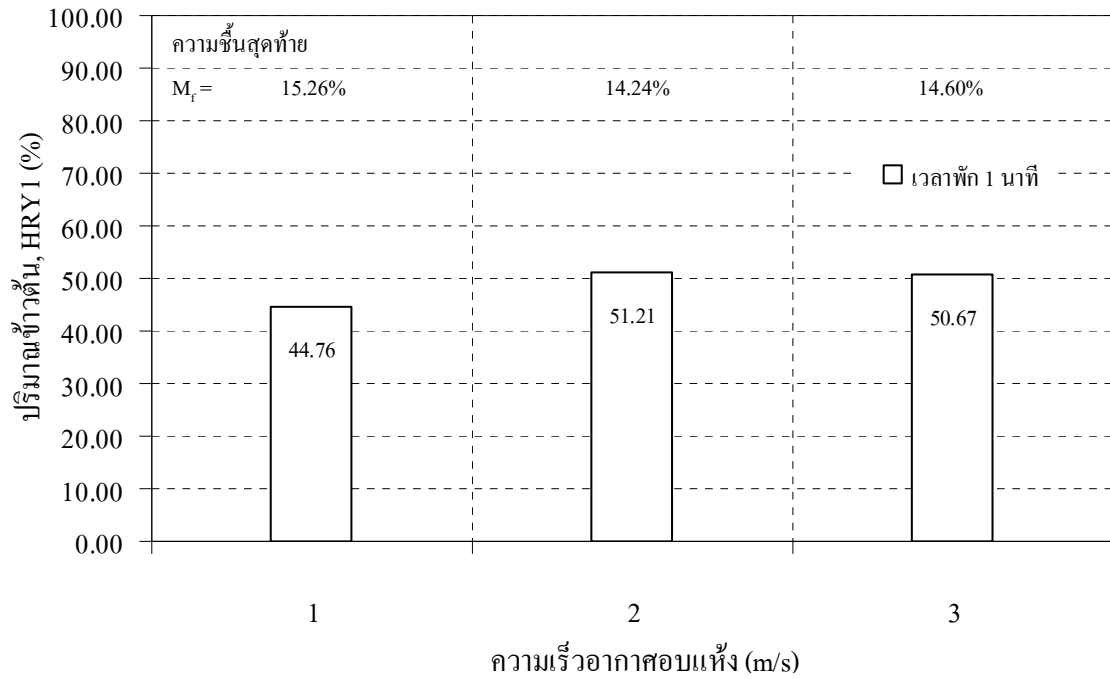
6.3 คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

ในการศึกษานี้จะพิจารณาลักษณะทางกายภาพเพื่อบ่งบอกถึงคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง ซึ่งลักษณะทางกายภาพที่พิจารณาคือ ปริมาณข้าวตันและค่าความขาวของข้าวสารที่ได้หลังการขัดสี ดังที่ได้นิยามและแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก.4 โดยวิเคราะห์ปริมาณข้าวตันในรูปของร้อยละข้าวตันทั่วไป, $%HRY$, และวิเคราะห์ค่าความขาวในรูปดัชนีความขาว, WI

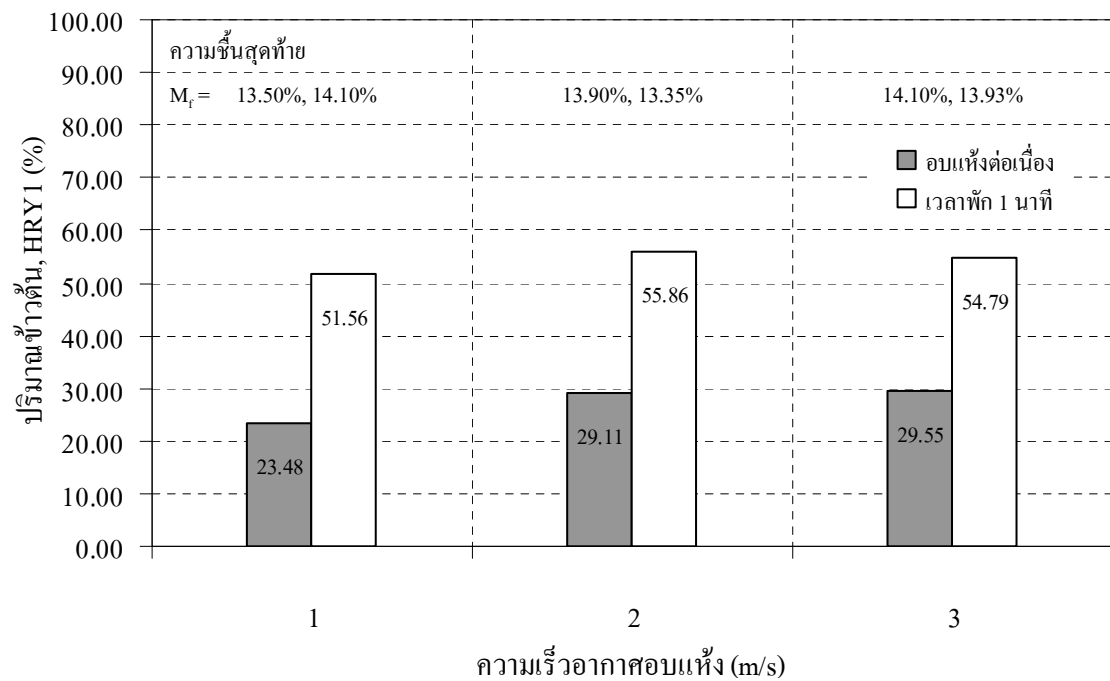
6.3.1 ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และระยะเวลาพักต่อปริมาณข้าวตันหลังการอบแห้ง

ปริมาณข้าวตันที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 6.25-6.29 ด้านบนรูปแสดงค่าความชื้นข้าวเปลือกก่อนทำการขัดสี (M_1) จากรูปแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาพักข้าวเปลือกมีผลอย่างมากต่อปริมาณข้าวตันที่ได้หลังการอบแห้ง ซึ่งเห็นได้จากปริมาณข้าวตันที่ระยะเวลาพัก 1 นาที เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ทำการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง (เวลาพัก 0 นาที) ในทุกกรณีศึกษา โดยระยะเวลาพักที่ 1, 2 และ 4 นาทีได้ปริมาณข้าวตันอยู่ในเกณฑ์ที่สูงและใกล้เคียงกัน เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการพักจะช่วยทำให้ข้าวเปลือกมีระยะเวลาในการแพร่กระจายความชื้นจากภายในมาสู่ที่ผิวเมล็ด ซึ่งเป็นการช่วยลดความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากความชื้นความชื้นภายในเมล็ด (moisture content gradient) อันเป็นผลจากการอบแห้ง และหากความชื้นความชื้นสูงมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดความเค้นกด (compressive stress) ที่แกนกลางเมล็ดและความเค้นดึง (tensile stress) ที่ผิวของเมล็ดมากยิ่งขึ้น ซึ่งนำไปสู่รอยร้าวและการแตกหักของข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งและขณะขัดสี (Li et al., 1999), (Poomsa-ad et al., 2002), (Aquerreta et al., 2006), (Dong et al., 2009)

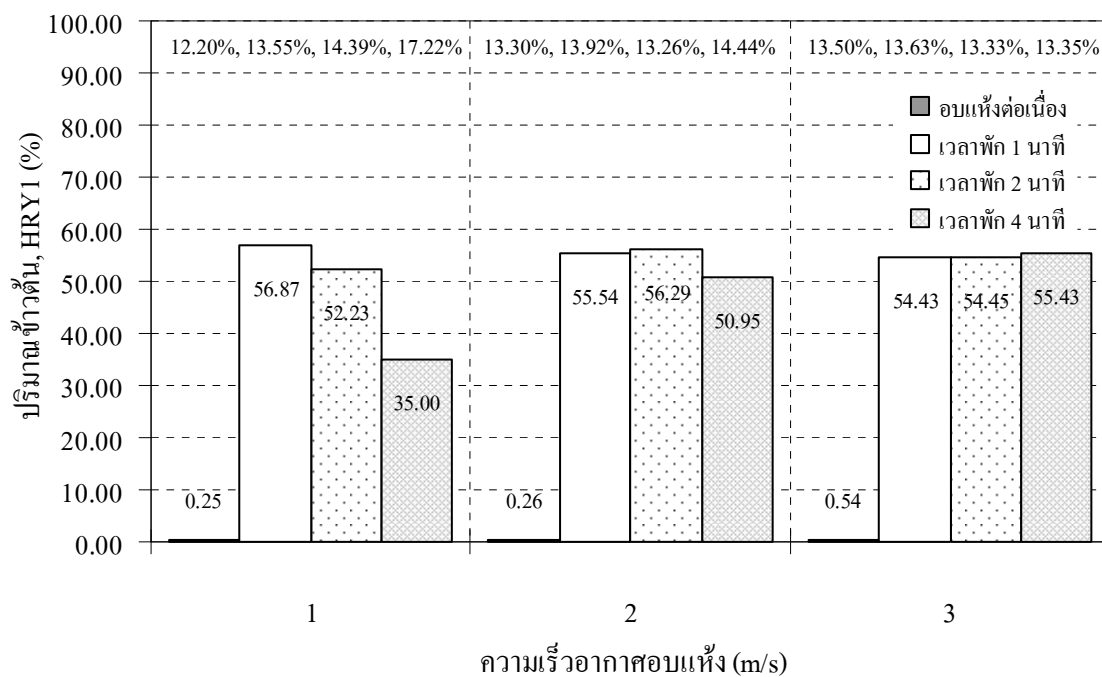
นอกจากนี้เนื่องจากลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งชนิดนี้จึงทำให้เมล็ดมีระยะเวลาอันสั้นในการสัมผัสอากาศร้อน ซึ่งส่งผลให้ความชื้นความชื้นหลังออกจากท่ออบแห้งในแต่ละรอบไม่สูงมากเหมือนเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ประกอบกับผลของการพักหลังการอบแห้งในแต่ละรอบดังที่กล่าวมาแล้ว จึงส่งผลให้การพักในช่วงเวลาสั้นๆ เพียง 1 นาทีก็เพียงพอต่อการช่วยรักษาเมล็ดข้าวไม่ให้เกิดการแตกร้าวขึ้นภายใน ส่งผลให้ปริมาณข้าวตันที่ได้สูง อันแสดงได้จากปริมาณข้าวตันในกรณีระยะเวลาพัก 1, 2 และ 4 นาทีมีค่าใกล้เคียงกัน



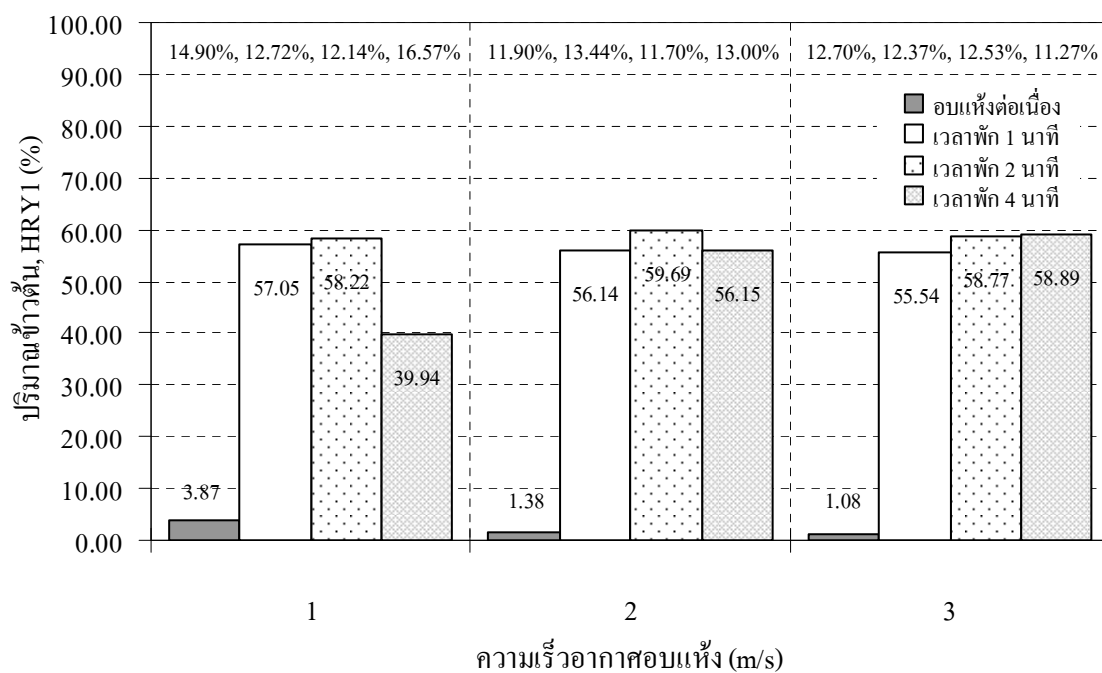
รูปที่ 6.25 ปริมาณข้าวต้น เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 40°C



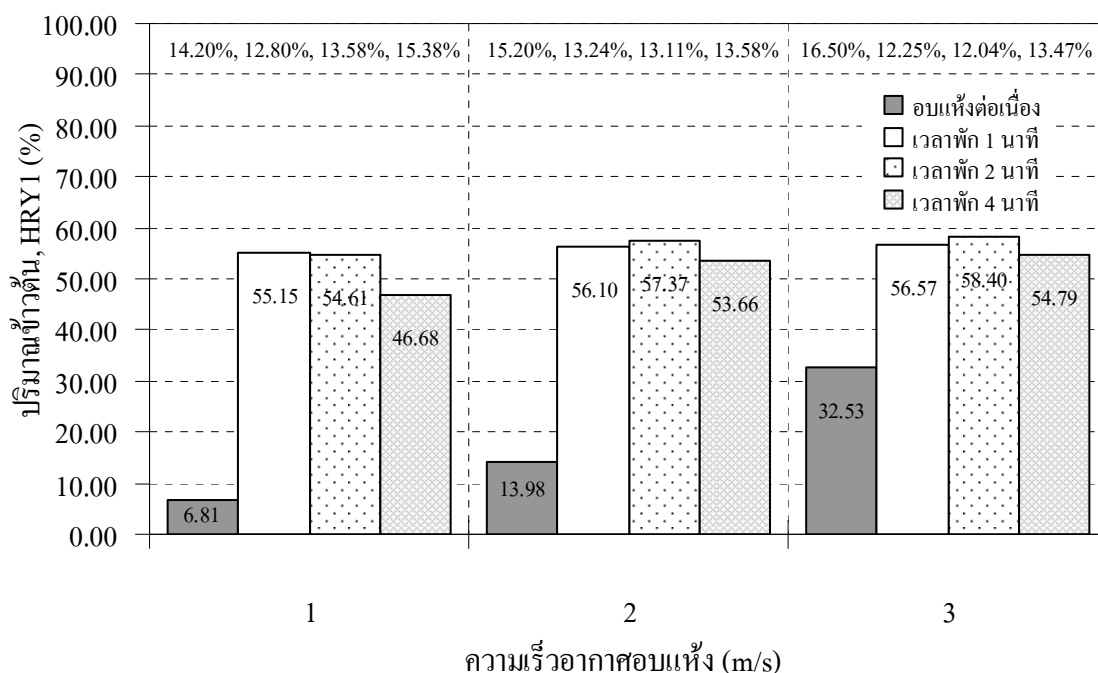
รูปที่ 6.26 ปริมาณข้าวต้น เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60°C



รูปที่ 6.27 ปริมาณข้าวตัน เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 6.28 ปริมาณข้าวตัน เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 130°C



รูปที่ 6.29 ปริมาณข้าวตัง เมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 150°C

6.3.2 ผลของความชื้นข้าวเปลือกขณะขัดสีต่อปริมาณข้าวตังหลังการอบแห้ง

จากรูปที่ 6.25-6.29 พบว่าในกรณีการพัก 1, 2 และ 4 นาทีปริมาณข้าวตังที่ได้มีความแปรปรวน ซึ่งไม่อาจบ่งบอกได้ว่าเป็นผลของความเร็วอากาศอบแห้งหรือระยะเวลาพัก เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนดังกล่าวจึงทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา และพบว่าผลดังกล่าวเกิดเนื่องจากความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ไม่เท่ากัน โดยอ้างอิงงานวิจัยของบุญส่ง(2532)ซึ่งพบว่าหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือก นวดและลดความชื้น โดยการตากแดดให้เมล็ดเหลือความชื้นในระดับต่าง ๆ การสีข้าวเปลือกที่มีความชื้นต่ำ (9-10% w.b.) ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวจะสูงกว่าการสีข้าวที่มีความชื้นสูง ซึ่งแสดงตามรูปที่ 6.30 ด้วยข้อมูลดังกล่าวจึงทำการวิเคราะห์ผลความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งกับปริมาณข้าวตังที่ได้ดังรูปที่ 6.31

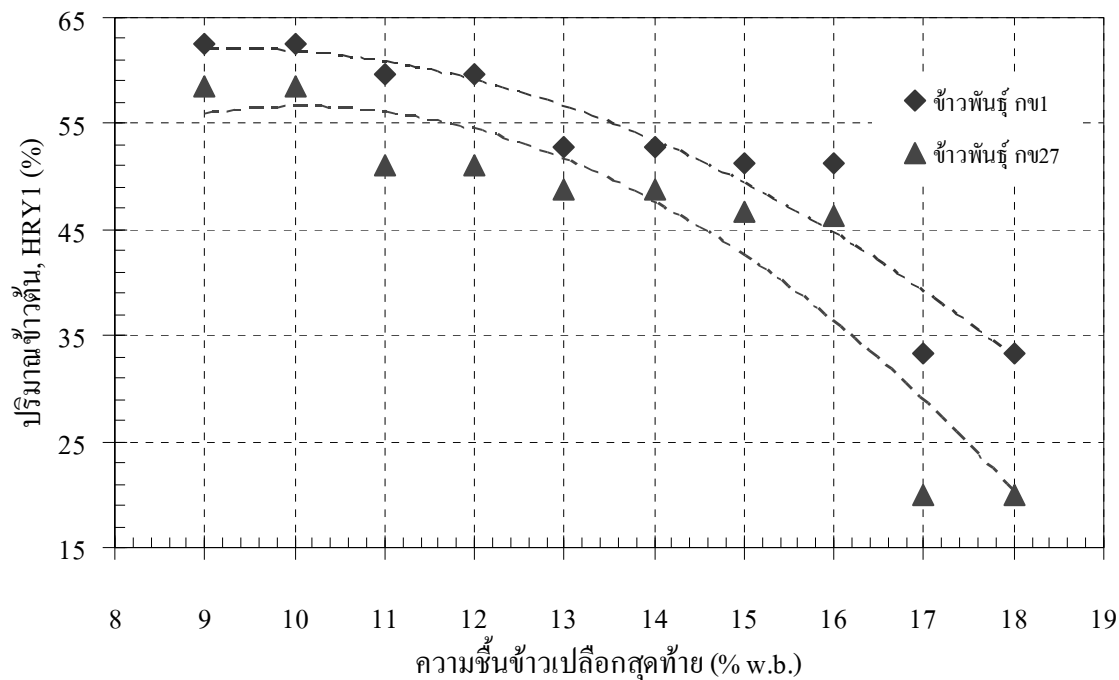
จากรูปที่ 6.31 พบว่าในกรณีที่มีข้าวเปลือกได้รับการพัก แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณข้าวตังแปรผกผันกับค่าความชื้นข้าวเปลือกขณะขัดสีตามผลการศึกษาของบุญส่ง(2532) และเมื่อพิจารณากรณีการอบแห้งอย่างต่อเนื่องพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (60°C) จะได้ปริมาณข้าวตังที่สูงกว่าการใช้อุณหภูมิสูง (100, 130 และ 150°C) แต่ไม่ว่าจะใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงหรือต่ำหากอบแห้งอย่างต่อเนื่องแนวโน้มปริมาณข้าวตังที่ได้จะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นข้าวเปลือก

ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากอบแห้งจนข้าวเปลือกมีความชื้นอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา (12-14% w.b.) ในกรณีอุณหภูมิสูงปริมาณข้าวคั่วที่ได้มีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์

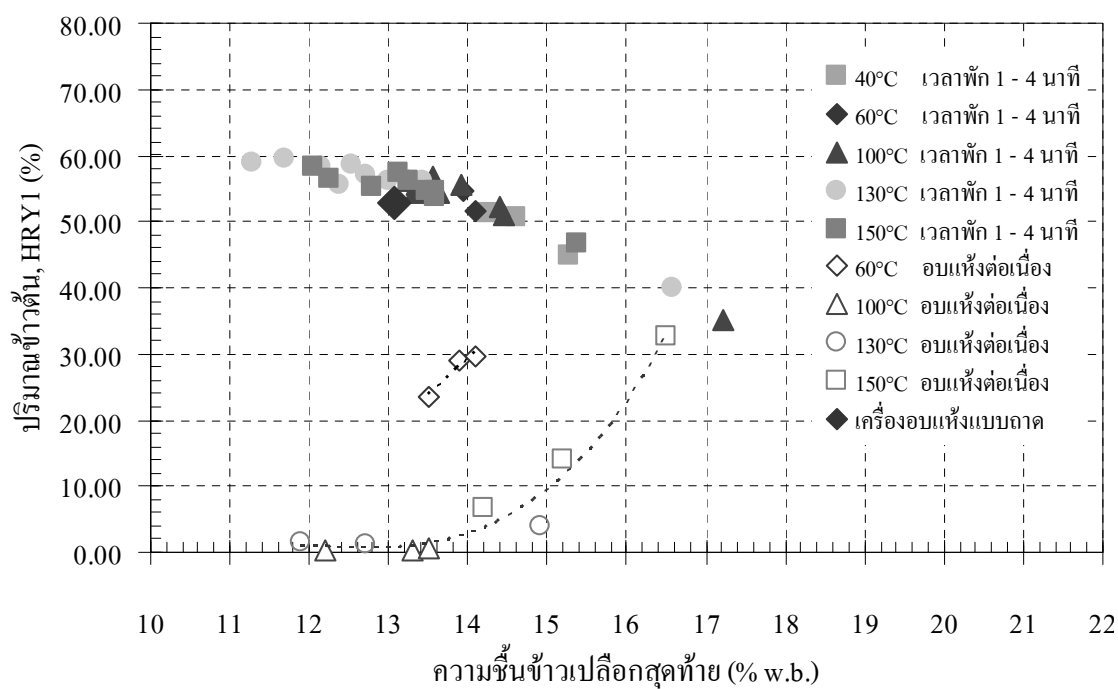
ได้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศแวดล้อม ให้เกิดการลดลงของความชื้นภายในข้าวเปลือกอย่างค่อยเป็นค่อยไป เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดเนื่องจากการอบแห้ง อันจะทำให้ได้ปริมาณข้าวเปลือกสูงสุดในกรณีการอบแห้งปกติเพื่อใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง ในการพิจารณาปริมาณข้าวคั่วที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการใช้เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ โดยใช้เครื่องแห้งแบบถาด ที่ใช้อากาศแวดล้อมอุณหภูมิประมาณ 30°C ความเร็วอากาศประมาณ 1 m/s ใช้เวลาลดความชื้นจาก 21.10-13.08% w.b. เท่ากับ 48 ชั่วโมง ได้ปริมาณข้าวคั่ว 52.82% ดังแสดงในรูปที่ 6.31 ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณข้าวคั่วที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระกรณีที่มีการพักจะมีปริมาณใกล้เคียงกับที่ได้จากตัวอย่างอ้างอิง

6.3.3 ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และระยะเวลาพักต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร

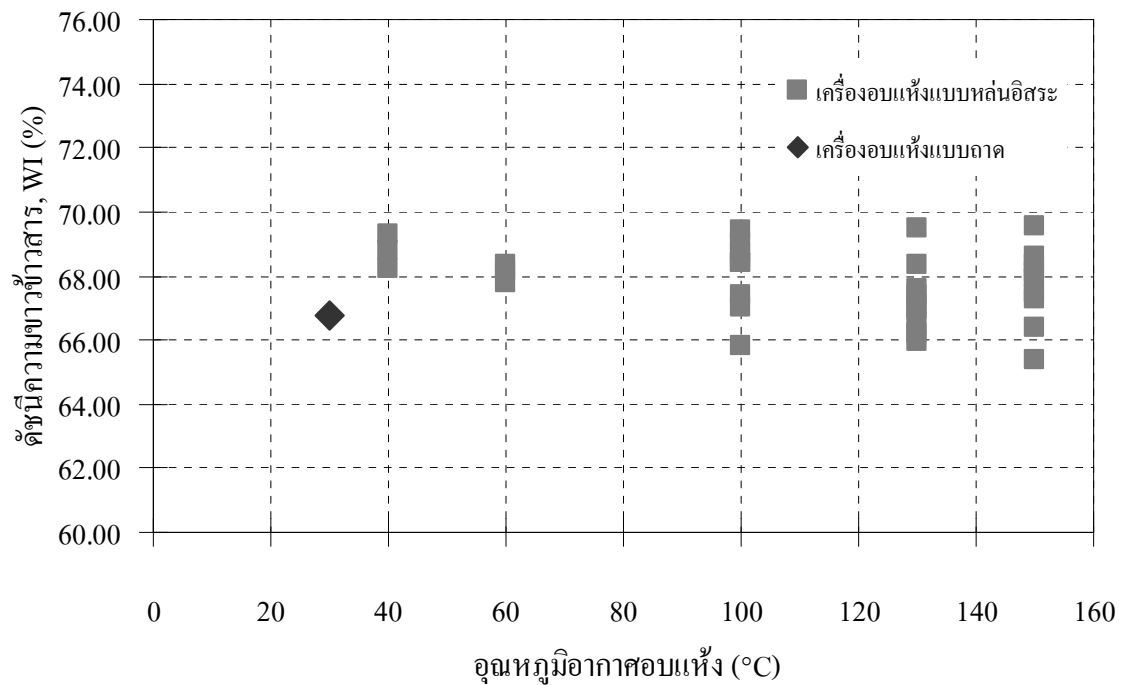
รูปที่ 6.32 แสดงค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร (whiteness index, *WI*) ที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระในช่วงอุณหภูมิ 40-150°C ความเร็ว 1-3 m/s ด้วยระยะเวลาพัก 1-4 นาที และตัวอย่างอ้างอิงที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแบบถาดตามเงื่อนไขที่ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้า ซึ่งพบว่าค่าดัชนีความขาวที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 65.19-69.58% ขณะที่ตัวอย่างอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 66.77% แสดงให้เห็นว่าข้าวสารที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่มีการพักข้าวเปลือกมีความขาวที่สูงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เหตุที่ค่าความขาวของข้าวสารที่ได้จากการอบด้วยเครื่องชนิดนี้มีค่าสูงแม้ใช้อุณหภูมิอบแห้งสูง เนื่องมาจากข้าวเปลือกจะสัมผัสอากาศร้อนในแต่รอบด้วยระยะเวลาอันสั้น จึงทำให้ไม่มีการสะสมความร้อนภายในเมล็ด ประกอบกับการพักระหว่างรอบการอบแห้ง จึงทำให้อุณหภูมิข้าวเปลือกไม่สูงมากนัก ปฏิบัติการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (nonenzymic browning reaction) จึงไม่เกิดขึ้น เพราะปฏิกิริยาดังกล่าวต้องการความร้อนเพื่อทำให้พันธะ hydroxyl group ระหว่างโมเลกุลภายในน้ำตาลหลุดออกจากกัน กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลต่ำ และความร้อนจะทำให้พันธะ hydroxyl group ภายในน้ำตาลโมเลกุลต่ำ หลุดจากกันเกิดเป็นสารประกอบคีโตน (ketone) ซึ่งจะทำให้ข้าวสารมีสีเหลือง (สมชาติ, 2540) ดังนั้นข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งด้วยความร้อนสูงเป็นระยะเวลานานจึงมักมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น ค่าความขาวที่วัดได้จึงต่ำลง เช่นงานวิจัยอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Somkiat et al., 2004) และเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็คเบด (จินดา, 2541) ซึ่งพบว่าการใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงเป็นระยะเวลานานจะทำให้ค่าความขาวของข้าวที่ผ่านเครื่องอบแห้งดังกล่าว ลดลงจากตัวอย่างอ้างอิงอย่างชัดเจน จึงสรุปได้ว่าเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระแม้ใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงและลดความชื้นข้าวเปลือกจนอยู่ในระดับต่ำ ยังคงรักษาความขาวของข้าวสารได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี



รูปที่ 6.30 ปริมาณข้าวตังกับความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย(บุญส่ง, 2532)



รูปที่ 6.31 ปริมาณข้าวตังกับความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย



รูปที่ 6.32 ดัชนีความชื้นของข้าวสารกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวสรุปผลการวิจัย ปัญหาที่เกิดจากการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการทำวิจัยต่อไป แบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

7.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้กล่าวในบทที่ 6 สามารถสรุปได้ดังนี้

- เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่มีช่วงเวลาพักระหว่างรอบการอบแห้งจะมีลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกที่รวดเร็วและค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการอบแห้งที่ศึกษา (21-14% w.b.) โดยเฉพาะเมื่อใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิสูง เนื่องจากในขณะพักความชื้นภายในข้าวเปลือกจะแพร่กระจายมาสู่ที่ผิวเมล็ด ทำให้ความชื้นที่ผิวเมล็ดค่อนข้างสม่ำเสมอในทุกรอบหลังการพัก จึงทำให้ขณะอบแห้งสามารถดึงปริมาณน้ำได้จำนวนมากและค่อนข้างคงที่ในทุกรอบของการอบแห้ง
- อุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งที่สูงสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งได้อย่างเด่นชัด โดยเฉพาะอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่ออัตราอบแห้ง ในขณะที่ความเร็วมีผลต่ออัตราอบแห้งมากขึ้นเมื่ออากาศอบแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพราะเมล็ดข้าวที่มีอุณหภูมิต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นภายในเมล็ดจะมีค่าน้อย การส่งผ่านความชื้นที่ผิวเมล็ดจึงอาจเกิดการอันด้วยการะบวนการแพร่จากภายในเมล็ด (Diffusion limited transfer) การใช้ความเร็วอากาศที่สูงเกินไป จึงไม่สามารถเพิ่มอัตราอบแห้งได้ ในช่วงอุณหภูมิต่ำ
- ระยะเวลาพักข้าวเปลือกที่นานขึ้นระหว่างรอบการอบแห้ง สามารถเพิ่มอัตราอบแห้งได้ แต่ควรพิจารณาผลของอุณหภูมิเมล็ดขณะพักด้วย เนื่องจากอุณหภูมิเมล็ดขณะพักที่สูงมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นภายในเมล็ดที่สูงตามกัน อีกทั้งมีผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในเมล็ด เพราะเมล็ดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า Glass transition temperature, (T_g) จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากสภาพคล้ายแก้วเป็นคล้ายยาง ซึ่งการจับตัวของเม็ดแป้งหลวมกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จึงเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด จึงควรรักษาระดับอุณหภูมิเมล็ดขณะพักให้สูงกว่า T_g เพื่อให้อัตราการแพร่สูง อันเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการพักที่มีต่อกระบวนการอบแห้ง
- อัตราสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่ออากาศอบแห้งมีอุณหภูมิและความเร็วสูงขึ้น แต่ก็มีลักษณะเป็นการเพิ่มที่ถดถอยหรือคงที่ในช่วง 60-100°C สำหรับ 100-130°C แนวโน้มกลับลดลง และเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วง 130-150°C เชื่อว่าการลดลงของพลังงานปฏุมภูมิ

จำเพาะที่ 130°C เนื่องจากเมล็ดข้าวมีอุณหภูมิอยู่เหนือช่วงวิกฤต (37-43°C) ทั้งหมดแล้ว จึงเกิดการเปลี่ยน โครงสร้างภายในจากสภาพแก้ว (glassy state) ไปเป็นสภาพยาง (rubbery state) ซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มสูงขึ้นเป็นพิเศษ อัตราอบแห้งจึงสูงทำให้ลดการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะได้มากยิ่งขึ้น โดยระดับพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้อยู่ในช่วง 1.93-3.91 MJ/kg น้ำที่ระเหย และพบว่าในภาพรวมแล้วระยะเวลาพักที่นานขึ้นมีแนวโน้มลดการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะได้ โดยเฉพาะกรณีที่อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกขณะพักสูงเกินค่า T_g

- การเพิ่มความเร็วและอุณหภูมิอบแห้งสามารถลดการใช้พลังงานรวมได้ เนื่องจากพลังงานหุติยภูมิจำเพาะ (พลังงานขับเคลื่อนพัดลมและพัดลม) ที่ตรวจวัดได้ มีค่าสูงและแปรผันตามระยะเวลาอบแห้ง การอบแห้งในช่วงอุณหภูมิต่ำจึงมีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะสูง ซึ่งอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้ระยะเวลาอบแห้งลดลง สัดส่วนพลังงานหุติยภูมิจำเพาะต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะจึงลดลง พลังงานรวมจำเพาะจึงลดลงตามไปด้วย โดยระดับพลังงานรวมจำเพาะที่ใช้มีค่าอยู่ในช่วง 4.88-24.41 MJ/kg น้ำที่ระเหย

- ระยะเวลาพักที่นานขึ้นสามารถลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะได้บ้างแม้ไม่มากนัก แต่การพักนานเกินไปจนอุณหภูมิเมล็ดข้าวลดลงต่ำกว่าระดับที่ทำให้เกิดการปรับสภาพยางมาเป็นสภาพแก้วจะทำให้เพิ่มสัดส่วนพลังงานปฐมภูมิจำเพาะได้

- ช่วงการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระควรเป็นช่วงที่อากาศอบแห้งมีอุณหภูมิประมาณ 130°C โดยใช้อากาศความเร็วสูง 3 m/s และระยะเวลาพัก 4 นาที เพราะทำให้สามารถอบแห้งได้รวดเร็ว ใช้พลังงานน้อย โดยที่อุณหภูมิเมล็ดข้าวไม่สูงจนเกินไป

- ระยะเวลาพักมากกว่า 1 นาทีต่อรอบการอบแห้ง ช่วยรักษาปริมาณข้าวต้นหลังการอบแห้งได้ในทุกเงื่อนไขอบแห้ง เพราะลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ที่ระยะเวลาสัมผัสอากาศร้อนสั้น ความชื้นความชื้นภายในเมล็ดจึงมีค่าน้อยและ ลดลงขณะพักในระยะเวลาอันสั้น ส่งผลให้ความเค้นตลก้างภายในเมล็ดหลังการอบแห้งมีค่าน้อย ปริมาณข้าวต้นที่ได้จึงมีค่าสูง (ประมาณ 55-60% ที่ความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย 12-14% w.b.) ซึ่งใกล้เคียงกับกรณีอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม ขณะที่กรณีข้าวเปลือกถูกอบแห้งอย่างต่อเนื่องจะมีปริมาณข้าวต้นต่ำกว่ามาก ความขาวของข้าวที่ได้ไม่แตกต่างกับตัวอย่างควบคุม

7.2 สรุปปัญหาจากการทดลอง

เนื่องจากระยะเวลาทำงานวิจัยที่จำกัด จึงมิได้ทำการทดลองซ้ำเพื่ออัตราผิดพลาด (error bar) และการทดลองใช้ระยะเวลานาน จึงเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อากาศแวดล้อมระหว่างการอบแห้ง ซึ่งมีผลต่อการอบแห้งและการพักในระดับหนึ่ง ผลการทดลองที่ได้จึงอาจมีความแปรปรวนอยู่บ้าง

7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของผลการพักข้าวเปลือก อุณหภูมิและความเร็ว อากาศอบแห้งต่อเครื่องอบแห้งแบบหมุนอิสระของเครื่องในระดับวิจัย ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพที่ดี ทั้งในด้านอัตราอบแห้ง พลังงานที่ใช้ และคุณภาพข้าวเปลือกที่ได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีความน่าสนใจต่อการประยุกต์ใช้งานในเครื่องขนาดใหญ่ระดับอุตสาหกรรม จึงควรจะมีการทำวิจัยต่อไปประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

- 1) การทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ระดับอุตสาหกรรม
- 2) การออกแบบเพื่อหาขนาด และความยาวของท่ออบแห้งที่เหมาะสมกับเงื่อนไขอบแห้ง
- 3) การทดลองอบแห้งที่มีการหมุนวนของอากาศอบแห้ง (การทดลองนี้อากาศไหลในแนวเส้นเท่านั้น)
- 4) การศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อหาความไวของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการอบแห้ง

รายการอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. (2547). **คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย**. บริษัทจักรวัฒน์เอ็กซ์เพรส จำกัด. กรุงเทพฯ. หน้า 1-15.
- กัญญา เชื้อพันธุ์. (2547). คุณภาพข้าวทางกายภาพ. ใน นามชื่น คงเสรี (บรรณาธิการ). **คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย**. (หน้า 31-40). กรุงเทพฯ: บริษัทจักรวัฒน์เอ็กซ์เพรส จำกัด.
- กิตติยา กิจจวรรดี. (2547). การเก็บเกี่ยวและปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ได้ข้าวคุณภาพดี. ใน นามชื่น คงเสรี (บรรณาธิการ). **คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย**. (หน้า 1-16). กรุงเทพฯ: บริษัทจักรวัฒน์เอ็กซ์เพรส จำกัด.
- เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2551). **การทดลองและวิเคราะห์หาแนวทางอบแห้งข้าวเปลือกให้ได้ประสิทธิภาพสูงด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2551). ผลของความเร็วดำอากาศต่ออัตราอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22**. 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- ขุนพล สังข์อารีย์กุล. (2544). **การประเมินสถานภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จินดา พานิชองอร. (2541). **การอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงโดยเทคนิคสเปาเต็คเบดสองมิติ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จุฑาทิพย์ ทองเดชาสามารถ. (2545). **การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันแบบใหม่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2546). การอบแห้งเมล็ดพืชที่อุณหภูมิสูงโดยเทคนิค สเปาเต็คเบดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเข้าดาวน้คัมเมอร์ได้. ใน

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17. 15-17 ตุลาคม 2546
จังหวัดปราจีนบุรี.

ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสภณา แจ่มการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ
ข้าวหล่นอิสระ: รวดเร็วและประหยัดพลังงาน. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่ง
ประเทศไทย ครั้งที่ 2. 27-29 กรกฎาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา.

ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสภณา แจ่มการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). ผลกระทบของลมหมุนวนต่อ
ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ. ใน การประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัด
นครราชสีมา.

บุญส่ง จิตรา. (2532). การศึกษาคุณภาพการสีจากข้าวเปลือกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่าง ๆ กัน.
ปัญหาพิเศษ เสนอภาควิชาเกษตรศาสตร์ คณะเกษตรและอุตสาหกรรม วิทยาลัยครูเพชรบุรี
วิทยาเขตกรณี่ เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร)
หน้า 14.

ไมตรี แนวพนิช. (ม.ป.ป.). หลักการลดความชื้นเมล็ดพืช. กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว
กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ศูนย์ข้อมูลการเกษตร. (2550). สารสนเทศจากสมุดข้าวไทย. สุพรรณบุรี: ศูนย์ข้อมูลการเกษตร ฝ่าย
แผนงานพัฒนาการเกษตร สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดสุพรรณบุรี

สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อารีย์ ทิมินกุล และ นิทัศน์ ตั้งพินิจกุล. (2547). ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจสอบความชื้น
ข้าวเปลือกด้วยเครื่องวัดความชื้น [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://210.246.186.28/AedWeb/48-7-ricemoisture.pdf>

AACC (1995). Approved method of the American association of cereal chemists (9th ed.). MN:
American Association of Cereal Chemists St. Paul.

Abhay Kumar Thakur and A.K. Gupta. (2006). Two stage drying of high moisture paddy with
intervening rest period. **Energy Conversion and Management**. 47:3069-3083.

A.G. Cnossen, M.J. Jimenez and T.J. Siebenmorgen. (2003). Rice fissuring response to high drying
and tempering temperatures. **Journal of Food Engineering**. 59:61-69.

- A.G. Cossen, T.J. Siebenmorgen and W. Yang. (2002). The glass transition temperature concept in drying and tempering : effect of drying rate. **American Society of Agricultural Engineering (ASAE)**. 45(3):759-766.
- A. Iguaz, M. Rodriguez and P. Virseda. (2006). Influence of handling and processing of rough rice on fissures and head rice yields. **Journal of Food Engineering**. 77:803-809.
- Cowie, J.M.G. (1991). *Polymers : Chemistry & Physics of Modern Materials*, 2nd. edition, Blackie Academic & Professional.
- H.R. Bolin and C.C. Huxsoll. (1991). Control of minimally processed carrot (*Dacus carota*) surface discoloration caused by abrasion peeling, **Journal of Food Science**. 56:416-418.
- Hung-Jung Shei and Yi-luen Chen. (2002). Computer simulation on intermittent drying of rough rice. **Drying Technology**. 20(3):615-636.
- Hung-Jung Shei and Yi-luen Chen. (1998). Intermittent drying of rough rice. **Drying Technology**. 16(3-5):839-851.
- James E. Wimberly. (1983). Drying. Technical Handbook for the Paddy Rice Postharvest Industry in Developing Countries. **International Rice Research Institute**. Los Baos, Laguna, Phillippines. p.18-19.
- J. Aquerreta, A. Iguaz, C. Arroqui and P. Virseda. (2007). Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality. **Journal of Food Engineering**. 80:611-618.
- K.J. Chua, A.S. Mujumdar and S.K. Chou (2003). Intermittent Drying of Bioproducts - an Overview, **Bioresource Technology**, Vol. 90, pp. 285-295.
- Nattapol Poomsa-ad, Somchart Soponronnarit, Somkiat Prachayawarakorn and Apichit Terdyothin. (2002). Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidization technique. **Drying Technology**. 20(1):195-210.
- Nattapol Poomsa-ad, Apichit Terdyothin, Somchart Soponronnarit and Somkiat Prachayawarakorn. (2005). Investigations on head-rice yield and operating time in the fluidised-bed drying process : experiment and simulation. **Journal of Stored Products Research**. 41:387-400.
- Perdon, A. A., Siebenmorgen, T. J., and Mauromoustakos, A. (2000). Glassy state transition and rice drying: Development of a brown rice state diagram. **Cereal Chemistry**. 77:708-713.

- Ponciano S. Madamba and Richard P. Yabes. (2004). Determination of the optimum intermittent drying conditions for rough rice (*Oryza sativa, L.*). **Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie**. 38:157-165.
- Qingling Zhang, Wade Yang and Canchum Jia. (2003). Preservation of head rice yield under high-temperature tempering as explained by the glass transition of rice kernels. **Cereal Chemistry**. 80(6):684-688.
- Renjie Dong, Zhanhui Lu, Ahuqing Liu, Yoshio Nishiyama and Wei Cao. (2009). Moisture distribution in a rice kernel during tempering drying. **Journal of Food Engineering**. 91:126-132.
- Somkiat Prachayawarakorn, Nattapol Poomsa-ad and Somchart Soponronnarit. (2005). Quality maintenance and economy with high-temperature paddy-drying process. **Journal of Stored Products Research**. 41:333-351.
- Somkiat Prachayawarakorn, Warunee Tia, Korakot Poopaiboon and Somchart Soponronnarit. (2004). Comparison of performances of pulsed and conventional fluidised-bed dryers. **Journal of Stored Products Research**. 41:479-497.
- Sun, Z., W. Yang, A. M. Stelwagen, T.J. Siebenmorgen, and A.G. Cnossen. (2002). Thermomechanical transitions of rice kernels. **Cereal Chemistry**. 79(3):349-353.
- W. Yang, C.-C. Jia and T.A. Howell. (2003). Relationship of moisture content gradients and glass transition temperature to head rice yield during cross-flow drying. **Biosystems Engineering**. 86(2):199-206.
- W. Yang, T.J. Siebenmorgen, T.:H. Thielen and A.G. Cnossen. (2003). Effect of glass transition on thermal conductivity of rough rice. **Biosystems Engineering**. 84(2):193-200.
- W. Yang, C.-C. Jia, T.J. Siebenmorgen, A. Pan and A.G. Cnossen. (2003). Relationship of kernel moisture content gradients and glass transition temperature to head rice yield. **Biosystems Engineering**. 85(4):467-476.
- Yoshio Nishiyama, Wei Cao and Boaming Li. (2006). Grain intermittent drying characteristic analyzed by a simplified model. **Journal of Food Engineering**. 76:272-279.
- Y.B. Li, C.W. Cao, Q.L. Yu and Q.X. Zhong. (1999). Study on rough rice fissuring during intermittent drying. **Drying Technology**. 17(9):1779-1793.

ภาคผนวก ก

การพิสูจน์สมการ

ภาคผนวก ก. เป็นการพิสูจน์สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณในวิทยานิพนธ์แสดงดังต่อไปนี้

ก.1 สมการคำนวณหาค่าอัตราอบแห้งเฉลี่ย

โดยนิยามอัตราอบแห้งเฉลี่ยคือ ผลต่างของความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นกับความชื้นสุดท้าย ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ต่อด้วยระยะเวลารวมทั้งที่ข้าวเปลือก 1 เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้งตลอดช่วงกระบวนการอบแห้งที่พิจารณา ซึ่งแสดงตามสมการดังนี้

$$\bar{M} = \left[\frac{(M_i - M_f)}{t_{TR}} \right] \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ \bar{M} = อัตราอบแห้งเฉลี่ย, % w.b./sec.
 M_i = ร้อยละความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น, % w.b.
 M_f = ร้อยละความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย, % w.b.
 t_{TR} = ระยะเวลาที่ข้าวเปลือก 1 เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้งตลอดช่วงกระบวนการอบแห้งที่พิจารณา, sec.

$$t_{TR} = (N_{DP} \times t_{RP}) \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ N_{DP} = จำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านเข้าสู่ท่ออบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นสู่ความชื้นสุดท้ายที่พิจารณา, รอบ
 t_{RP} = เวลาที่ข้าวเปลือก 1 เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้ง ใน 1 รอบอบแห้ง, sec.

จากผลการทดสอบความเร็วการตกของข้าวเปลือกในท่ออบแห้ง ตามภาคผนวก ข. สามารถประมาณได้ว่าระยะเวลาที่เมล็ดข้าวเปลือก 1 เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้ง ใน 1 รอบการอบแห้งมีค่าประมาณ 0.5 วินาที ดังนั้นจึงใช้ค่า t_{RP} เท่ากับ 0.5 วินาที

โดยกำหนดช่วงความชื้นที่พิจารณาในช่วง 21 ถึง 14% w.b. ในบางกรณีศึกษาที่การลดความชื้นยังไม่ถึง 14% w.b. จะใช้การประมาณค่านอกช่วง (extrapolation) เพื่อหาจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้งจนได้ระดับความชื้นที่ 14% w.b.

ก.2 สมการคำนวณหาค่าพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก

พิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้งกับปริมาณน้ำที่ระเหยจากข้าวเปลือกในการอบแห้ง

$$E_p = \frac{Q}{w_i - w_f} \quad (\text{ก.3})$$

$$Q = \dot{m}_a [(1 - W_a)C_a + C_v W_a] (T_{out} - T_{in}) \Delta t \quad (\text{ก.4})$$

$$\dot{m}_a = \rho_a A \bar{V} \quad (\text{ก.5})$$

$$E_p = \frac{\rho_a A \bar{V} [(1 - W_a)C_a + C_v W_a] (T_{out} - T_{in}) \Delta t}{w_i - w_f} \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ	E_p	=	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฏิกิริยาเฉพาะ, MJ/kg น้ำที่ระเหย
	Q	=	พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้งที่ผ่านเครื่องทำความร้อน, MJ
	\dot{m}_a	=	อัตราไหลมวลของอากาศ, kg/s
	ρ_a	=	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m ³ (ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ T_{in} และ T_{out})
	A	=	พื้นที่หน้าตัดท่ออบแห้ง, m ²
	\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ยกระแสอากาศในท่ออบแห้ง, m/s
	W_a	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง (ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ แวกดรัม), kg/kg-dry air
	C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, kJ/(kg · K) (ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ T_{in} และ T_{out})
	C_v	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, kJ/(kg · K) (ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ T_{in} และ T_{out})
	T_{in}	=	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน, °C (ใช้อุณหภูมิอากาศ แวกดรัม และความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการเฉลี่ยตลอดช่วงการอบแห้ง)
	T_{out}	=	อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อน, °C

Δt = ระยะเวลาอบแห้งรวม เฉพาะช่วงที่มีข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง, sec.

w_i, w_f = มวลข้าวเปียกเริ่มต้นและสุดท้าย ตามลำดับ, kg

$w_i - w_f$ คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยจากข้าวเปลือกในการอบแห้งซึ่งสามารถหาได้ดังนี้
พิจารณาความชื้นข้าวเปลือกตามมาตรฐานเปียก (ทศนิยม)

$$M_i = \frac{(w_i - d)}{w_i} \quad (\text{ก.7})$$

$$M_f = \frac{(w_f - d)}{w_f} \quad (\text{ก.8})$$

$$M_i - M_f = \frac{(w_i - d)}{w_i} - \frac{(w_f - d)}{w_f} = \frac{d(w_i - w_f)}{w_i \cdot w_f} \quad (\text{ก.9})$$

$$\therefore w_i - w_f = \frac{(w_i \cdot w_f) \cdot (M_i - M_f)}{d} \quad (\text{ก.10})$$

$$M_f = \frac{(w_f - d)}{w_f} = 1 - \left(\frac{d}{w_f} \right) \quad (\text{ก.11})$$

$$\left(\frac{w_f}{d} \right) = \left(\frac{1}{1 - M_f} \right) \quad (\text{ก.12})$$

$$\therefore w_i - w_f = w_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \quad (\text{ก.13})$$

เมื่อ M_i = อัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานเปียกก่อนเริ่มการอบแห้ง
 M_f = อัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานเปียกเมื่อเสร็จสิ้นการอบแห้ง
 d = มวลข้าวเปลือกแห้ง

ด้วยเหตุที่ระหว่างกรอบแห้งได้นำตัวอย่างข้าวออกไปชั่งวัดความชื้นครั้งละ 15 กรัม ดังนั้นเพื่อความถูกต้องในการคำนวณปริมาณน้ำที่ระเหยจึงใช้มวลข้าวเปลือกเฉลี่ย, (\bar{w}_i) แทนมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น, (w_i) ดังนี้

$$\bar{w}_1 = \frac{(w_i + (w_i - 0.015N))}{2} \quad (ก.14)$$

เมื่อ N = จำนวนครั้งที่เก็บตัวอย่างข้าวเปลือก
สำหรับเวลาที่กองข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งในแต่ละรอบการเทข้าวเปลือกหาได้ตามสมการ

$$t_{one\ pass} = \left(\frac{\bar{w}_i}{\dot{m}_p} \right) \cdot 60 \quad (ก.15)$$

เมื่อ $t_{one\ pass}$ = เวลาที่กองข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งในแต่ละรอบการเทข้าวเปลือก
 \dot{m}_p = อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย kg/min.

โดยผลการทดสอบอัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยแสดงในภาคผนวก ข.
ดังนั้นระยะเวลาที่ให้ความร้อนในหนึ่งการทดลอง (Δt) คือ

$$\Delta t = (t_{one\ pass} \cdot N_{DP}) \quad (ก.16)$$

แทนค่า $w_i - w_f$ ลงในสมการคำนวณหาค่าพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกได้

$$E_p = \frac{\rho_a A \bar{V} [(1 - W_a) C_a + C_v W_a] (T_{out} - T_{in}) \Delta t}{\left(\frac{\bar{w}_i}{w_i} \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \right)} \quad (ก.17)$$

แทนค่า Δt ลงในสมการคำนวณหาค่าพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกได้

$$E_p = \frac{\rho_a A \bar{V} [(1 - W_a) C_a + C_v W_a] (T_{out} - T_{in}) \cdot \left(60 N_{DP} \left(\frac{\bar{w}_i}{\dot{m}_p} \right) \right)}{\left(\frac{\bar{w}_i}{w_i} \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \right)} \quad (ก.18)$$

โดยค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่คำนวณได้แสดงในภาคผนวก ค.

ก.3 สมการคำนวณหาค่าพลังงานทฤษฎีจำเพาะและพลังงานรวมจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

พลังงานทฤษฎีจำเพาะที่พิจารณามี 2 ส่วนคือพลังงานขับเคลื่อนเป่าลมและกะพ้อลำเลียงข้าวเปลือกโดยพิจารณาพลังงานทั้ง 2 ส่วนในรูปของพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ขณะทำการอบแห้ง โดยที่พลังงานขับเคลื่อนพัสดมหาได้จากสมการ

$$E_{SB} = \left(\frac{V_B \cdot I_B}{w_i - w_f} \right) \cdot \Delta t_B \quad (\text{ก.19})$$

เมื่อ E_{SB} = พลังงานทฤษฎีจำเพาะที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องเป่าลม, MJ/kg น้ำที่ระเหย
 V_B = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมขณะอบแห้ง, volt.
 I_B = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมขณะอบแห้ง, amp.
 Δt_B = ระยะเวลาอบแห้งรวม เฉพาะช่วงที่มีข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้ง, sec.

โดยที่ Δt_B และ $(w_i - w_f)$ มีค่าเช่นเดียวกับกรณีพลังงานปฐมภูมิจำเพาะซึ่งหาได้ตามสมการ

$$\Delta t_B = \left(60 N_{DP} \cdot \left(\frac{\bar{w}_i}{\dot{m}_p} \right) \right) \quad (\text{ก.20})$$

$$w_i - w_f = \bar{w}_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \quad (\text{ก.21})$$

ในกรณีพลังงานขับเคลื่อนกะพ้อลำเลียงหาได้จากสมการดังนี้

$$E_{SC} = \left(\frac{V_C \cdot I_C}{w_i - w_f} \right) \cdot \Delta t_C \quad (\text{ก.22})$$

เมื่อ E_{SC} = พลังงานทฤษฎีจำเพาะที่ใช้ขับเคลื่อนกะพ้อลำเลียง, MJ/kg น้ำที่ระเหย
 V_C = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กะพ้อลำเลียงขณะอบแห้ง, volt.
 I_C = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กะพ้อลำเลียงขณะอบแห้ง, amp.

Δt_C = ระยะเวลารวมที่ใช้ในการลำเลียงข้าวเปลือกตลอดช่วงการอบแห้ง, sec.
โดยที่ Δt_C และ $(w_i - w_f)$ มีค่าเช่นเดียวกับกรณีพลังงานปฐมภูมิจำเพาะซึ่งหาได้ตามสมการ

$$\Delta t_C = \left(60N_{DP} \cdot \left(\frac{\bar{w}_i}{\dot{m}_p} \right) \right) \quad (\text{ก.23})$$

$$w_i - w_f = \bar{w}_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \quad (\text{ก.24})$$

ดังนั้นพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ, E_S มีค่าเท่ากับ

$$E_S = E_{SB} + E_{SC} \quad (\text{ก.25})$$

$$E_S = \frac{V_B \cdot I_B}{\bar{w}_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right)} \cdot \left(60N_{DP} \cdot \left(\frac{\bar{w}_i}{\dot{m}_p} \right) \right) + \frac{V_C \cdot I_C}{\bar{w}_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right)} \cdot \left(60N_{DP} \cdot \left(\frac{\bar{w}_i}{\dot{m}_p} \right) \right) \quad (\text{ก.26})$$

$$E_S = (V_B \cdot I_B + V_C \cdot I_C) \cdot \frac{60N_{DP} \cdot \left(\frac{\bar{w}_i}{\dot{m}_p} \right)}{\bar{w}_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right)} \quad (\text{ก.27})$$

พลังงานรวมจำเพาะมีค่าเท่ากับผลรวมพลังงานปฐมภูมิจำเพาะกับทุติยภูมิจำเพาะ ดังสมการต่อไปนี้

$$E_T = E_P + E_S \quad (\text{ก.28})$$

$$E_T = \left(\rho_a A \bar{V} \cdot ((1 - W_a) C_a + C_v W_a) \cdot (T_{out} - T_{in}) + (V_B \cdot I_B + V_C \cdot I_C) \right) \cdot \frac{60N_{DP} \cdot \left(\frac{\bar{w}_i}{\dot{m}_p} \right)}{\bar{w}_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right)} \quad (\text{ก.29})$$

โดยค่าพลังงานรวมจำเพาะที่คำนวณได้แสดงในภาคผนวก ก.

ก.4 สมการคำนวณหาร้อยละข้าวต้นและค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร

ในการศึกษานี้พิจารณาปริมาณข้าวต้นในรูปร้อยละข้าวต้นซึ่งคำนวณได้ ตามสมการดังนี้

$$\%HRY_1 = (\text{น้ำหนักข้าวต้น} / \text{น้ำหนักข้าวเปลือก}) * 100\% \quad (\text{ก.30})$$

โดยสมการนี้เป็นนิยามที่ใช้กันโดยทั่วไป แต่เนื่องจากผู้วิจัยเห็นว่าชนิดของพันธุ์ข้าวและความชื้นที่แตกต่างกันย่อมมีผลต่อน้ำหนักของแกลบที่ได้ ซึ่งทำให้การเปรียบเทียบข้าวต่างสายพันธุ์ไม่เป็นมาตรฐาน จึงขอแนะนำนิยามสัดส่วนร้อยละข้าวต้นแบบใหม่ขึ้นตามสมการดังนี้

$$\%HRY_2 = (\text{น้ำหนักข้าวต้น} / \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}) * 100\% \quad (\text{ก.31})$$

อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้จะทำการวิเคราะห์ร้อยละข้าวต้นตามนิยามทั่วไปเพื่อการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมา และได้คำนวณร้อยละข้าวต้นตามนิยามใหม่แสดงในภาคผนวก ก. นอกจากนี้ยังได้คำนวณร้อยละแกลบและข้าวกล้องตามสมการดังนี้

$$\%Husk = (\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}) / (\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}) * 100\% \quad (\text{ก.32})$$

$$\%BRY = (\text{น้ำหนักข้าวกล้อง} / \text{น้ำหนักข้าวเปลือก}) * 100\% \quad (\text{ก.33})$$

ในการวิเคราะห์ค่าความขาวของข้าวสารที่ขัดสีได้ เนื่องจากผลจากเครื่องมือทดสอบสีให้ค่าตามมาตรฐานสี $L^*a^*b^*$ โดยค่า L^* แทนสว่าง-มืด, a^* แทนแดง-เขียว, b^* แทนเหลือง-น้ำเงิน ดังนั้นจึงต้องมีสมการเพื่อวิเคราะห์ผลของความสว่างและสีต่าง ๆ ที่มีผลต่อความขาวของวัสดุซึ่งอยู่ในรูปดัชนีความขาว (whiteness index, WI), (Bolin & Huxsoll, 1991) ตามสมการดังนี้

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{ก.34})$$

โดย WI , L^* , a^* และ b^* มีหน่วยเป็นร้อยละ และแสดงค่าในภาคผนวก ก.

ภาคผนวก ข

ข้อมูลเครื่องมือทดสอบ

ภาคผนวก ข แสดงข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องทำความร้อน (heater), Orifice plate, เครื่องเป่าลม (blower), ความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ย, อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย, การใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลมและกะพ้อลำเลียง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ข.1 เครื่องทำความร้อน (heater) มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1540 W ปรับค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ Variac ปรับค่าแรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน พิจารณารายละเอียดดังนี้

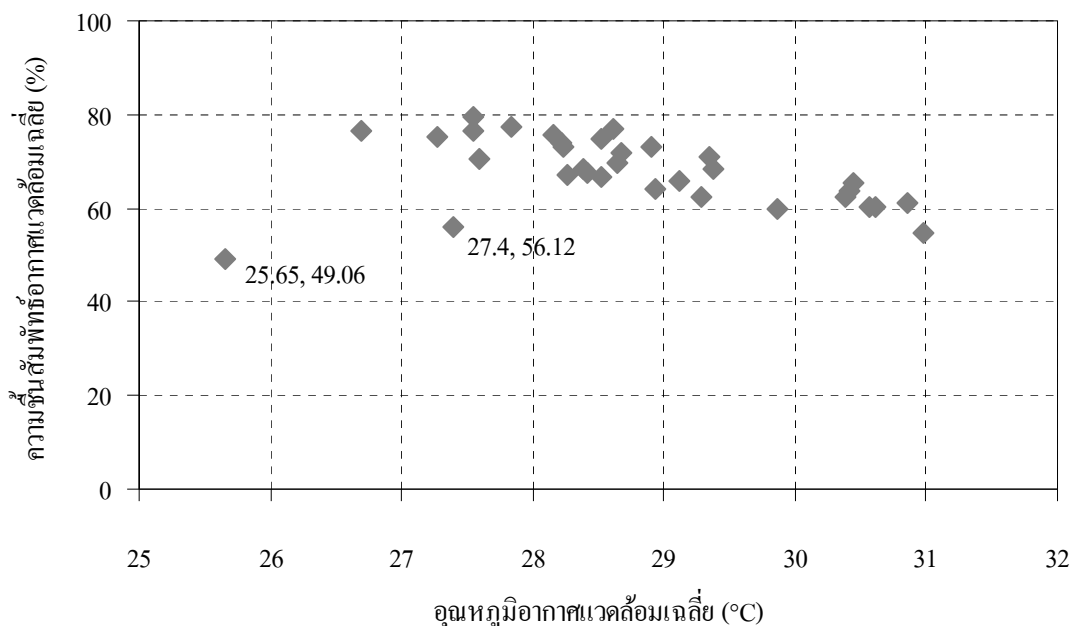
ข.1.1 ค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองในทุกเงื่อนไขการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 25.65-30.98°C โดยที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 49.06-79.43% ดังแสดงในตาราง ข.1 โดยวันที่มีอุณหภูมิต่ำจะมีแนวโน้มของความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า รูปที่ ข.1 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย พบว่าค่าโดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน แต่มี 2 การทดลองที่สภาพอากาศแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอย่างมากคือค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยลดลงผิดแปลกจากในวันอื่นๆ ซึ่งคือการทดลองที่ 32 และ 33 เหตุเพราะในวันดังกล่าวเริ่มเข้าสู่ฤดูหนาวอย่างชัดเจน

ตารางที่ ข.1 แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง อุณหภูมิเฉลี่ยและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอากาศแวดล้อม

การทดลองครั้งที่	วันที่ทำการทดลอง	อากาศอบแห้ง		ระยะเวลาพัก (นาท)	อากาศแวดล้อมเฉลี่ย	
		อุณหภูมิ (°C)	ความเร็ว (m/s)		อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
33	10-พ.ย.-51	40	1	1	25.65	49.06
32	9-พ.ย.-51	40	2	1	27.40	56.12
31	8-พ.ย.-51	40	3	1	28.41	67.67
30	6-พ.ย.-51	60	1	1	28.52	74.87
22	27-ต.ค.-51	60	2	1	28.23	73.07
21	24-ต.ค.-51	60	3	1	27.55	79.43
8	10-ก.ย.-51	100	1	1	29.34	71.14
3	20-ส.ค.-51	100	1	2	28.62	76.94
9	12-ก.ย.-51	100	1	4	28.15	75.82
6	2-ก.ย.-51	100	2	1	30.44	65.44
5	29-ส.ค.-51	100	2	2	29.86	59.91
7	8-ก.ย.-51	100	2	4	28.90	72.95

ตารางที่ ข.1 แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม (ต่อ)

การทดลอง ครั้งที่	วันที่ทำการ ทดลอง	อากาศอบแห้ง		ระยะเวลาพัก (นาที)	อากาศแวดล้อมเฉลี่ย	
		อุณหภูมิ (°C)	ความเร็ว (m/s)		อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)
4	28-ส.ค.-51	100	3	1	30.85	61.1
1	15-ส.ค.-51	100	3	2	30.98	54.49
2	16-ส.ค.-51	100	3	4	28.64	69.8
16	1-ต.ค.-51	130	1	1	28.68	71.9
12	22-ก.ย.-51	130	1	2	28.26	67.26
17	2-ต.ค.-51	130	1	4	27.54	76.55
15	26-ก.ย.-51	130	2	1	30.57	60.42
11	19-ก.ย.-51	130	2	2	27.84	77.24
14	25-ก.ย.-51	130	2	4	28.93	63.95
18	3-ต.ค.-51	130	3	1	29.38	68.35
10	18-ก.ย.-51	130	3	2	28.22	74.14
13	24-ก.ย.-51	130	3	4	30.38	62.22
29	6-พ.ย.-51	150	1	1	28.38	68.38
25	30-ต.ค.-51	150	1	2	27.27	75.02
28	5-พ.ย.-51	150	1	4	27.59	70.55
24	28-ต.ค.-51	150	2	1	29.12	65.85
20	22-ต.ค.-51	150	2	2	30.61	60.08
27	4-พ.ย.-51	150	2	4	26.70	76.29
23	28-ต.ค.-51	150	3	1	28.52	66.83
19	21-ต.ค.-51	150	3	2	30.42	63.88
26	3-พ.ย.-51	150	3	4	29.28	62.56



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยกับความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศแวดล้อม ในช่วงที่ทำการทดลอง

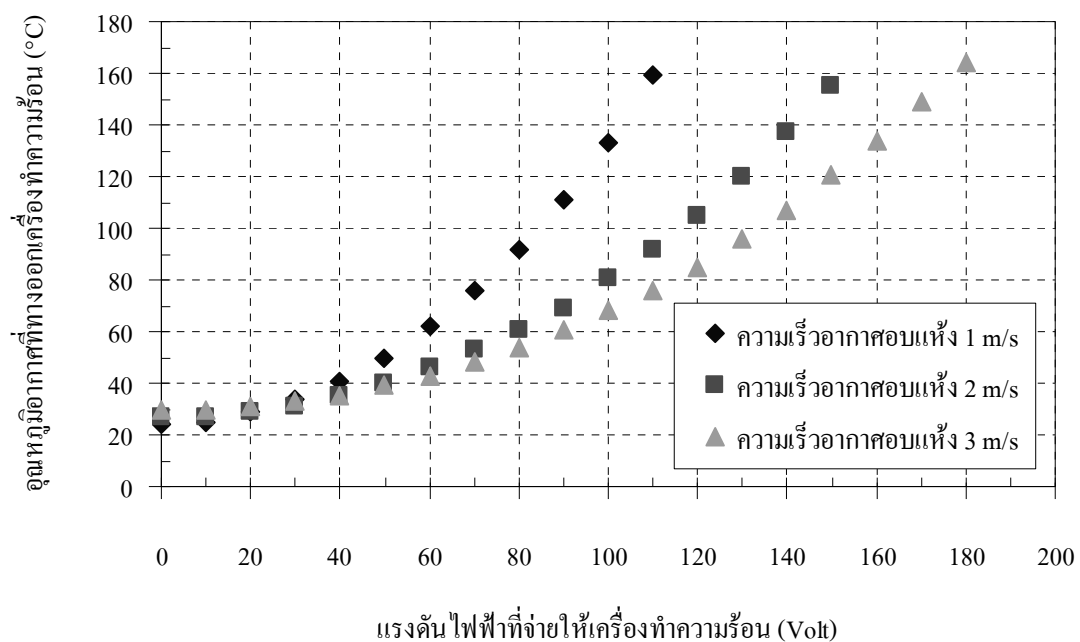
ข.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนกับ อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ออกเครื่องทำความร้อน (ทางเข้าท่ออบแห้ง) ที่ความเร็วอากาศอบแห้งต่าง ๆ

ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน อุณหภูมิอากาศอบแห้งจะสูงขึ้น โดยมีการเพิ่มในลักษณะของ exponential และเมื่อเพิ่มความเร็ว อากาศอบแห้งทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อให้ได้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่เท่ากัน โดยมีแนวโน้ม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศอบแห้งสอดคล้องกัน โดยขณะทดสอบอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่า 23°C ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ ข.2 และรูปที่ ข.2

เนื่องจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีผลต่อการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อ ปรับค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง โดยที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ำกว่าจะใช้พลังงานสูงกว่าแต่มี พฤติกรรม และการเพิ่มของอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สอดคล้องกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าที่ได้ จากการทดสอบเป็นค่าประมาณสำหรับการปรับค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งให้มีค่าตามที่ต้องการ โดย ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเป็นสำคัญ

ตารางที่ ข.2 แสดงข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน, อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และ ความเร็วอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 23°C

แรงดันไฟฟ้า เครื่องเป่าลม (Volt)	ความเร็ว อากาศ อบแห้ง (m/s)	อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ออกจากเครื่องทำความร้อน (°C)																		
		แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน (Volt)																		
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
40	1	24	25	29	34	41	50	62	76	92	111	133	159	-	-	-	-	-	-	
70	2	27	27	29	31	35	40	46	53	61	69	81	92	105	120	137	155	-	-	
110	3	30	30	31	33	35	39	43	48	54	61	68	76	85	96	107	121	134	149	164



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ที่ออกจากเครื่องทำความร้อน กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 23°C

ข.2 Orifice plate

ในทางวิจัยนี้วัดความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ผ่านเข้าสู่เครื่องอบแห้งด้วยแผ่นออริฟิส ที่ เกรียงไกร (2551) ออกแบบและสร้างตามมาตรฐาน ISO 5167 มีลักษณะเป็นแบบ concentric orifice plate (square edge) จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างกันแบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps) แสดงดัง รูป ข.3 มีรายละเอียดของขนาดชุดออริฟิส เพื่อใช้ในการคำนวณความเร็วดังนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	D	=	29.1	mm
เส้นผ่านศูนย์กลาง orifice plate	d	=	20	mm
อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ($0.2 \leq \beta \leq 0.75$)	$\beta = (d/D)$	=	0.687	
กรณี $\beta > 0.6$ จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างกันมีค่าเป็น				
ระยะด้านเหนือหน้า	$D \pm 0.1D$	ในงานวิจัยเลือกใช้ระยะ	=	29 mm
ระยะด้านปลายหน้า	$0.5D \pm 0.01D$	ในงานวิจัยเลือกใช้ระยะ	=	14.3 mm

พิจารณาการไหลของของไหลระหว่างสองจุดใด ๆ โดยใช้สมการเบอร์นูลลี ภายใต้สมมติฐานคือ ไม่มีการส่งผ่านความร้อนทั้งโดยตรง และโดยอ้อม และไม่มีการส่งผ่านงาน กำหนดให้ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งของท่อขนาดใหญ่ และตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลาง orifice plate ดังรูปที่ ข.3 สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{\bar{V}_2^2}{2g} \quad (\text{ข.1})$$

จัดรูปสมการใหม่เป็น

$$\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2 = 2g \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right] \quad (\text{ข.2})$$

จากสมการอนุรักษ์มวล

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{ข.3})$$

$$\rho_1 A_1 \bar{V}_1 = \rho_2 A_2 \bar{V}_2 \quad (\text{ข.4})$$

พิจารณาว่าอุณหภูมิของอากาศที่ผ่าน orifice plate มีความแตกต่างกันน้อยจึงประมาณได้ว่า $\rho_1 \approx \rho_2$

$$A_1 \bar{V}_1 = A_2 \bar{V}_2 \quad (\text{ข.5})$$

$$\bar{V}_1 = \frac{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \bar{V}_1 = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \bar{V}_2 \quad (\text{ข.6})$$

นำ \bar{V}_1 กลับไปแทนในสมการเบอร์นูลลี (ข.2)

$$\bar{V}_2^2 - \left\{ \left(\frac{d}{D}\right)^2 \bar{V}_2 \right\}^2 = 2g \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right] \quad (\text{ข.7})$$

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \sqrt{2g \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right]} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2g \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right]} \quad (\text{ข.8})$$

ดังนั้นสามารถหาค่าอัตราการไหลปริมาตรที่ตำแหน่ง orifice plate ได้เป็น

$$Q_2 = A_2 \bar{V}_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2g \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right]} \quad (\text{ข.9})$$

สมการที่ได้มาเป็นอัตราการไหลปริมาตรโดยทางทฤษฎี ซึ่งต้องมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงเนื่องจากไม่ได้คิดความฝืดที่ด้านทวนการไหล ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) และสัมประสิทธิ์การขยายตัว (ε) เพื่อสามารถนำไปใช้ได้กับการวัดค่าจริง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$Q_2 = A_2 \bar{V}_2 = \frac{C_d \varepsilon A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2g \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right]} \quad (\text{ข.10})$$

โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์การขยายตัว (ε) พิจารณาได้จากสมการ

$$\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta P}{kP_1} \quad (\text{ข.11})$$

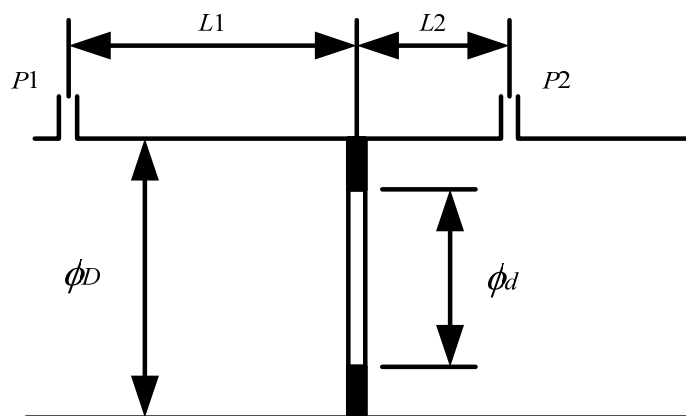
เมื่อ	P_1	=	ความดันสัมบูรณ์ที่ท่อก่อนถึง orifice plate, Pa
	ΔP	=	ผลต่างความดันตกคร่อมที่ orifice plate, Pa
	k	=	specific heat ratio = 1.4 (ที่อุณหภูมิอากาศ 30°C)

โดยชุดออร์ฟิสนี้ เกรียงไกร (2551) ได้นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (ε) มีค่าเท่ากับ 0.99937 สัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) หาได้จากสมการ Reader-Harris/Gallagher

$$\begin{aligned}
 C_d = & 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521\left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)^{0.7} + \left(0.0188 + 0.0063\left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)^{0.8}\right)\beta^{3.5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.3} \\
 & + (0.043 + 0.8e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1})\left(1 - 0.11\left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)^{0.8}\right)\frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.31\left[\left(\frac{2L'_2}{1 - \beta}\right) - 0.8\left(\frac{2L'_2}{1 - \beta}\right)^{1.1}\right]\beta^{1.3} \\
 & + 0.011(0.75 - \beta)\left(2.8 - \frac{D}{25.4}\right) \quad (\text{ข.12})
 \end{aligned}$$

เมื่อ	L_1	=	1
	L'_2	=	0.47

(กรณีจุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างแบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps))



รูปที่ ข.3 แผนภาพแสดงลักษณะของท่อ orifice plate และจุดต่อสำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันแบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps)

โดยชุดออริฟิสนี้ เกรียงไกร (2551) ได้นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) มีค่าเท่ากับ 0.62989 และทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบค่า C_d ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงานพบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยค่า C_d ที่ได้จากการทดสอบกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.61-0.68 ทดสอบในช่วงค่าเลขเรโนลด์ภายในท่อเท่ากับ 1800-20000

ข.3 เครื่องเป่าลม (blower) มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 600 W ปรับค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ Variac ปรับค่าแรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม มีการนำ orifice plate มาใช้วัดค่าอัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องเป่าลม มีรายละเอียดดังนี้

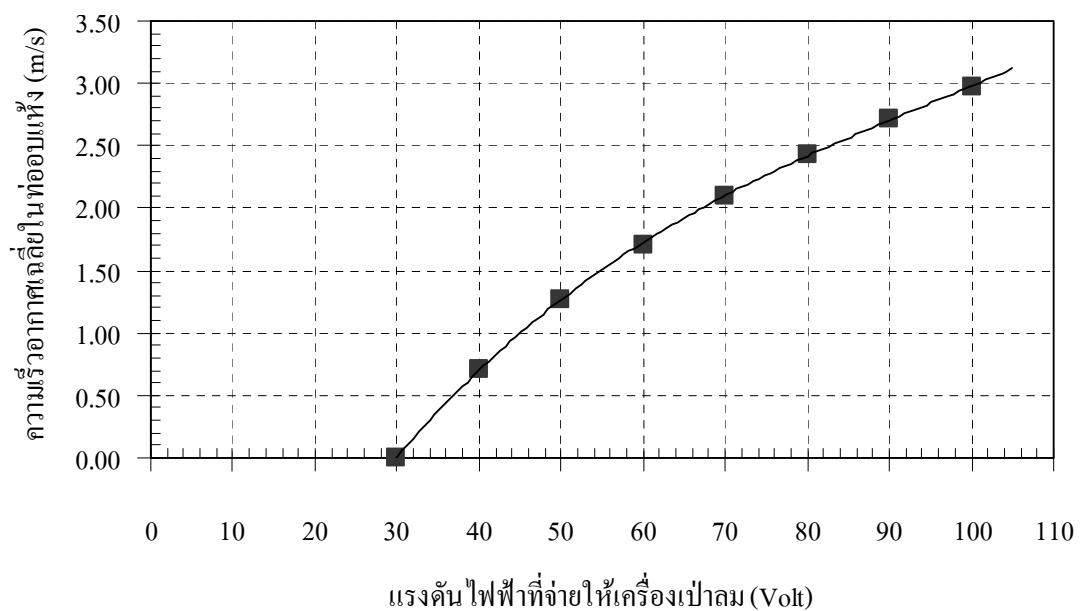
นำชุด orifice plate ไปทดสอบกับชุดการทดลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ของการปรับแรงดันไฟฟ้าและความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้ง โดยทำการติดตั้งที่ทางเข้าอากาศก่อนที่จะเข้าเครื่องเป่าลม ทดสอบขณะที่มีขั้วเปลือกไหลสวนทางกับอากาศในท่ออบแห้ง โดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม เพื่อวัดค่าผลต่างความดันตกคร่อม orifice plate ด้วยหัววัดความดัน (pressure probe testo 0638.1445 C) แสดงข้อมูลในตาราง ข.3 กำหนดค่าความเร็วที่ตำแหน่งคอคอ orifice plate ด้วยสมการ (ข-6) และใช้กฎการอนุรักษ์มวลกำหนดค่าความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้งที่ต้องการ ดังข้อมูลในตารางที่ ข.4 และรูปที่ ข.4

ตารางที่ ข.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมกับผลต่างความดันตกคร่อม orifice plate วัดด้วยหัววัดความดัน (pressure probe testo 0638.1445 C) ขณะที่ขั้วเปลือกไหลสวนทางกับอากาศในท่ออบแห้ง

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม (Volt)	ผลต่างความดันตกคร่อม orifice plate (10^2 -Pa)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	0.1401	0.1419	0.1509	0.1443
50	0.4339	0.4627	0.4641	0.4536
60	0.8196	0.8253	0.8247	0.8232
70	1.2391	1.2310	1.2569	1.2423
80	1.6667	1.6489	1.6370	1.6509
90	2.0881	2.0604	2.0681	2.0722
100	2.4601	2.4993	2.5059	2.4884

ตารางที่ ข.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม, ความเร็วอากาศที่ตำแหน่งคอคอดแผ่น orifice plate และความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้ง ขณะที่มีการเป่าลมไหลสวนทางกับอากาศในท่ออบแห้ง

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม (Volt)	\bar{V}_{avg1} ที่ orifice plate (m/s)	\bar{V}_{avg2} ในท่ออบแห้ง (m/s) $\bar{V}_{avg2} = 0.19841 \bar{V}_{avg1}$
30	0.00	0.00
40	3.61	0.72
50	6.40	1.27
60	8.62	1.71
70	10.59	2.10
80	12.20	2.42
90	13.67	2.71
100	14.98	2.97



รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมกับความเร็วอากาศเฉลี่ยภายในท่ออบแห้ง ขณะที่มีการเป่าลมไหลสวนทางกับอากาศในท่ออบแห้ง

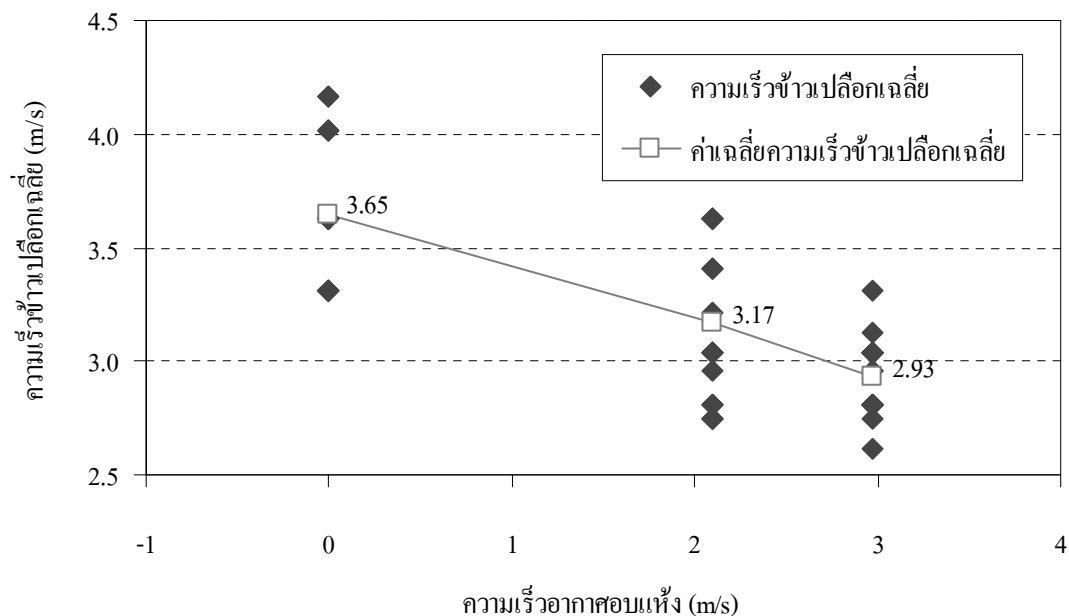
ข.4 ความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ย

เนื่องจากข้าวเปลือกในท่ออบแห้งตกอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วง ประกอบกับมีแรงต้านจากอากาศอบแห้งที่ไหลสวนทางกันอยู่ จึงทำการทดสอบหาความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ยตลอดความยาวท่ออบแห้งที่เงื่อนไขความเร็วอากาศอบแห้งต่าง ๆ เพื่อหาแนวโน้มและขนาดความเร็วที่เกิดขึ้นขณะทำการอบแห้ง

โดยทำการปล่อยกองข้าวเปลือกจากถังพักด้านบนให้ไหลผ่านท่ออบแห้งขณะที่มีอากาศอบแห้งไหลด้วยความเร็ว 3 ค่าคือ 0, 2.1 และ 2.97 m/s ตามลำดับ ใช้นาฬิกาจับเวลาเพื่อหาเวลานับตั้งแต่ที่ขอบหน้ากลุ่มข้าวเปลือกไหลผ่านปากทางเข้าท่ออบแห้งด้านบนจนผ่านปลายทางออกท่ออบแห้งด้านล่าง, t_{Paddy} ซึ่งเป็นระยะทาง, $h_{Dryer Tube}$ เท่ากับ 112.5 cm ความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ยตลอดความยาวท่ออบแห้ง, \bar{V}_{Paddy} หาได้จากสมการดังนี้

$$\bar{V}_{Paddy} = \frac{h_{Dryer Tube}}{t_{Paddy}} \quad (ข.13)$$

โดยข้อมูลการทดสอบแสดงในตารางที่ ข.5 และผลของความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่อความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ยแสดงในรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ย

ตารางที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้ง, ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกไหลผ่านท่ออบแห้ง และความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ย

การทดสอบครั้งที่	ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกไหลผ่านท่ออบแห้ง (sec)			ความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ย (m/s)		
	ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
	0	2.1	2.97	0	2.1	2.97
1	0.28	0.40	0.40	4.02	2.81	2.81
2	0.34	0.41	0.40	3.31	2.74	2.81
3	0.27	0.33	0.38	4.17	3.41	2.96
4	0.27	0.37	0.37	4.17	3.04	3.04
5	0.34	0.37	0.37	3.31	3.04	3.04
6	0.31	0.38	0.37	3.63	2.96	3.04
7	0.28	0.37	0.40	4.02	3.04	2.81
8	0.31	0.31	0.40	3.63	3.63	2.81
9	0.31	0.40	0.37	3.63	2.81	3.04
10	0.31	0.40	0.38	3.63	2.81	2.96
ค่าเฉลี่ย	0.31	0.36	0.38	3.65	3.17	2.93

ข.5 อัตราการไหลข้าวเปลือก

เนื่องจากข้าวเปลือกไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งด้วยแรงโน้มถ่วง อัตราการไหลของข้าวเปลือกจึงแปรผันตามขนาดทางออกถึงพัก มุมเอียงของถึงพัก ความหนาแน่นของกองข้าวเปลือก (ASME, 1966) และความชื้นของข้าวเปลือก เพื่อความถูกต้องจึงทำการทดสอบ โดยกองข้าวเปลือกไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งที่มีอากาศอบแห้งไหลสวนทางด้วยความเร็ว 1, 2 และ 3 m/s ตามลำดับ จับเวลาที่ข้าวเปลือกทั้งกองใช้ในการไหลออกจากถึงพักด้านบนจนหมด ช่างนำหนักข้าวเปลือกกองที่จับเวลา เพื่อศึกษาผลกระทบความชื้นข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการไหลข้าวเปลือก การทดสอบนี้จึงกระทำโดยตลอดการอบแห้ง ข้อมูลแสดงดังตารางที่ ข.6 โดยอัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยที่นำเสนอได้จากค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ 5 ครั้ง และแสดงในรูปที่ ข.6

ตารางที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้ง, ความชื้นภายในข้าวเปลือก และอัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย

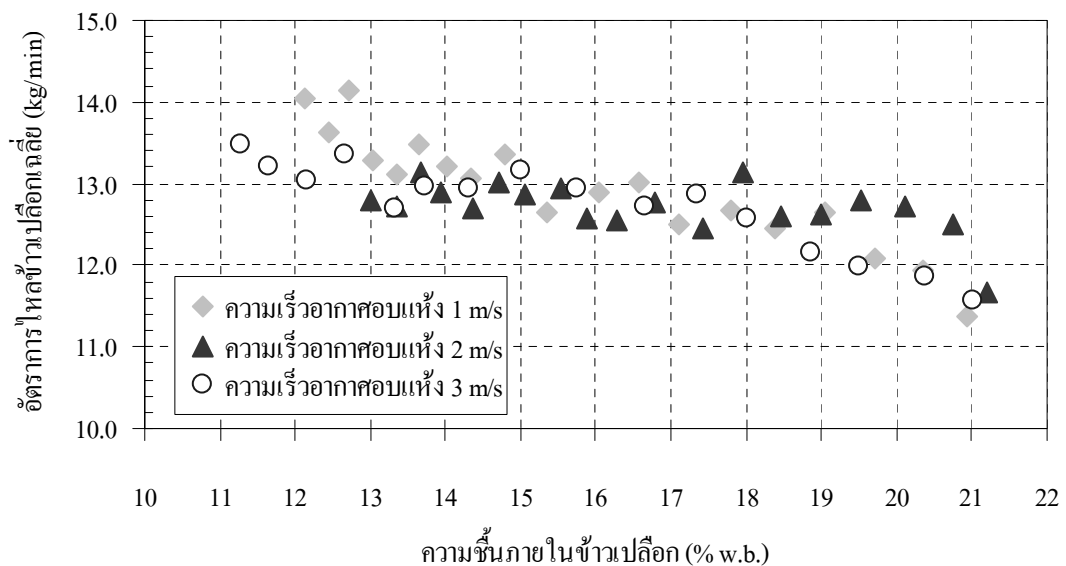
ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s		ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s		ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s	
ความชื้นภายในข้าวเปลือก (% w.b.)	อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย (kg/min)	ความชื้นภายในข้าวเปลือก (% w.b.)	อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย (kg/min)	ความชื้นภายในข้าวเปลือก (% w.b.)	อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย (kg/min)
20.95	11.38	21.20	11.67	21.03	11.57
20.34	11.94	20.75	12.50	20.37	11.86
19.72	12.08	20.11	12.71	19.50	11.98
19.06	12.64	19.54	12.79	18.85	12.17
18.38	12.45	18.98	12.62	18.01	12.59
17.79	12.68	18.46	12.60	17.35	12.86
17.12	12.50	17.96	13.15	16.65	12.71
16.58	13.01	17.42	12.44	15.76	12.95
16.05	12.90	16.79	12.76	15.00	13.16
15.36	12.66	16.28	12.54	14.30	12.95
14.80	13.35	15.89	12.57	13.73	12.97
14.35	13.07	15.52	12.94	13.34	12.71
14.02	13.22	15.05	12.88	12.66	13.35
13.64	13.48	14.70	13.01	12.16	13.05
13.34	13.10	14.38	12.68	11.66	13.20
13.03	13.28	13.95	12.90	11.27	13.47
12.70	14.14	13.68	13.15		
12.44	13.62	13.35	12.73		
12.14	14.03	13.00	12.80		

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความชื้นข้าวเปลือกมีผลต่ออัตราการไหลข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ความเร็วอากาศอบแห้งก็มีผลแต่เนื่องจากไม่สามารถแสดงถึงผลกระทบได้อย่างชัดเจน ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเฉพาะความชื้นข้าวเปลือกเป็นสำคัญ

เนื่องจากเครื่องอบแห้งที่ศึกษามีลักษณะอัตราอบแห้งที่รวดเร็วแบบคงที่ตลอดช่วงการทดลอง ดังนั้นในการประมาณอัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยตลอดช่วงความชื้นข้าวเปลือกที่ศึกษาจึงหาได้จากสมการแนวโน้มของข้อมูลที่นำเสนอในรูปแบบที่ ข.6 ซึ่งแสดงในสมการดังนี้

$$\bar{m}_{Paddy} = -7.90753 \times 10^{-5} \cdot MC^3 + 3.75786 \times 10^{-3} \cdot MC^2 - 6.08761 \times 10^{-2} \cdot MC + 0.550076 \quad (\text{ข.14})$$

จากสมการพบว่าค่าเฉลี่ยอัตราการไหลข้าวเปลือกในช่วงความชื้นข้าวเปลือก 21-14% w.b. มีค่าเท่ากับ 12.59 kg/min



รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นภายในข้าวเปลือกกับอัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย

ข.6 การใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลมและกะพ้อลำเลียง

เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานทฤษฎีจำเพาะซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานขับเคลื่อนพัดลมและกะพ้อลำเลียง จึงทำการวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ทั้ง 2 ตามเงื่อนไขการอบแห้ง ข้อมูลการทดสอบแสดงในตารางที่ ข.7 และ ข.8 ตามลำดับ เนื่องจากกะพ้อลำเลียงปรับความเร็วรอบด้วยเครื่อง inverter โดยใช้หลักการปรับความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้มอเตอร์ขับเคลื่อนกะพ้อ โดยที่ความเร็วรอบมอเตอร์จะแปรผันตรงกับความถี่จากการทดสอบพบว่าค่าความถี่ต่ำสุดที่กะพ้อลำเลียงสามารถทำงานได้คือ 20 Hz. ได้อัตราการป้อนข้าวเปลือกเท่ากับ 15.37 kg/min

ตารางที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับการใช้พลังงานไฟฟ้าเครื่องเป่าลม

ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)	แรงดันไฟฟ้า (Volt)	กระแสไฟฟ้า (Amp)	กำลังไฟฟ้า (Watt)
1	45	1.04	46.58
2	67	1.17	78.28
3	101	1.30	131.07

ตารางที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนข้าวเปลือกของกะพ้อลำเลียงกับการใช้พลังงานไฟฟ้าของกะพ้อลำเลียง

อัตราการป้อนข้าวเปลือก ของกะพ้อลำเลียง (kg/min)	แรงดันไฟฟ้า (Volt)	กระแสไฟฟ้า (Amp)	กำลังไฟฟ้า (Watt)
15.37	220	1.2	264

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40°C*

จำนวนรอบที่ ข้าวเปลือก ผ่านท่อ อบแห้ง	ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)		
	ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s	ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s	ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s
	ระยะเวลาพัก (นาที)	ระยะเวลาพัก (นาที)	ระยะเวลาพัก (นาที)
	1	1	1
0	21.01	21.05	21.04
30	20.64	20.63	20.83
60	20.40	20.28	20.57
90	20.07	19.86	20.18
120	19.72	19.57	19.88
150	19.54	19.30	19.48
180	19.23	19.00	19.07
210	18.95	18.55	18.66
240	18.71	18.18	18.41
270	18.39	17.97	17.99
300	18.12	17.61	17.78
330	18.00	17.36	17.51
360	17.68	17.05	17.27
390	17.43	16.83	16.96
420	17.12	16.62	16.68
450	16.97	16.21	16.33
480	16.76	15.93	16.08
510	16.65	15.70	15.89
540	16.49	15.66	15.73
570	16.23	15.41	15.53
600	16.18	15.29	15.48
630	16.11	15.18	15.27
660	15.93	14.94	15.10
690	15.87	14.81	14.91
720	15.78	14.64	14.83

หมายเหตุ : * ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.1

ตารางที่ ค.2 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C*

จำนวนรอบที่ ข้าวเปลือก ผ่านท่อ อบแห้ง	ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)		
	ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s	ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s	ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s
	ระยะเวลาพัก (นาที)	ระยะเวลาพัก (นาที)	ระยะเวลาพัก (นาที)
	1	1	1
0	21.05	20.96	21.08
20	20.70	20.53	20.62
40	20.47	20.20	20.07
60	20.29	19.73	19.56
80	19.96	19.36	19.19
100	19.61	19.00	18.79
120	19.35	18.47	18.39
140	19.00	18.13	17.92
160	18.73	17.85	17.46
180	18.36	17.46	17.11
200	18.10	17.14	16.66
220	17.86	16.93	16.44
240	17.65	16.63	16.05
260	17.43	16.43	15.76
280	17.19	16.18	15.56
300	17.09	15.81	15.06
320	16.81	15.60	14.89
340	16.64	15.44	14.56
360	16.52	15.22	14.20
380	16.20	15.04	14.07
400	16.02	14.90	-
420	15.81	14.55	-
440	15.81	14.50	-
460	15.67	14.40	-
480	15.67	14.23	-
500	15.55	14.13	-
520	15.38	13.98	-
540	15.22	13.74	-

ตารางที่ ค.2 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C* (ต่อ)

จำนวนรอบที่ ข้าวเปลือก ผ่านท่อ อบแห้ง	ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)		
	ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s	ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s	ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s
	ระยะเวลาพัก (นาที)	ระยะเวลาพัก (นาที)	ระยะเวลาพัก (นาที)
	1	1	1
560	15.04	13.66	-
580	14.93	-	-
600	14.92	-	-
620	14.82	-	-
640	14.74	-	-
660	14.70	-	-
680	14.62	-	-
700	14.49	-	-
720	14.39	-	-

หมายเหตุ : * ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.2

ตารางที่ ค.3 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C*

จำนวนรอบที่ ข้าวเปลือก ผ่านท่อ อบแห้ง	ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)								
	ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s		
	ระยะเวลาพัก (นาที)			ระยะเวลาพัก (นาที)			ระยะเวลาพัก (นาที)		
	1	2	4	1	2	4	1	2	4
0	21.07	21.07	21.01	21.03	20.90	21.05	21.06	21.00	21.00
10	20.95	20.82	20.88	20.74	20.79	20.68	20.45	20.83	20.59
20	20.77	20.62	20.56	20.54	20.27	20.38	20.02	20.26	20.11
30	20.58	20.34	20.46	20.19	19.94	19.91	19.62	19.78	19.58
40	20.24	19.98	20.24	19.87	19.58	19.54	19.11	19.15	19.09
50	20.08	19.71	19.94	19.47	19.20	19.15	18.66	18.64	18.52
60	19.88	19.58	19.68	19.11	18.79	18.78	18.11	18.21	18.03
70	19.59	19.30	19.48	18.79	18.40	18.37	17.78	17.53	17.49
80	19.44	19.21	19.28	18.57	17.95	18.05	17.23	17.00	16.98
90	19.15	19.00	18.99	18.08	17.69	17.52	16.80	16.39	16.44
100	19.03	18.82	18.79	17.88	17.28	17.24	16.51	15.91	15.98
110	18.83	18.33	18.61	17.54	16.79	16.99	16.07	15.45	15.71
120	18.70	18.19	18.61	17.33	16.57	16.57	15.69	14.90	15.30
130	18.54	18.00	18.22	17.11	16.15	16.39	15.23	14.55	15.04
140	18.29	17.76	18.04	16.78	15.83	16.01	15.07	14.08	14.58
150	18.04	17.68	17.81	16.52	15.53	15.79	14.72	13.68	14.18
160	17.91	17.53	17.51	16.18	15.23	15.52	14.34	13.28	13.84
170	17.70	17.31	17.42	16.10	15.01	15.38	14.10	12.81	13.60
180	17.60	17.22	17.24	15.81	14.80	15.03	13.66	12.51	13.32
190	17.43	17.03	-	15.67	14.50	14.80	-	12.17	-
200	17.28	16.80	-	15.35	14.33	14.65	-	11.95	-
210	16.63	16.63	-	15.17	14.11	14.47	-	11.53	-
220	16.53	16.53	-	14.94	13.83	-	-	-	-
230	16.24	16.24	-	14.84	13.71	-	-	-	-
240	16.25	16.25	-	14.56	13.52	-	-	-	-
250	16.09	16.09	-	14.49	13.30	-	-	-	-
260	15.92	15.92	-	14.26	-	-	-	-	-
270	15.87	15.87	-	14.09	-	-	-	-	-

ตารางที่ ค.3 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C* (ต่อ)

จำนวนรอบที่ ข้าวเปลือก ผ่านท่อ อบแห้ง	ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)								
	ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s		
	ระยะเวลาพัก (นาที)			ระยะเวลาพัก (นาที)			ระยะเวลาพัก (นาที)		
	1	2	4	1	2	4	1	2	4
280	16.05	15.83	-	-	-	-	-	-	-
290	15.93	15.41	-	-	-	-	-	-	-
300	15.79	15.37	-	-	-	-	-	-	-
310	15.73	15.26	-	-	-	-	-	-	-
320	15.67	15.06	-	-	-	-	-	-	-
330	15.50	15.12	-	-	-	-	-	-	-
340	15.34	14.97	-	-	-	-	-	-	-
350	15.24	14.92	-	-	-	-	-	-	-
360	15.09	14.84	-	-	-	-	-	-	-
370	14.94	14.82	-	-	-	-	-	-	-
380	14.86	14.52	-	-	-	-	-	-	-
390	14.65	14.47	-	-	-	-	-	-	-
400	14.52	14.36	-	-	-	-	-	-	-
410	14.44	14.29	-	-	-	-	-	-	-
420	14.34	14.21	-	-	-	-	-	-	-
430	14.25	-	-	-	-	-	-	-	-
440	14.18	-	-	-	-	-	-	-	-
450	14.07	-	-	-	-	-	-	-	-
460	13.98	-	-	-	-	-	-	-	-
470	13.87	-	-	-	-	-	-	-	-
480	13.78	-	-	-	-	-	-	-	-
490	13.67	-	-	-	-	-	-	-	-
500	13.66	-	-	-	-	-	-	-	-
510	13.51	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : * ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.3, 6.10, 6.11

ตารางที่ ค.4 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C* (ต่อ)

จำนวนรอบที่ ข้าวเปลือก ผ่านท่อ อบแห้ง	ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)								
	ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s		
	ระยะเวลาพัก (นาที)			ระยะเวลาพัก (นาที)			ระยะเวลาพัก (นาที)		
	1	2	4	1	2	4	1	2	4
280	13.30	13.39	-	-	-	-	-	-	-
290	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	12.91	13.08	-	-	-	-	-	-	-
310	-	-	-	-	-	-	-	-	-
320	12.63	12.75	-	-	-	-	-	-	-
330	-	-	-	-	-	-	-	-	-
340	-	12.49	-	-	-	-	-	-	-
350	-	-	-	-	-	-	-	-	-
360	-	12.19	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : * ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.4

ตารางที่ ค.5 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C*

จำนวนรอบที่ ข้าวเปลือก ผ่านท่อ อบแห้ง	ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)								
	ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s		
	ระยะเวลาพัก (นาที)			ระยะเวลาพัก (นาที)			ระยะเวลาพัก (นาที)		
	1	2	4	1	2	4	1	2	4
0	20.94	21.02	21.09	21.03	21.07	21.03	20.91	21.06	20.92
10	-	-	-	20.75	20.66	20.67	20.41	20.35	20.29
15	20.58	20.59	20.48	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	20.29	20.05	20.05	19.78	19.60	19.37
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	20.12	20.07	19.98	19.74	19.42	19.47	18.85	18.76	18.39
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	19.09	18.88	18.78	18.34	17.90	17.48
45	19.46	19.50	19.37	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	18.45	18.05	18.19	17.54	17.18	16.85
55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	18.99	18.94	18.79	18.00	17.60	17.57	16.77	16.23	15.93
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	17.53	17.10	16.96	16.04	15.41	15.11
75	18.55	18.53	18.18	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	17.17	16.37	16.46	15.27	14.78	14.16
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	18.07	18.03	17.61	16.47	16.04	15.98	14.88	13.92	13.42
95	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	-	-	-	15.96	15.54	15.51	14.04	13.28	12.77
105	17.46	17.53	17.09	-	-	-	-	-	-
110	-	-	-	15.48	15.03	14.96	13.56	12.58	-
115	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	17.06	17.04	16.59	15.04	14.50	14.40	12.96	11.99	-
125	-	-	-	-	-	-	-	-	-
130	-	-	-	14.57	14.13	14.07	-	-	-
135	16.68	16.61	16.09	-	-	-	-	-	-
140	-	-	-	14.12	13.62	13.62	-	-	-

ตารางที่ ค.5 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C* (ต่อ)

จำนวนรอบที่ ข้าวเปลือก ผ่านท่อ อบแห้ง	ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)								
	ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s		
	ระยะเวลาพัก (นาที)			ระยะเวลาพัก (นาที)			ระยะเวลาพัก (นาที)		
	1	2	4	1	2	4	1	2	4
145	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150	16.28	16.13	15.63	13.75	13.18	13.29	-	-	-
155	-	-	-	-	-	-	-	-	-
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-
165	15.91	15.84	15.16	-	-	-	-	-	-
170	-	-	-	-	-	-	-	-	-
175	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	15.47	15.42	14.78	-	-	-	-	-	-
185	-	-	-	-	-	-	-	-	-
190	-	-	-	-	-	-	-	-	-
195	15.00	15.04	-	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
205	-	-	-	-	-	-	-	-	-
210	14.64	14.74	-	-	-	-	-	-	-
215	-	-	-	-	-	-	-	-	-
220	-	-	-	-	-	-	-	-	-
225	14.32	14.40	-	-	-	-	-	-	-
230	-	-	-	-	-	-	-	-	-
235	-	-	-	-	-	-	-	-	-
240	13.89	14.08	-	-	-	-	-	-	-
245	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-
255	13.62	13.78	-	-	-	-	-	-	-
260	-	-	-	-	-	-	-	-	-
265	-	-	-	-	-	-	-	-	-
270	13.20	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : * ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.5

ตารางที่ ค.6 แสดงระยะเวลารวมในท่ออบแห้ง(resident time) และอัตราอบแห้งเฉลี่ย**

อากาศอบแห้ง		ระยะพัก (min)	ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)		จำนวนรอบที่ ผ่านท่ออบแห้ง, N_{DP} (รอบ)	ระยะเวลารวม ในท่ออบแห้ง, t_{TR} (sec)	อัตราอบแห้ง เฉลี่ย, \bar{M} (% w.b. /sec)
อุณหภูมิ (°C)	ความเร็ว (m/s)		เริ่มต้น M_i	สุดท้าย M_f			
100	1	1	21.07	13.98	460	230	0.0308
		2	21.07	14.00	449*	224.5	0.0315
		4	21.01	14.00	455*	227.5	0.0308
	2	1	21.03	14.09	270	135	0.0514
		2	20.90	13.83	220	110	0.0643
		4	21.05	14.00	233*	116.5	0.0605
	3	1	21.06	13.66	180	90	0.0822
		2	21.00	13.68	150	75	0.0976
		4	21.00	13.84	160	80	0.0895
130	1	1	21.05	13.65	260	130	0.0569
		2	21.10	13.69	260	130	0.0570
		4	21.09	14.00	254*	127	0.0558
	2	1	21.00	13.78	160	80	0.0903
		2	20.99	13.90	160	80	0.0886
		4	21.04	13.75	150	75	0.0972
	3	1	21.03	13.91	110	55	0.1295
		2	21.02	13.65	120	60	0.1228
		4	21.01	13.70	100	50	0.1462
150	1	1	20.94	13.89	240	120	0.0588
		2	21.02	13.78	255	127.5	0.0568
		4	21.09	14.00	206*	103	0.0688
	2	1	21.03	13.75	150	75	0.0971
		2	21.07	13.62	140	70	0.1064
		4	21.03	13.62	140	70	0.1059
	3	1	20.91	13.56	110	55	0.1336
		2	21.06	13.92	90	45	0.1587
		4	20.92	13.42	90	45	0.1667

ตารางที่ ค.6 แสดงระยะเวลารวมในท่ออบแห้ง(resident time) และอัตราอบแห้งเฉลี่ย** (ต่อ)

อากาศอบแห้ง		ระยะพัก (min)	ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)		จำนวนรอบที่ ผ่านท่ออบแห้ง, N_{DP} (รอบ)	ระยะเวลารวม ในท่ออบแห้ง, t_{TR} (sec)	อัตราอบแห้ง เฉลี่ย, \bar{M} (% w.b. /sec)
อุณหภูมิ (°C)	ความเร็ว (m/s)		เริ่มต้น M_i	สุดท้าย M_f			
40	1	1	21.01	15.07	1063*	531.5	0.0112
	2		21.05	14.00	877*	438.5	0.0161
	3		21.04	14.00	869*	434.5	0.0162
60	1	1	21.05	14.00	823*	411.5	0.0171
	2		20.96	13.98	520	260	0.0268
	3		21.08	14.07	380	190	0.0369

หมายเหตุ : * กรณีศึกษาที่ลดความชื้นข้าวเปลือกไม่ถึง 14% w.b. จะใช้การประมาณค่านอกช่วง (extrapolation) เพื่อหาจำนวนรอบที่ผ่านท่ออบแห้งจนได้ระดับที่ 14% w.b.

** ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.6, 6.12, 6.21, 6.22, 6.23, 6.24

ตารางที่ ค.7 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณพลังงานปฐมภูมิจำเพาะตามภาคผนวก ก. ซึ่งมีตัวแปรดังต่อไปนี้

เมื่อ	E_p	=	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ, MJ/kg น้ำที่ระเหย
	Q	=	พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้งที่ผ่านเครื่องทำความร้อน, MJ
	ρ_a	=	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m ³ (ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ T_{in} และ T_{out})
	A	=	พื้นที่หน้าตัดท่ออบแห้ง, m ²
	\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ยกระแสอากาศในท่ออบแห้ง, m/s
	W_a	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง (ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ แวกดรัม), kg/kg-dry air
	C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, kJ/(kg · K) (ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ T_{in} และ T_{out})
	C_v	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, kJ/(kg · K) (ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ T_{in} และ T_{out})
	T_{in}	=	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน, °C (ใช้อุณหภูมิอากาศ แวกดรัม และความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการเฉลี่ยตลอดช่วงการอบแห้ง)
	T_{out}	=	อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อน, °C
	Δt	=	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งรวม เฉพาะช่วงเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง, sec.
	t_{rest}	=	ระยะเวลาพักระหว่างรอบอบแห้ง, min.
	w_i, w_f	=	มวลข้าวเปียกเริ่มต้นและสุดท้าย ตามลำดับ, kg
	$w_i - w_f$	=	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากข้าวเปลือกในการอบแห้ง, kg
	M_i	=	อัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานเปียกก่อนเริ่มการอบแห้ง
	M_f	=	อัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานเปียกสุดท้ายที่พิจารณา
	\bar{w}_i	=	มวลข้าวเปลือกเฉลี่ย, kg

ตารางที่ ค.7 แสดงค่าพลังงานปรุณภูมิจำเพาะและค่าที่ใช้ในการคำนวณพลังงานปรุณภูมิจำเพาะ*

T_{out}	\bar{V}	t_{rest}	ρ_a	w_a	C_a	C_v	T_{in}	N_{DP}	\bar{w}_i	Δt	Q	M_i	M_f	$w_i - w_f$	E_P
40	1	1	1.1550	0.0100	1.0046	1.8713	25.65	1063	2.7225	13784	0.3666	0.2101	0.1507	0.1904	1.93
	2		1.1516	0.0127	1.0047	1.8717	27.40	877	2.7675	11560	0.5396	0.2105	0.1400	0.2269	2.38
	3		1.1496	0.0163	1.0048	1.8719	28.41	869	2.7750	11486	0.7408	0.2104	0.1400	0.2272	3.26
60	1	1	1.1155	0.0182	1.0063	1.8761	28.52	823	2.6775	10495	0.5966	0.2105	0.1400	0.2195	2.72
	2		1.1161	0.0174	1.0063	1.8760	28.23	520	2.7975	6929	0.7948	0.2096	0.1398	0.2270	3.50
	3		1.1174	0.0183	1.0063	1.8759	27.55	380	2.8500	5158	0.9082	0.2108	0.1407	0.2325	3.91
100	1	1	1.0571	0.0181	1.0096	1.8852	29.34	460	2.6475	5800	0.7035	0.2107	0.1398	0.2182	3.22
		2	1.0585	0.0188	1.0095	1.8850	28.62	449	2.6550	5678	0.6970	0.2107	0.1400	0.2183	3.19
		4	1.0594	0.0180	1.0095	1.8849	28.15	455	2.6475	5737	0.7091	0.2101	0.1400	0.2158	3.29
	2	1	1.0550	0.0177	1.0097	1.8854	30.44	270	2.7900	3588	0.7998	0.2103	0.1409	0.2254	3.55
		2	1.0561	0.0156	1.0096	1.8853	29.86	220	2.8275	2963	0.7112	0.2090	0.1383	0.2320	3.07
		4	1.0579	0.0181	1.0096	1.8851	28.90	233	2.8125	3121	0.7624	0.2105	0.1400	0.2306	3.31
	3	1	1.0542	0.0168	1.0097	1.8855	30.85	180	2.8575	2450	0.9289	0.2106	0.1366	0.2449	3.79
		2	1.0539	0.0151	1.0097	1.8855	30.98	150	2.8800	2058	0.7274	0.2100	0.1368	0.2442	2.98
		4	1.0584	0.0170	1.0095	1.850	28.64	160	2.8725	2189	0.8047	0.2100	0.1384	0.2387	3.37

ตารางที่ ค.7 แสดงค่าพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะและค่าที่ใช้ในการคำนวณพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ* (ต่อ)

T_{out}	\bar{V}	t_{rest}	ρ_a	w_a	C_a	C_v	T_{in}	N_{DP}	\bar{w}_i	Δt	Q	M_i	M_f	$w_i - w_f$	E_P
130	1	1	1.0231	0.0176	1.0120	1.8921	28.68	260	2.8950	3585	0.6047	0.2105	0.1365	0.2481	2.44
		2	1.0239	0.0160	1.0120	1.8920	28.26	260	2.8950	3585	0.6069	0.2110	0.1369	0.2485	2.44
		4	1.0253	0.0176	1.0120	1.8919	27.54	254	2.8950	3502	0.5986	0.2109	0.1400	0.2387	2.51
	2	1	1.0195	0.0164	1.0122	1.8925	30.57	160	2.8725	2189	0.7215	0.2100	0.1378	0.2405	3.00
		2	1.0247	0.0180	1.0120	1.8919	27.84	160	2.8725	2189	0.7460	0.2099	0.1390	0.2365	3.15
		4	1.0226	0.0158	1.0121	1.8922	28.93	150	2.8800	2058	0.6910	0.2104	0.1375	0.2434	2.84
	3	1	1.0218	0.0174	1.0121	1.8923	29.38	110	2.9100	1525	0.7650	0.2103	0.1391	0.2407	3.18
		2	1.0240	0.0177	1.0120	1.8920	28.22	120	2.9025	1659	0.8440	0.2102	0.1365	0.2477	3.41
		4	1.0198	0.0167	1.0122	1.8925	30.38	100	2.9175	1390	0.6887	0.2101	0.1370	0.2471	2.79
150	1	1	1.0030	0.0164	1.0137	1.8969	28.38	240	2.8725	3284	0.6522	0.2094	0.1389	0.2352	2.77
		2	1.0052	0.0170	1.0136	1.8967	27.27	255	2.8650	3480	0.6992	0.2102	0.1378	0.2406	2.91
		4	1.0045	0.0162	1.0137	1.8968	27.59	206	2.8875	2833	0.5671	0.2109	0.1400	0.2381	2.38
	2	1	1.0016	0.0165	1.0138	1.8971	29.12	150	2.8800	2058	0.8113	0.2103	0.1375	0.2431	3.34
		2	0.9987	0.0163	1.0139	1.8974	30.61	140	2.8875	1925	0.7477	0.2107	0.1362	0.2490	3.00
		4	1.0063	0.0167	1.0136	1.8966	26.70	140	2.8875	1925	0.7781	0.2103	0.1362	0.2477	3.14

ตารางที่ ค.7 แสดงค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะและค่าที่ใช้ในการคำนวณพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ* (ต่อ)

T_{out}	\bar{V}	t_{rest}	ρ_a	w_a	C_a	C_v	T_{in}	N_{DP}	\bar{w}_i	Δt	Q	M_i	M_f	$w_i - w_f$	E_P
150	3	1	1.0027	0.0162	1.0137	1.8970	28.52	110	2.9100	1525	0.9070	0.2091	0.1356	0.2474	3.67
		2	0.9990	0.0172	1.0139	1.8974	30.42	90	2.9250	1254	0.7323	0.2106	0.1392	0.2426	3.02
		4	1.0012	0.0158	1.0138	1.8971	29.28	90	2.9250	1254	0.7399	0.2092	0.1342	0.2534	2.92

หมายเหตุ : * ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.13, 6.14, 6.15, 6.16

ตารางที่ ค.8 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณพลังงานทุติยภูมิจำเพาะและพลังงานรวมจำเพาะตามภาคผนวก ก. ซึ่งมีตัวแปรดังต่อไปนี้

เมื่อ	T_{out}	=	อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อน, °C
	\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ยกระแสอากาศในท่ออบแห้ง, m/s
	t_{rest}	=	ระยะเวลาพักระหว่างรอบอบแห้ง, min.
	V_B	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมขณะอบแห้ง, Volt
	I_B	=	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมขณะอบแห้ง, Amp
	Δt_B	=	ระยะเวลาอบแห้งรวม เฉพาะช่วงที่มีข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง, sec.
	V_C	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กะพ้อลำเลียงขณะอบแห้ง, Volt
	I_C	=	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กะพ้อลำเลียงขณะอบแห้ง, Amp
	Δt_C	=	ระยะเวลารวมในการลำเลียงข้าวเปลือกตลอดช่วงการอบแห้ง, sec.
	w_i, w_f	=	มวลข้าวเปียกเริ่มต้นและสุดท้าย ตามลำดับ, kg
	$w_i - w_f$	=	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากข้าวเปลือกในการอบแห้ง, kg
	E_{SB}	=	พลังงานทุติยภูมิจำเพาะที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องเป่าลม, MJ/kg น้ำที่ระเหย
	E_{SC}	=	พลังงานทุติยภูมิจำเพาะที่ใช้ขับเคลื่อนกะพ้อลำเลียง, MJ/kg น้ำที่ระเหย
	E_S	=	พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ, MJ/kg น้ำที่ระเหย
	E_T	=	พลังงานรวมจำเพาะ, MJ/kg น้ำที่ระเหย

ตารางที่ ค.8 แสดงค่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ พลังงานรวมจำเพาะและค่าที่ใช้ในการคำนวณพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ*

T_{out}	\bar{V}	t_{rest}	V_B	I_B	$w_i - w_f$	Δt_B	E_{SB}	V_C	I_C	$w_i - w_f$	Δt_C	E_{SC}	E_S	E_T
40	1	1	45	1.04	0.1904	13784	3.37	220	1.2	0.1904	13784	19.11	22.48	24.41
	2		67	1.17	0.2269	11560	3.99	220	1.2	0.2269	11560	13.45	17.44	19.82
	3		101	1.30	0.2272	11486	6.63	220	1.2	0.2272	11486	13.35	19.97	23.24
60	1	1	45	1.04	0.2195	10495	2.23	220	1.2	0.2195	10495	12.62	14.85	17.57
	2		67	1.17	0.2270	6929	2.39	220	1.2	0.2270	6929	8.06	10.45	13.95
	3		101	1.30	0.2325	5158	2.91	220	1.2	0.2325	5158	5.86	8.76	12.67
100	1	1	45	1.04	0.2182	5800	1.24	220	1.2	0.2182	5800	7.02	8.26	11.48
		2	45	1.04	0.2183	5678	1.21	220	1.2	0.2183	5678	6.87	8.08	11.27
		4	45	1.04	0.2158	5737	1.24	220	1.2	0.2158	5737	7.02	8.26	11.54
	2	1	67	1.17	0.2254	3588	1.25	220	1.2	0.2254	3588	4.20	5.45	9.00
		2	67	1.17	0.2320	2963	1.00	220	1.2	0.2320	2963	3.37	4.37	7.44
		4	67	1.17	0.2306	3121	1.06	220	1.2	0.2306	3121	3.57	4.63	7.94
	3	1	101	1.30	0.2449	2450	1.31	220	1.2	0.2449	2450	2.64	3.95	7.74
		2	101	1.30	0.2442	2058	1.10	220	1.2	0.2442	2058	2.22	3.33	6.31
		4	101	1.30	0.2387	2189	1.20	220	1.2	0.2387	2189	2.42	3.62	6.99

ตารางที่ ค.8 แสดงค่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ พลังงานรวมจำเพาะและค่าที่ใช้ในการคำนวณพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ* (ต่อ)

T_{out}	\bar{V}	t_{rest}	V_B	I_B	$w_i - w_f$	Δt_B	E_{SB}	V_C	I_C	$w_i - w_f$	Δt_C	E_{SC}	E_S	E_T
130	1	1	45	1.04	0.2481	3585	0.67	220	1.2	0.2481	3585	3.81	4.49	6.93
		2	45	1.04	0.2485	3585	0.67	220	1.2	0.2485	3585	3.81	4.48	6.92
		4	45	1.04	0.2387	3502	0.68	220	1.2	0.2387	3502	3.87	4.56	7.07
	2	1	67	1.17	0.2405	2189	0.71	220	1.2	0.2405	2189	2.40	3.11	6.11
		2	67	1.17	0.2365	2189	0.72	220	1.2	0.2365	2189	2.44	3.17	6.32
		4	67	1.17	0.2434	2058	0.66	220	1.2	0.2434	2058	2.23	2.89	5.73
	3	1	101	1.30	0.2407	1525	0.83	220	1.2	0.2407	1525	1.67	2.50	5.68
		2	101	1.30	0.2477	1659	0.88	220	1.2	0.2477	1659	1.77	2.65	6.05
		4	101	1.30	0.2471	1390	0.74	220	1.2	0.2471	1390	1.48	2.22	5.01
150	1	1	45	1.04	0.2352	3284	0.65	220	1.2	0.2352	3284	3.69	4.34	7.11
		2	45	1.04	0.2406	3480	0.67	220	1.2	0.2406	3480	3.82	4.49	7.40
		4	45	1.04	0.2381	2833	0.55	220	1.2	0.2381	2833	3.14	3.70	6.08
	2	1	67	1.17	0.2431	2058	0.66	220	1.2	0.2431	2058	2.23	2.90	6.23
		2	67	1.17	0.2490	1925	0.61	220	1.2	0.2490	1925	2.04	2.65	5.65
		4	67	1.17	0.2477	1925	0.61	220	1.2	0.2477	1925	2.05	2.66	5.80

ตารางที่ ค.8 แสดงค่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ พลังงานรวมจำเพาะและค่าที่ใช้ในการคำนวณพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ* (ต่อ)

T_{out}	\bar{V}	t_{rest}	V_B	I_B	$w_i - w_f$	Δt_B	E_{SB}	V_C	I_C	$w_i - w_f$	Δt_C	E_{SC}	E_S	E_T
150	3	1	101	1.30	0.2474	1525	0.81	220	1.2	0.2474	1525	1.63	2.43	6.10
		2	101	1.30	0.2426	1254	0.68	220	1.2	0.2426	1254	1.36	2.04	5.06
		4	101	1.30	0.2534	1254	0.65	220	1.2	0.2534	1254	1.31	1.95	4.88

หมายเหตุ : * ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22, 6.23, 6.24

ตารางที่ ค.9 แสดงอุณหภูมิสูงสุดของข้าวเปลือก คุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสี ในด้าน ปริมาณข้าวตัน และดัชนีความขาวของข้าวสาร

เมื่อ	T_{out}	=	อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อน, °C
	\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ยกระแสอากาศในท่ออบแห้ง, m/s
	t_{rest}	=	ระยะเวลาพักระหว่างรอบอบแห้ง, min.
	M_i	=	ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง, % w.b.
	M_f	=	ความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย <u>หลังการอบแห้ง</u> , % w.b.
	$T_{max\ paddy}$	=	อุณหภูมิสูงสุดของข้าวเปลือก, °C
	$Husk$	=	ปริมาณแกลบ, %
	BRY	=	ปริมาณข้าวกล้อง, %
	HRY_1	=	ปริมาณข้าวตันที่คำนวณแบบทั่วไป, %
	HRY_2	=	ปริมาณข้าวตันที่คำนวณแบบใหม่, %
	L^*	=	ความเป็นสีขาว-ดำ, %
	a^*	=	ความเป็นสีแดง-เขียว, %
	b^*	=	ความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน, %
	WI	=	ดัชนีความขาว, %

ตารางที่ ค.9 แสดงอุณหภูมิสูงสุดของข้าวเปลือก คุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสี ในด้านปริมาณข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าวสาร*

T_{out}	\bar{V}	t_{rest}	M_i	M_f	$T_{max\ paddy}$	$Husk$	BRY	HRY_1	HRY_2	L^*	a^*	b^*	WI
40	1	1	21.01	15.26	26.99	21.08	68.26	44.76	56.72	68.72	0.06	5.58	68.22
	2		21.05	14.24	30.47	21.25	70.40	51.21	65.03	69.40	-0.16	6.25	68.77
	3		21.04	14.60	32.08	21.13	70.58	50.67	64.24	69.86	-0.03	5.84	69.30
60	1	1	21.05	14.10	33.96	21.54	69.41	51.56	65.72	68.93	-0.14	5.88	68.38
	2		20.96	13.35	35.84	21.47	71.91	55.86	71.13	68.53	-0.16	6.75	67.81
	3		21.08	13.93	38.32	21.32	72.34	54.79	69.64	68.78	-0.08	6.41	68.13
100	1	1	21.07	13.55	39.9	21.13	70.87	56.87	72.10	70.08	-0.18	6.35	69.41
		2	21.07	14.39	36.5	21.60	68.43	52.23	66.62	69.24	-0.04	7.16	68.42
		4	21.01	17.22	33.6	21.88	58.22	35.00	44.80	68.24	-0.25	7.42	67.38
	2	1	21.03	13.92	42.8	21.67	69.43	55.54	70.91	67.62	-0.25	6.31	67.01
		2	20.90	13.26	39.6	21.27	70.30	56.29	71.49	69.73	-0.14	6.55	69.03
		4	21.05	14.44	37.7	21.96	65.32	50.95	65.28	69.12	-0.07	6.58	68.42
	3	1	21.06	13.63	48	21.65	68.12	54.43	69.47	69.39	-0.25	6.33	68.74
		2	21.00	13.33	43.2	22.95	69.35	54.45	70.66	66.71	0.06	7.65	65.84
		4	21.00	13.35	39.6	21.22	69.49	55.43	70.36	69.09	-0.22	6.58	68.40

ตารางที่ ค.9 แสดงอุณหภูมิสูงสุดของข้าวเปลือก คุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสี ในด้านปริมาณข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าวสาร* (ต่อ)

T_{out}	\bar{V}	t_{rest}	M_i	M_f	$T_{max\ paddy}$	$Husk$	BRY	HRY_1	HRY_2	L^*	a^*	b^*	WI
130	1	1	21.05	12.72	44.6	21.00	71.27	57.05	72.10	67.58	-0.12	6.40	66.95
		2	21.10	12.14	39.5	21.14	71.38	58.22	73.82	70.20	-0.23	6.52	69.49
		4	21.09	16.57	35.8	21.96	60.96	39.94	51.18	67.46	-0.15	7.80	66.53
	2	1	21.00	13.44	49.6	21.37	69.23	56.14	71.40	68.43	-0.16	7.33	67.58
		2	20.99	11.70	47.5	21.20	71.95	59.69	75.75	68.19	0.05	7.06	67.42
		4	21.04	13.00	41.8	21.42	69.75	56.15	71.45	67.77	-0.20	6.65	67.09
	3	1	21.03	12.37	54.2	21.60	68.08	55.54	70.84	67.00	-0.15	7.31	66.20
		2	21.02	12.53	50	21.18	71.25	58.77	74.57	69.05	-0.23	6.62	68.35
		4	21.01	11.27	47.6	21.37	71.27	58.89	74.89	66.61	0.01	6.84	65.92
150	1	1	20.94	12.80	46.27	21.48	71.25	55.15	70.24	65.93	-0.18	6.30	65.35
		2	21.02	13.58	41.78	21.22	71.75	54.61	69.31	69.48	-0.17	7.41	68.59
		4	21.09	15.38	38.13	22.03	67.70	46.68	59.87	68.17	-0.17	6.65	67.48
	2	1	21.03	13.24	52.16	21.26	70.54	56.10	71.25	68.55	-0.28	6.23	67.93
		2	21.07	13.11	48.76	21.42	71.34	57.37	73.01	70.22	-0.22	6.19	69.58
		4	21.03	13.58	42.95	21.75	70.06	53.66	68.58	66.93	-0.16	5.98	66.39

ตารางที่ ค.9 แสดงอุณหภูมิสูงสุดของข้าวเปลือก คุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสี ในด้านปริมาณข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าวสาร* (ต่อ)

T_{out}	\bar{V}	t_{rest}	M_i	M_f	$T_{max\ paddy}$	$Husk$	BRY	HRY_1	HRY_2	L^*	a^*	b^*	WI
150	3	1	20.91	12.25	56.15	21.40	69.97	56.57	71.97	68.97	-0.14	6.12	68.37
		2	21.06	12.04	53.91	21.78	71.04	58.40	74.66	67.81	-0.13	5.90	67.27
		4	20.92	13.47	50.18	21.76	70.94	54.79	70.02	68.93	-0.17	7.28	68.08

หมายเหตุ : * ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.25, 6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.31, 6.32

ตารางที่ ค.10 แสดงคุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสี ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด โดยใช้อากาศแวดล้อมในการอบแห้ง*

T_{amb}	\bar{V}	t_{rest}	M_i	M_f	$T_{max\ paddy}$	$Husk$	BRY	HRY_1	HRY_2	L^*	a^*	b^*	WI
≈ 30	≈ 1	0	21.1	13.08	≈ 30	21.70	70.72	52.82	67.45	67.42	-0.06	6.52	66.77

หมายเหตุ : * ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.31, 6.32

ตารางที่ ค.11 แสดงคุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสี ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระต่อเนื่อง (ไม่มีระยะเวลาพัก)*

T_{out}	\bar{V}	t_{rest}	M_i	M_f	Husk	BRY	HRY ₁	HRY ₂	L^*	a^*	b^*	WI
60	4.50	0	21.40	13.5	22.90	36.44	23.48	30.46	67.75	0.18	8.97	66.52
	5.20	0	21.40	13.9	22.00	46.38	29.11	37.32	68.03	-0.06	7.90	67.06
	5.93	0	21.40	14.1	22.09	47.40	29.55	37.92	66.67	0.06	7.62	65.81
100	4.50	0	21.40	12.2	26.22	5.91	0.25	0.35	Na	Na	Na	Na
	5.20	0	21.40	13.3	25.77	9.18	0.26	0.34	Na	Na	Na	Na
	5.93	0	21.40	13.5	24.11	10.98	0.54	0.71	Na	Na	Na	Na
130	4.50	0	21.40	14.9	24.73	12.52	3.87	5.14	66.48	0.15	10.52	64.86
	5.20	0	21.40	11.9	29.89	2.01	1.38	1.97	Na	Na	Na	Na
	5.93	0	21.40	12.7	26.44	4.29	1.08	1.47	Na	Na	Na	Na
150	4.50	0	21.40	14.2	25.99	15.08	6.81	9.20	66.81	0.49	12.04	64.69
	5.20	0	21.40	15.2	23.68	26.19	13.98	18.31	68.38	0.05	9.33	67.03
	5.93	0	21.40	16.5	22.76	53.65	32.53	42.11	66.00	0.04	7.44	65.19

หมายเหตุ : Na เนื่องจากได้ปริมาณข้าวคืนน้อยจึงไม่สามารถนำไปวัดค่าความขาวของข้าวสารได้

* ข้อมูลสำหรับพล็อตในรูปที่ 6.25, 6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.31

ประวัติผู้เขียน

นายสุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ เกิดเมื่อวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดเชียงใหม่ ได้เข้าศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษา ที่โรงเรียนเทพดินทร์วิทยา และระดับมัธยมศึกษา ที่โรงเรียนนวมินทราชูทิศ พายัพ หลังจากนั้น ในปี พ.ศ. 2542 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545

ปี พ.ศ. 2548 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการ จำนวน 5 รายวิชา (1) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1, (2) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2, (3) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3, (4) วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม 1 และ (5) วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม 2 เป็นระยะเวลา 3 ปี

ผลงานวิจัยในระดับปริญญาโท ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการดังนี้

- เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบุญ. (2551). ผลของความเร็วอากาศต่ออัตราอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. 15–17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบุญ. (2552). ผลของระยะพัก ความเร็ว และอุณหภูมิต่ออัตราอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกหล่นอิสระ. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10. 1–3 มีนาคม 2552. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบุญ. (2552). ผลของระยะพัก อุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5. 29 เมษายน–1 พฤษภาคม 2552. มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบุญ. (2552). เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ : เงื่อนไขการอบแห้งที่ดีต่อคุณภาพข้าวเปลือก. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. 4–7 พฤศจิกายน 2552. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.