

การทดลองและวิเคราะห์หาแนวทางอบแห้งข้าวเปลือกให้ได้ประสิทธิภาพสูง
ด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

นายเกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2551

**EXPERIMENT AND ANALYSIS OF PADDY DRYING IN
THE FREE-FALL PADDY DRYER TO SEARCH FOR
A HIGH EFFICIENCY DRYING**

Kriangkrai Phetnamkhiao

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

การทดลองและวิเคราะห์หาแนวทางอบแห้งข้าวเปลือกให้ได้ประสิทธิภาพสูง
ด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ทวิข จิตรสมบุญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ

(อ. ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว : การทดลองและวิเคราะห์หาแนวทางอบแห้งข้าวเปลือกให้ได้
ประสิทธิภาพสูงด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ (EXPERIMENT AND ANALYSIS OF
PADDY DRYING IN THE FREE-FALL PADDY DRYER TO SEARCH FOR A HIGH
EFFICIENCY DRYING) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีช จิตรสมบุญ, 176 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาทดลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งคือ ให้ข้าวเปลือกขึ้นหล่นจากถังพักด้านบนอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วงโดยไม่มีการขวางการไหลในท่ออบแห้งแนวดิ่ง สวนทางกับอากาศร้อนที่พุ่งขึ้นจากด้านล่างสู่ทางออกด้านบน ทำให้ข้าวเปลือกมีความพรุนสูง ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศมีค่าสูง เกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศร้อนในท่ออบแห้งอย่างรวดเร็วด้วยวิธีการพาแบบบังคับ งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ และคุณภาพข้าวที่ผ่านการอบแห้ง (ปริมาณข้าวต้นและความขาว) ในการศึกษาใช้เมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 เป็นข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้นด้วยวิธีการแช่ข้าวจนได้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 20-26% w.b. อัตราการป้อนข้าวเปลือก 15.37 kg/min อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45, 60, 90 และ 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก อุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งและอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น หากเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งต่อไปความชื้นจะเข้าสู่ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวเปลือก อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความเร็วสัมพัทธ์ของอากาศ ในส่วนคุณภาพข้าวพบว่าปริมาณข้าวต้นมีค่าต่ำและใกล้เคียงกันในทุกกรณีศึกษา ขณะที่ความขาวมีค่าสูงและเกาะกลุ่มกันในทุกกรณี งานวิจัยได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกสดจากการเก็บเกี่ยวที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b. พบว่า อัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ และคุณภาพข้าวมีแนวโน้มและทิศทางที่สอดคล้องกับกรณีข้าวเปลือกแห้งเพิ่มความชื้น อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศอบแห้งแต่มีค่าต่ำกว่าและใช้ระยะเวลาการอบแห้งนานกว่า ทั้งที่ความชื้นเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่า อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าสูงกว่ากรณีข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้นที่สภาวะอบแห้งเดียวกันกว่าสองเท่า และคุณภาพข้าวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับกรณีข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้นทั้งปริมาณข้าวต้นและความขาว โดยปริมาณข้าวต้นมีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อย

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

KRIANGKRAI PHETNAMKHIAO : EXPERIMENT AND ANALYSIS OF
PADDY DRYING IN THE FREE-FALL PADDY DRYER TO SEARCH
FOR A HIGH EFFICIENCY DRYING. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
TAWIT CHITSOMBOON, Ph.D., 176 PP.

PADDY DRYING/COUNTER FLOW DRYER/HIGH TEMPERATURE DRYING

Experiment and analysis of the free-fall paddy rice dryer were studied. This dryer uses the counter flow principle where paddy flows downward with gravity force and hot air flow upward in a drying tube. The paddy has high porosity and high relative velocity with the air, hence high heat and mass transfer coefficients. This research showed the effect of drying air velocity, drying temperature and initial moisture content of paddy on drying rates, specific energy consumptions, head rice yields and whiteness. The conditions used were: Chainat 1 paddy rewetted for initial moisture content 20-26% w.b., feed rate 15.37 kg/min, drying temperature 45, 60, 90 and 120°C and drying air velocity 1, 2, 3 and 4 m/s. The experimental results indicated that the drying rates and specific energy consumptions increased with the drying temperature, drying air velocity and initial moisture content of the paddy. Dried paddy had low head rice yield but whiteness was very good for all cases. For fresh harvest with initial moisture content about 23% w.b. the drying rates and specific energy consumptions increased with the drying air velocity. The drying rate had the same trend with the rewetted paddy but it used longer time for drying. The specific energy consumptions were more than two times of the rewetted paddy. Head rice yields and whiteness were close to those of the rewetted paddy.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

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

รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบุญรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ จำพิศ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์ อาจารย์ที่ตัด คลวิชัย และอาจารย์โศรฎาแจ้งการ อาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอักษรวิทยา คุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร และคุณวันเพ็ญ สืบสาย เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณจ่านง ผายสระน้อย คุณคมสัน ภายเดช คุณศรัทธา โพธิสว่าง คุณณรงค์ เขียวสูงเนิน และคุณสมยง พิมพ์พรม เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณบรรณาชาน์เขียว คุณสุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ คุณปราโมทย์ สิงห์ทอง คุณปิยะ ยินสันเพ็ยะ คุณพรสวรรค์ ทองใบ คุณวิกันดา ศรีเดช และท่านอื่น ๆ ที่เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาที่มีได้มี รายชื่อข้างต้น ตลอดจนครูอาจารย์ในอดีตทุกท่านที่ได้สั่งสอน อบรม และให้ความรู้

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด

บทที่

1	บทนำ	1
1.1	ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2	แนวทางการทำวิจัย.....	5
1.3	วัตถุประสงค์การวิจัย.....	7
1.4	ขอบเขตของการวิจัย.....	7
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	7
2	คำจำกัดความและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1	ความสำคัญของการอบแห้ง	8
2.2	ทฤษฎีการอบแห้ง.....	8
2.2.1	การถ่ายเทความร้อน.....	8
2.2.2	การถ่ายเทความร้อน.....	10
2.2.2.1	การนำความร้อน	10
2.2.2.2	การพาความร้อน	10
2.2.2.3	การแผ่รังสีความร้อน.....	11
2.3	ความชื้นวัสดุ.....	11
2.3.1	ความชื้นมาตรฐานเปียก.....	11
2.3.2	ความชื้นมาตรฐานแห้ง	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	ความชื้นสัมพัทธ์	12
2.5	ความชื้นสมมูลของวัสดุ	12
2.6	ประเภทของความชื้น	12
2.6.1	ความชื้นที่เกาะที่ผิวเมล็ดพันธุ์	12
2.6.2	ความชื้นภายในเมล็ด	12
2.6.3	ความชื้นซึ่งไม่สามารถทำให้ระเหยออกได้	12
2.7	ลักษณะทางกายภาพของข้าว	13
2.7.1	น้ำหนักเมล็ด	13
2.7.2	ขนาดรูปร่างเมล็ด	13
2.7.3	ความขาวของข้าวสาร	13
2.7.4	คุณภาพการสี	13
2.8	ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย	14
2.9	การลดความชื้นเมล็ด	15
2.9.1	วิธีธรรมชาติ	15
2.9.1.1	ตากข้าวทิ้งไว้ในนาหลังจากเก็บเกี่ยว	15
2.9.1.2	การตากในลานหลังนวดข้าวเสร็จแล้ว	16
2.9.2	การใช้เครื่องอบ	16
2.10	วิธีการหาค่าความชื้น	16
2.10.1	การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง	16
2.10.2	การหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม	17
3	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
3.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
3.2	ผลสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
4	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง	32
4.1	รายละเอียดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ	32
4.2	หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ	33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	วิธีดำเนินการวิจัย	39
5.1	ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกชั้น	39
5.1.1	วิธีการคลุกข้าว	39
5.1.2	วิธีการแช่ข้าว	39
5.2	ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก	39
5.3	ขั้นตอนการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก	40
5.3.1	เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน	41
5.3.2	การหาค่าความชื้นโดยวิธีการใช้ตู้อบ	41
5.4	ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว	42
5.4.1	การทำความสะอาด	42
5.4.2	การกะเทาะเปลือก	42
5.4.3	การขัดขาว	42
5.4.4	การคัดแยกปลายข้าว	42
5.4.5	การวิเคราะห์คุณภาพข้าว	43
5.5	ขั้นตอนการหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ	43
5.6	สถานที่ทำการวิจัย	43
5.7	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	43
5.8	วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	44
5.9	การเก็บรวบรวมข้อมูล	44
5.10	การวิเคราะห์ข้อมูล	44
6	ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	45
6.1	อัตราการอบแห้งข้าวเปลือก	45
6.1.1	อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ค่าต่าง ๆ	45
6.1.2	อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้ง ค่าต่าง ๆ	51
6.1.3	อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นค่าต่าง ๆ	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.1.4	อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีข้าวเปลือกสดที่ความเร็ว อากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ	60
6.2	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ	66
6.3	คุณภาพข้าวเปลือก	71
6.4	แนวทางอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง	80
7	สรุปและข้อเสนอแนะ	83
7.1	สรุปผลการวิจัย	83
7.2	สรุปปัญหาจากการทดลอง	84
7.3	ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป	85
	รายการอ้างอิง	86
	ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	การพิสูจน์สมการ	90
ก.1	สมการคำนวณหาค่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการเพิ่ม ความชื้นให้กับข้าวเปลือก	91
ก.2	สมการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก	93
ภาคผนวก ข	การเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการคลุกข้าวและแช่ข้าว (soak), การทดลองการอบแห้งข้าวเปลือก และการหาค่าความชื้น ด้วยเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett เทียบกับการหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ	96
ภาคผนวก ค	ทดสอบกะพ้อลำเลียง เครื่องทำความร้อน และเครื่องเป่าลม	109
ค.1	กะพ้อลำเลียง (conveyer)	110
ค.2	เครื่องทำความร้อน (heater)	119
ค.3	Orifice plate	125
ค.4	เครื่องเป่าลม (blower)	134

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง	ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก	138
ภาคผนวก จ	บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	174
ประวัติผู้เขียน		176

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ3
ข.1	แสดงข้อมูลระยะเวลาในการแช่ข้าวเปลือก, ค่าความชื้นข้าวเปลือก ในช่วงเวลา 24 hr โดยการหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรง โดยการใส่ตู้อบ..... 98
ข.2	แสดงข้อมูลการทดลองและสถานะควบคุมในการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือก โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกทั้งสองวิธี 100
ข.3	แสดงข้อมูลความชื้นที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ ของข้าวเปลือก ที่เพิ่มความชื้นทั้งสองวิธี และค่าความแตกต่างของความชื้น โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นด้วยการแช่ข้าว (soak) เป็นกรณีเปรียบเทียบ 100
ข.4	แสดงข้อมูลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือก 105
ข.5	แสดงการหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใส่ตู้อบ 105
ข.6	แสดงข้อมูลความชื้นที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ จากการหาค่าความชื้น ทั้งสองวิธี และค่าความผิดพลาดโดยใช้การหาค่าความชื้นวิธีตรง โดยการใส่ตู้อบเป็นค่าอ้างอิง 106
ค.1	แสดงข้อมูลของความถี่กระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบมอเตอร์ขับ 111
ค.2	แสดงข้อมูลของความเร็วรอบมอเตอร์ขับกับความเร็วรอบสายพานลำเลียง 112
ค.3	แสดงข้อมูลของความเร็วรอบมอเตอร์ขับ, แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 114
ค.4	แสดงข้อมูลอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นสัมบูรณ์ของ อากาศแวดล้อมในการทดลอง 119
ค.5	แสดงข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน, อุณหภูมิ อากาศอบแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 23°C 121
ค.6	แสดงข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน, อุณหภูมิ อากาศอบแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 27°C 122
ค.7	แสดงข้อมูลของความเร็วอากาศอบแห้ง, อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ 123

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.8	ความสัมพัทธ์การหาปริมาตรการไหล, ค่าความดันที่ตำแหน่งตกร้อม orifice plate, ค่า Reynold's Number และค่า C_d กรณีใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน 132
ค.9	ความสัมพัทธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม, ผลต่างความสูงของน้ำตกร้อม U-tube manometer, ความเร็วอากาศที่ตำแหน่งคอคออดแผ่น orifice และความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้ง 136
ง.1	แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง สภาวะอากาศแวดล้อม และสภาวะอากาศอบแห้ง กรณีการอบแห้งทั้งหมด 139
ง.2	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C ความชื้นเริ่มต้น ประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s..... 141
ง.3	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความชื้นเริ่มต้น ประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s..... 145
ง.4	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C ความชื้นเริ่มต้น ประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s..... 149
ง.5	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความชื้นเริ่มต้น ประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s..... 152
ง.6	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ใช้ข้าวเปลือกสด ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s 155
ง.7	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 22.92% w.b. 159
ง.8	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 25.04 และ 26.05% w.b. 162
ง.9	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s กรณีความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ..... 164
ง.10	แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s กรณีความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ..... 165

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
ง.11	แสดงข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง และอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ ที่ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกประมาณ 26% w.b. และข้าวเปลือกสด.....	167
ง.12	แสดงการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ ของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ.....	169
ง.13	แสดงข้อมูลปริมาณข้าวต้น และความขาว เมื่อพิจารณาผลกระทบ ของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้าย ที่สภาวะอบแห้งต่าง ๆ โดยใช้มวลตัวอย่างข้าวเปลือก 100 g.....	171

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	เครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทางอิสระ..... 3
1.2	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง..... 6
4.1	แผนภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ..... 34
4.2	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง..... 35
4.3	เครื่องเป่าลม (blower) ของ FengLi ขนาด 0.6 kW ความเร็วรอบมอเตอร์ 16000 rpm 36
4.4	Variac ของ yamabishi รุ่น s-260-10M..... 36
4.5	Orifice plate ที่ใช้ในงานวิจัย 37
4.6	U-tube manometer 37
4.7	Inverter ของ Toshiba รุ่น VF-s7, ตัวรับและแสดงค่าอุณหภูมิของ Shinko รุ่น GCS-300..... 38
6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ..... 47
6.2	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ..... 48
6.3	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ..... 49
6.4	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ..... 50
6.5	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ..... 52
6.6	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ..... 53
6.7	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ..... 54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 55
6.9	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C กรณีค่าความชื้น เริ่มต้นค่าต่าง ๆ 57
6.10	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีค่าความชื้น เริ่มต้นค่าต่าง ๆ 58
6.11	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีค่าความชื้น เริ่มต้นค่าต่าง ๆ 59
6.12	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกสด ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 61
6.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s 62
6.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s 63
6.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s 64
6.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s 65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ และความชื้นเริ่มต้น ข้าวเปลือกประมาณ 26% w.b.....	68
6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่อุณหภูมิ 120°C ของข้าวเปลือกสด กับข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น	69
6.19 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ ของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ	70
6.20 ลักษณะของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวเต็มเมล็ด และข้าวหัก ที่ผ่านการอบแห้ง กรณีข้าวเปลือกสดและข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น	73
6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งข้าวเปลือกกับปริมาณข้าวคืน	74
6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกกับปริมาณข้าวคืน	75
6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้ง กับปริมาณข้าวคืน	76
6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งข้าวเปลือกกับค่าความขาว.....	77
6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกกับค่าความขาว	78
6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้ง กับค่าความขาว.....	79
6.27 ผลของอุณหภูมิและ ความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่ออัตราการสิ้นเปลือง พลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ	81
6.28 ผลของอุณหภูมิและ ความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่อระยะเวลา การอบแห้งข้าวเปลือก	82
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการแช่ข้าวเปลือกกับค่าความชื้นข้าวเปลือก	99
ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก เปรียบเทียบกันระหว่างการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการคลุกข้าว กับการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการแช่ข้าว (soak) ด้วยความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.3	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความแตกต่างของความชื้น โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นด้วยการแช่ข้าว (soak) เป็นกรณีเปรียบเทียบ..... 103
ข.4	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก เปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett m401 กับการหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ ด้วยความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 108.1°C 107
ข.5	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความผิดพลาด ของค่าความชื้นข้าวเปลือก เมื่อให้การหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรง โดยการใช้ตู้อบเป็นค่าอ้างอิง 108
ค.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์ขับ..... 111
ค.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ขับกับความเร็วรอบ ของสายพานลำเลียง 113
ค.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม (ความเร็วอากาศอบแห้ง) กับอัตราการป้อนข้าวเปลือก ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ขับค่าต่าง ๆ 118
ค.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ขับ กับอัตราการป้อนข้าวเปลือกเฉลี่ย..... 118
ค.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมที่วัดได้ 120
ค.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนกับอุณหภูมิ อากาศอบแห้งที่ออกจากเครื่องทำความร้อน กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง ค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 23°C 121
ค.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนกับอุณหภูมิ อากาศอบแห้งที่ออกจากเครื่องทำความร้อน กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง ค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 27°C 122
ค.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งกับความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ ที่ตำแหน่งทางเข้าที่อบแห้ง กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.9	แผนภาพแสดงลักษณะของท่อ orifice plate และจุดต่อสำหรับวัดค่า ความแตกต่างของความดันแบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps) 131
ค.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_d กับค่า Reynold's Number จากการทดสอบ 134
ค.11	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม กับผลต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer 137
ค.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer กับความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้ง 137

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

β	=	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (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
A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งและของไหล, พื้นที่ผิวของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พื้นที่หน้าตัดท่ออบแห้ง, m^2
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	=	มวลของวัสดุแห้ง, kg , เส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice plate, mm
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, mm
D_{AB}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่, $kg/(m \cdot hr)$
e	=	ความหนาของแผ่น orifice plate, mm
\hat{E}_T	=	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ, MJ/kg น้ำที่ระเหย
g	=	แรงโน้มถ่วง, m/s^2
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
k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัตถุ (thermal conductivity), $W/(m \cdot ^\circ C)$
		specific heat ratio
L_e	=	ความยาวท่อสมมูล, m
m_a	=	อัตราไหลมวลของอากาศ, kg/s

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, % dry basis or % d.b.
M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก, % wet basis or % w.b.
N_A	=	ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท, kg/hr
Nu	=	Nusselt number
Pr	=	Prandtl number
Δp	=	ผลต่างความดันตกคร่อมที่แผ่น orifice plate, Pa
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
Q	=	พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้ง, MJ, อัตราไหลปริมาตร, m ³ /s
Re	=	Reynolds number
Re_D	=	Reynolds number ภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D
Sc	=	Schmidt number
Sh	=	Sherwood number
T_∞	=	อุณหภูมิของกระแสของไหล, อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม, °C, K
T_{in}	=	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน, °C
T_{out}	=	อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อน, °C
T_S	=	อุณหภูมิที่ผิวของเม็ดของแข็ง, อุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, °C, K
Δt	=	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min
V	=	ปริมาตรของน้ำ, m ³
\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ยกระแสอากาศในท่ออบแห้ง, m/s
w	=	มวลของวัสดุชิ้น, kg
W_a	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง (ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ), kg/kg-dry air
x	=	พิกัดมวลสาร, m
x_w	=	เศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศ
x_{ws}	=	เศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัว
Z	=	ระดับจากจุดอ้างอิง, m
$\frac{dT}{dx}$	=	ความชันของอุณหภูมิในเนื้อวัตถุ, °C/m

บทที่ 1

บทนำ

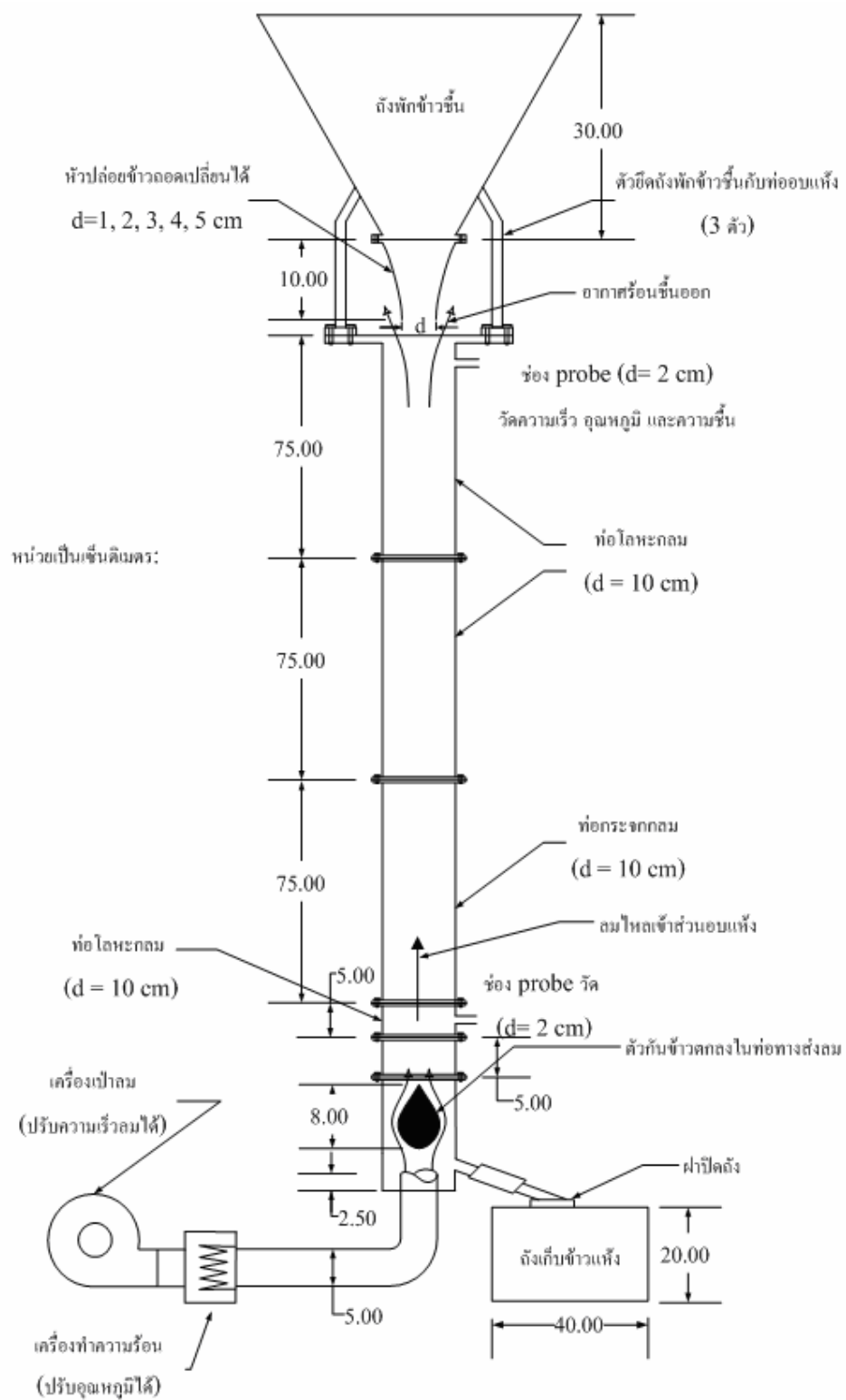
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ข้าวเป็นอาหารหลักของประชากรส่วนใหญ่ของโลก ประเทศไทยเป็นประเทศที่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก และด้วยความเหมาะสมทางภูมิศาสตร์ประเทศไทยจึงเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการปลูกข้าวเป็นจำนวนมาก ในกระบวนการเก็บเกี่ยวข้าวจะทำการเก็บเกี่ยวขณะที่ยังเขียวเปลือกมีความชื้นสูง (20-30% w.b.) (wet basis) (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2538) ทั้งนี้เพื่อลดการร่วงหล่นของเมล็ดข้าว แต่ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงจะมีระยะเวลาการเก็บรักษาสั้น ใช้ต้นทุนในการเก็บรักษา และขนส่งสูง และหากเก็บไว้เป็นระยะเวลานานจะส่งผลให้คุณภาพข้าวเปลือกมีค่าต่ำลง การอบแห้งจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการลดต้นทุนการผลิต การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นของข้าวเปลือก โดยใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนให้กับข้าวเปลือก ทำให้น้ำระเหยตัวออกจากข้าวเปลือก ซึ่งความชื้นของข้าวเปลือกที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษามีค่าประมาณ 14% w.b. ในอดีตใช้วิธีการตากข้าวเปลือกบนลานกว้าง กองข้าวที่ตากมีชั้นความหนาประมาณ 5-10 cm และพลิกกลับกองข้าวทุก ๆ 2 ชั่วโมง (กรมการข้าว, 2550) ซึ่งใช้เวลา และพื้นที่เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ข้าวเปลือกมีการปนเปื้อน และมีความเสียหายปริมาณสูง (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540) จึงได้มีการวิจัย และพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อให้อัตราการอบแห้งสูง อบแห้งได้อย่างรวดเร็ว และคุณภาพข้าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งมีหลากหลายรูปแบบที่เป็นที่นิยมในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิด ไคซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบคอลัมน์ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า เครื่องอบแห้งแบบสเปาเด็ดเบด และเครื่องอบแห้งแบบถาด โดยใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งอยู่ในช่วง 4-15 MJ/kg น้ำที่ระเหย (Marier, 2002) เป็นต้น

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนพลังงานเป็นปัญหาสำคัญของสังคม ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการอบแห้งข้าวเปลือก งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก รวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และคุณภาพข้าวเปลือกหลังจากที่ผ่านการอบแห้ง โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง

จากการวิจัย และการพัฒนาเครื่องอบแห้งที่มีอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา แต่ปริมาณการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะในการอบแห้งยังมีค่าสูง และใช้เวลานานในการอบแห้ง แม้ว่าคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งจะมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก็ตาม ดังนั้น ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้คิดค้นเครื่องอบแห้งแบบใหม่เมื่อปี พ.ศ. 2543 เรียกว่า เครื่องอบแห้งแบบหล่นไหลสวนทางอิสระ (Free Fall countered Flow Dryer) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (จุฑาทิพย์ ทองเดชาสามารถ, 2545) มีหลักการทำงานคือ พัดลมเป่าลมผ่านขดลวดความร้อนทางด้านล่างของท่ออบแห้งที่ตั้งในแนวตั้งเพื่อสร้างลมร้อน แล้วเคลื่อนที่ออกทางด้านบน สวนทางกับข้าวเปลือกชิ้นที่ตกจากถังพักด้านบนอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน และความชื้นระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศร้อนภายในท่ออบแห้งอย่างรวดเร็วโดยวิธีการพาแบบบังคับ (forced convection) เพราะการไหลตัวของข้าวเปลือกมีความพรุน และไหลด้วยความเร็วสูง เพิ่มพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความชื้น ทั้งยังทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าสูง ส่งผลให้อุณหภูมิของผิวเมล็ดข้าวต่ำ ช่วยลดการแตกร้าว และ สีหมองคล้ำ จากผลการทดสอบการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80, 100 และ 120°C เมื่อความชื้นเริ่มต้นเป็น 23% d.b. ใช้ระยะเวลาการอบแห้งในช่วง 20-30 s จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเป็น 15.5% d.b. พบว่าอัตราการอบแห้งแปรผันตรงกับอุณหภูมิการอบแห้ง และมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงแสดงว่าไม่เกิดช่วงอัตราการอบแห้งถดถอยดังเช่นการอบแห้งกรณีอื่น ๆ และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะในช่วง 2.4-3.14 MJ/kg น้ำที่ระเหย เมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยเทคนิคแบบอื่น ๆ พบว่า เครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้สามารถอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นต่ำ และทำการอบจนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะต่ำกว่าการใช้เทคนิคแบบอื่น ดังแสดงในตารางที่ 1.1 (ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสริฎา แจ็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, 2549)



รูปที่ 1.1 เครื่องอบแห้งแบบหล่นไหลสวนทางอิสระ

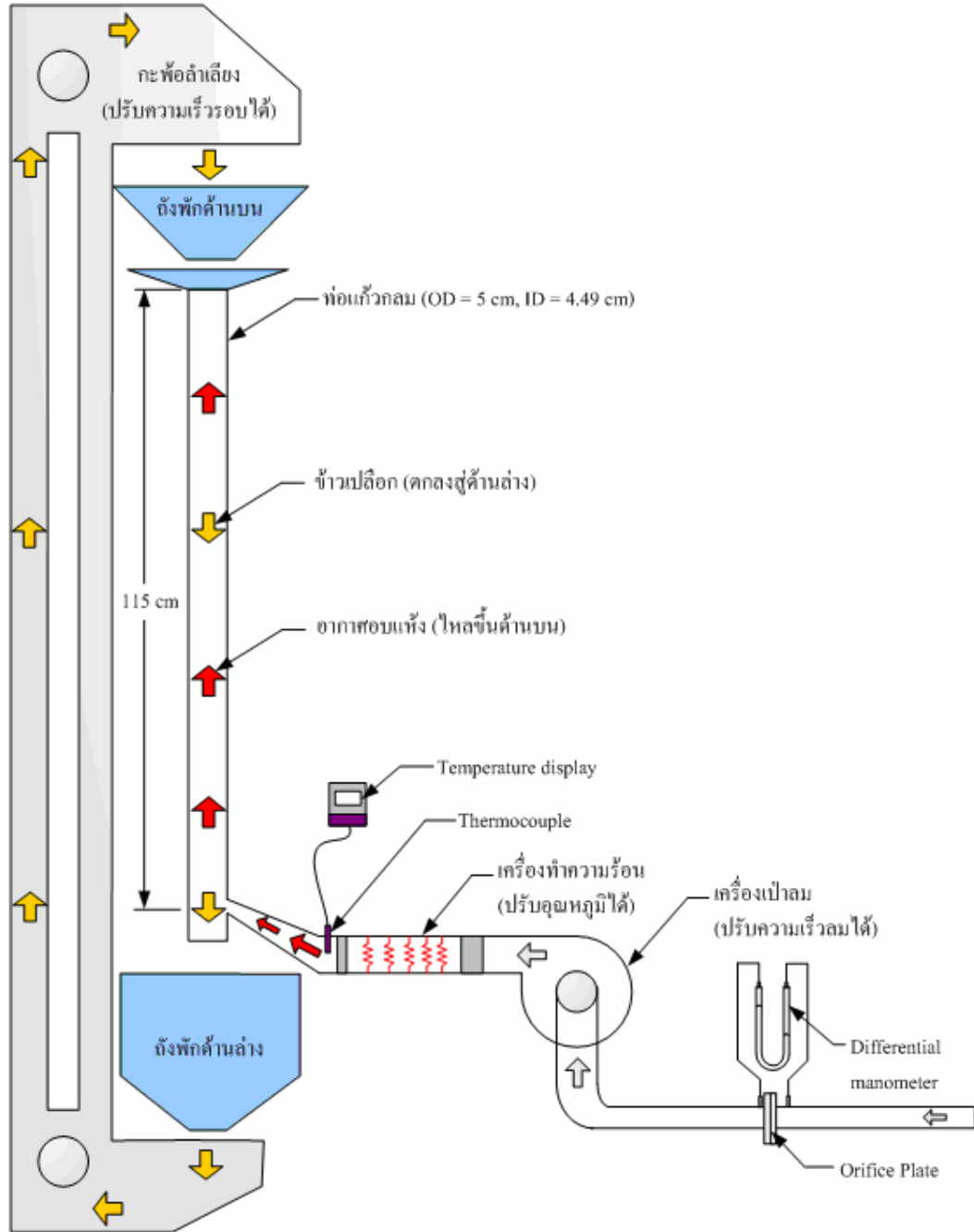
ตารางที่ 1.1 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

ชนิดของเครื่องอบแห้ง	Drying Temp. (°C)	Initial moisture content (% d.b.)	Final moisture content (% d.b.)	Primary energy consumption (MJ/kg น้ำที่ระเหย)
หล่นอิสระ (จุฬาทิพย์ ทองเดชาสามารถ, 2545)	80	23	15.5	2.4
	100			3.14
	120			3.03
	100 (1.5 กก)			1.43
ฟลูอิดไดซ์เบดฐานสั้น (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, สุวัฒน์ ตรุทัศน์วินท์ และ วุฒิกรณ์ จรรย์ตันติเวทย์, 2545)	125	26.8	23.7	5.47
	133	24.1	20.7	4.69
	140	28	23	3.8
สเปาเต็ดเบด (ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2546)	110	33.5	19	12.2
			20	11.7
			17.5	11
			17.5	10.3
	130	33.5	16.5	12.7
			15	12.0
			14.5	11.1
			12.5	10.7
	150	33.5	15	13.9
			13	13.3
			13	13.1
			12	12.2

1.2 แนวทางการทำวิจัย

แม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบหล่นไหลสวนทางอิสระจะมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิจำเพาะต่ำกว่าการใช้เทคนิคแบบอื่น แต่การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้กระทำภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่เป็นการทดลองแบบขั๊กคือ มีระยะเวลาการพักข้าวระหว่างการอบแห้งแต่ละรอบ, ใช้ปริมาณข้าว 600 g ซึ่งถือว่าน้อยมาก และทำการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นต่ำซึ่งโดยทั่วไปเป็นช่วงที่สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าช่วงที่ความชื้นสูง งานวิจัยนี้มีแนวทางที่จะทำการอบแห้งอย่างต่อเนื่องแทนการอบแห้งแบบขั๊ก เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยสำคัญที่มีต่อเครื่องอบแห้งนี้

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 1.2 มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระดังรูปที่ 1.1 แต่มีส่วนที่ต่างกันดังนี้คือ เปลี่ยนแปลงตำแหน่งทางเข้าของอากาศอบแห้งจากด้านล่างของท่ออบแห้งเป็นด้านข้างตอนล่างของท่ออบแห้ง และใช้เป็นลักษณะหัวฉีดเร่งความเร็วอากาศอบแห้ง ติดตั้งชุดกะพ้อลำเลียงเพื่อขนถ่ายข้าวเปลือกให้มีการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง และมีการลดขนาดของเครื่องอบแห้งลงเป็นครึ่งหนึ่งของเครื่องเดิม เพื่อวิเคราะห์การทำงาน และศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาปรับปรุงสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป



รูปที่ 1.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง

1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง
- 1.3.2 วัดอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความเร็วอากาศอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ
- 1.3.3 วิเคราะห์หาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วอากาศอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ
- 1.3.4 วัดความขาว และปริมาณข้าวตัน ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง
- 1.3.5 วิเคราะห์หาแนวทางอบแห้งที่ได้ประสิทธิภาพสูง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระขนาดเล็กที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง การศึกษาจะพิจารณาตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อระยะเวลาการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ และคุณภาพข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้ง ตัวแปรที่พิจารณาคือ ความเร็วลมในท่ออบแห้ง อุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก การวิเคราะห์จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และผลกระทบของแต่ละตัวแปรที่ทำให้การอบแห้งโดยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1.5.1 ได้แนวทางการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพ และคุณภาพสูง
- 1.5.2 ได้ข้อมูลการวิจัยเพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งต่อไป

บทที่ 2

คำจำกัดความและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและคำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยจะแบ่งส่วนของข้าวเปลือก และลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือก กับส่วนของกระบวนการลดความชื้น และวิธีการหาความชื้นรวมถึงคำจำกัดความทางอุณหพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1 ความสำคัญของการอบแห้ง

กระบวนการลดความชื้นเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากโดยปกติความชื้นเมล็ดพืชขณะเก็บเกี่ยวจะมีค่าในช่วง 20-30% w.b. เพื่อป้องกันการร่วนหล่น ดังนั้นจึงต้องมีการลดความชื้นให้มีค่าที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา ความชื้นสำหรับพืชจำพวกแป้งที่เหมาะสมในการเก็บรักษามีค่าในช่วง 13-15% w.b. สำหรับพืชน้ำมันควรมีค่าประมาณ 10% w.b. (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้น มักใช้ความร้อนเป็นตัวกลาง ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแสดอากาศอบแห้งไปยังผิววัสดุ ความร้อนบางส่วนถูกใช้ไปในการระเหยน้ำในรูปของความชื้นแฝงของการระเหย และไอน้ำจะเคลื่อนที่สู่อากาศอบแห้ง เมื่อผิววัสดุมีการสูญเสียไอน้ำไป ความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะลดลงทำให้ความชื้นจากภายในเมล็ดเกิดการเคลื่อนตัวออกสู่ภายนอก และเคลื่อนที่สู่อากาศอบแห้ง

2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง

2.2.1 การถ่ายเทความชื้น

การถ่ายเทความชื้นเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุซึ่งอาจอยู่ในรูปของของเหลวหรือไอ เมื่อวัสดุได้รับความร้อนระหว่างการอบแห้ง น้ำหรือไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนตัวจากเนื้อวัสดุด้านในออกมายังผิวหน้าของวัสดุ จากนั้นน้ำที่ผิวหน้าจะกลายเป็นไอระเหยสู่บรรยากาศรอบ ๆ โดยปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของน้ำระหว่างการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และกลไกภายในของการไหลของของเหลวในวัสดุ ซึ่งมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุ ได้แก่ แรงคาпилลารี (capillary force), การแพร่ของของเหลว (liquid diffusion), การแพร่ของไอน้ำ (vapor diffusion), การแพร่ของไอ และการแพร่ของของเหลวที่ดูดซับที่ผิวของวัสดุ (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2532)

ทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวของแข็ง และของไหลนั้น ปริมาณการถ่ายเทจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร ที่ใดมีมวล และความเข้มข้นมากกว่าจะแพร่กระจายไปยังที่ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า

ที่ความเร็วขนาดหนึ่ง ของไหลจะไหลผ่านบริเวณใกล้เคียงกับเม็ดยของแข็ง บริเวณนี้มีชั้นชั้นชิดผิว (boundary layer) หนาน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับขนาดความเร็วของไหลที่ไหลผ่านเข้ามาภายในอาณาบริเวณขอบเขตนี้ การถ่ายเทมวลสารเป็นไปอย่างช้า ๆ เป็นสัดส่วนกับอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุล นอกเหนือจากชั้นขอบเขตนี้แล้ว การถ่ายเทมวลสารจะเป็นลักษณะการพา มวลด้วยกำลังบังคับ (forced convection mass transfer) ความเข้มข้นของสารในกระแสของไหลต้องสูงกว่าความเข้มข้นที่ขอบเขต และความเข้มข้นที่ขอบเขตต้องสูงกว่าความเข้มข้นที่ผิวของเม็ดยของแข็ง ถ้าเป็นกรณีที่มีมวลจากของแข็งละลายหรือแพร่กระจายในกระแสของไหลความเข้มข้นจะเป็นไปในทางตรงกันข้าม

อัตราการแพร่ของมวลที่ผิวของเม็ดยของแข็งแสดงได้ดังสมการ Fick's law of diffusion

$$N_A = -D_{AB}A \frac{dC_A}{dx}$$

เมื่อ	N_A	=	ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท, kg/hr
	D_{AB}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่, kg/(m · hr)
	A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดยของแข็ง และของไหล, m ²
	C_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร
	x	=	พิกัดมวลสาร, m

การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นชิดผิวของเม็ดยของแข็งสู่กระแสของไหล สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์คล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังนี้

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

เมื่อ	N_A	=	ปริมาณของมวลสาร A ที่ถ่ายเท, kg/hr
	h'_D	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, kg/(m ² · hr)
	A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดยของแข็ง และของไหล, m ²
	C_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร A
	C_{AS}	=	ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว

2.2.2 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนระหว่างสองสิ่งใด ๆ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ทิศทางการถ่ายเทความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ และอัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับระดับความแตกต่างของอุณหภูมิ แบ่งได้เป็นการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

2.2.2.1 การนำความร้อน (conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างโมเลกุลของสสารชนิดหนึ่งที่อยู่ติดกัน สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ถ้าเกิดขึ้นในของเหลวหรือก๊าซอาจเรียกว่า การแพร่ แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดังสมการของ Fourier's law of heat conduction

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

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

2.2.2.2 การพาความร้อน (convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ เป็นผลจากการนำความร้อนหรือการแพร่ที่บริเวณผิวของแข็งกับของไหล และการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านของแข็ง อัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นสัดส่วนกับความเร็วจนของไหล แสดงได้ดังสมการ Newton's law of cooling

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

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

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

$$q = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4)$$

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

2.3 ความชื้นวัสดุ

ความชื้นเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้ 2 แบบคือ

2.3.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก เป็นค่าที่นิยมใช้กันในวงการค้า

$$M_w = (w - d) / w$$

2.3.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง เป็นค่าที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เนื่องจากมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง

$$M_d = (w - d) / d$$

เมื่อ	w	=	มวลของวัสดุชื้น, kg
	d	=	มวลของวัสดุแห้ง, kg

2.4 ความชื้นสัมพัทธ์

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

$$\phi = \frac{x_w}{x_{ws}} \times 100$$

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

2.5 ความชื้นสัมบูรณ์ของวัสดุ

ความชื้นสัมบูรณ์ หมายถึง ความชื้นในวัสดุที่มีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย ค่าความชื้นสัมบูรณ์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.6 ประเภทของความชื้น

ความชื้นเมล็ดพันธุ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำและเมล็ดพันธุ์ ดังนี้

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

2.6.2 ความชื้นภายในเมล็ด เป็นความชื้นที่เมล็ดสามารถดูดซับไว้ภายในได้ จึงระเหยได้ยากกว่า อัตราการระเหยหรืออัตราการคายความชื้นขึ้นอยู่กับระดับความชื้นภายในเมล็ด ลักษณะหรือชนิดของเมล็ด อุณหภูมิ และปริมาณลมร้อนที่ใช้ในการลดความชื้น

2.6.3 ความชื้นซึ่งไม่สามารถทำให้ระเหยออกไปได้ เป็นความชื้นในเมล็ดซึ่งโมเลกุลของน้ำยึดติดแน่นกับโมเลกุลของแป้ง และโปรตีนซึ่งเป็นส่วนประกอบของเมล็ด (ต่ำกว่า 2% w.b.) (ไมตรี แนวพนิช, ม.ป.ป.)

2.7 ลักษณะทางกายภาพของข้าว

ลักษณะทางกายภาพเป็นคุณสมบัติต่าง ๆ ที่สามารถมองเห็น ชั่ง หรือตวงวัดได้ เช่น น้ำหนักเมล็ด ขนาดรูปร่างเมล็ด ความขาวของข้าวสาร คุณภาพการสี เป็นต้น

2.7.1 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

2.7.2 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

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

2.7.4 คุณภาพการสี (milling quality) สามารถประเมินได้จากข้าวเต็มเมล็ด และข้าวคั้น ข้าวที่มีคุณภาพการสีดีจะมีข้าวเต็มเมล็ด และข้าวคั้นสูง โดยต้องมีข้าวเต็มเมล็ด และข้าวคั้นมากกว่า 50% มีการกำหนดขนาดของข้าวเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาคุณภาพการสีดังนี้คือ ข้าวเต็มเมล็ด

(แบ่งเป็น 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

คุณภาพการสีของข้าวขึ้นกับปริมาณการแตกร้าวของเมล็ดข้าว ซึ่งมีสาเหตุจาก

- การเก็บเกี่ยว และการนวดอย่างไม่เหมาะสม
- การลดความชื้นเมล็ดด้วยอัตราเร็วที่ไม่เหมาะสม
- ข้าวที่แห้งแล้วได้รับความชื้นซ้ำ (rewetting) เนื่องจากขณะที่เมล็ดมีความชื้น

ลดลงจะเกิดการหดตัว แต่เมื่อได้รับความชื้นอีกครั้งจะเกิดการขยายตัว พฤติกรรมเช่นนี้ทำให้เกิดการแตกร้าวได้ เช่น การผสมข้าวที่มีความชื้นสูงกับข้าวที่มีความชื้นต่ำ, ข้าวที่แห้งแล้วเปียกฝนหรือน้ำค้าง, การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ กลางวันร้อนแต่กลางคืนเย็น และการจับตัวหรือกลายเป็นหยดน้ำของไอน้ำในการเก็บรักษา (กิตติยา กิจวรรดี, 2547)

กระบวนการสีข้าวประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 4 ขั้นตอน ได้แก่

- การทำความสะอาด (cleaning) เพื่อกำจัดระแง้ใบข้าว (ระแง้คือ 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 68-70% ของข้าวเปลือก
- การคัดแยก (grading) เพื่อคัดแยกข้าวเต็มเมล็ด ข้าวต้น และข้าวหักขนาดต่าง ๆ ออกจากกัน (กัญญา เชื้อพันธุ์, 2547)

2.8 ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย

ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัยเป็นพันธุ์ ชัยนาท 1 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวเจ้า ได้รับการผสม 3 ทาง ระหว่างลูกผสมชั่วที่ 1 ของกลุ่มผสม 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 คณะกรรมการวิจัย และพัฒนากรมวิชาการ เกษตร มีมติให้เป็นข้าวพันธุ์รับรอง โดยข้าวพันธุ์ ชัยนาท 1 มีลักษณะเด่นประจำสายพันธุ์ ดังนี้

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

ค่อนข้างถี่ ฟางแข็ง

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

2.9 การลดความชื้นเมล็ด

หลังจากเก็บเกี่ยวแล้วนวดข้าว จะได้ข้าวเปลือกที่ยังมีความชื้นในเมล็ดสูง เมล็ดพืชเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีการหายใจ การลดความชื้นจึงมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา อัตราการเสื่อมคุณภาพเชื้อรา การเข้าทำลายของแมลงศัตรูในโรงเก็บ ดังนั้นหลังจากเก็บเกี่ยวจึงต้องรีบตากหรือลดความชื้นเมล็ดให้แห้งโดยเร็วที่สุด เพื่อลดอัตราการหายใจของเมล็ดพืช

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

วิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกมี 2 วิธีคือ

2.9.1 วิธีธรรมชาติ (natural drying หรือ sun drying) ได้แก่ การใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ และการเคลื่อนที่ของอากาศเป็นตัวช่วยพาความชื้นออกจากเมล็ด เป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะ ประหยัด ไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อจำกัด และข้อเสียคือ ในฤดูฝนไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ มีการใช้แรงงาน และพื้นที่ตากมาก รวมทั้งไม่สามารถควบคุมคุณภาพของข้าวได้ โดยเฉพาะเมื่อตากข้าวไว้ในแปลงจะมีการสูญเสียจากการทำลายของ นก หนู และแมลง เมื่อเก็บเกี่ยวข้าวเสร็จแล้ว การลดความชื้นโดยวิธีธรรมชาติที่เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมใช้กันจะแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

2.9.1.1 ตากข้าวทิ้งไว้ในนาหลังจากเก็บเกี่ยว (ตากทิ้งรวงก่อนนำไปนวด) โดยจะทำการตากข้าวทิ้งไว้ในนาเป็นระยะเวลาหนึ่ง เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนแรงงาน และพื้นที่ตาก แต่วิธีการนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียต่อข้าวอย่างมาก ทั้งเนื่องจากสัตว์ และแมลงศัตรูพืชทำลาย เกิดการร่วงหล่นขณะตาก และขนย้ายไปนวด คุณภาพการสี และคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ต่ำลงมาก เพราะการตากข้าวทิ้งไว้ในนาจะได้รับผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น การเปียกน้ำค้างในตอนกลางคืน การเปียกฝนขณะตากสลับกับการลดความชื้นจากการได้รับความร้อนในตอน

กลางวัน ทำให้เกิดการแตกร้าวของข้าวเมื่อนำไปนวดหรือขัดสี และระยะเวลาการตากข้าวทิ้งไว้ในนาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการลดลงของคุณภาพการสีข้าว (กิตติยา กิจวรดี, 2547)

2.9.1.2 การตากในลานหลังนวดข้าวเสร็จแล้ว (ตากเป็นเมล็ดหลังจากนวด) เป็นการลดความชื้นของข้าวหลังจากที่เก็บเกี่ยวแล้วผ่านการนวดทันที เพราะในปัจจุบันนิยมใช้รถเกี่ยวนวด จากนั้นจะขายข้าวเปลือกสด (ชื้น) ทันที แต่หากยังไม่ขายจะนำไปตากลดความชื้นบนลาน เพื่อให้ได้ราคาที่สูงขึ้น และช่วยลดการสูญเสียคุณภาพของเมล็ด ดังที่กล่าวข้างต้น การตากข้าวเพื่อให้ได้ผลดีที่สุดมีแนวปฏิบัติดังนี้

- การตากควรมีวัสดุที่สะอาด และแห้งรองรับ เช่น ฟ้าใบหรือเสื่อที่สานด้วยไม้ไผ่ ไม่ควรตากกับพื้นโดยตรง เพราะเมล็ดอาจได้รับความร้อนจากพื้นสูงเกินไป และมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกรณีพื้นซีเมนต์ หรืออาจได้รับความชื้นสูงในกรณีพื้นลานดินทำให้เมล็ดที่ติดกับผิวดินมีความชื้นสูง

- ความหนาของกองข้าวเปลือกควรมีค่าประมาณ 5-10 cm เพราะหากการตากบางเกินไปอุณหภูมิข้าวที่ตากจะสูง ทำให้เกิดการแตกร้าวเมื่อนำไปสี ส่วนถ้าตากหนาเกินไปการระบายอากาศในกองข้าวจะไม่ดี ข้าวแห้งช้า ระหว่างการตากควรกลับกองข้าวทุก ๆ 2 ชั่วโมง หรือวันละ 4 ครั้ง เพื่อช่วยลดความชื้นให้เร็ว และสม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้ได้ข้าวคุณภาพดี

- ในเวลากลางคืนควรมีวัสดุปกคลุมกองข้าวเพื่อป้องกันน้ำค้างหรือฝน

- ไม่ควรตากข้าวนานเกินไป โดยควรให้ความชื้นข้าวมีค่าประมาณ

12-14% w.b. จึงหยุดตาก สำหรับข้าวที่ต้องการเก็บไว้ทำพันธุ์ควรลดความชื้นให้มีค่าประมาณ 9-10% w.b. จึงนำไปเก็บรักษา โดยปกติใช้เวลาตากประมาณ 3-4 แดด จะมีค่าความชื้นในระดับที่ต้องการ

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

2.10 วิธีการหาค่าความชื้น

การหาค่าความชื้นของเมล็ดสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

2.10.1 การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง (direct measurement) สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกลั่น การใช้สารดูดความชื้นในสูญญากาศ การใช้รังสีอินฟราเรด และการใช้ตู้อบ (oven method) เป็นต้น

การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรงมีความเที่ยงตรงสูงแต่ใช้เวลานาน วิธีที่ใช้เป็นมาตรฐานของสถาบันด้านชั่งตวงวัดแห่งชาติของประเทศต่าง ๆ และกำหนดให้เป็นวิธีพื้นฐานในการใช้สอบเทียบเครื่องมือวัดแบบการหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อมคือ การใช้ตู้อบ โดยมีหลักการดังนี้ ทำการชั่งน้ำหนักของข้าวที่ต้องการหาค่าความชื้น จากนั้นนำไปอบให้น้ำในเมล็ดระเหยออกไปจนหมด แล้วจึงนำไปชั่งอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักของน้ำในเมล็ดที่หายไป โดยแต่ละประเทศจะมีมาตรฐานของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้อบแห้งแตกต่างกันไป สำหรับมาตรฐานที่สำนักชั่งตวงวัดยึดเป็นมาตรฐานคือ มาตรฐาน ISO 712, “Cereals and cereal products-Determination of moisture content (Routine Reference Method)”, 1998 ซึ่งอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 130°C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง (วิธีการวัดปริมาณความชื้นในข้าว, 2546)

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

บทที่ 3

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเป็นงานวิจัยที่กล่าวถึงวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และคุณภาพข้าวเปลือกหลังผ่านกระบวนการอบแห้ง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มการพัฒนาเครื่องอบแห้ง และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่มีอยู่ในปัจจุบัน พร้อมทั้งสรุปประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ

3.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อรอนงค์ ศรีพาทกุล, สมเกียรติ ปรัชญาวารากร และ สมชาติ โสภณธณฤทธิ์ (1994) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกในช่วงความชื้นสูงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดอย่างต่อเนื่องโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควบคู่ไปกับการทดลอง ซึ่งพิจารณาที่อัตราการผลิตสูง ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ และข้าวเปลือกที่ได้มีคุณภาพดี อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ แวดล้อม 30°C และ 70% ตามลำดับ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 30% d.b. ความชื้นสุดท้าย 24% d.b. อุณหภูมิในการอบแห้ง 115°C ผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดลองของอุณหภูมิอากาศ และความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งนั้นสามารถทำนายได้ใกล้เคียง สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์กับความชื้นหลังการอบแห้ง ที่ความชื้นสุดท้ายประมาณ 22% d.b. จะมีเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์โดยเฉลี่ย 88% และถ้าอบให้ข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 19% d.b. จะมีเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์โดยเฉลี่ย 60% ส่วนความขาวสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลง และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายลดต่ำลง และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งมากที่สุดในการศึกษาครั้งนี้เป็นการอบแห้งที่ความสูงของ weir 10 cm อัตราการไหลอากาศจำเพาะ 0.043 kg/s/kg dry matter อัตราการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ระเหยน้ำต่ออัตราการผลิตต่ำสุด คิดเป็นอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ 7.9 MJ/kg น้ำที่ระเหย แบ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ 31.1% (2.46 MJ/kg น้ำที่ระเหย) พลังงานความร้อนจำเพาะ 68.9% (5.44 MJ/kg น้ำที่ระเหย) และมีอัตราส่วนระหว่างพลังงานปฐมภูมิจำเพาะต่ออัตราการผลิตเท่ากับ 3.0 (MJ/kg น้ำที่ระเหย)/(kg dry matter/min) ในสภาวะอบแห้งนี้จะมีค่าใช้จ่าย 2.05 Baht/kg น้ำที่ระเหย คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง 0.99 Baht/kg น้ำที่ระเหย

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในกรณีใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง 1.06 Baht/kg น้ำที่ระเหย ถ้าใช้น้ำมันดีเซล ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจะเพิ่มเป็น 1.61 Baht/kg น้ำที่ระเหย

Wiset, L., Srzednicki, Driscoll, Nimmuntavin, C., and Siwapornrak, P. (2001) ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลจากการอบแห้ง 3 แบบคือ การอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันเพียงชั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 85-90°C จนมีความชื้นประมาณ 14% w.b. ซึ่งใช้เวลาประมาณ 11 min, การอบแห้งแบบสองชั้นตอน ชั้นตอนแรกเป็นการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันที่อุณหภูมิสูงประมาณ 150°C เป็นเวลา 4 min จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นประมาณ 18% w.b. จากนั้นทำการอบแห้งชั้นตอนที่สองในโกดังด้วยอุณหภูมิห้องจนมีความชื้นประมาณ 14% w.b. และการอบแห้งในโกดังด้วยอุณหภูมิห้องเพียงชั้นตอนเดียวจนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นประมาณ 14% w.b. โดยใช้ข้าวเปลือกตัวอย่าง 2 ชนิดคือ ข้าว Langi ที่มีเมล็ดขนาดยาว และข้าว Amaroo ที่มีเมล็ดยาวปานกลาง จากรัฐ New South Wales ประเทศ Australia ผลการทดสอบพบว่า เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของการอบแห้งแบบสองชั้นตอนมีค่าสูงสุดคือ 78.3% และ 83.4% สำหรับข้าว Amaroo และข้าว Langi การอบแห้งในโกดังด้วยอุณหภูมิห้องมีค่า 70% และ 77.8% สำหรับข้าว Amaroo และข้าว Langi ส่วนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันมีค่าต่ำสุด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Soponronnarit, S. et al. (1996) และ Taweerattanapanish, A. et al. (1999) ที่กล่าวว่า การอบแห้งโดยใช้เทคนิคแบบฟลูอิดไดเซชันเพียงอย่างเดียวที่มีอุณหภูมิสูงจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงเมื่ออบแห้งจนความชื้นข้าวเปลือกมีค่าไม่ต่ำกว่า 18% w.b. ค่า Gel consistency เป็นค่าที่บอกแนวโน้มความนุ่มหรือแข็งของข้าวที่หุงสุก จากการทดสอบพบว่าข้าวที่อบแห้งในโกดังชั้นตอนเดียวมีค่าสูงสุดคือ 93 mm สำหรับข้าว Langi และ 81 mm สำหรับข้าว Amaroo การอบแห้งแบบสองชั้นตอน มีค่า Gel consistency คือ 87 mm สำหรับข้าว Langi และ 78 mm สำหรับข้าว Amaroo การอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันชั้นตอนเดียวมีค่าต่ำสุด โดยค่า Gel consistency ที่มีค่าสูงกว่า 60 mm แสดงว่าเป็นข้าวที่มีความนุ่ม ในการดูดซับน้ำและการขยายตัวเชิงปริมาตรของข้าวที่หุงสุกพบว่าข้าว Amaroo มีค่าสูงกว่าข้าว Langi ในทุกการทดสอบ และการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันชั้นตอนเดียวมีค่าต่ำที่สุด ส่วนค่า Amylose content เป็นปริมาณแป้งในเมล็ดข้าวที่สามารถละลายน้ำได้ซึ่งจะแสดงเป็นร้อยละเทียบกับแป้งทั้งหมดในเมล็ดข้าว จะมีค่าลดลงเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อน และข้าว Amaroo มีค่า Amylose content สูงกว่าข้าว Langi เล็กน้อย สำหรับค่า Ergosterol content เป็นค่าที่บ่งบอกการเจริญเติบโตของเชื้อรา พบว่ากระบวนการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ค่า Ergosterol content ลดลง ซึ่งตรงข้ามกับกระบวนการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำจะทำให้ค่า Ergosterol content มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันจะทำการอบแห้งได้จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นประมาณ 18% w.b. เพราะหากทำการอบแห้งต่อไปจะมีผลต่อคุณภาพข้าวเปลือก สำหรับกระบวนการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ค่า Amylose content และ Ergosterol content ลดลง

สมชาติ โสภณธนฤทธิ, สมบูรณ์ เวชกามา, สุวัฒน์ ทรุทัศน์วินท์ และ วุฒิกรณ์ จรรย์ตันดิเวทย์ (2545) ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องต้นแบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด จาก การทดสอบตามสภาวะเงื่อนไขดังนี้คือ กำลังการผลิต 4.82 ton/hr ความสูงของตัวอย่างบนฐาน 11.5 cm ความเร็วอากาศอบแห้ง 1.4 m/s อากาศเวียนกลับ 85% ความถี่การสั่นประมาณ 1 (ความถี่ 7.3 Hz และแอมพลิจูดในแนวดิ่ง 5 mm) อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย 140°C อบแห้งจาก ความชื้นเริ่มต้น 28% d.b. จนกระทั่งความชื้นสุดท้าย 23% d.b. พบว่า ความชื้นข้าวเปลือกที่ผ่านการ อบแห้งมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ ปริมาณข้าวต้นเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม ประมาณ 5% ขณะที่ความขามีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ รวมเฉลี่ย 6.15 MJ/kg น้ำที่ระเหย จากการพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาแนวทางที่ เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งเมื่อความชื้นเริ่มต้นเป็น 30% d.b. และความชื้นสุดท้ายเป็น 26% d.b. การอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นจะสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะน้อยกว่าเทคนิค การทำไหลประมาณ 7% อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายยังมีความ คลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้ง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะ สูงถึง 37.5% และ 35.3% ตามลำดับซึ่งมีสาเหตุจากการรั่วของอากาศอบแห้งบริเวณรอยต่อระหว่าง ระบบสั้นกับห้องอบแห้ง จึงทำให้ค่าที่ได้จากแบบจำลองเกิดความผิดพลาด

มานิต สุจันง, วัชรินทร์ คงบัง และ กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย (2548) ทำการศึกษาการอบแห้ง ข้าวเปลือกพันธุ์ กข. 10 ด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด โดยการใช้เครื่องอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการ มีการเวียนลมร้อนที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ประมาณ 80% สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกในห้องอบแห้ง ปริมาณ 25 g ทุก ๆ 30 s ในการวิเคราะห์ค่าความชื้นของข้าวเปลือกตามมาตรฐาน ASAE (1989) และมีเงื่อนไขการอบแห้งคือ ความเร็วลมร้อนเฉลี่ย ณ หัวฉีดลม 5.25 m/s อุณหภูมิลมร้อนใน การศึกษา 3 ระดับคือ 70, 80 และ 90°C ความหนาของเบดประมาณ 8.5 cm ความชื้นเริ่มต้น ข้าวเปลือกประมาณ 25% w.b. ใช้เวลาการอบแห้ง 10 min ทำการทดลองซ้ำกรณีละ 3 ครั้ง จากการ ทดลองพบว่า การลดลงของความชื้นจะแปรผันตามอุณหภูมิของลมร้อน ที่อุณหภูมิลมร้อนสูงการ ลดลงของความชื้นจะมากกว่ากรณีที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีลักษณะการลดลงเป็นไปในแนวทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่ระดับความชื้นสุดท้ายไม่ต่ำกว่า 19% w.b. เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกหักของข้าวเปลือก การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 70-90°C พบว่าระยะเวลาในการอบแห้งลดลงเป็น 3.7-1.9 min อัตราการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 3.667-6.947 kg น้ำที่ระเหย/hr และค่าใช้จ่ายในการระเหยน้ำ ลดลงเป็น 1.51-0.84 baht/kg น้ำที่ระเหย

Prachayawarakorn, S., Poomsa-ad, N., and Soponronnarit S. (2005) ได้ทำการศึกษากระบวนการ อบแห้งข้าวเปลือก 3 แบบเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งและสร้าง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะ กระบวนการอบแห้งทั้ง 3 แบบจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ การอบแห้งด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นขั้นตอนสำคัญในการลดความชื้นของข้าวเปลือกมีการใช้อุณหภูมิสองค่าคือ 130°C และ 150°C, tempering (การเก็บในที่อับอากาศ) เป็นการคลายความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดข้าวโดยใช้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวซึ่งจะช่วยลดการแตกหักหลังจากขั้นตอนอบแห้ง และ ambient-air ventilation (การระบายอากาศด้วยอุณหภูมิแวดล้อม) จะลดอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกให้มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อมซึ่งทำให้ข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนเป็นสีเหลือง ข้าวตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นข้าวจากเขตภาคกลาง โดยมีความชื้นเริ่มต้น 30% d.b. และ 35% d.b. กระบวนการอบแห้งแบบที่ 1 มีขั้นตอนดังนี้คือ การอบแห้งด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเวลา 2.5-4 min ขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิการอบแห้ง, tempering เป็นเวลา 0-45 min และ Ambient-air ventilation เป็นเวลา 20 min จากผลการทดสอบพบว่าที่ความชื้นเริ่มต้นทั้งสองค่า ปริมาณร้อยละข้าวต้นแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาการทำ tempering ในขณะที่ค่าความขาวมีแนวโน้มตรงข้าม เพราะเมื่อระยะเวลา tempering เพิ่มขึ้นความขาวจะมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งช่วงเวลากการทำ tempering ที่เหมาะสมที่ทำให้ทั้งปริมาณร้อยละข้าวต้น และความขาวของข้าวมีค่าสูงคือ ประมาณ 30 min กระบวนการอบแห้งแบบที่ 2 จะแบ่งเป็น 2 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะมีขั้นตอนเช่นเดียวกับแบบที่ 1 มีการต่อแบบอนุกรมกัน มีระยะเวลาการอบแห้ง 1-2 min เวลาการทำ tempering 15 min และ 20 min เวลาการทำ Ambient-air ventilation 30 min และระหว่างชุดที่ 1 กับ 2 จะมีการทำ tempering เป็นเวลา 0-120 min ผลการทดสอบพบว่าที่ความชื้นเริ่มต้นทั้งสองค่าปริมาณร้อยละข้าวต้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อระยะเวลาการทำ tempering เปลี่ยนแปลง ส่วนค่าความขาวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาการทำ tempering เพิ่มขึ้น กระบวนการอบแห้งแบบที่ 3 มีขั้นตอนดังนี้คือ การอบแห้งด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเวลา 1-2 min, tempering เป็นเวลา 15 min และ 30 min แล้วทำการอบแห้งด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไดซ์เบดกับ tempering ซ้ำอีกครั้ง ขั้นตอนสุดท้ายเป็น Ambient-air ventilation 30 min ผลการทดสอบพบว่าที่ความชื้นเริ่มต้นทั้งสองค่าระยะเวลาการทำ tempering ไม่มีผลต่อปริมาณร้อยละข้าวต้น และความขาว โดยค่าที่ได้จะต่ำกว่ากระบวนการอบแห้งแบบที่ 1 และ 2 เมื่อนำข้อมูลการทดลองจากกระบวนการอบแห้งแบบที่ 1 และ 2 โดยแบบที่ 2 ไม่พิจารณาการทำ tempering ระหว่างชุดที่ 1 และ 2 มาคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าแบบที่ 2 มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าแบบที่ 1 ที่ความชื้นเริ่มต้น 30% d.b. และ 35% d.b. อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะมีค่า 6.67 และ 7.32 MJ/kg น้ำที่ระเหย สำหรับกระบวนการอบแห้งแบบที่ 1 และ 3.96 และ 4.75 MJ/kg น้ำที่ระเหย สำหรับกระบวนการอบแห้งแบบที่ 2 และมีอัตราการป้อนวัตถุดิบมากกว่าแบบที่ 1 ประมาณ 4 เท่า

Prachayawarakorn, S., Tia, W., Poopaiboon, K., and Soponronnarit, S. (2005) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ pulsed fluidized-bed และ conventional fluidized-bed คุณสมบัติของข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง และเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือก และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิเฉพาะในการอบแห้ง เครื่องอบแห้งที่ใช้มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง อัตราการอบแห้ง 20 ton/hr ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 28–30% d.b. อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 144-154°C และความชื้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งมีค่าประมาณ 25% d.b. ผลการทดสอบพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้นอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการอบแห้งจะมากขึ้นสำหรับเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 8 MJ/kg น้ำที่ระเหย ขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งแบบ conventional fluidized-bed มีค่าสูงกว่าประมาณ 30% สำหรับกรณีที่ไม่มีความชื้นในอากาศ เว้นกลับ เมื่อพิจารณาอากาศเวียนกลับที่ 70-80% อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง ในการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่า 25% d.b. อัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเครื่องอบแห้งแบบ conventional fluidized-bed มีค่าสูงกว่า ปริมาณข้าวคืน และความแข็งของข้าวที่หุงสุกแปรผันตรงกับอุณหภูมิการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงกว่า 150°C จะทำให้ปริมาณร้อยละข้าวคืนจากการอบแห้งแบบ pulsed fluidized-bed มีค่าสูงกว่าการอบด้วยอากาศแวดล้อม ความขาวของข้าวเปลือกจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น สำหรับข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่า 29% d.b. จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือคล้ำเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงกว่า 150°C การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งกับการทดสอบนั้น มีความคลาดเคลื่อน -2.5% และ $\pm 2.7\%$ สำหรับเครื่องอบแห้งแบบ conventional fluidized-bed และ pulsed fluidized-bed ตามลำดับ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิเฉพาะสำหรับเครื่องอบแห้งแบบ pulsed fluidized-bed มีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$

อนุชา ใจกล้า, สมเกียรติ ปรัชญาวารากร, วาณี วารัญญานนท์ และ สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ (2549) ศึกษาวิธีการอบแห้งข้าวเปลือกให้มีลักษณะเหมือนข้าวเก่า และมีคุณภาพสูงโดยทำการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 130°C และ 150°C จากความชื้นเริ่มต้น 22% w.b. และ 25% w.b. จนมีความชื้นประมาณ 18-19% w.b. จากนั้นเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลาต่าง ๆ จาก 0-120 min ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบเป็นข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 จากผลการทดสอบพบว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 22% w.b. ปริมาณร้อยละข้าวคืนมีการแปรผันตรงกับระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศในช่วงเวลา 30 min เมื่อเก็บในที่อับอากาศนานกว่านี้การเปลี่ยนแปลงร้อยละข้าวคืนมีค่าน้อยมาก การอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C มีค่าร้อยละข้าวคืนสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130°C ทุกระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศ การเปลี่ยนแปลงค่าความขาวของข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีค่า

ลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศนานขึ้น ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 25% w.b. ปริมาณ ร้อยละข้าวคันมีการแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศจนถึงระยะเวลาประมาณ 90 min และมีแนวโน้มคงที่เมื่อระยะเวลานานขึ้น การเปลี่ยนแปลงค่าความขามีแนวโน้มลดลงเมื่อ ระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศนานขึ้นเช่นเดียวกัน และมีค่าต่ำกว่ากรณีความชื้นเริ่มต้น 22% w.b. อัตราการยืดตัวของข้าวสุกจากการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 150°C มีค่าสูงกว่าการอบแห้งที่ อุณหภูมิ 130°C และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศนานขึ้นทั้งสองค่า ความชื้นเริ่มต้น แต่ค่าความชื้นเริ่มต้นที่ต่างกันไม่มีผลต่ออัตราการยืดตัวของข้าวสุกอย่างมีนัยสำคัญ คุณสมบัติการดูดซับน้ำของข้าวสุกมีการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัดเมื่อความชื้นเริ่มต้น และระยะเวลา การเก็บในที่อับอากาศเปลี่ยนไป แต่อุณหภูมิการอบแห้งจะทำให้การดูดซับน้ำของข้าวสุกมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำข้าวสุกมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการ อบแห้งสูงขึ้น และระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศนานขึ้นแต่สำหรับค่าความชื้นเริ่มต้นจะมีผล แตกต่างกันน้อยมาก จากงานวิจัยทำให้ทราบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ให้ค่าคุณสมบัติของ ข้าวเมื่อหุงต้มคล้ายข้าวเก่ามากกว่า และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บข้าวในที่อับอากาศจะ ขึ้นกับความชื้นเริ่มต้นในการอบแห้ง

สมบัติ กำมอญ, สมเกียรติ ประชญารากร, ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์, พัชร ตั้งตระกูล และ สมชาติ โสภณธฤทธิ์ (2551) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 โดยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด เครื่องอบแห้งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm ความสูง ของเบด 9.5 cm ความเร็วอากาศในห้องอบแห้งประมาณ 2.5 m/s อากาศเวียนกลับประมาณ 80% ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 22 และ 25% w.b. อุณหภูมิอบแห้ง 70, 90, 110, 130 และ 150°C ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งจะนำไปเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา 30, 60 และ 90 min จากนั้นเป่าด้วย อากาศแวดล้อมจนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% w.b. ผลการศึกษาพบว่า ในกรณีที่ข้าวเปลือกมี ความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่า 25% w.b. การอบแห้งไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงกว่า 90°C เพราะจะทำให้ร้อยละ ต้นข้าวมีค่าต่ำลง แต่เมื่อความชื้นข้าวเปลือกสูงกว่า 25% w.b. การใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงจะให้ ร้อยละต้นข้าวสูงกว่าร้อยละต้นข้าวอ้างอิง (ข้าวอ้างอิงหมายถึงข้าวที่ผ่านการลดความชื้น โดยการ ตากไว้ในที่ร่ม) อุณหภูมิอบแห้ง 150°C จึงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกรณีที่มีความชื้นข้าวเปลือกสูงกว่า 25% w.b. เพราะให้ปริมาณร้อยละต้นข้าวสูงที่สุด ความชื้นหลังการอบแห้งไม่ควรต่ำกว่า 19% w.b. เพราะจะทำให้ข้าวเกิดการแตกหักขณะทำการขัดสีสูง การพักข้าวไว้ในที่อับอากาศเป็นเวลา 30 min จะให้ความขาวสูงสุด แต่หากใช้เวลานานขึ้นแม้ความขาวจะลดลงแต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในทางการค้า (38-40) และความคงตัวของแป้งข้าวดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งมีค่าสูงขึ้น

เวียง อากรชิ, วิบูลย์ เทพนนท์, สุเทพ กลสิกรรม และ อารีย์ ทิมินกุล (2548) ศึกษา และ ทดสอบการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคแบบเครื่องเป่าลมร้อนให้ข้าวเปลือกที่ทุ่งกระจาย

(spouted bed) ด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ปริมาณตัวอย่างข้าวเปลือก 350 g และมีการเวียนลมร้อน กลับมาใช้ใหม่ เพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณร้อยละของข้าวคั่วหลังจากการอบแห้งเปรียบเทียบกับปริมาณร้อยละของข้าวคั่วที่ลดความชื้นโดยใช้อากาศแวดล้อม ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลอง เป็นพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานี มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26-27% w.b. และความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% w.b. อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้มี 80, 100, 120 และ 150°C ที่ระยะเวลาอบแห้งมากกว่า 20 min จนถึงประมาณ 7 min ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูง อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกจะสูงตาม เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้น แต่จะได้ปริมาณร้อยละของข้าวคั่วต่ำ โดยภายหลังจากทำการอบแห้งแล้วจะต้องมีระยะเวลาพักตัวของเมล็ดข้าว (tempering) ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณร้อยละของข้าวคั่ว เมื่อเพิ่มระยะเวลาพักตัวจะทำให้ปริมาณร้อยละของข้าวคั่วมีค่าเพิ่มขึ้นแต่จะมีผลในช่วงระยะเวลาพักตัวไม่เกิน 20 min เพราะเมื่อใช้ระยะเวลาพักตัวมากกว่านี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณร้อยละของข้าวคั่วได้น้อยมาก โดยปริมาณร้อยละของข้าวคั่วที่ผ่านการอบแห้ง และมีระยะเวลาการพักตัวแล้วจะมีค่าประมาณ 26-27 สำหรับกรณีการลดความชื้นโดยใช้ อากาศแวดล้อมมีค่าปริมาณร้อยละของข้าวคั่วประมาณ 44.5 เมื่อทำการศึกษาที่สภาวะการทดลอง เช่นเดียวกับการทดลองนี้ด้วยข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานีจากที่ต่าง ๆ พบว่ามีแนวโน้มของค่าที่ใกล้เคียงกัน และมีความสอดคล้องกันของทั้งสองวิธี ข้าวเปลือกที่ได้ปริมาณร้อยละของข้าวคั่ว สูงสุดเป็นข้าวเปลือกจากอำเภอบางปลาหมอ จังหวัดสุพรรณบุรี ปริมาณร้อยละของข้าวคั่วที่ผ่านการอบแห้ง และมีระยะเวลาการพักตัวแล้วมีค่า 34.23 และสำหรับกรณีการลดความชื้น โดยใช้อากาศแวดล้อมมีค่าปริมาณร้อยละของข้าวคั่ว 53.78

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณฤทธิ (2546) ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก โดยใช้เครื่องอบแห้งสเปาเต็คเบดแบบสองมิติที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเข้า คิวาน์คัมเมอร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 110, 130 และ 150°C และปรับอัตราการไหลของ อากาศเข้าคิวาน์คัมเมอร์เป็น 0, 10, 20 และ 30% ในแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเป็น ลักษณะเชิงเส้นทุกค่าอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าอัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่ เมื่อปรับอัตราการไหล ของอากาศเข้าคิวาน์คัมเมอร์เพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดความเค้นใน เมล็ดข้าวมากขึ้นปริมาณข้าวคั่วจึงมีแนวโน้มต่ำลง แต่ปริมาณอากาศที่เข้าคิวาน์คัมเมอร์จะมีผลต่อ ความขาวหลังการอบแห้งไม่มากนัก เมื่อพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะใน การอบแห้งพบว่าแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศเข้าคิวาน์คัมเมอร์กรณีที่อากาศเวียนกลับ 67% โดยมีค่าในช่วง 6.7-9.0 MJ/kg น้ำที่ระเหย ของข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 33-34% d.b. และ ความชื้นสุดท้าย 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. เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดในระดับห้องปฏิบัติการ อัตราการอบแห้งที่พิจารณาต่อหน่วยปริมาตรของเครื่องอบแห้งในการทดสอบมีค่ามากกว่าเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดประมาณ 1.4 เท่า คุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสีทั้งความขาว และปริมาณข้าวตันของทั้งสองเทคนิคให้ผลไม่แตกต่างกัน และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะในการอบแห้งเมื่อพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งข้าวเปลือกมีระดับความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา ของการอบแห้งโดยเทคนิคสเปาเต็คเบดมีค่าต่ำกว่า

Madhiyanon, T., Soponronnarit, S., and Tia, W. (2000) ได้ทำการสร้างเครื่องอบแห้งแบบ spouted bed มีอัตราการอบแห้งสูงสุด 3 ton/hr โดยห้องอบแห้งเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 0.6 m ยาว 2.1 m และสูง 1.45 m แผ่นเอียงด้านข้างทำมุม 60° ทางเข้าอากาศกว้าง 0.04 m แผ่นตั้ง 2 แผ่น ขนาดกว้าง 0.62 m ยาว 2.1 m ติดตั้งตรงส่วนกลางให้เป็นช่อง spout ซึ่งมีความกว้าง 0.06 m ความสูงของช่องทางเข้าอากาศมีค่า 0.1 m ทุกกรณีทดลอง ความเร็วลมที่ใช้ 10 m/s มีการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ประมาณ 60-70% และมีการนำตัวอย่างข้าวเปลือกออกมาวัดความชื้น ปริมาณข้าวตัน และความขาวทุก 10 min ในช่วงระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 80 min ในการอบแห้งข้าวเปลือกจะอยู่ใช้เวลาอยู่ในช่วง spout น้อยกว่า 1 วินาทีต่อรอบ และเวลาเกือบทั้งหมดจะเป็นช่วงเวลาที่ข้าวอยู่ในดาวน์คัมเมอร์ ซึ่งในการทดลองได้ทำการปรับอัตราการป้อนข้าวเปลือก และอุณหภูมิความร้อน ผลปรากฏว่า การทดลองที่ได้ผลดีที่สุดคือ กรณีที่ใช้อัตราการป้อนข้าวเปลือก 1 ton/hr ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด 12.6 min โดยที่ค่าความขาว และปริมาณข้าวตันมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยสภาวะอากาศแวดล้อม แม้ว่าจะเป็นการอบแห้งอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 144°C ก็ตาม ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมีค่า 20.0% d.b. และความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกมีค่า 14.4% d.b. แต่อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะมีค่าสูงประมาณ 7.46 MJ/kg น้ำที่ระเหย ซึ่งการที่อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะมีค่าสูงนั้นพิจารณาได้ว่ามาจากสาเหตุ 2 ประการคือ ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกมีค่าต่ำจึงต้องใช้พลังงานสูงในการอบแห้ง และการหมุนเวียนข้าวเปลือกในบริเวณห้องอบแห้งนั้นไม่สม่ำเสมอ และไม่เพียงพออย่างต่อเนื่อง สำหรับการปรับอัตราการป้อนข้าวเปลือกจะต้องทำการปรับให้มีความเหมาะสมกับระยะเวลาการอบแห้งในห้องอบแห้งด้วยเพื่อให้การอบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพซึ่งจะมีการศึกษาในส่วนของปริมาณอากาศที่เป่าเข้าเครื่องอบแห้ง และความดันอากาศในขั้นต่อไป

Wetchacamai, S., Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Prachayawarakorn, S., Panich-ing-orn, J., and Suthicharoenpanich, S. (2001) ได้ทำการออกแบบ และสร้างเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็คเบด 2 มิติ ที่มี draft plate เพื่อศึกษาจลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือก คุณภาพข้าวเปลือก และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ โดยห้องอบแห้งขนาด กว้าง 15 cm ยาว 60 cm และสูง 150 cm แผ่นเอียงด้านข้างทำมุม 60° ทางเข้าอากาศกว้าง 4 cm draft plate ติดตั้งตรงส่วนกลางให้เป็นช่อง spout

ซึ่งมีความกว้าง 8 cm ความสูงของช่องทางเข้าอากาศ 10 cm ทดลองที่สภาวะดังนี้ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมีค่า 31.1-45.6% d.b. ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกมีค่า 16% d.b. อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130, 140 และ 150°C ปริมาณข้าวที่อยู่ภายในห้องอบแห้ง 20, 25 และ 30 kg ความสูงของเบดเป็น 40, 50 และ 60 cm จากผลการทดลองได้ว่าค่า maximum pressure drop ที่ช่อง spout มีค่า 2000, 2700 และ 3000 Pa ทำให้ความเร็วของอากาศร้อนที่ทางเข้าห้องอบแห้งมีค่าในช่วง 15.4-16.4 m/s จากนั้น pressure drop จะลดลงมีค่าในช่วง 1400, 1700 และ 2300 Pa ซึ่งจะทำให้ความเร็วในช่อง spout มีค่า 3.9-4.1 m/s เมื่อทำการเพิ่มค่าอุณหภูมิการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และการลดลงของความชื้นเป็นในลักษณะเชิงเส้นของทุกค่าอุณหภูมิการอบแห้ง ในส่วนของปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงเมื่อค่าความชื้นข้าวเปลือกสุดท้ายมีค่าลดลง และปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ลดต่ำลง ในทางกลับกันค่าความขาวของข้าวเปลือกจะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้น และค่าความขาวจะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นข้าวเปลือกสุดท้ายมีค่าต่ำลง นอกจากนั้นที่อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความขาวของข้าวเปลือกลดต่ำลง จากข้อมูลปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ และค่าความขาวของข้าวเปลือกเห็นได้ว่าความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย และอุณหภูมิการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพข้าว โดยสภาวะการอบแห้งด้วยเทคนิคสเปาเต็คเบดเพื่อให้ข้าวเปลือกมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานไม่ควรใช้อุณหภูมิการอบแห้งเกิน 150°C และความชื้นข้าวเปลือกสุดท้ายไม่ควรต่ำกว่า 21% d.b. สำหรับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะพิจารณาได้ดังนี้ กรณีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะทางความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิการอบแห้ง และ specific air flow rate แต่อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะทางไฟฟ้าจะมีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 0.5 MJ/kg น้ำที่ระเหย เมื่อคูณด้วยตัวปรับค่า 2.6 แล้ว

ทวิช จิตรสมบุญ, โสโรภา แข็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว (2549) ศึกษาผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ เครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้มีลักษณะเป็นแบบการไหลสวนทาง อากาศอบแห้งเคลื่อนตัวจากด้านล่างของท่ออบแห้งที่วางตัวในแนวตั้งขึ้นสู่ด้านบนสวนทางกับข้าวเปลือกชั้นที่ไหลตัวลงมาอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วง ข้าวเปลือกที่ไหลผ่านท่ออบแห้งมีความพรุนสูง และเนื่องจากเป็นการไหลแบบสวนทางจึงทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างข้าวเปลือก และอากาศอบแห้งมีค่าสูง เกิดการถ่ายเทความร้อน และความชื้นในท่ออบแห้งโดยวิธีการพาแบบบังคับ การทดสอบใช้อุณหภูมิตั้ง 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 วินาทีต่อการอบแห้ง ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเป็น 20.6, 27.2 และ 29.1 s กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 80, 100 และ 120°C มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ 2.4, 3.14 และ 3.03 MJ/kg น้ำที่ระเหย

ตามลำดับ เมื่อพิจารณาคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งพบว่ามีความขาว และปริมาณข้าวคืนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้อัตราการอบแห้งยังมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงตลอดการอบแห้งโดยไม่เกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่ความเร็วสัมพัทธ์สูงมากทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพาที่ผิวเมล็ดข้าวสูง และอัตราการแพร่ความร้อนของเมล็ดข้าวสูง เนื่องจากความชันของความชื้นที่ผิวสูง (moisture gradient) ทั้งนี้การศึกษากระทำภายใต้เงื่อนไขการทดลองดังนี้

- เป็นการศึกษาในย่านความชื้นต่ำซึ่งเป็นย่านที่มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าย่านความชื้นสูง
- เครื่องอบแห้งมีการทำงานเป็นชั๊ก โดยแต่ละรอบการเทข้าวห่างกันประมาณ 1 min
- ปริมาณข้าวที่ใช้คือ 600 g ซึ่งน้อยมาก ทำให้อากาศที่ทางออกยังมีศักยภาพในการอบแห้งได้ จึงสันนิษฐานได้ว่าถ้าเป็นการอบแห้งแบบต่อเนื่องจะสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้ง และประหยัดพลังงานได้มากขึ้น
- เมื่อทดลองใช้ข้าวเปลือก 1.5 kg ทดสอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 100°C ใช้เวลาอบแห้ง 32 s อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ 1.43 MJ/kg น้ำที่ระเหย

ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสริฎา แข็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว (2549) ศึกษาผลกระทบของลมหมุนวนต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ จากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของลมหมุนวนภายในท่ออบแห้งโดยใช้สภาวะการทดสอบเดียวกันพบว่า เมื่อทำให้อากาศอบแห้งภายในท่ออบแห้งหมุนวนจะทำให้เพิ่มระยะเวลา และพื้นที่สัมผัสอากาศระหว่างอากาศอบแห้ง และข้าวเปลือกทำให้การอบแห้งดีขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเป็น 24.2, 24.5 และ 18.3 s สำหรับลมหมุนวน และ 29.1, 27.2 และ 20.6 s สำหรับลมไม่หมุนวน กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 80, 100 และ 120°C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ 16.8, 9.9 และ 11.2% ตามลำดับ โดยพฤติกรรมการอบแห้งจะไม่เกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะเป็น 1.98, 2.81 และ 2.7 MJ/kg น้ำที่ระเหย สำหรับกรณีลมหมุนวน 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 และปริมาณข้าวคืนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

3.2 ผลสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น เห็นได้ว่าปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องอบแห้ง และมีการนำมาประยุกต์ใช้กันมากมาย แต่แบบที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมีอยู่ 2 เทคนิคคือ การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด และการอบแห้งด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบด ถึงแม้ว่าทั้งสองเทคนิคจะมีข้อดีหลายประการ แต่ข้อเสียประการสำคัญที่ทำให้ต้องมีการพัฒนา และหาแนวทางแก้ไขต่อไปคือ คุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งวิธีการทั้งสองมีหลักการทำงาน และรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ใช้ลมร้อนเป่าจากทางด้านล่างของเครื่องอบแห้งผ่านชั้นตะแกรงที่มีวัสดุวางกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ และเคลื่อนตัวออกทางด้านบน ความเร็วอากาศอบแห้งจะต้องมีค่าสูงพอที่สามารถเอาชนะแรงโน้มถ่วงชั้นวัสดุได้ และทำให้วัสดุลอยตัวอยู่ในอากาศ มีคุณลักษณะเหมือนกับของไหล ความเร็วอากาศอบแห้งที่ใช้ขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่น ขนาด และรูปทรงของวัสดุ การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดจะแบ่งการอบแห้งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นการอบแห้งจากวัสดุที่มีความชื้นสูงจนกระทั่งวัสดุมีความชื้นไม่ต่ำกว่า 18% w.b. ซึ่งการอบแห้งในช่วงนี้สามารถใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งได้สูงถึง 150°C โดยอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะแปรผัน โดยตรงกับระยะเวลาการอบแห้งวัสดุ จากนั้นในช่วงที่ 2 การพักวัสดุในที่อบอากาศ เป็นการทำให้ความชื้นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในวัสดุ และลดความเค้นที่เกิดขึ้นจากการลดความชื้นอย่างรวดเร็ว และทำการเป่าด้วยอากาศอุณหภูมิแวดล้อมอย่างช้า ๆ จนกระทั่งวัสดุมีความชื้นสุดท้ายที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา (สำหรับข้าวเปลือกประมาณ 14% w.b.) สาเหตุที่ต้องทำการอบแห้งเป็นสองช่วงเนื่องจาก หากอบแห้งเพียงขั้นต้นเดียวโดยลดความชื้นลงมาถึงค่าที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพต่ำลง เช่น เกิดการแตกหักสูง และมีสีหมองคล้ำ เป็นต้น ระยะเวลาการพักวัสดุในที่อบอากาศสามารถช่วยลดการแตกหักของวัสดุได้ โดยมีช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมประมาณ 30 min หากใช้เวลามากกว่านี้จะมีผลต่อการแตกหักของวัสดุน้อยแต่จะทำให้สีของวัสดุมีการหมองคล้ำมากขึ้น

การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมีจุดเด่นหลายประการดังนี้

- มีอัตราการอบแห้งสูงเพราะมีการถ่ายเทความร้อน และถ่ายเทมวลที่ดี
- ความชื้นวัสดุที่ได้จากการอบแห้งมีความสม่ำเสมอ
- สามารถใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงได้
- คุณภาพวัสดุอบแห้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาโดยใช้เทคนิคอื่นเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งให้ดีขึ้น เช่น ใช้เทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น เพื่อลดกำลังของลมที่เป่าในการเอาชนะแรงโน้มถ่วงของชั้นวัสดุเพราะชั้นวัสดุมีความพรุนมากขึ้น หรือการใช้วิธีการเป่าลมเข้ามาภายในห้องอบแห้งเป็นจังหวะ

อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งทั้งสองเทคนิคจะช่วยให้ลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้โดยให้คุณภาพของวัสดุอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดยังมีจุดด้อยที่สำคัญดังนี้

- ไม่สามารถลดความชื้นให้มีค่าที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาได้ในขั้นตอนเดียว
- มีความยุ่งยากซับซ้อนในกระบวนการอบแห้ง
- บำรุงรักษายาก
- มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูง

การอบแห้งด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบด มีห้องอบแห้งเป็นทรงกระบอก ด้านล่างมีลักษณะเป็นกรวยปลายตัดเพื่อให้อากาศอบแห้งไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง ภายในบรรจุวัสดุที่จะอบแห้งกองตัวกันอยู่ อากาศอบแห้งถูกเป่าเข้าสู่ห้องอบแห้งด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วสูงสุดของความต้านทานอากาศ และแรงโน้มถ่วงของวัสดุ (terminal velocity) ทำให้วัสดุที่บริเวณช่องทางเข้าลอยตัวตามแรงลมขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบแห้ง และกระจายตัวออกรอบ ๆ ถ้าวัสดุที่พุ่งขึ้นมา วัสดุที่อยู่ด้านล่างจะเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณทางเข้า และถูกลมเป่าขึ้นสู่ด้านบนเป็นวงรอบเช่นนี้ต่อเนื่องกันไป จนกระทั่งวัสดุมีความชื้นสุดท้ายที่เหมาะสม วัสดุที่กองตัวอยู่บริเวณรอบ ๆ ถ้าวัสดุที่ถูกเป่าจะได้รับอากาศที่มีความเร็วต่ำจากทางเข้าเป่าผ่านตลอดเวลา การอบแห้งด้วยเทคนิคนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ บริเวณลำวัสดุตรงกลางที่เคลื่อนตัวตามอากาศอบแห้งจะเป็นส่วนหลักของการลดความชื้นซึ่งมีระยะเวลาต่อรอบน้อย และเมื่อข้าวกระจายตัวในพื้นที่รอบ ๆ จะเป็นการพักข้าว โดยถูกเป่าด้วยลมร้อนที่มีความเร็วต่ำทำให้เกิดการกระจายตัวของความชื้น และอุณหภูมิต่ำเพราะมีระยะเวลาต่อรอบนาน การหมุนเวียนของวัสดุในระบบจะขึ้นกับปัจจัยสำคัญคือ ความสูงของชั้นวัสดุ ความสูงช่องทางเข้าอากาศที่ทำให้วัสดุเคลื่อนตัวสู่ช่องทางเข้าอากาศอบแห้ง ความกว้างของทางเข้า และมุมเอียงของห้องอบแห้ง โดยการหมุนเวียนของวัสดุจะเปลี่ยนไปเมื่อปัจจัยเหล่านี้มีค่าเปลี่ยนไป ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะขึ้นกับอัตราการหมุนเวียนของวัสดุในระบบ ปัญหาสำคัญของการอบแห้งด้วยเทคนิคนี้คือ ระยะเวลาในการอบแห้งของส่วนที่ลดความชื้น และส่วนของการพักข้าวจะต้องสมดุล และสัมพันธ์ต่อกันเพราะจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพวัสดุที่ผ่านการอบแห้ง (Jumah and Mujumdar, 2000)

การอบแห้งด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบดมีจุดเด่นหลายประการดังนี้

- สามารถลดความชื้นให้มีค่าที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาได้ในขั้นตอนเดียว
- มีการเคลื่อนตัวของวัสดุเป็นวงรอบทำให้ลดการกองรวมกันของวัสดุ
- ความชื้นวัสดุที่ได้จากการอบแห้งมีความสม่ำเสมอ
- สามารถใช้อุณหภูมิก๊าซอากาศอบแห้งสูงได้
- คุณภาพวัสดุอบแห้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ได้มีการพัฒนารูปแบบของเครื่องอบแห้งด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบคเพื่อให้ประสิทธิภาพการอบแห้งให้ดีขึ้นเช่น การทำเป็นช่องทางที่วางตัวในแนวตั้งตรงกับทางเข้าอากาศอบแห้ง (draft plate) สำหรับให้วัสดุเคลื่อนตัวตามอากาศอบแห้งขึ้นไปได้อย่างสะดวก และไม่ทำให้วัสดุที่กองตัวอยู่บริเวณรอบ ๆ ไหลลงมาปิดทาง, การทำวัสดุที่มีลักษณะเป็นรูปโค้งคว่ำไปติดตั้งด้านบนของห้องอบแห้งเพื่อให้วัสดุกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่กระทบกับห้องอบแห้งซึ่งจะทำให้เกิดการแตกหักเสียหาย และการทำลักษณะห้องอบแห้งเป็น 2 มิติเพื่อเพิ่มปริมาณการอบแห้ง

อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบคยังมีจุดด้อยที่สำคัญดังนี้

- ใช้ปริมาณอากาศอบแห้งมาก และความเร็วสูง
- มีข้อจำกัดของปริมาณด้วยขนาดของโครงสร้าง และความสูงของชั้นวัสดุ
- ความสม่ำเสมอของความชื้น และคุณภาพวัสดุซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาการหมุนเวียนของวัสดุที่เหมาะสม, รูปร่างลักษณะของห้องอบแห้งในกรณีของ 2 มิติ
- เป็นการยากที่จะทำให้มีขนาดใหญ่
- บำรุงรักษายาก
- มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูง

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ ใช้เครื่องเป่าลมเป่าอากาศผ่านชุดขดลวดความร้อนเพื่อสร้างลมร้อนเข้าสู่ด้านล่างของท่ออบแห้งที่วางตัวอยู่ในแนวตั้ง แล้วออกทางด้านบนที่ช่องทางออก ลมร้อนจะคลุกเคล้ากับข้าวเปลือกชั้นที่ตกลงมาโดยอิสระ (ไม่มีการกีดขวางใด ๆ) จากถังพักด้านบนด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งแตกต่างจากเครื่องอบแห้งอื่นๆ ที่ถึงแม้จะมีการไหลของเมล็ดพืชในแนวตั้งสวนทางกับอากาศแต่ก็จะมีตัวควบคุมการไหลให้เมล็ดพืชไหลอย่างช้า ๆ โดยเมล็ดพืชจะอยู่อย่างหนาแน่นภายในท่ออบแห้งแล้วอากาศจะค่อย ๆ ซึมผ่านขึ้นไป ด้วยเทคนิคแบบนี้ เมล็ดพืชจะไหลลงมาอย่างหลวม ๆ มีความพรุนสูง ทำให้พื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อน และความชื้นมากขึ้น นอกจากนี้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดพืชจะมีค่าสูงมาก ซึ่งทำให้มีอัตราการถ่ายเทมวลความร้อนที่สูงเป็นสัดส่วนกัน โดยพบว่าสามารถสร้างความเร็วสัมพัทธ์ได้ถึงประมาณ 10 m/s ขณะเดียวกันความเร็วสัมพัทธ์ที่มีค่าสูงทำให้เวลาในการสัมผัสอากาศร้อนของเมล็ดพืชมีน้อย อุณหภูมิที่ผิวเมล็ดพืชมีค่าต่ำ และมีการทะลวงของความร้อนต่ำ ส่งผลให้มีการแตกร้าวน้อย มีการหมองคล้ำเนื่องจากความร้อนน้อย และเมื่อมีการสร้างอากาศหมุนวนที่ทางเข้า ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาที่เมล็ดพืชสัมผัสกับอากาศมากขึ้น โดยไม่ต้องเพิ่มความยาวของท่ออบแห้ง จะทำให้การถ่ายเทมวล และความชื้นสูงขึ้น อัตราการอบแห้งจึงดีขึ้นในขณะที่คุณภาพเมล็ดพืชยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (จุฑาทิพย์ ทองเดชาสามารถ, 2545)

การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระมีจุดเด่นหลายประการดังนี้

- สามารถลดความชื้นให้มีค่าที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาได้ในขั้นตอนเดียว

- ความพรุนของวัสดุสูง ทำให้พื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อน และความชื้นมาก
- ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดพืชมีค่าสูง ทำให้อัตราการถ่ายเทมวล และความชื้นสูง
- ใช้เวลาการอบแห้งน้อย
- เวลาในการสัมผัสอากาศร้อนของเมล็ดพืชน้อย ทำให้การแตก råว และการหมองคล้ำ จากความร้อนน้อย
- ความชื้นวัสดุที่ได้จากการอบแห้งมีความสม่ำเสมอ
- สามารถใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงได้
- คุณภาพวัสดุอบแห้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ได้ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลองหลายประการ ซึ่งทำให้สันนิษฐานได้ว่าหากเครื่องอบแห้งมีการทำงานแบบต่อเนื่องแม้ว่าจะใช้เวลาการอบแห้งนานมากขึ้นแต่จะสามารถประหยัดพลังงานได้มากขึ้นเช่นกัน ขณะที่คุณภาพข้าวเปลือกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

บทที่ 4

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง

ในบทนี้จะอธิบายถึงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง โดยมีหัวข้อดังนี้ รายละเอียดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ และหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ

4.1 รายละเอียดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ

รายละเอียดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

4.1.1 เครื่องเป่าลม (blower) ของ FengLi ขนาด 0.6 kW ความเร็วรอบมอเตอร์ 16000 rpm ติดตั้งควบคู่กับ variac ของ yamabishi รุ่น s-260-10M เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้า และความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ สามารถทำความเร็วอากาศอบแห้งได้สูงสุดประมาณ 5 m/s แสดงดังรูปที่ 4.3-4.4

4.1.2 ตำแหน่งทางเข้าอากาศอบแห้งมีชุด orifice plate ซึ่งผู้ทำวิจัยได้ออกแบบตามมาตรฐาน 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 4.5-4.6

4.1.3 เครื่องทำความร้อน (heater) ใช้ขดลวดความร้อนขนาด 1.54 kW 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 4.4 และรูปที่ 4.7 รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก

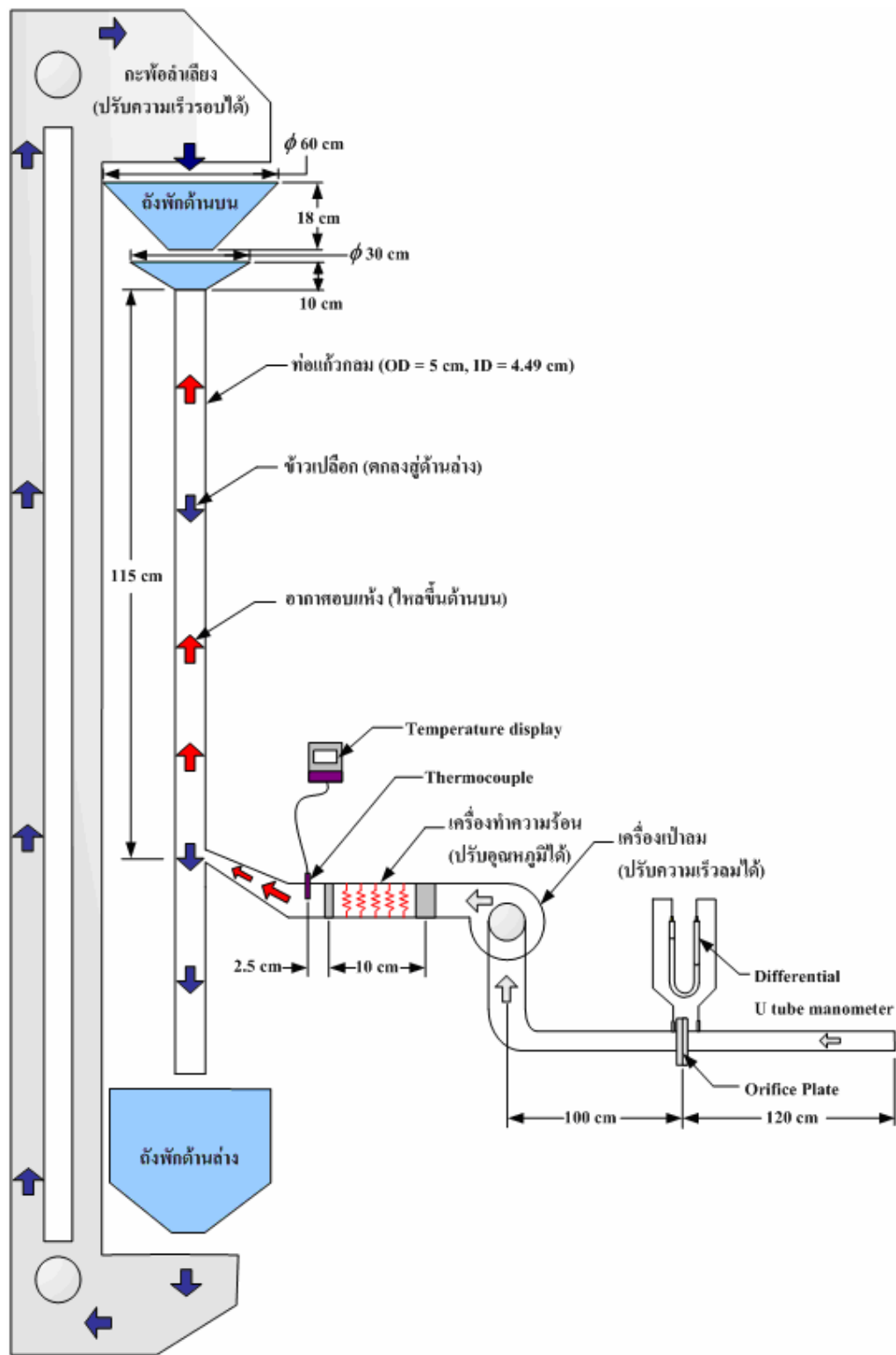
4.1.4 ท่ออบแห้ง เป็นท่อหลอดแก้วทนความร้อน หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.49 cm ยาว 115 cm วางตัวในแนวตั้งต่อจากส่วนของถังพักข้าวเปลือกขึ้นที่มาจากโลหะ ส่วนด้านล่างต่อกับท่อส่งอากาศอบแห้งที่ผ่านเครื่องทำความร้อน ตำแหน่งที่ท่อส่งอากาศอบแห้งต่อเชื่อมกับท่ออบแห้งมีลักษณะเป็น nozzle ทำมุมเอียง 45° ทั้งนี้เพื่อต้องการให้อากาศอบแห้งที่ทางเข้ามีความเร็วสูง และมีความปั่นป่วน ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้ง โดยที่

ความยาวท่ออบแห้งมีค่าเท่าเดิม และคาดว่าจะช่วยลดเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

4.1.5 ชุดกะพ้อลำเลียงข้าวเปลือก เป็นผลงานโครงการงานของของนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีจำนวนกะพ้อดักทั้งหมด 28 กะพ้อ สูง 4 m ใช้มอเตอร์ของ Toshiba ขนาด 0.74 kW ความเร็วรอบ 1440 rpm ควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ inverter ของ Toshiba รุ่น VF-S7 ปรับค่าความถี่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์กะพ้อลำเลียง มีหน้าจอ แสดงความถี่กระแสไฟฟ้าเป็นตัวเลขทศนิยม 1 ตำแหน่ง (หน่วยเป็น Hz.) แสดงดังรูปที่ 4.7 รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก

4.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ

เครื่องเป่าลมที่ควบคุมความเร็วด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของ variac ดูดอากาศจาก ลังแวดล้อมผ่านชุด orifice plate แล้วเข้าสู่เครื่องทำความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยการปรับ แรงดัน ไฟฟ้าของ variac เช่นเดียวกัน จากนั้นอากาศอบแห้งจะเคลื่อนตัวผ่าน nozzle เพื่อเร่ง ความเร็วเข้าสู่ท่ออบแห้งที่วางตัวในแนวตั้ง ข้าวเปลือกชั้นที่ถูกลำเลียงจากถังพักทางด้านล่างขึ้นสู่ ถังพักด้านบน โดยใช้กะพ้อลำเลียงจะเคลื่อนตัวลงสู่ท่ออบแห้งอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วงโดยไม่มี การกีดขวางใด ๆ ข้าวเปลือกชั้น และอากาศอบแห้งจะเคลื่อนที่สวนทางกัน (counter flow) ซึ่งจะเกิด การแลกเปลี่ยนความร้อน และความชื้นด้วยวิธีการพาแบบบังคับ (forced convection) อากาศอบแห้งที่ ผ่าน nozzle จะมีความเร็วสูง และเกิดความปั่นป่วน ส่งผลให้เพิ่มระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสกับ อากาศอบแห้งประกอบกับข้าวเปลือกที่เคลื่อนตัวลงมาอย่างอิสระจะมีความพรุนสูง พื้นที่สัมผัส อากาศอบแห้งมีมาก จึงคาดว่าจะช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งหรือทำให้้อตราการอบแห้งสูงขึ้น จาก พฤติกรรมที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่สวนทางกับอากาศอบแห้งทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ของข้าวเปลือก มีค่าสูงเป็นผลให้อุณหภูมิข้าวเปลือกจะสูงเฉพาะในส่วนผิวเท่านั้น ซึ่งจะช่วยให้คุณภาพข้าวเปลือก ทั้งความขาว และปริมาณข้าวคืนมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.1 แผนภาพเครื่องอบแห้งข้่าวเปลือกแบบข้่าวหล่นอิสระ



รูปที่ 4.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.3 เครื่องเป่าลม (blower) ของ FengLi ขนาด 0.6 kW ความเร็วรอบมอเตอร์ 16000 rpm



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



รูปที่ 4.5 Orifice plate ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.6 U-tube manometer



รูปที่ 4.7 Inverter ของ Toshiba รุ่น VF-S7, ตัวปรับ และแสดงค่าอุณหภูมิของ Shinko รุ่น GCS-300

บทที่ 5

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะอธิบายถึงวิธีดำเนินการวิจัย โดยจะแบ่งเป็นหัวข้อได้แก่ ขั้นตอนในการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น ขั้นตอนในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก ขั้นตอนในการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก ขั้นตอนในการวิเคราะห์คุณภาพข้าว และขั้นตอนการหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฏิกowskiจำเพาะ ดังนี้

5.1 ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น

ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น จะพิจารณา 2 วิธีการคือ วิธีการคลุกข้าว และวิธีการแช่ข้าว (soak) ซึ่งมีวิธีการดังนี้

5.1.1 วิธีการคลุกข้าว

- นำข้าวเปลือกแห้งที่ต้องการเพิ่มความชื้นมาชั่งน้ำหนัก และนำไปวัดความชื้น
- เพิ่มความชื้นให้ข้าวเปลือกแห้งโดยการพรมน้ำในปริมาณที่คำนวณได้จากสมการดังรายละเอียดในภาคผนวก ก จากนั้นพักข้าวเปลือกไว้ในภาชนะบรรจุมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศภายนอกประมาณ 4-6 hr แล้วจึงนำไปเก็บในที่เย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 0-6°C เป็นเวลา 7 วัน (สมบัติ กำมอญ, 2551)

5.1.2 วิธีการแช่ข้าว (soak)

- นำข้าวเปลือกแห้งที่ต้องการเพิ่มความชื้นมาใส่ในภาชนะ จากนั้นเทน้ำใส่จนกระทั่งท่วมปริมาณข้าวเปลือกแล้วคนให้ข้าวเปลือกกระจายทั่วกัน
- รอเวลาจนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นตามที่ต้องการ ดังรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ข จากนั้นนำข้าวเปลือกขึ้นจากน้ำ แล้วทำการซับผิวข้าวเปลือกให้แห้ง จึงดำเนินการขั้นต่อไป

5.2 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก

ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก ประกอบด้วย

5.2.1 เปิดเครื่องเป่าลม (blower) และปรับให้มีค่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่ออบแห้งเป็น 1 m/s

5.2.2 เปิดเครื่องทำความร้อน (heater) และปรับอุณหภูมิให้มีค่า 45, 60, 90 และ 120°C ตามลำดับ

5.2.3 เปิดเครื่องกะพ้อลำเลียงโดยปรับค่าความถี่กระแสไฟฟ้าที่แสดงบนหน้าปัดควบคุม ให้มีค่า 20 Hz. ซึ่งจะได้ค่าความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 593 rpm และความเร็วรอบของกะพ้อตักมีค่า 11 rpm (feed rate มีค่า 15.37 kg/min) สามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ค

5.2.4 เทข้าวเปลือกชั้นที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. ปริมาณ 2.5 kg ลงใน ช่องทางเข้าของกะพ้อลำเลียง ปริมาณข้าวเปลือก 2.5 kg เป็นปริมาณข้าวเปลือกค่าสุดที่เพียงพอจะ ทำให้การอบแห้งดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง สามารถอ่านเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ค

5.2.5 เริ่มจับเวลาเมื่อเทข้าวเปลือกหมด การเก็บตัวอย่างแบ่งเป็น 3 ช่วงคือ ในช่วง 20 min แรก เก็บตัวอย่างทุก 2 min จากนั้นเก็บตัวอย่างทุก 5 min จนถึงเวลา 120 min หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างทุก 10 min จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นอยู่ในช่วง 13-15% w.b. จึงหยุดทำการทดลอง

5.2.6 เก็บปริมาณตัวอย่างข้าวเปลือกครั้งละ 10-15 g บรรจุในถุงพลาสติกปิดปากถุงให้สนิท เพื่อนำไปวัดความชื้น และทดสอบคุณภาพข้าว

5.2.7 ปรับค่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่ออบแห้งเป็น 2, 3 และ 4 m/s ตามลำดับ แล้วทำตาม ขั้นตอนที่ 5.2.2-5.2.6

5.2.8 นำข้าวเปลือกชั้นที่มีค่าความชื้นเริ่มต้น 22% w.b. ทำตามขั้นตอนที่ 5.2.1-5.2.7 จึง เป็นการเสร็จสิ้นการทดลอง

5.2.9 นำข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองพักข้าวไว้เป็นระยะเวลาประมาณ 4-6 hr เพื่อให้ เมล็ดข้าวเปลือกคลายความเครียดที่ผิวที่เกิดจากการลดความชื้นอย่างรวดเร็ว และมีการกระจาย ความชื้นอย่างสม่ำเสมอภายในเมล็ด แล้วจึงนำข้าวเปลือกไปวัดความชื้น และทดสอบคุณภาพข้าว รวมทั้งหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะต่อไป

5.3 ขั้นตอนการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก

ในการหาค่าความชื้นข้าวเปลือกสามารถทำได้หลากหลายวิธีทั้งวิธีตรง และวิธีอ้อม สำหรับ ข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระจากการทดลองนี้จะใช้ วิธีการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก 2 วิธีด้วยกันคือ เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน Grain Moisture Tester Riceter m401 เป็นการวัดค่าความชื้นวิธีอ้อม โดยเป็นเครื่องที่สะดวก ใช้เวลาน้อย และเหมาะสำหรับการหาความชื้นของตัวอย่างที่มีจำนวนน้อย ในกรณีที่ตัวอย่างมีจำนวนมากจะใช้ การหาค่าความชื้น โดยวิธีการใช้ตู้อบซึ่งเป็นการวัดค่าความชื้นวิธีตรง ซึ่งมีความถูกต้อง และ สามารถใช้อ้างอิงได้ ในการทดลองนี้ใช้ตู้อบของ MCP HEK GmbH โดยนำข้าวเปลือกตัวอย่างที่ บดละเอียดไปไว้ในตู้อบอุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (วิธีการวัดปริมาณความชื้นในข้าว, 2546) ซึ่งแต่ละวิธีมีขั้นตอนดังนี้

5.3.1 เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน Grain Moisture Tester Riceter m401 มีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

- นำข้าวเปลือกตัวอย่างวางเรียงในถาดบรรจุตัวอย่าง โดยวางให้เต็มพื้นที่มากที่สุด และไม่ควรวางให้เมล็ดข้าวเปลือกซ้อนทับกัน
- เปิดเครื่องแล้วเลือกลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ โดยกดที่ปุ่ม paddy
- นำถาดบรรจุตัวอย่างใส่ในช่องด้านข้างของเครื่อง จากนั้นหมุนเกลียวลงมาจนสุดเพื่อให้สกรูบดข้าวเปลือกตัวอย่าง
- กดปุ่ม power รอประมาณ 2-3 s เครื่องจะแสดงค่าความชื้นของข้าวเปลือกตัวอย่าง โดยแสดงค่าเป็น % w.b.

5.3.2 การหาค่าความชื้นโดยวิธีการใช้ตู้อบ มีขั้นตอนดังนี้

- นำกระป๋องเก็บตัวอย่างที่ทำจากอลูมิเนียมไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ขณะนำกระป๋องออกจากตู้อบใช้คีบคีบวางในถาดบรรจุอย่าใช้มือสัมผัสกระป๋องตัวอย่าง)
- นำกระป๋องเก็บตัวอย่างไปวางให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้นประมาณ 30 min
- นำข้าวเปลือกตัวอย่างไปบดด้วยเครื่องบดตัวอย่าง Perten 3303 Laboratory mill
- ชั่งน้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่าง บันทึกค่าแล้วกด reset เพื่อให้ค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ จากนั้นใส่ตัวอย่างที่บดลงไปประมาณ 5-10 g และบันทึกค่าน้ำหนักของข้าวเปียก
- นำกระป๋องเก็บตัวอย่างเอาไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยไม่ต้องปิดฝา
- เมื่อครบเวลา ปิดฝากะป๋องเก็บตัวอย่างแล้วนำไปวางให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้นประมาณ 30 min
- เปิดฝาแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ค่าที่ชั่งได้เป็นน้ำหนักของข้าวแห้งรวมกับน้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่าง จากนั้นลบกับน้ำหนักของกระป๋องเก็บตัวอย่างจะได้เป็นน้ำหนักของข้าวแห้ง
- นำค่ามาคำนวณหาค่าความชื้นข้าวเปลือก ดังสมการ

$$\text{ค่าความชื้นข้าวเปลือก} = \frac{w-d}{w} \times 100 \text{ \% w.b.}$$

เมื่อ w = มวลของข้าวเปียก (kg)
 d = มวลของข้าวแห้ง (kg)

5.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว

ในการวิเคราะห์คุณภาพข้าวจะต้องนำข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการอบแห้งไปขัดสี สำหรับการทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกตัวอย่างที่จะทำการขัดสีปริมาณ 100 g โดยมีขั้นตอนคือ การทำความสะอาด การกะเทาะเปลือก การขัดขาว และการคัดแยก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.4.1 การทำความสะอาด

เครื่องทำความสะอาดโดยใช้ตะแกรง และแรงลมเพื่อแยกสิ่งเจือปนกับเมล็ดข้าวเปลือก ตะแกรงจะถูกวางซ้อนกัน 3 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมีขนาดของรูตะแกรง 6.5, 3.0 และ 1.75 mm เรียงลำดับจากด้านบนลงด้านล่าง ที่ชั้นล่างสุดจะมีลมเป่าเพื่อแยกฝุ่นที่เบากว่าเมล็ดข้าวเปลือกเป็นชั้นสุดท้าย

5.4.2 การกะเทาะเปลือก

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

5.4.3 การขัดขาว

เครื่องขัดขาว (Rice Miller) ที่ใช้เป็นของห้างหุ้นส่วนจำกัด เจริญเกษตร มีความจุประมาณ 100 g ข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะเปลือกจะนำมาขัดขาวซึ่งจะทำการขัดสีเอารำออก และได้ข้าวขาวกับรำออกมา หลักการทำงานของเครื่องขัดขาวจะประกอบด้วยแกนเหล็กขัดขาวที่มีใบมีดติดอยู่ และวางตัวในแนวระดับ ด้านล่างของแกนมีตะแกรงขัดขาวที่มีรูลักษณะเป็นรูวงรีเพื่อให้เมล็ดข้าวอยู่ในรู และใบมีดที่ติดกับแกนเหล็กทำการขัดเอารำออก

5.4.4 การคัดแยกปลายข้าว

เครื่องคัดแยกปลายข้าว (Cylinder Separator) ที่ใช้เป็นของห้างหุ้นส่วนจำกัด เจริญเกษตร มีความจุประมาณ 100 g เครื่องคัดแยกปลายข้าวจะเป็นลักษณะทรงกระบอกกลาง โดยที่ผิวด้านในของทรงกระบอกจะเป็นหลุมรูปทรงกระบอกกระจายเต็มพื้นผิว เมื่อทำการหมุน และใส่ข้าวที่ผ่านการขัดขาวลงไป ข้าวเต็มเมล็ดที่มีน้ำหนักมากกว่าจะเคลื่อนตัวไปอยู่ภายในหลุมบริเวณด้านข้างของทรงกระบอก ส่วนปลายข้าวที่มีน้ำหนักเบาที่จะเคลื่อนตัวออกมาทางช่องทางออก จะทำให้สามารถแยกข้าวต้น และปลายข้าวจากกันได้

5.4.5 การวิเคราะห์คุณภาพข้าว

เมื่อผ่านกระบวนการคัดแยกปลายข้าวเรียบร้อยแล้วจะนำข้าวขาวมาพิจารณาคุณภาพข้าวใน 2 กรณีคือ

- ปริมาณข้าวคืน สามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักข้าวคืน และปลายข้าวที่ได้จากการขัดสีของทุกกรณีแล้วหาค่าร้อยละเพื่อนำไปวิเคราะห์ในแต่ละกรณี
- ความขาวของข้าว จะนำข้าวคืนมาทำการวัดสีด้วยเครื่องวัดสีของ Minolta รุ่น CR300 โดยจะแสดงออกมา 3 ค่าคือ ความขาวแทนด้วยค่า +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

5.5 ขั้นตอนการหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิความร้อนจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะหมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้งตลอดระยะเวลาการอบแห้งกับปริมาณน้ำที่ระเหยจากข้าวเปลือกในการอบแห้ง เป็นค่าที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากสามารถใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังสมการด้านล่าง ซึ่งสามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก

$$\hat{E}_T = \frac{\rho_a A \bar{V} [(1 - W_a) C_a + C_v W_a] (T_{out} - T_{in}) \Delta t}{\left(\frac{w_{in} (M_{in} - M_{final})}{(1 - M_{final})} \right)}$$

5.6 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยบัณฑิตศึกษาศาखाวิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี F4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

5.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ประกอบด้วย

- เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหั่นอิสระ
- เครื่องวัดความเร็ว, ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของ Testo 445
- Orifice plate และ U-tube manometer
- เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

- เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน Grain Moisture Tester Riceter m401
- เครื่องบดเมล็ดพันธุ์ Perten 3303 Laboratory mill
- ตู้อบความร้อน MCP HEK GmbH
- เครื่องทำความสะอาดด้วยตะแกรง และแรงลม
- เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก (Rice Huller)
- เครื่องขัดขาว (Rice Miller)
- เครื่องคัดแยกปลายข้าว (Cylinder Separator)
- เครื่องวัดสีข้าวสารของ Minolta รุ่น CR-300

5.8 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวพันธุ์ ชัยนาท 1 จากศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวนครราชสีมา เมล็ดพันธุ์สุทธิไม่ต่ำกว่า 98% โดยน้ำหนัก และความชื้นประมาณ 11-12% w.b. เป็นข้าวที่ผ่านการตากแห้ง และคลุกยาเคมีชื่อ คาเบนดาซิม, แมนโคเซบ และคลอร์ไพริฟอส (ห้ามใช้เป็นอาหารหรือเลี้ยงสัตว์)

5.9 การเก็บรวบรวมข้อมูล

จัดทำเป็นตาราง ประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

- ความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบแห้ง
- อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกที่ความเร็วลม ความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิต่าง ๆ
- ปริมาณข้าวต้นของเมล็ดข้าวที่ความเร็วลม ความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิต่าง ๆ
- ปริมาณความขาวของข้าวที่ผ่านการขัดสีที่ความเร็วลม ความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิต่าง ๆ
- อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐภูมิจำเพาะที่ความเร็วลม ความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิต่าง ๆ

5.10 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองจะถูกรวบรวม และวิเคราะห์ แล้วนำเสนอในรูปของตาราง และรูปภาพ ที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความเร็วลม ความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิ ที่มีต่ออัตราการอบแห้ง ปริมาณข้าวต้น ความขาวของข้าวที่ขัดสี และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐภูมิจำเพาะ

บทที่ 6

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก โดยใช้อุณหภูมิอบแห้งข้าวเปลือก 4 ค่า คือ 45, 60, 90 และ 120°C และปรับความเร็วอากาศอบแห้ง 4 ค่าคือ 1, 2, 3 และ 4 m/s ผลการทดลอง จะแสดงอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีอุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกที่ต่างกัน อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ความร้อนปฐภูมิจำเพาะ ปริมาณข้าวตั้น และความขาว และพิจารณาเปรียบเทียบผลการอบแห้ง ระหว่างข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น และข้าวเปลือกสดที่ได้จากการเก็บเกี่ยว

6.1 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวเปลือกแห้งที่มีความชื้นประมาณ 11% w.b. และเพิ่มความชื้นด้วยวิธีการแช่ข้าว (soak) เป็นระยะเวลา 16 hr ซึ่งจะได้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นประมาณ 26% w.b.

6.1.1 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ

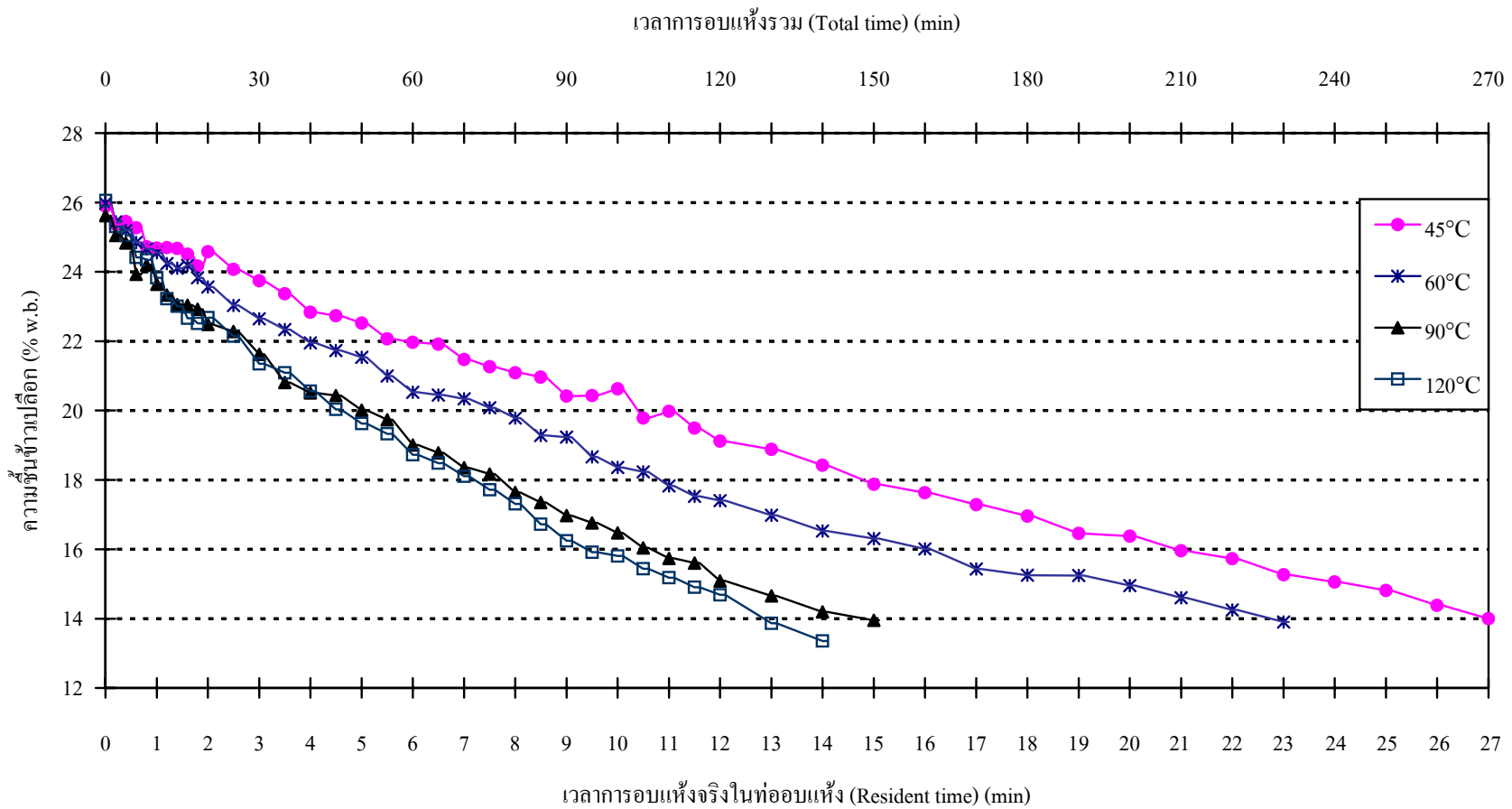
การทดลองจะปรับค่าความเร็วอากาศอบแห้งให้คงที่ จากนั้นปรับค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็น 45, 60, 90 และ 120°C แล้วจึงเปลี่ยนความเร็วอากาศอบแห้งจนครบทั้ง 4 ค่า ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 6.1-6.4

ผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าลดลงสำหรับทุกกรณีความเร็วอากาศอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C จะใช้เวลาการอบแห้งน้อยกว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C กว่าสองเท่า โดยระยะเวลาการอบแห้งจะลดลงจาก 270-128 min, 194-90 min, 170-70 min และ 140-58 min กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45, 60, 90 และ 120°C สำหรับความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s ตามลำดับ และแนวโน้มระยะเวลาการอบแห้งจะลดลงมากขึ้นเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลต่อระยะเวลาการอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูงขึ้น จะทำให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลง แต่การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพข้าวเปลือก โดยทำให้มีการแตกหักสูงมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณข้าวตั้นลดลง

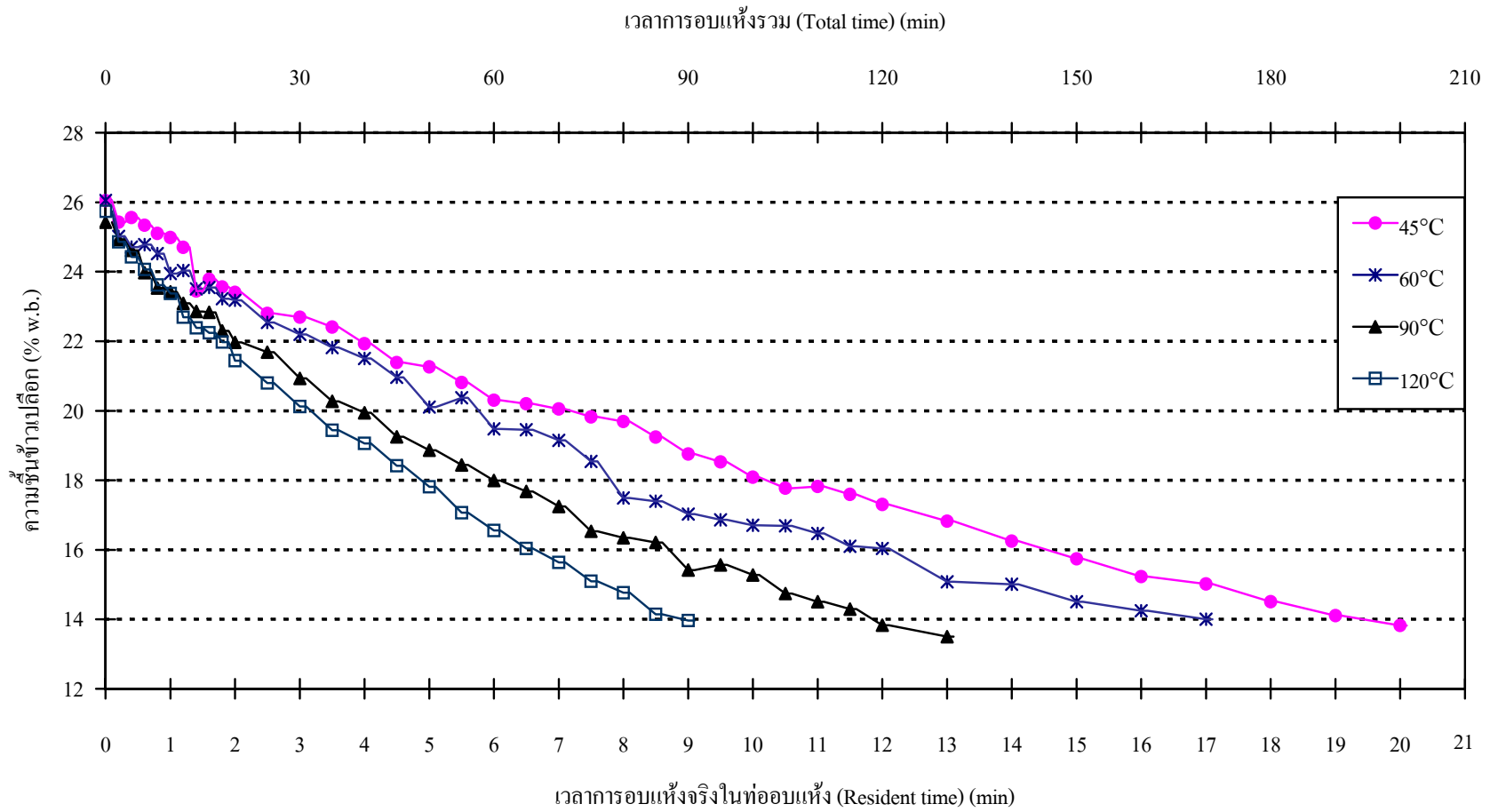
การที่อุณหภูมิอบแห้งสูงสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งได้เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นอัตราการแพร่ของความชื้นจากในเมล็ดสู่ผิวข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นตามสมการ Fick's law of diffusion ที่ได้กล่าวในบทที่ 2 เพราะค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

$$\text{สัมประสิทธิ์การแพร่} \quad D_{AB} = f(T)$$

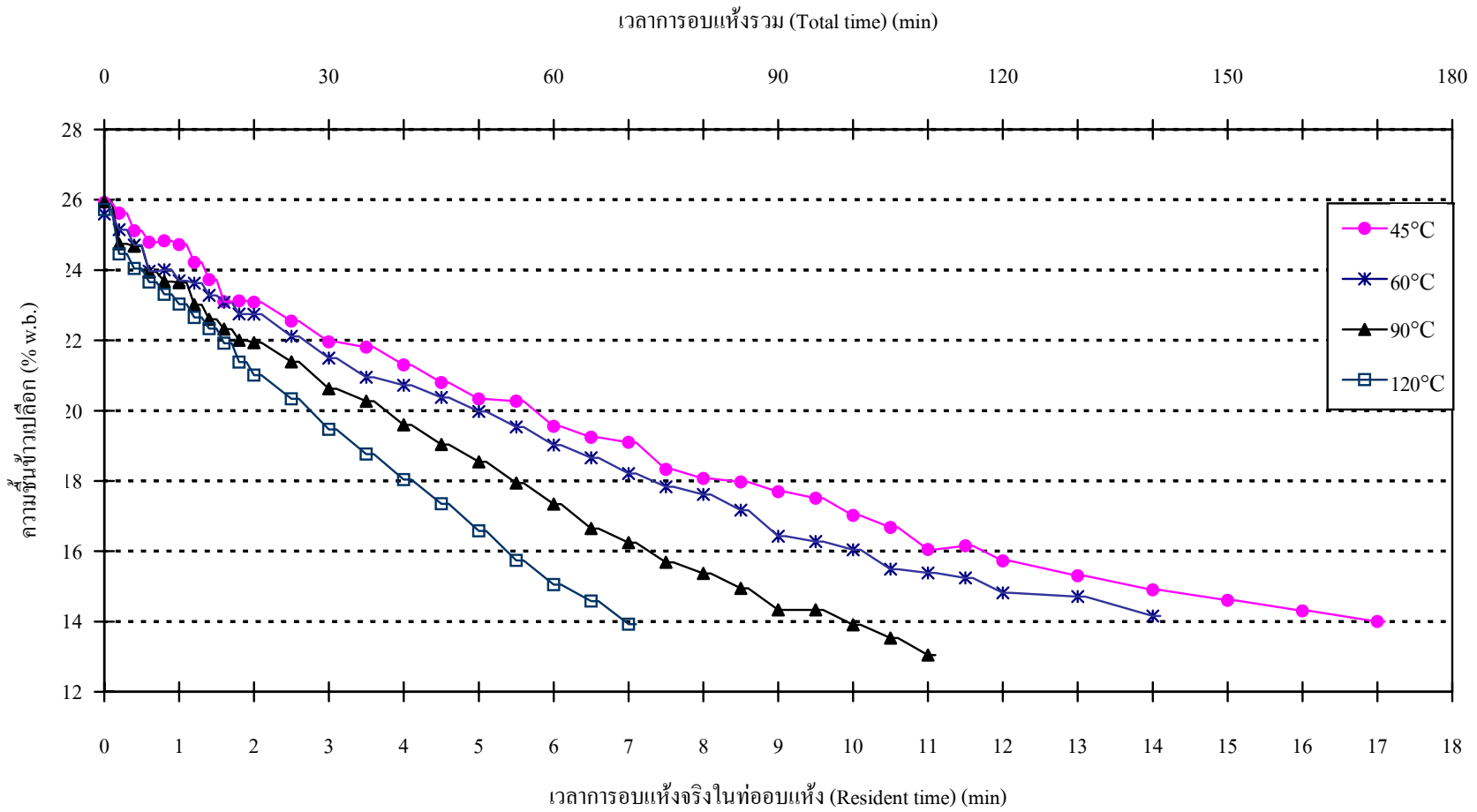
และเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าลดลง อากาศที่อุณหภูมิสูงจึงมีศักยภาพในการดึงความชื้นจากผิวข้าวเปลือกได้มากกว่าอากาศที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบกับการที่ข้าวเปลือกไหลในท่ออบแห้งด้วยแรงโน้มถ่วงอย่างอิสระโดยไม่มีการขวางการไหลจึงทำให้มีความพรุนสูง และพื้นที่สัมผัสอากาศมาก เมื่อความชื้นที่ผิวข้าวเปลือกลดลงจึงเกิดความแตกต่างของระดับความชื้นที่ผิวข้าวเปลือก และภายในเมล็ดข้าวเปลือก (moisture gradient) ความชื้นที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวเปลือกก็จะเคลื่อนตัวมาแทนที่ และอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้ผลต่างของระดับความชื้นนี้มีค่าสูงมากขึ้น ความชื้นที่อยู่ภายในจึงเคลื่อนตัวมายังผิวข้าวเปลือกมากขึ้นทำให้ลดความชื้นข้าวเปลือกได้เร็วยิ่งขึ้น



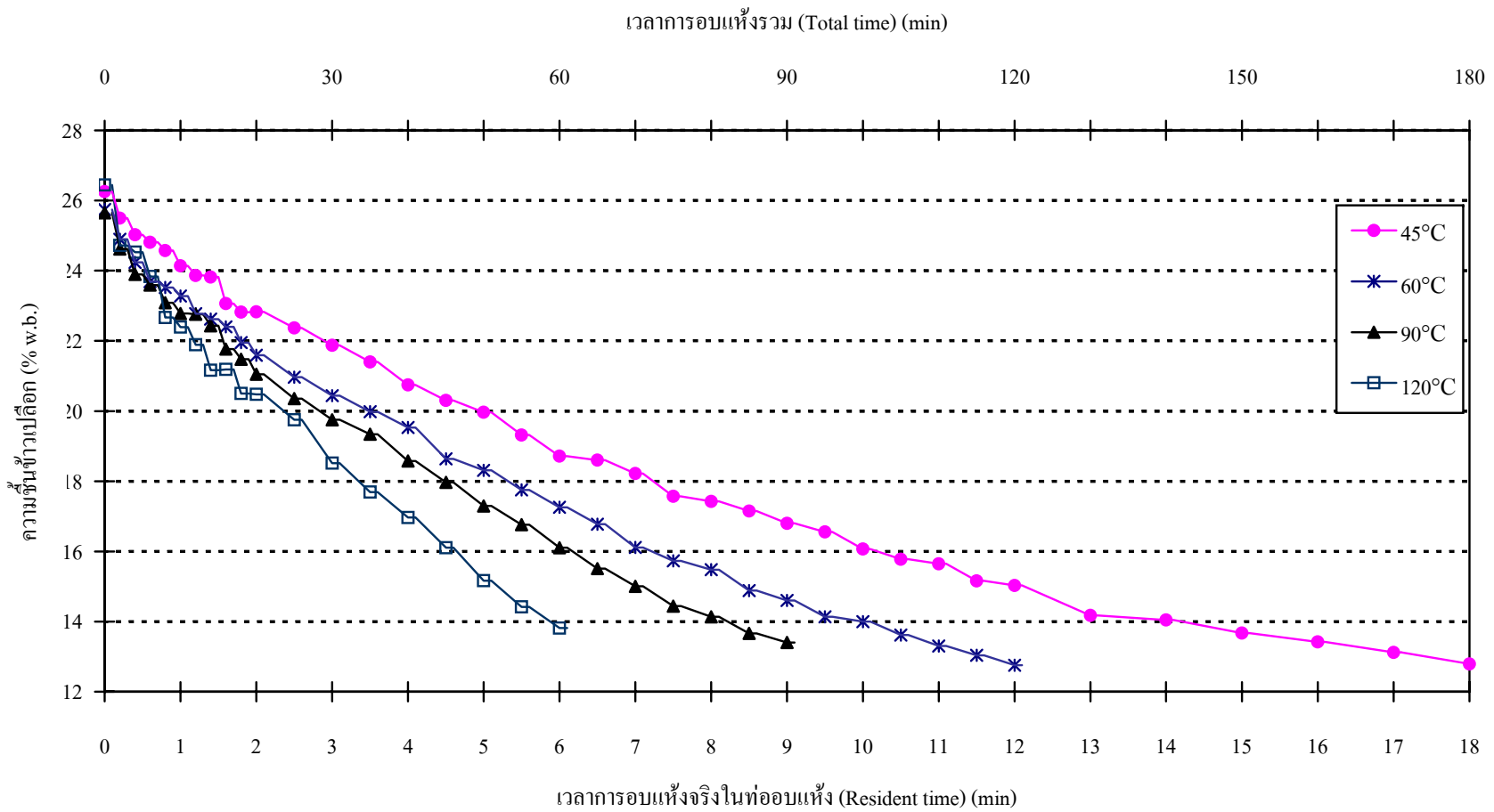
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ

6.1.2 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีที่มีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ

นำข้อมูลผลการทดลองในหัวข้อ 6.1.1 มาศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่ออัตราการอบแห้ง พบว่าความเร็วอากาศอบแห้งมีผลต่อระยะเวลาการอบแห้ง เมื่อความเร็วอากาศอบแห้งสูงเพิ่มขึ้นระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าลดลงสำหรับทุกกรณี อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ระยะเวลาการอบแห้งจะลดลงจาก 270-140 min, 230-100 min, 148-82 min และ 128-58 min ในกรณีความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 1-4 m/s สำหรับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45, 60, 90 และ 120°C ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ประมาณ 2 เท่า จากรูปที่ 6.5-6.8 จะเห็นว่าเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งเพิ่มจาก 1-2 m/s ระยะเวลาการอบแห้งจะลดลงมากที่สุด รองลงมาคือ 2-3 m/s และ 3-4 m/s ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดลงของระยะเวลาการอบแห้งจะน้อยลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งสูงมากขึ้น

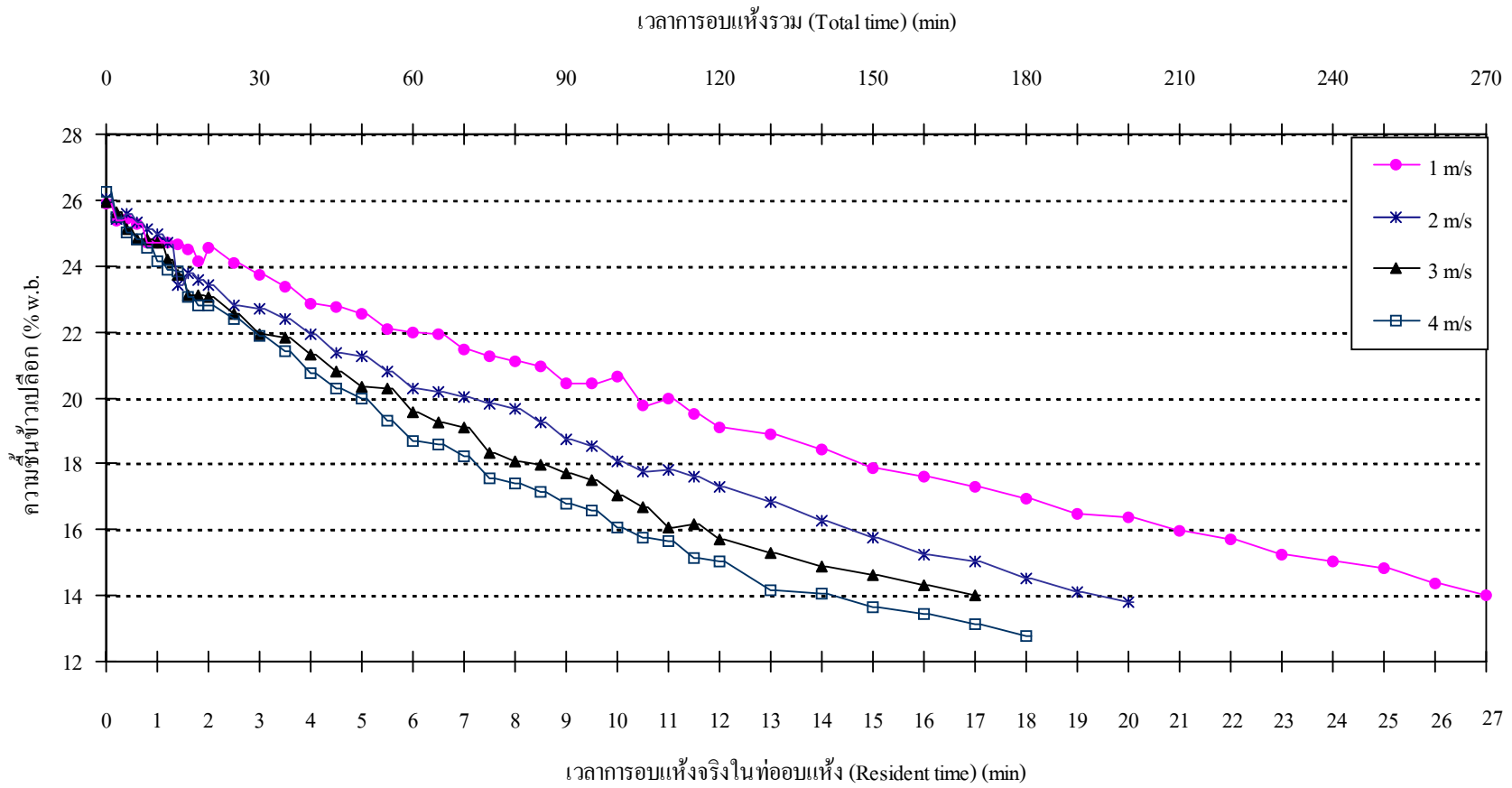
ความเร็วอากาศอบแห้งที่สูงขึ้นสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อน และความชื้นที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นลักษณะการพาแบบบังคับ (forced convection) และเนื่องจากเครื่องอบแห้งนี้เป็นแบบการไหลสวนทางซึ่งทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างเมล็ดข้าวกับอากาศอบแห้งมีค่าสูง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และความชื้นมีค่าสูงขึ้น เพราะค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่าความเร็ว

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

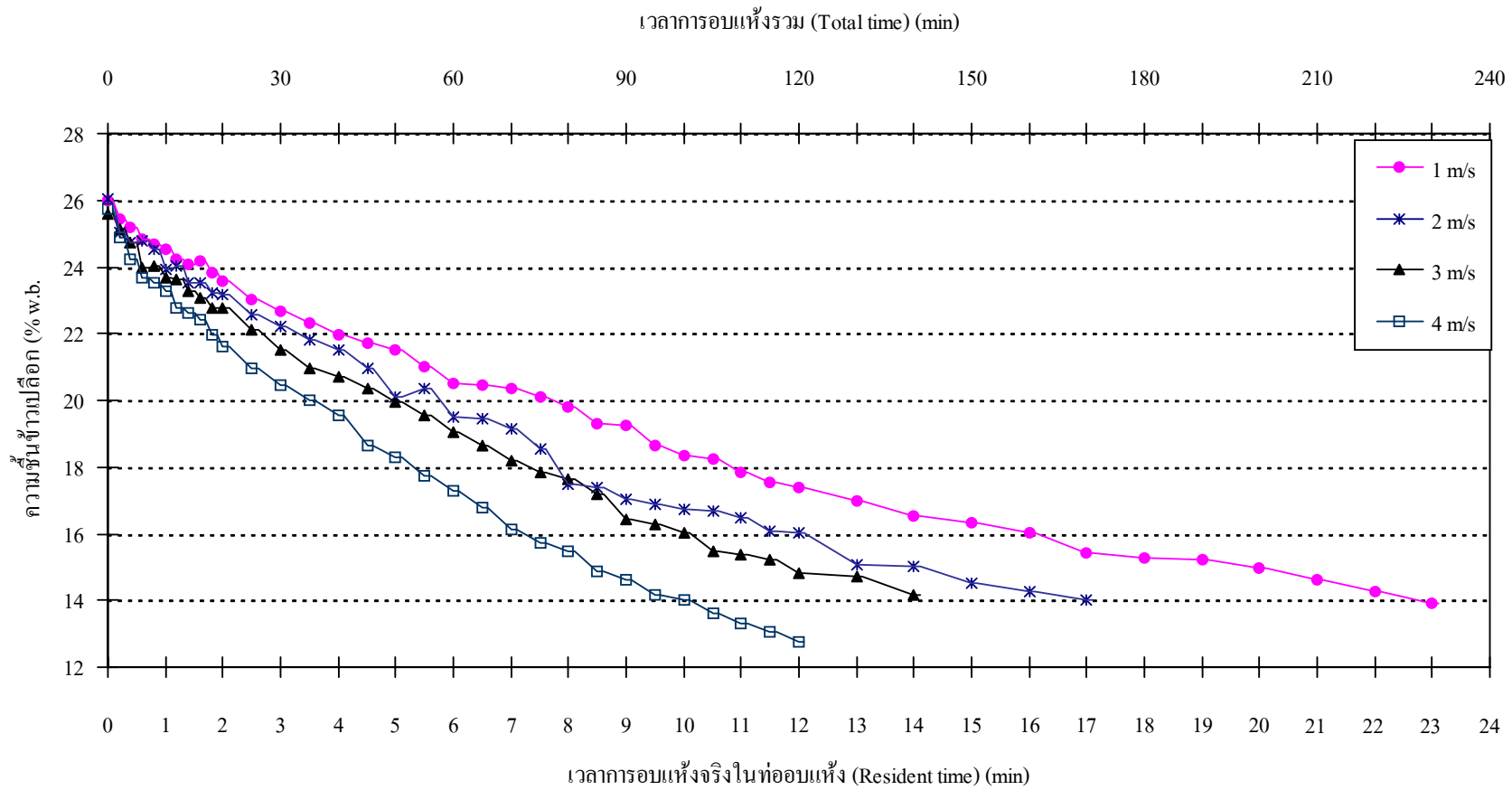
$$\text{การถ่ายเทมวล} \quad \text{Sherwood number :} \quad \text{Sh} = f(\text{Re}^a, \text{Sc}^b)$$

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว และทำให้ความชันของความชื้นที่ผิวข้าวเปลือก (moisture gradient) มีค่าสูงขึ้น ดังที่กล่าวข้างต้น ทำให้ใช้ระยะเวลาการอบแห้งข้าวเปลือกน้อยลง

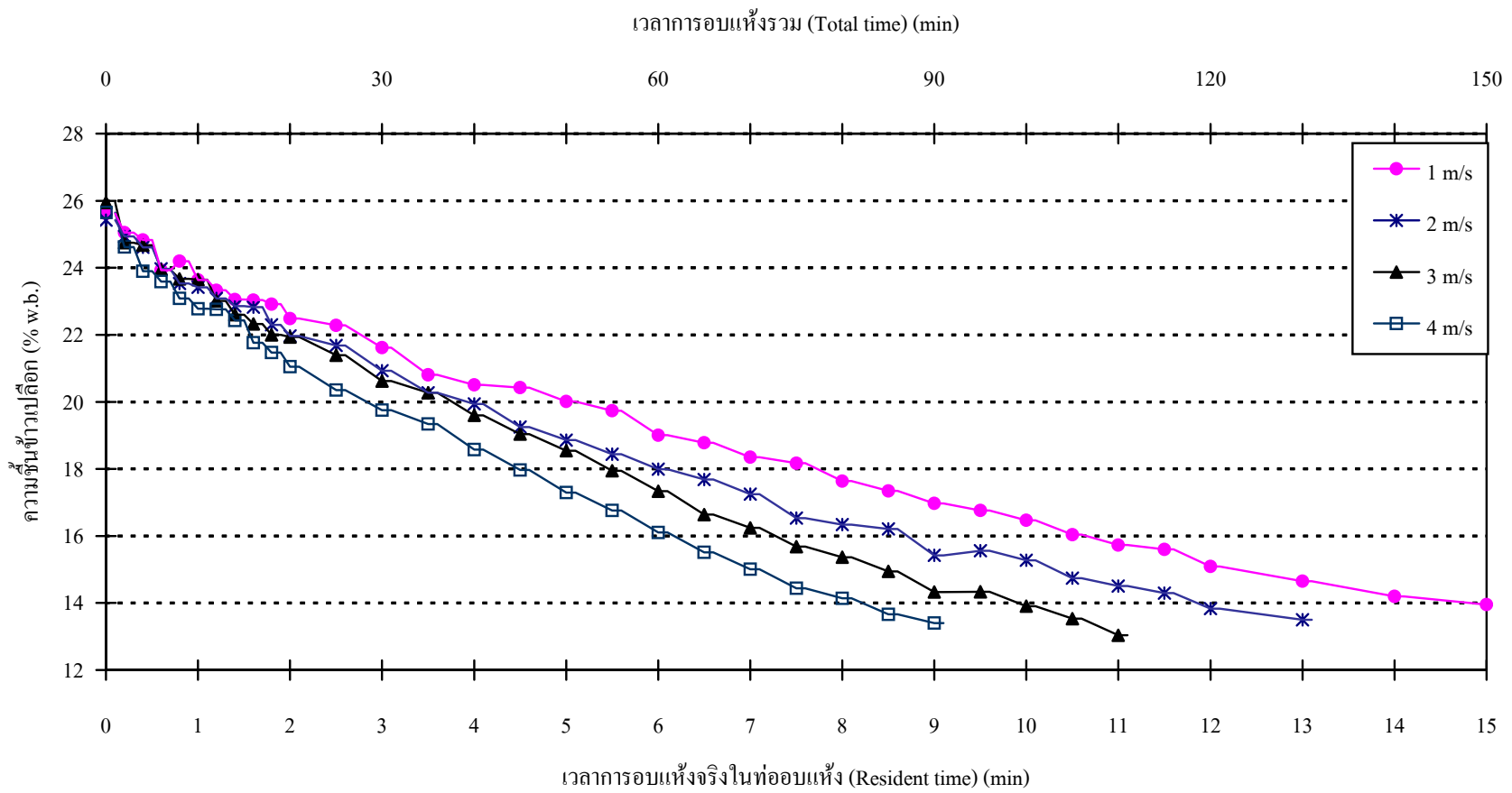
จากพฤติกรรมการอบแห้งเมื่อเปลี่ยนค่าความเร็วอากาศอบแห้ง และอุณหภูมิอากาศอบแห้งพบว่า อัตราการอบแห้งในช่วงแรกจะมีค่าสูงลักษณะเป็นเส้นตรงมีระยะเวลาประมาณ 10-20 min เพราะในช่วงแรกผิวข้าวเปลือกมีความชื้นสูงจึงสามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว จากนั้นเมื่อความชื้นที่ผิวนอกของข้าวเปลือกระเหยออกไปหมดแล้วอัตราการอบแห้งจะลดลงแต่ยังคงมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงจนเสร็จสิ้นการอบแห้งโดยไม่เกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานเป็นขั้วโดยใช้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 19% w.b. แม้ว่าเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องจะใช้ระยะเวลาการอบแห้งมากกว่าแต่มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน



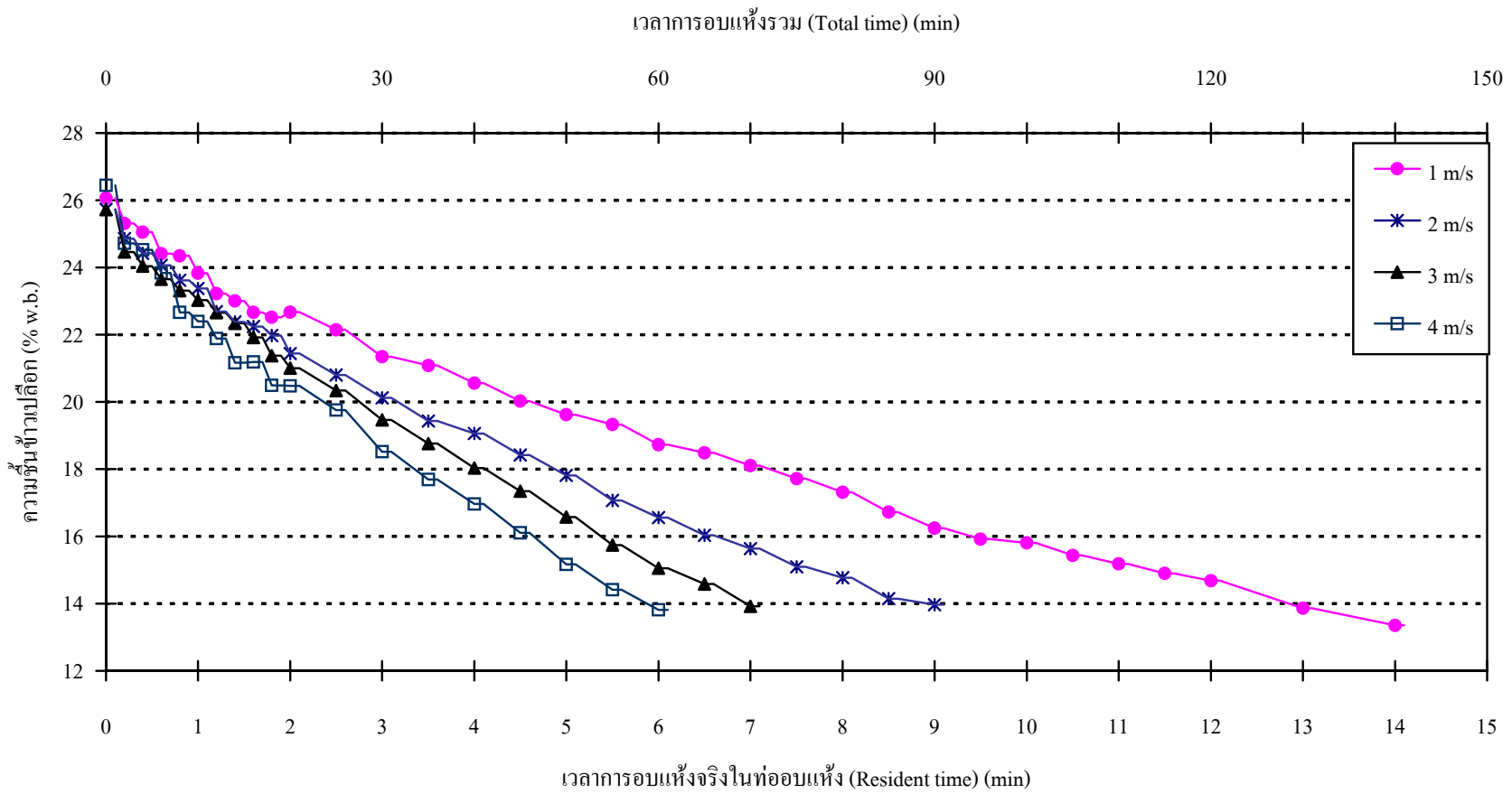
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นเข้าเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นเข้าเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ



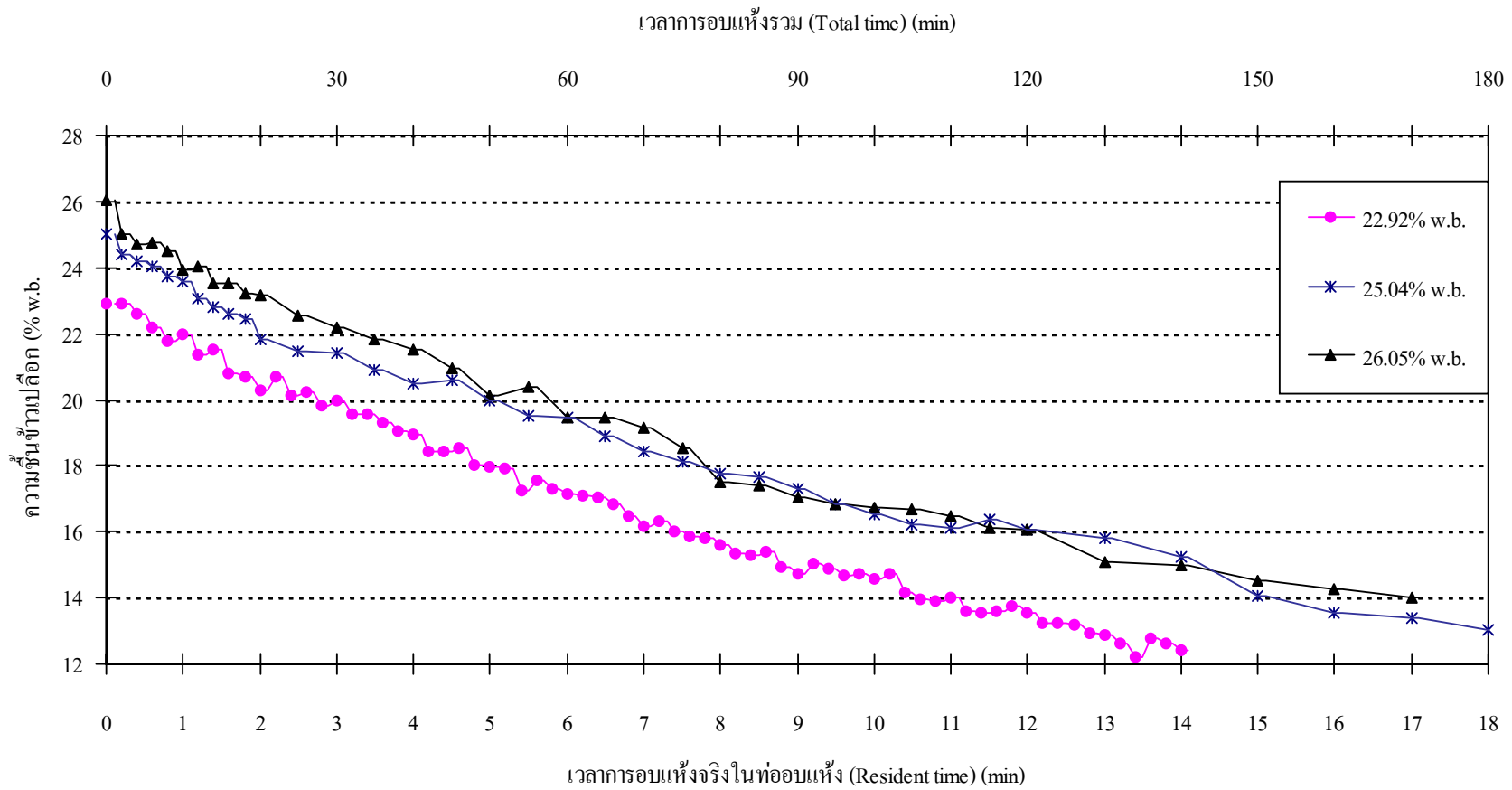
รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ

6.1.3 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีที่มีความชื้นเริ่มต้นค่าต่าง ๆ

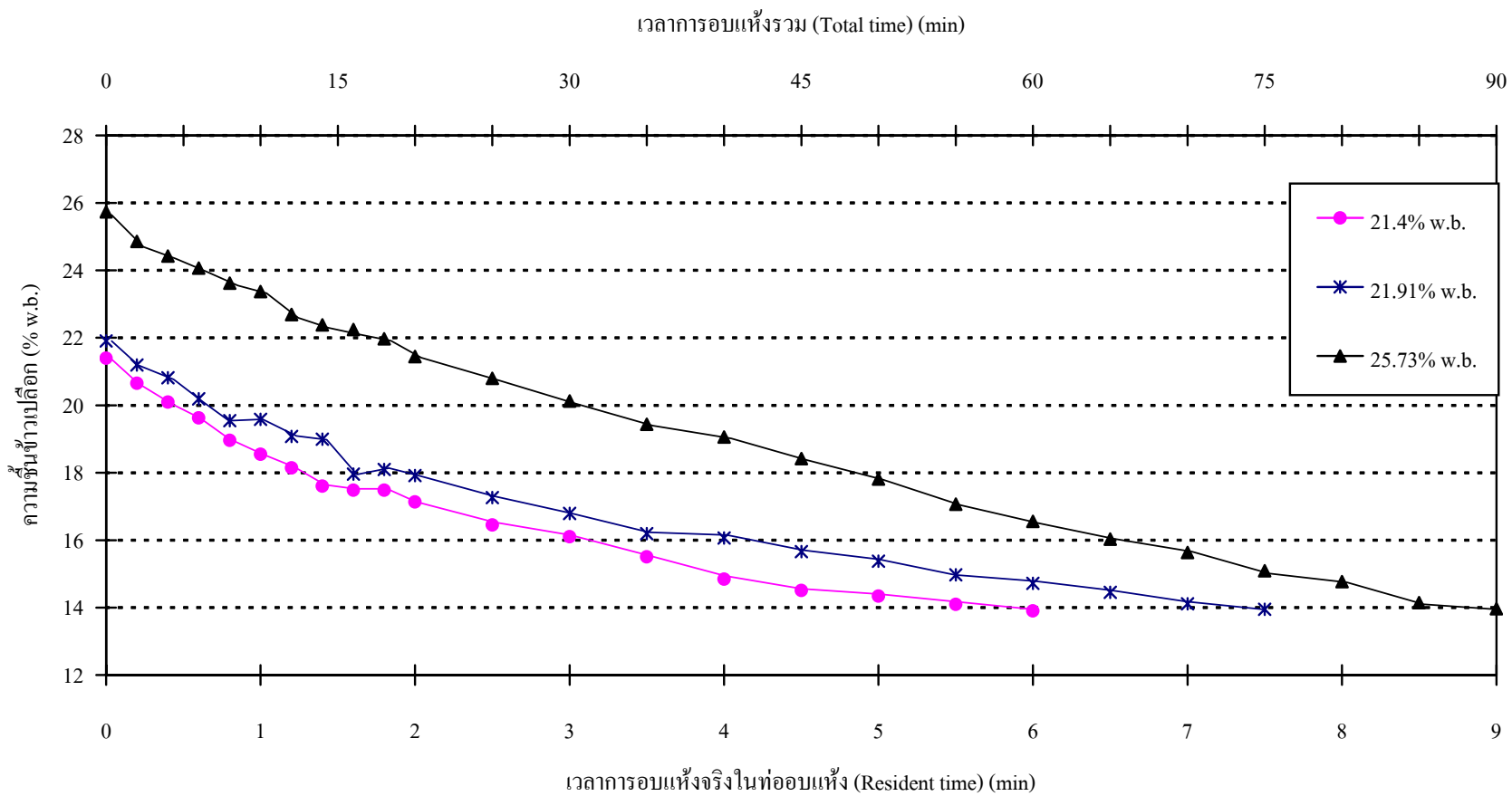
การทดลองจะเตรียมข้าวเปลือกให้มีความชื้นเริ่มต้น 3 ค่า ในช่วง 20-26% w.b. ทำการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 120°C โดยใช้ค่าความเร็วอากาศอบแห้ง 2 และ 4 m/s ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.9-6.11

ผลการทดลองพบว่าพฤติกรรมกรอบแห้งเป็นดังเช่นที่กล่าวมาข้างต้น โดยในช่วงแรกอัตราการอบแห้งสูงมีลักษณะเป็นเส้นตรง จากนั้นอัตราการอบแห้งจะลดลงแต่ยังคงมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเช่นเดิม ในทุกกรณีของความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก อุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ โดยความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ำกว่าจะใช้ระยะเวลาการอบแห้งน้อยกว่า จากรูปที่ 6.9-6.11 จะเห็นว่าที่ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกต่ำลงอัตราการอบแห้งในช่วงหลังจะมีค่าต่ำลงเช่นกัน โดยกรณีอุณหภูมิอบแห้งสูงจะเห็นได้ชัดเจนกว่า เนื่องจากที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำอัตราการอบแห้งในช่วงแรกกับช่วงหลังมีความแตกต่างกันน้อย และจากแนวโน้มของอัตราการอบแห้งของแต่ละชุดข้อมูลเห็นได้ชัดเจนว่าค่าเข้าสู่ค่าความชื้นสุดท้ายคงที่ค่าหนึ่ง แต่เป็นค่าที่ต่างกัน ในกรณีที่อุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้งที่ต่างกัน

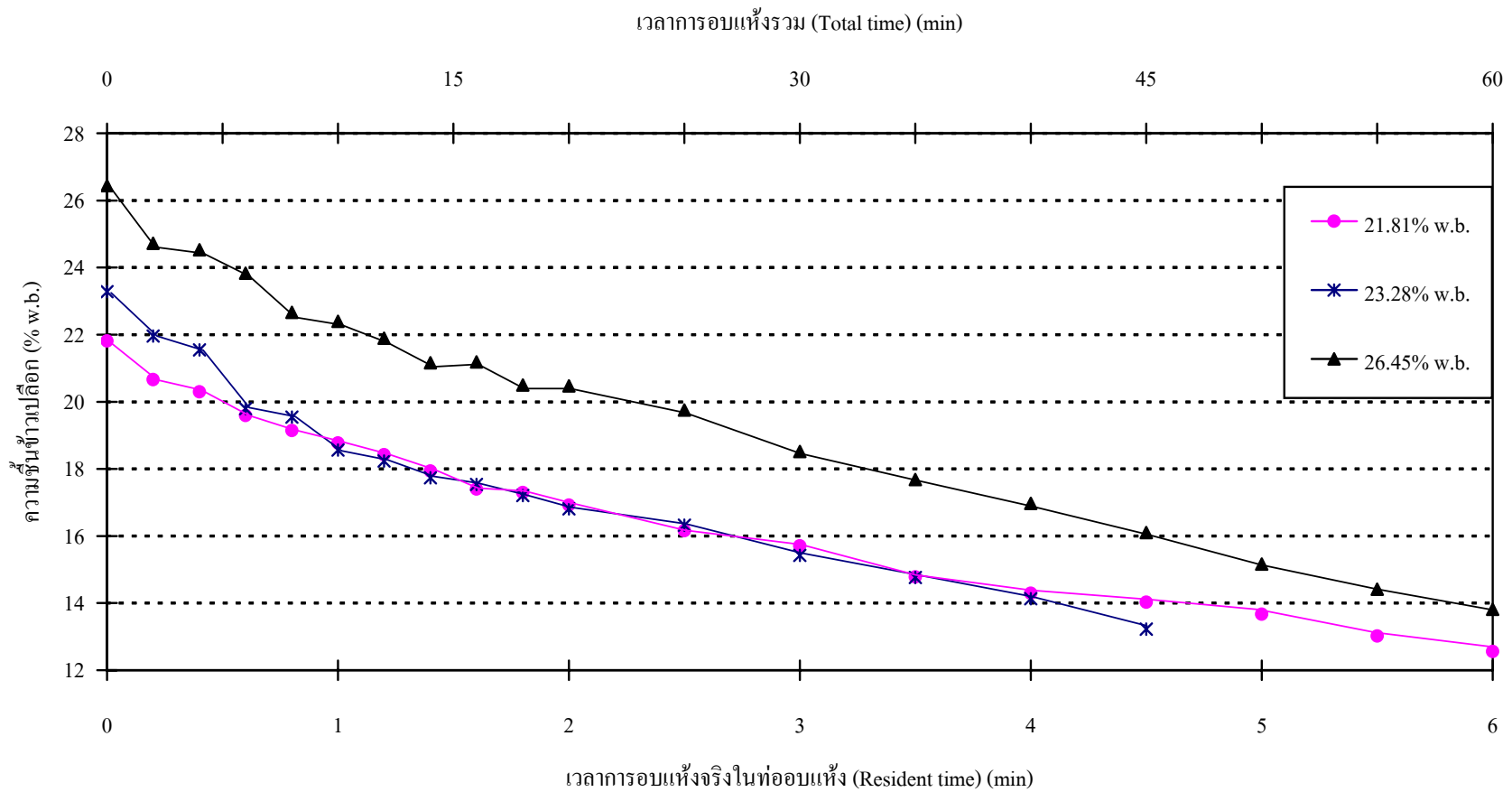
จากแนวโน้มของกราฟในรูปที่ 6.9-6.11 ความชื้นสุดท้ายที่กราฟแต่ละชุดข้อมูลดูเข้าหานั้นคือ ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุ ซึ่งค่านี้จะขึ้นกับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังนั้นความชื้นสุดท้ายของแต่ละชุดข้อมูลจะมีค่าแตกต่างกันตามสถานะการอบแห้ง จากการทดลองแม้ว่าความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นที่ต่ำกว่าจะมีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าแต่จะเข้าสู่ความชื้นสุดท้ายเดียวกันในสถานะทดลองเดียวกัน ซึ่งทำให้ใช้ระยะเวลาการอบแห้งน้อยกว่ากรณีความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นสูงกว่า



รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C กรณีค่าความชื้นเริ่มต้นค่าต่าง ๆ



รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้างปัดออกที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีค่าความชื้นเริ่มต้นค่าต่าง ๆ



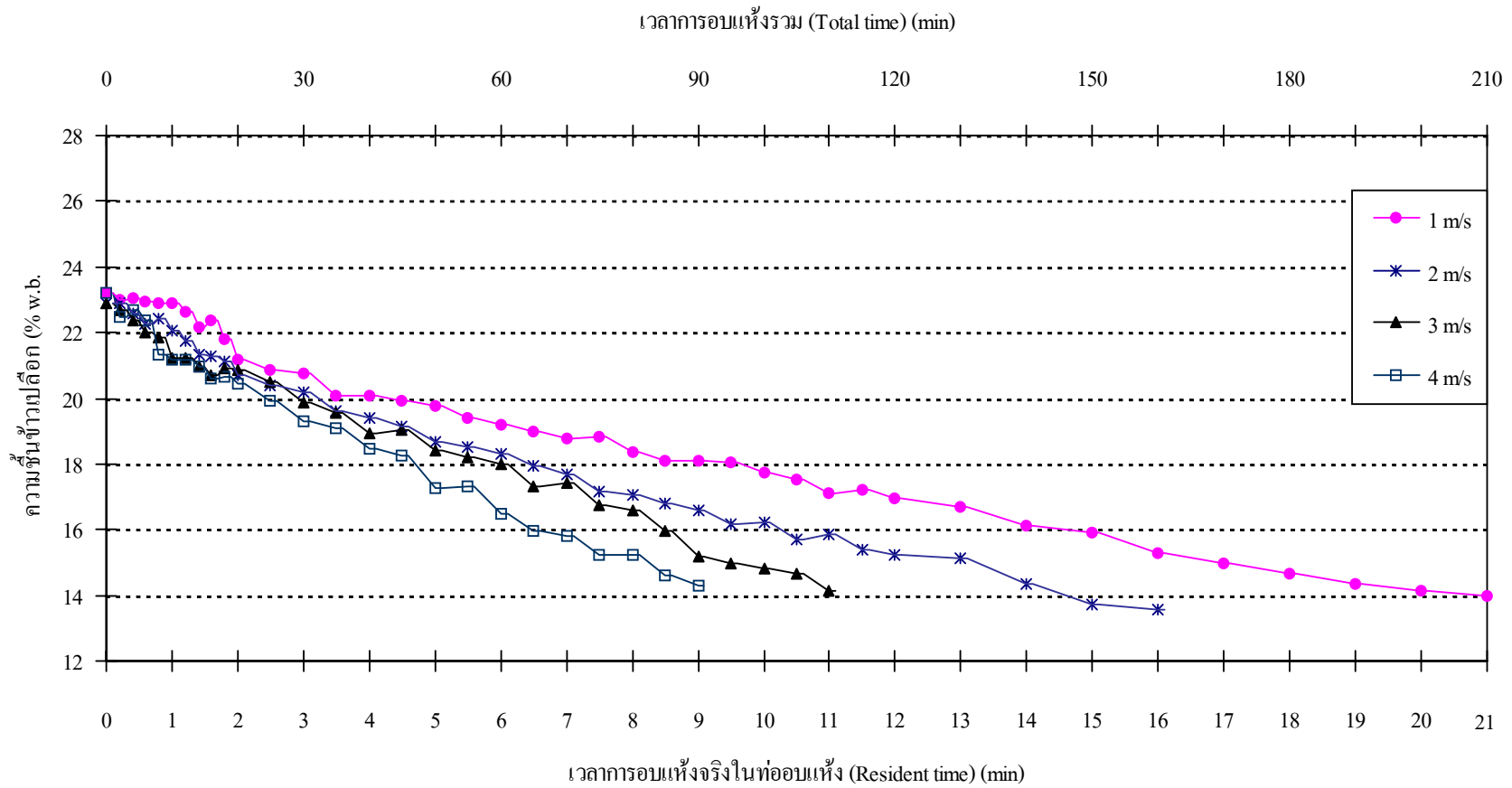
รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นที่เข้าเปลือกที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีค่าความชื้นเริ่มต้นค่าต่าง ๆ

6.1.4 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีข้าวเปลือกสดที่ความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ

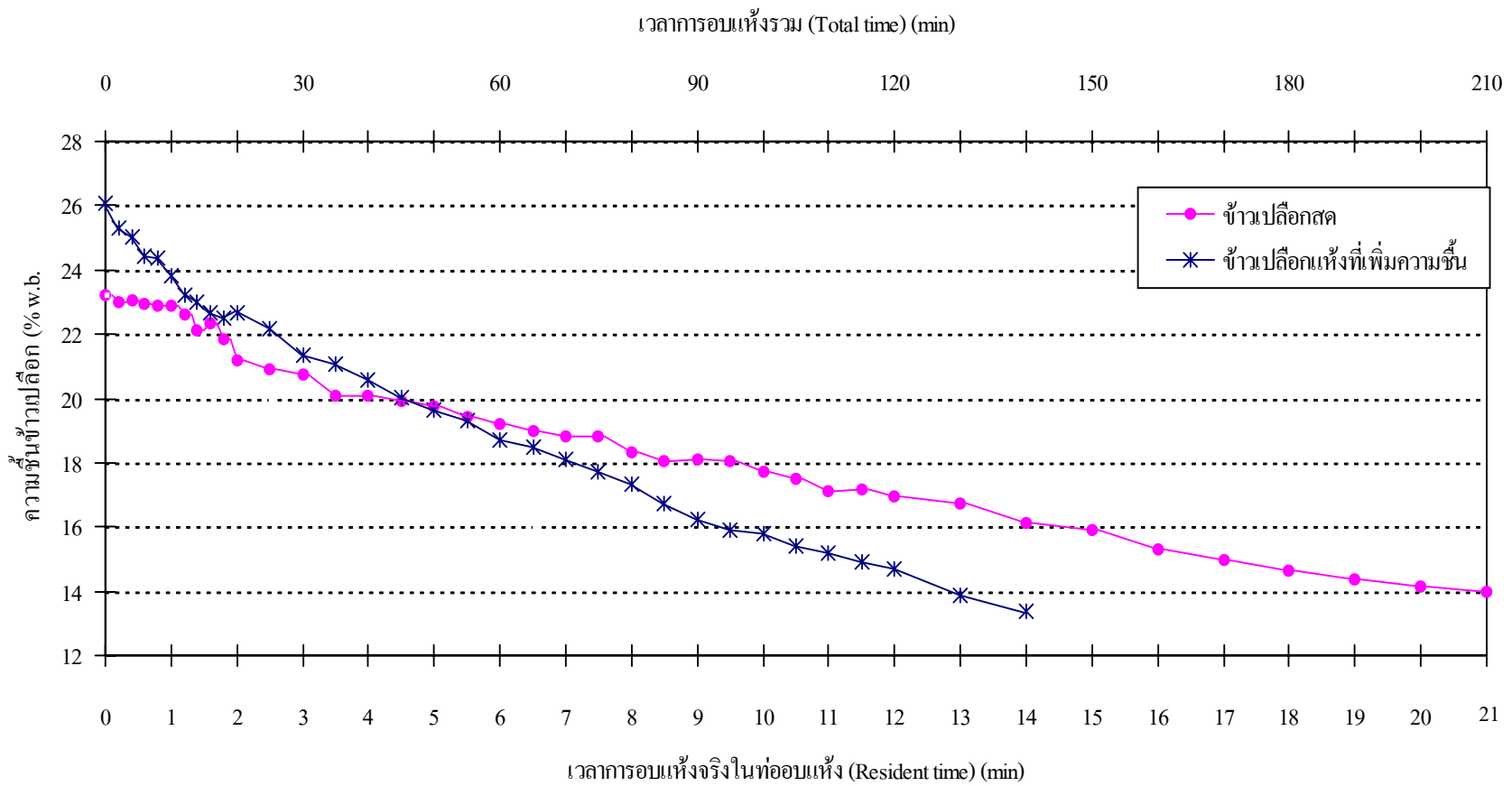
การทดลองจะปรับค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C จากนั้นปรับค่าความเร็วอากาศอบแห้งเป็น 1, 2, 3 และ 4 m/s ค่าความชื้นข้าวเปลือกสดประมาณ 23% w.b. ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.12

ผลการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้อง และเป็นไปในทิศทางเดียวกับการนำข้าวเปลือกแห้งมาเพิ่มความชื้นทั้งอัตราการอบแห้ง และเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งจาก 1-4 m/s ระยะเวลาการอบแห้งลดลงเป็น 210-95 min และ 128-58 min ในกรณีข้าวเปลือกสด และข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น (ประมาณ 26% w.b.) ตามลำดับ พบว่าข้าวเปลือกสดใช้ระยะเวลาการอบแห้งนานกว่าทั้งที่ค่าความชื้นเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่า ระยะเวลาการอบแห้งในกรณีข้าวเปลือกสดมีค่ามากกว่าข้าวเปลือกที่นำมาเพิ่มความชื้น 82, 55, 45 และ 37 min ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6.13-6.16

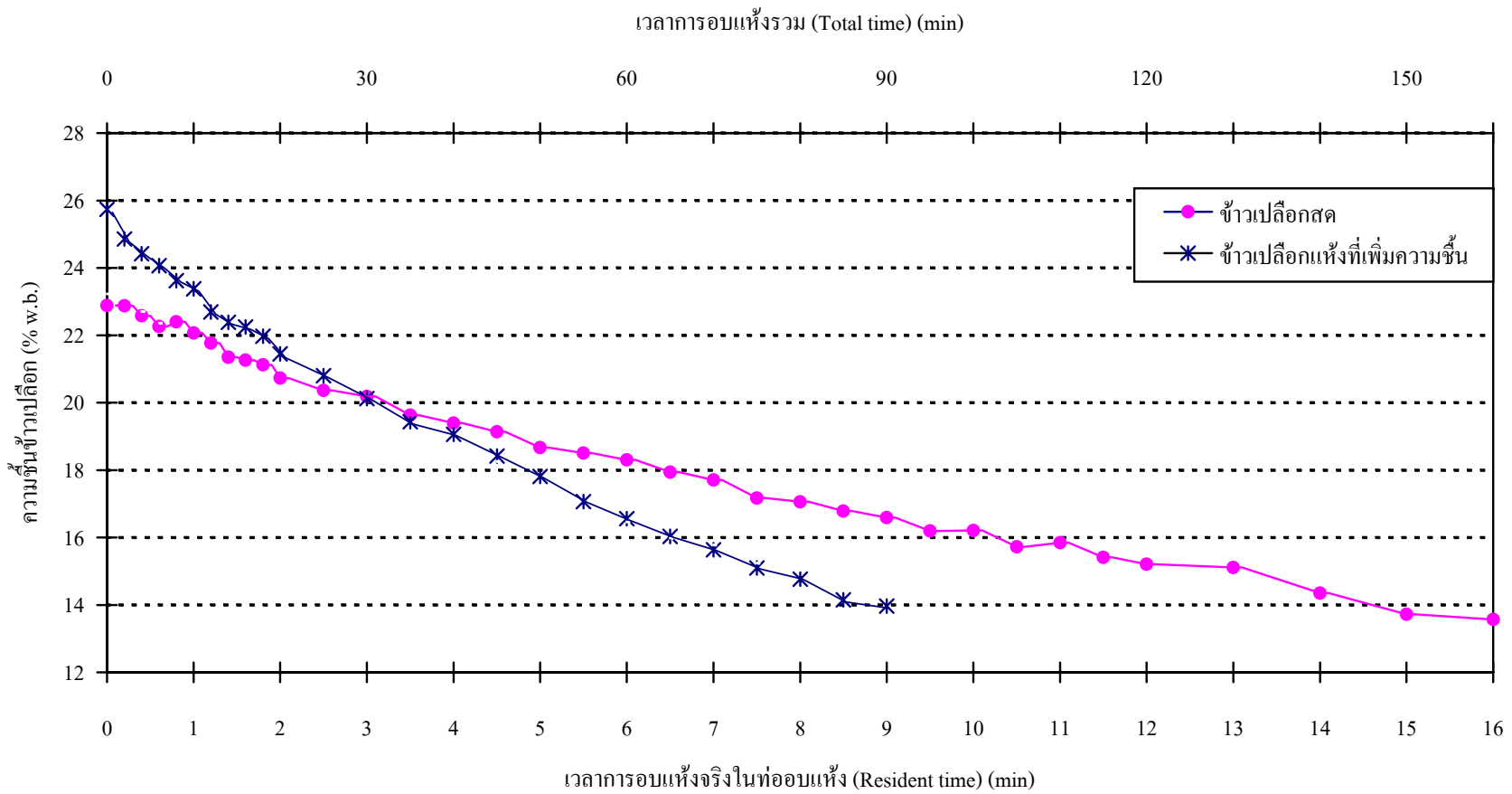
การที่แนวโน้มการอบแห้งข้าวเปลือกสดเป็นไปในทิศทางเดียวกับการอบแห้งข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้นนั้น ทำให้สามารถทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยว และผลที่เกิดจากปัจจัยการอบแห้งต่าง ๆ ได้ ส่วนระยะเวลาการอบแห้งข้าวเปลือกสดที่มากกว่านั้น สันนิษฐานได้ว่าลักษณะความชื้นที่เกิดจากการใช้วิธีการเพิ่มความชื้นมีความแตกต่างกับความชื้นของข้าวเปลือกสดที่ได้จากการเก็บเกี่ยว และอาจคาดการณ์ได้ว่าข้าวเปลือกสดนั้นมีแรงคัปิลลารี (capillary force) ที่สูงทำให้สามารถดึงน้ำได้ดีจึงต้องใช้พลังงาน และระยะเวลามากในการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าว ขณะที่ข้าวที่ผ่านการทำให้แห้งจะมีช่องว่างระหว่างเซลล์กว้างมากขึ้น แรงคัปิลลารีจึงมีค่าน้อยกว่าทำให้ไม่สามารถดึงน้ำได้ดีเท่าที่ควร เป็นผลให้ใช้พลังงาน และเวลาน้อยกว่า เมื่อพิจารณาระยะเวลาการอบแห้งจนข้าวเปลือกมีความชื้นในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาพบว่าข้าวเปลือกสดใช้ระยะเวลาการอบแห้งนานกว่าข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้นประมาณ 2 เท่า ซึ่งมีค่าแตกต่างกันมาก จึงควรเป็นหัวข้อในการทำวิจัยต่อไปว่าพันธุ์ข้าวต่าง ๆ มีแนวโน้มการอบแห้งเหมือนหรือต่างกันอย่างไร



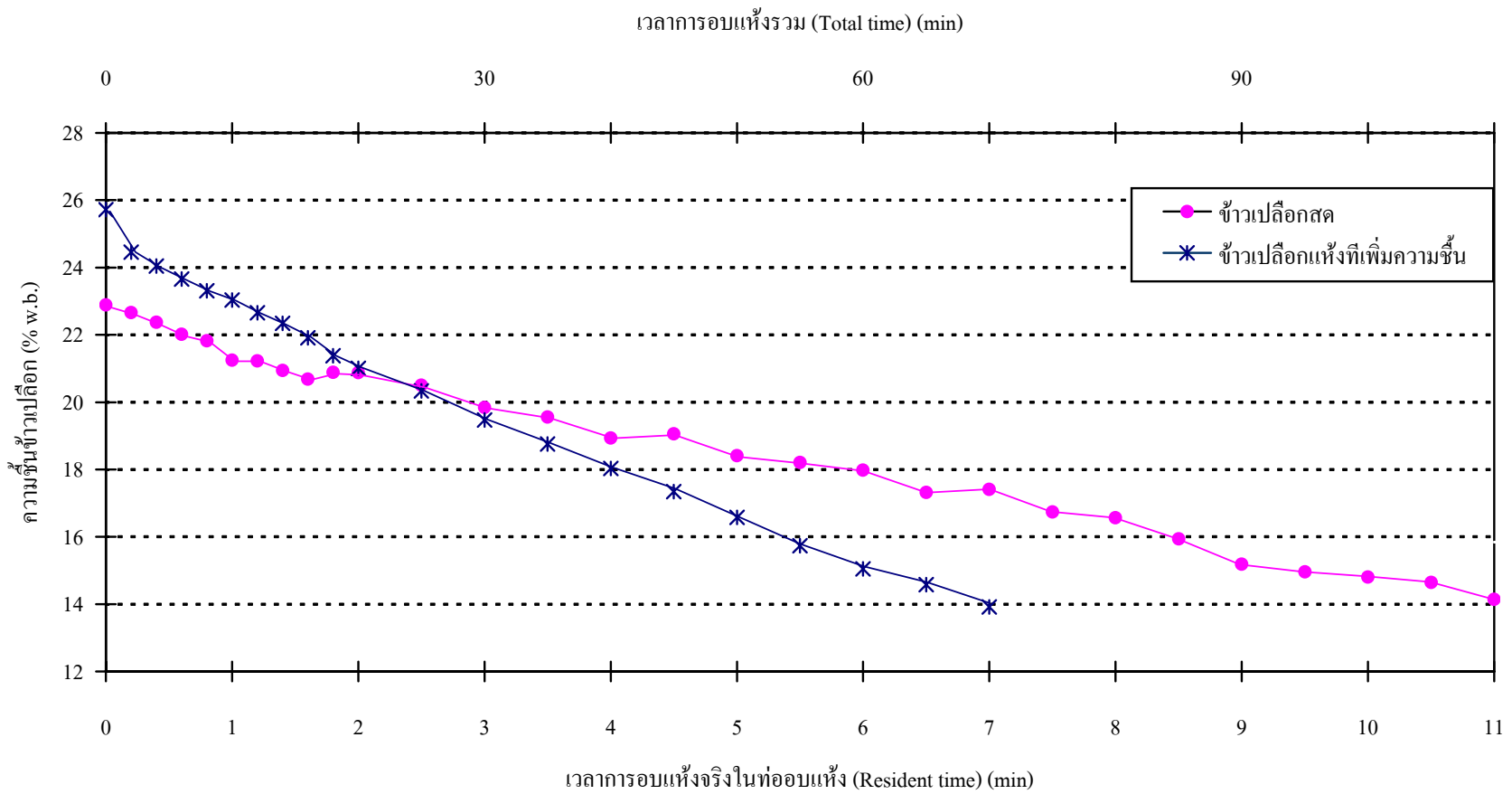
รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นน้ำที่ดูดซับที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ



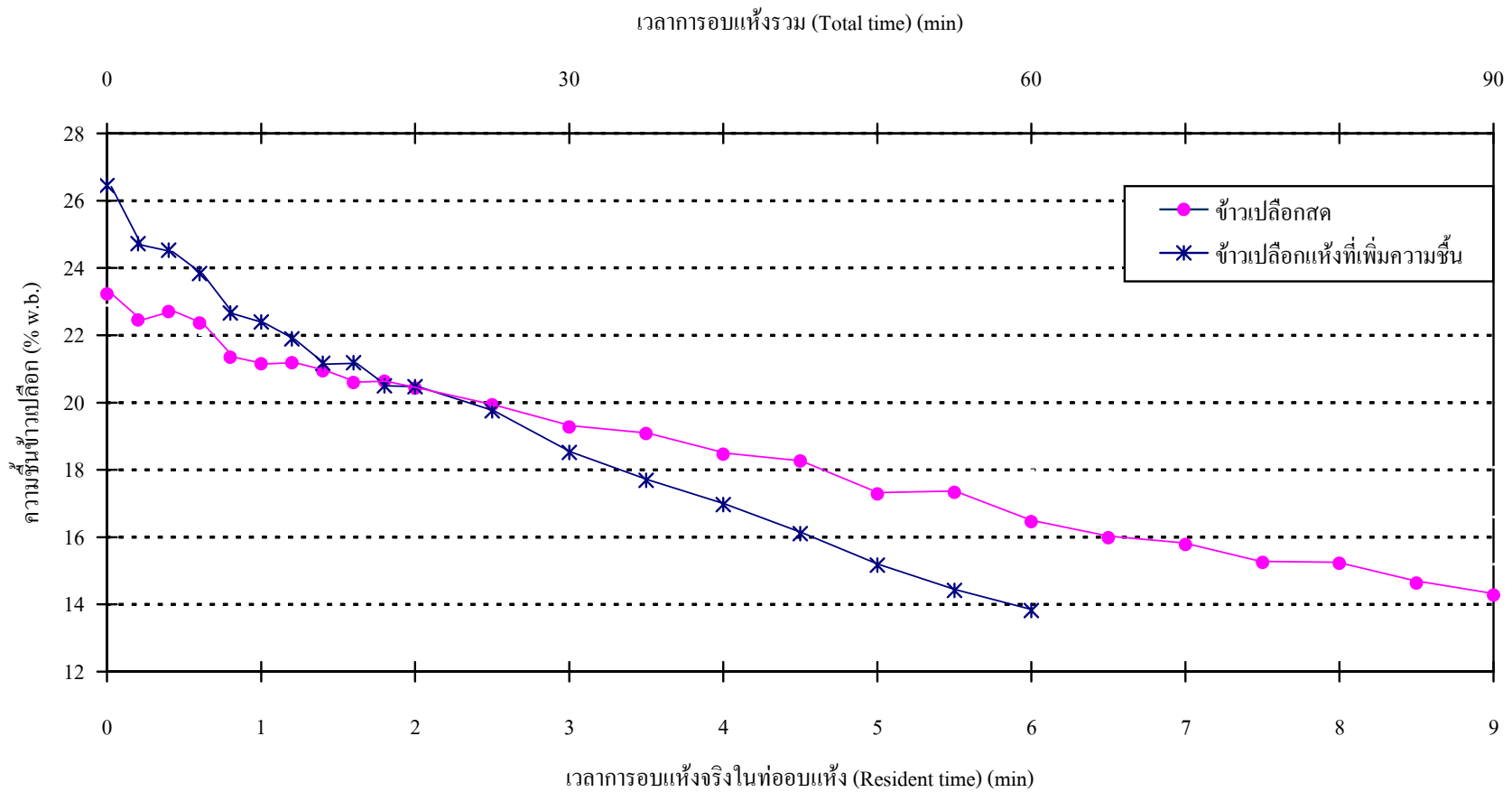
รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s



รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s



รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s



รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาอบแห้ง เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s

6.2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ

จากข้อมูลการทดลองได้ทำการคำนวณค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะของกรณีความเร็วอากาศอบแห้ง และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 1, 2, 3, 4 m/s และ 45, 60, 90, 120°C ตามลำดับ ดังรายละเอียดของสมการในภาคผนวก ก ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.17 และรูปที่ 6.18

ผลการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะจะมีค่าสูงขึ้นในทุกค่าความเร็วอากาศอบแห้ง และแนวโน้มสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้น สำหรับความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกค่าหนึ่ง หากค่าความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกมีค่าลดลงแนวโน้มอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าลดลงเช่นกัน อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่า 1.42-2.79, 2.56-4.02, 2.92-6.32 และ 3.52-6.00 MJ/kg น้ำที่ระเหย ของความเร็วอากาศอบแห้ง 1-4 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45, 60, 90 และ 120°C ตามลำดับ

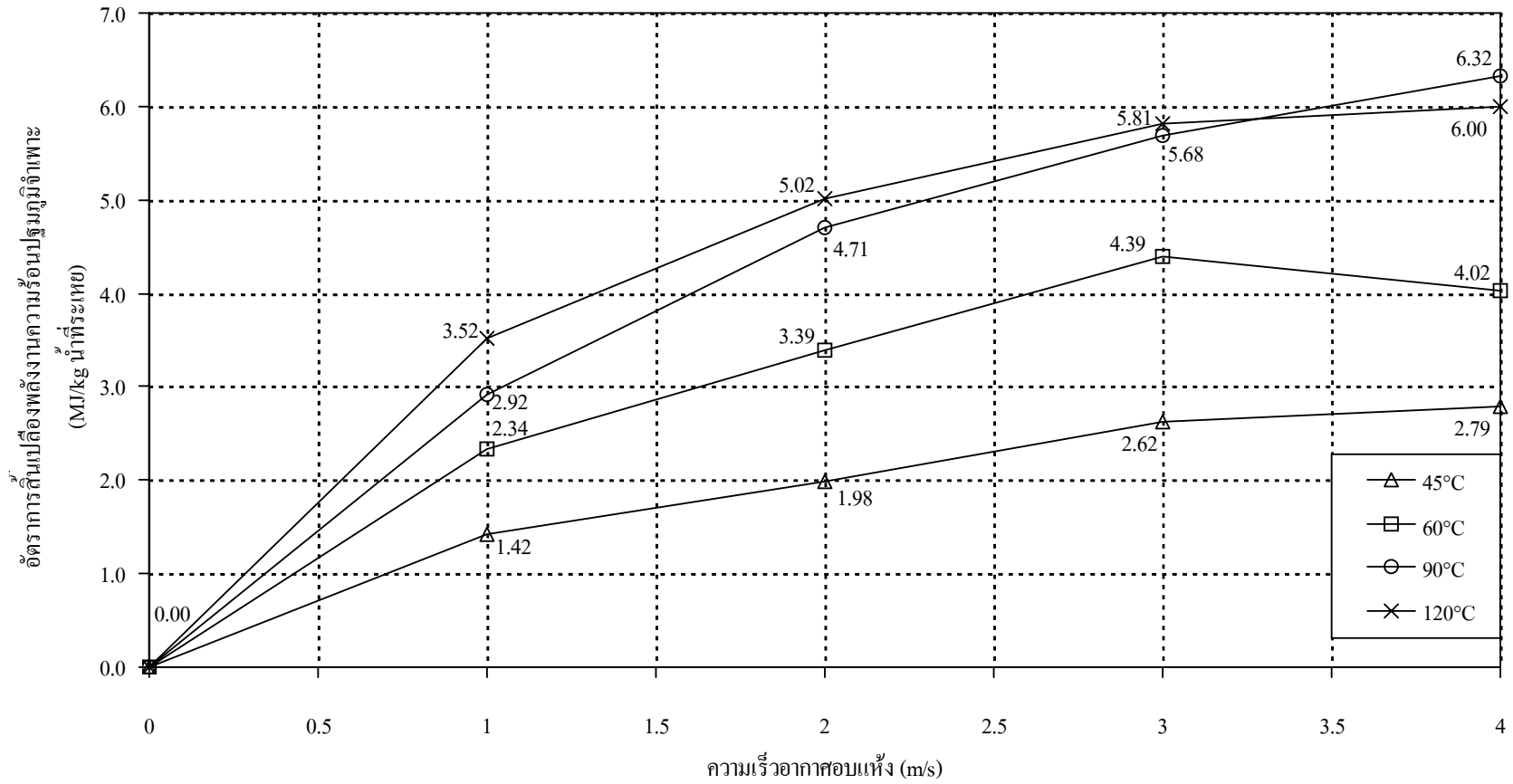
จากรูป 6.17 พิจารณาผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งพบว่า เมื่อความเร็วอากาศอบแห้งสูงขึ้นอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะจะมีค่าสูงขึ้น โดยที่แนวโน้มสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะที่ความเร็วอากาศอบแห้งต่ำ อากาศจะรั่วออกทางด้านล่างของท่ออบแห้งแต่เมื่อความเร็วอากาศอบแห้งสูงขึ้น สัดส่วนอากาศอบแห้งที่รั่วออกมีค่าน้อยลง และหากเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งให้มีค่ามากกว่า 4 m/s อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ดังนั้นเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยขณะที่ลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้อีก แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่ต่ำ และไม่ขึ้นกับความเร็วอากาศอบแห้งเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าสูง

จากรูปที่ 6.17 พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ กรณีที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s มีค่าสูงกว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีอื่น โดยสาเหตุอาจเป็นเพราะวันที่ทำการทดลองนั้นมีอุณหภูมิอากาศต่ำกว่ากรณีอื่น จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศ ดังรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ง

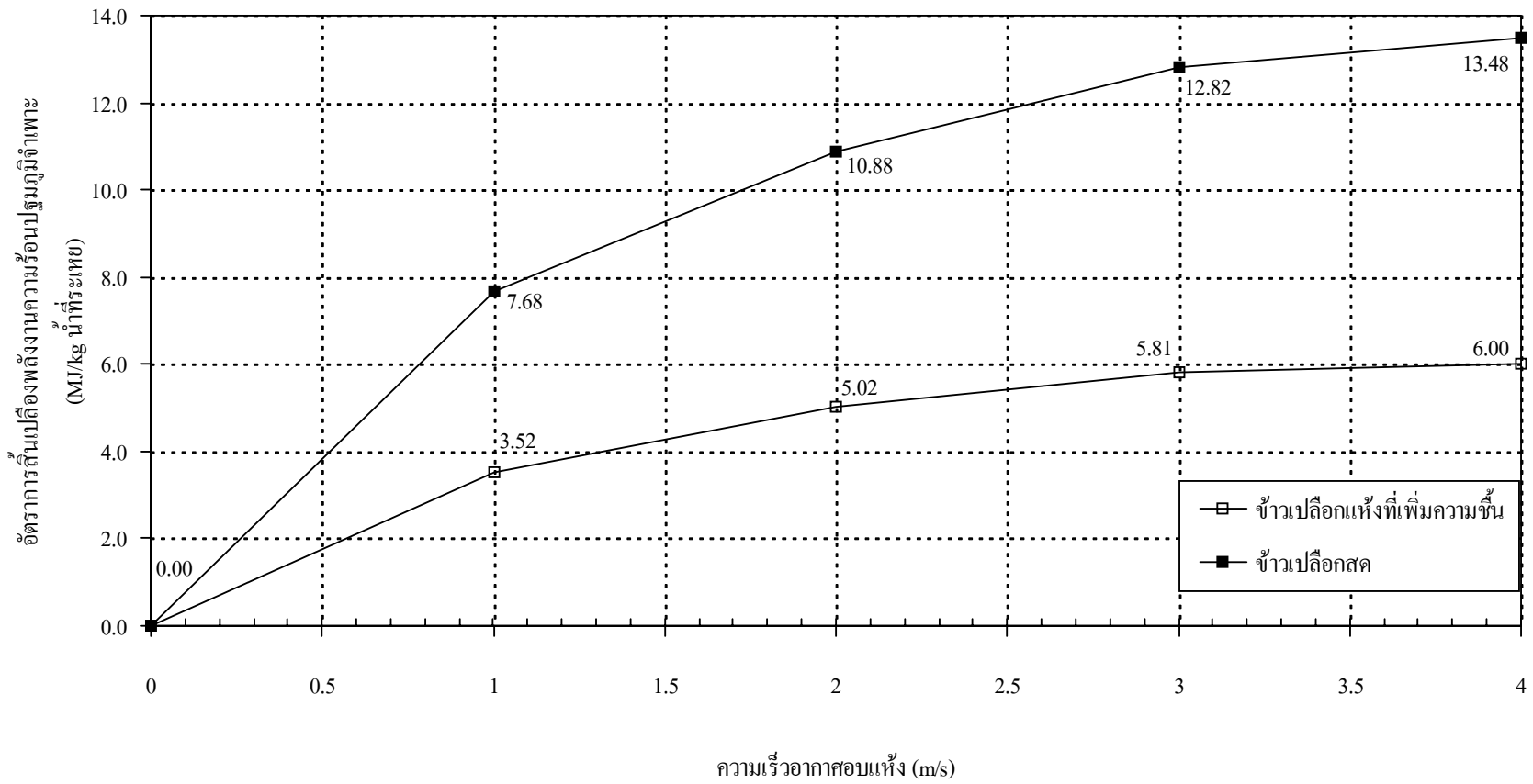
รูปที่ 6.18 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะกรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120 °C ที่ความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ เปรียบเทียบกันระหว่างข้าวเปลือกสดที่มีความชื้น

เริ่มต้นประมาณ 23% w.b. และข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้นด้วยการแช่ข้าว (soak) ซึ่งมีความชื้นประมาณ 26% w.b. ผลการคำนวณเห็นได้ชัดเจนว่ากรณีของข้าวเปลือกสดมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงกว่า โดยอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าสูงกว่าการอบแห้งข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น 4.16, 5.86, 7.01 และ 7.48 MJ/kg น้ำที่ระเหย ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s ตามลำดับ ขณะที่แนวโน้มของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีของข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น สาเหตุที่ข้าวเปลือกสดมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงกว่าอาจเนื่องจาก แรงกะปิลลารีที่สูงกว่าสามารถดึงน้ำได้ดีจึงต้องใช้พลังงานและระยะเวลามากกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น อย่างไรก็ตามผลการคำนวณนั้นทำให้ทราบถึงแนวโน้ม และพฤติกรรมของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งข้าวเปลือกสด ซึ่งสามารถนำไปพัฒนา และปรับปรุงเครื่องอบแห้งเพื่อให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

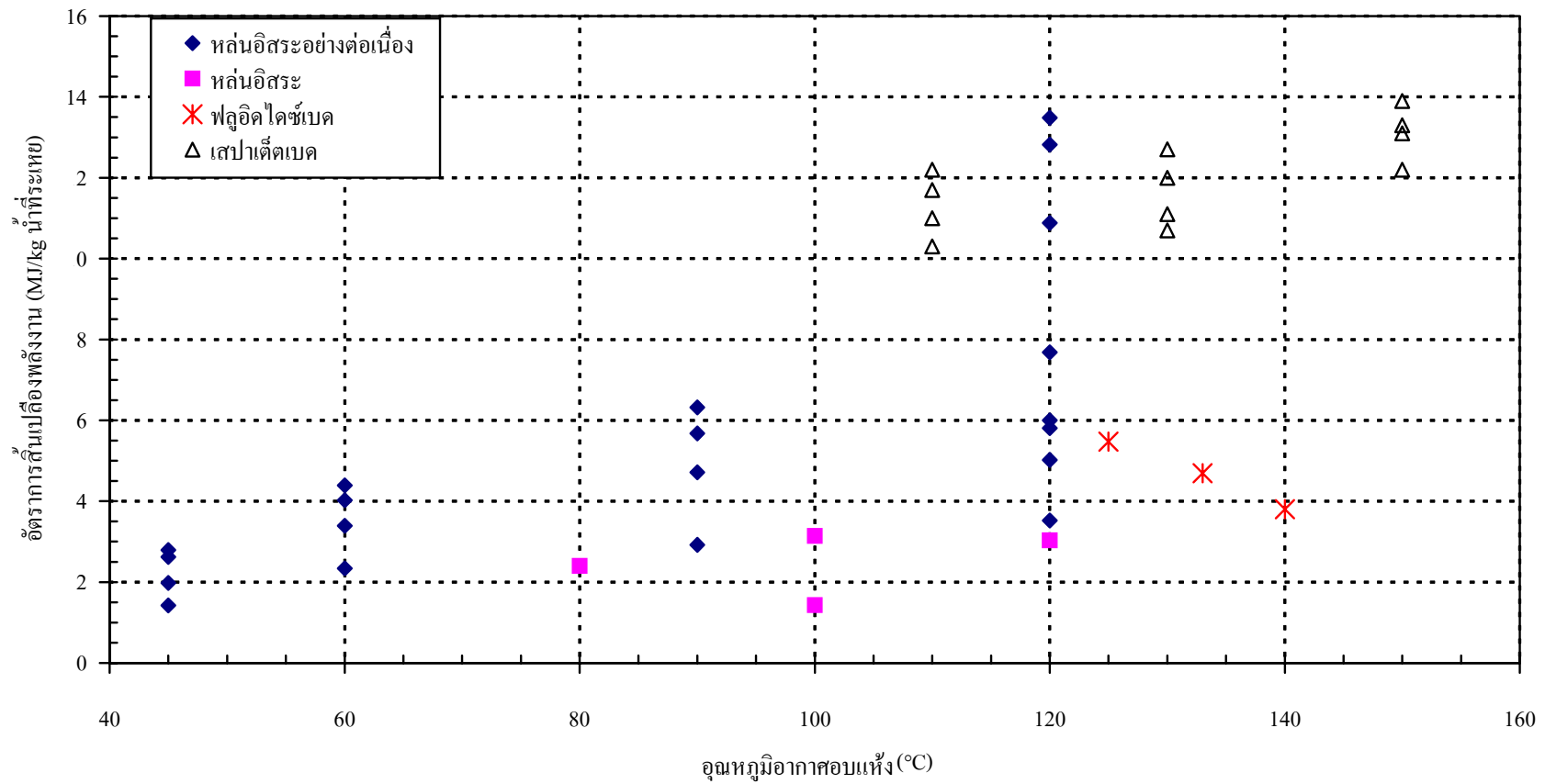
รูปที่ 6.19 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด รองลงมาคือ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดฐานสั้น เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง และเครื่องอบแห้งแบบเสปาเต็ดเบด ตามลำดับ การที่เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุดนั้นอาจเป็นเพราะปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ในการอบแห้งมีปริมาณที่น้อยมาก และมีการพักข้าวประมาณ 1 นาทีต่อรอบการเท ซึ่งอาจเป็นเหตุผลให้เกิดการแพร่ของความชื้นจากภายในเมล็ดออกมายังผิวของข้าวเปลือกได้ดีขึ้น สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดฐานสั้นกระบวนการอบแห้งจะลดความชื้นลงมาเพียงระดับหนึ่งเท่านั้น ซึ่งมีค่าไม่ต่ำกว่า 18% w.b. (~21.9% d.b.) เพื่อป้องกันการแตกหักของเมล็ดข้าว ดังนั้นพลังงานที่ใช้จึงไม่ใช่พลังงานรวมทั้งหมดที่สามารถลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา ในส่วนของเครื่องอบแห้งแบบเสปาเต็ดเบดสามารถลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาได้ แต่มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงมาก แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระอย่างต่อเนื่องสามารถลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาได้ภายในขั้นตอนเดียว และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ต่ำ



รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ และความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกประมาณ 26% w.b.



รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่อุณหภูมิ 120°C ของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น



รูปที่ 6.19 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานประมุขจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

6.3 คุณภาพข้าวเปลือก

เมื่อนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะอบแห้งต่าง ๆ มาทำการขัดสีเพื่อศึกษาคุณภาพข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องนั้น มีขั้นตอน และรายละเอียดดังแสดงในบทที่ 5 และภาคผนวก ง ผลการทดลองได้นำเสนอในส่วนของปริมาณข้าวต้น และความขาว โดยแสดงในรูปของผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้าย ดังรูปที่ 6.20-6.26

กรณีการอบแห้งด้วยการเป่าลมเบา ๆ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม จะใช้เป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบคุณภาพกับข้าวเปลือกที่อบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้ง การทดลองใช้ 2 กรณีคือ ข้าวเปลือกสด และข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น ผลการทดลองเป็นดังนี้

- ข้าวเปลือกสดใช้ระยะเวลาการอบแห้ง 57.3 hr ในการลดความชื้นจาก 23.36-14.75% w.b. มีปริมาณข้าวต้น 56.97 g และมีค่าความขาวจากเครื่องวัดสี 69.11
- ข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้นใช้ระยะเวลาการอบแห้ง 12.25 hr ในการลดความชื้นจาก 27.74-16.66% w.b. มีปริมาณข้าวต้น 6.05 g และมีค่าความขาวจากเครื่องวัดสี 68.25

ผลการทดลองพบว่า ข้าวเปลือกที่แห้งที่นำมาเพิ่มความชื้นมีปริมาณข้าวต้นต่ำมากเมื่อเทียบกับกรณีของข้าวเปลือกสด โดยมีสภาวะการอบแห้งที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งปริมาณข้าวต้นที่ได้จากการอบแห้งด้วยวิธีการเป่าลมเบา ๆ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมควรมีค่ามากกว่า 50% จากปริมาณข้าวทดสอบทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าข้าวเปลือกแห้งที่ได้รับความชื้นซ้ำจะทำให้เมล็ดเกิดการหดตัว และขยายตัวสลับ ไปมาทำให้เกิดการแตกร้าวได้ (กิตติยา กิจจวรรดิ, 2547) ในขณะที่ความขาวมีค่าใกล้เคียงกัน และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

การทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้นที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้าย พบว่าปริมาณข้าวต้นมีค่าต่ำมากในทุกกรณี ปริมาณข้าวต้นมีค่าใกล้เคียง และเกาะกลุ่มกันอยู่ในช่วง 2.91-16.64 g แต่มีแนวโน้มของปริมาณข้าวต้นเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเริ่มต้นต่ำลง และความชื้นสุดท้ายเพิ่มขึ้น โดยอาจเป็นเพราะข้าวเปลือกมีการสูญเสียความชื้นในปริมาณที่ไม่สูงเกินไปจึงทำให้ไม่เกิดการหดตัวของเมล็ดข้าวอย่างกะทันหัน การแตกร้าวจึงน้อยลง ในส่วนของสาเหตุที่ทำให้ปริมาณข้าวต้นมีค่าต่ำมากนั้นอาจเป็นเนื่องจาก

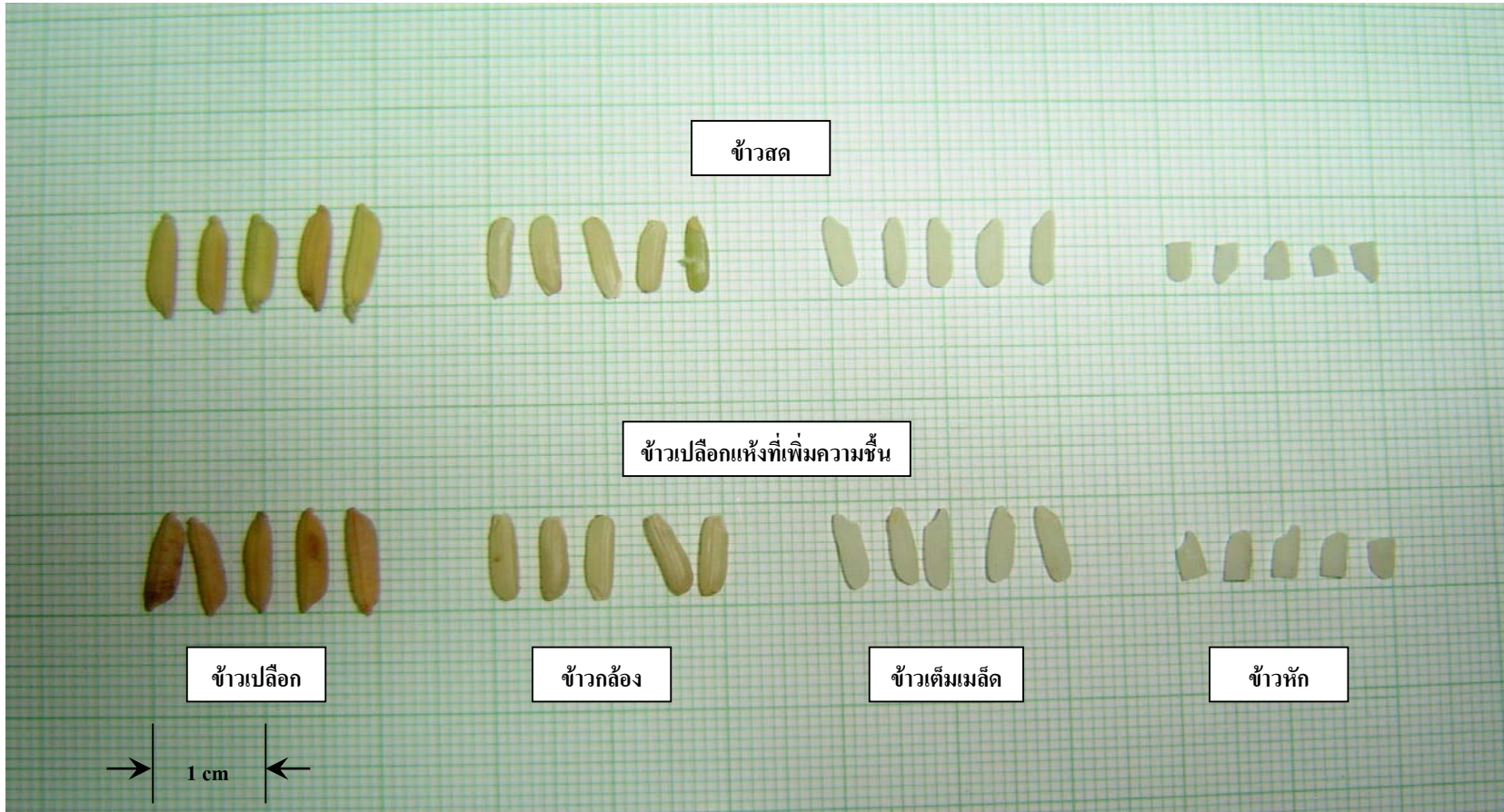
- การเพิ่มความชื้นซ้ำให้ข้าวเปลือกซึ่งได้อธิบายไปข้างต้นแล้ว
- การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยอัตราเร็วที่ไม่เหมาะสม
- วิธีการขัดสี ทั้งในส่วนของเครื่องขัดสีที่ไม่ได้มาตรฐาน การกะเทาะเปลือกที่ตั้ระยะถูกกลิ้งขีดหรือห่างกันเกินไปเนื่องจากเครื่องกะเทาะไม่สามารถปรับระยะได้ละเอียด หรือการขัดขาวที่ใช้ระยะเวลานานเกินไป อย่างไรก็ตามผู้ทำวิจัยได้พยายามตั้งค่าเหล่านี้ให้เท่ากันตลอดการ

ทดลอง เพื่อให้แน่ใจได้ว่าข้าวที่ผ่านการขัดสีทั้งหมดมีวิธีการ และการตั้งค่าที่เป็นค่าที่เท่ากันทั้งในกรณีข้าวเปลือกที่เป่าลม และข้าวเปลือกที่เพิ่มความชื้น

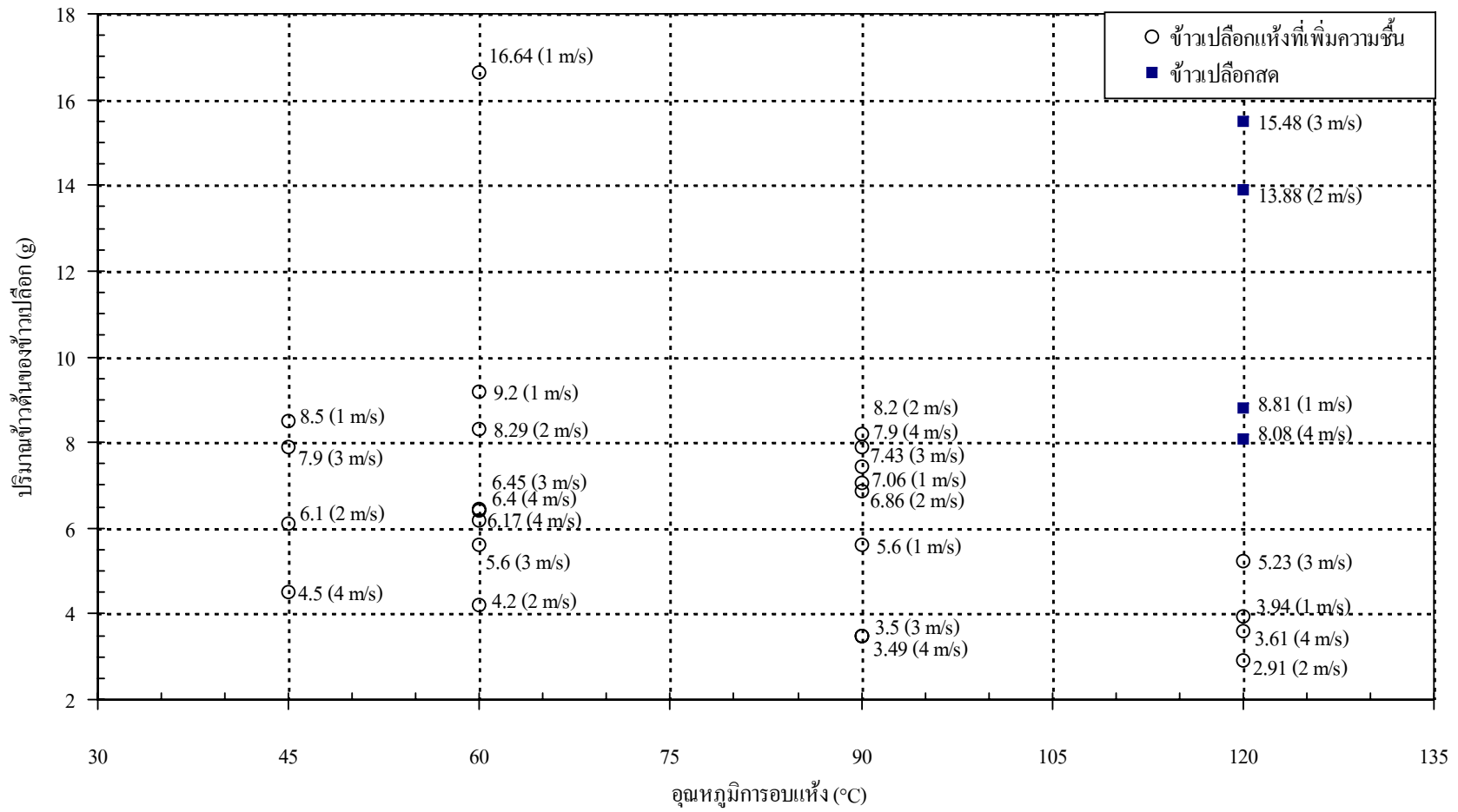
- เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง ข้าวเปลือกที่ถูกลำเลียงด้วยกะพ้อลำเลียงขึ้นสู่ด้านบน และสาดเข้าสู่ถังพักทางด้านบนทำให้เกิดการกระแทกตัวของข้าวเปลือก จากนั้นข้าวเปลือกผ่านถังพักด้านล่างเข้าสู่กะพ้อลำเลียงอีกครั้งจะถูกกะพ้อกระแทกประกอบกับระยะเวลาการอบแห้งที่นานซึ่งมีผลทำให้เมล็ดข้าวเกิดความล้า และการสะสมของอุณหภูมิในเมล็ดข้าวจนเมล็ดข้าวมีอุณหภูมิสูง ผนวกกับผลของการเพิ่มความชื้นซ้ำกับอัตราการลดความชื้นที่ไม่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยช่วยเสริมให้ข้าวเปลือกเกิดการแตกร้าวในเมล็ดสูงมากขึ้น

ในส่วนของความขาวมีแนวโน้มก่อนข้างสูงกระจายตัวเป็นกลุ่มมีค่าในช่วง 66.54-77.2 ในทุกกรณีการอบแห้ง แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องสามารถใช้ออบแห้งข้าวเปลือกได้ค่าความขาวดีทั้งในกรณีที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูง ช่วงความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน และการอบแห้งในขั้นตอนเดียวจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา

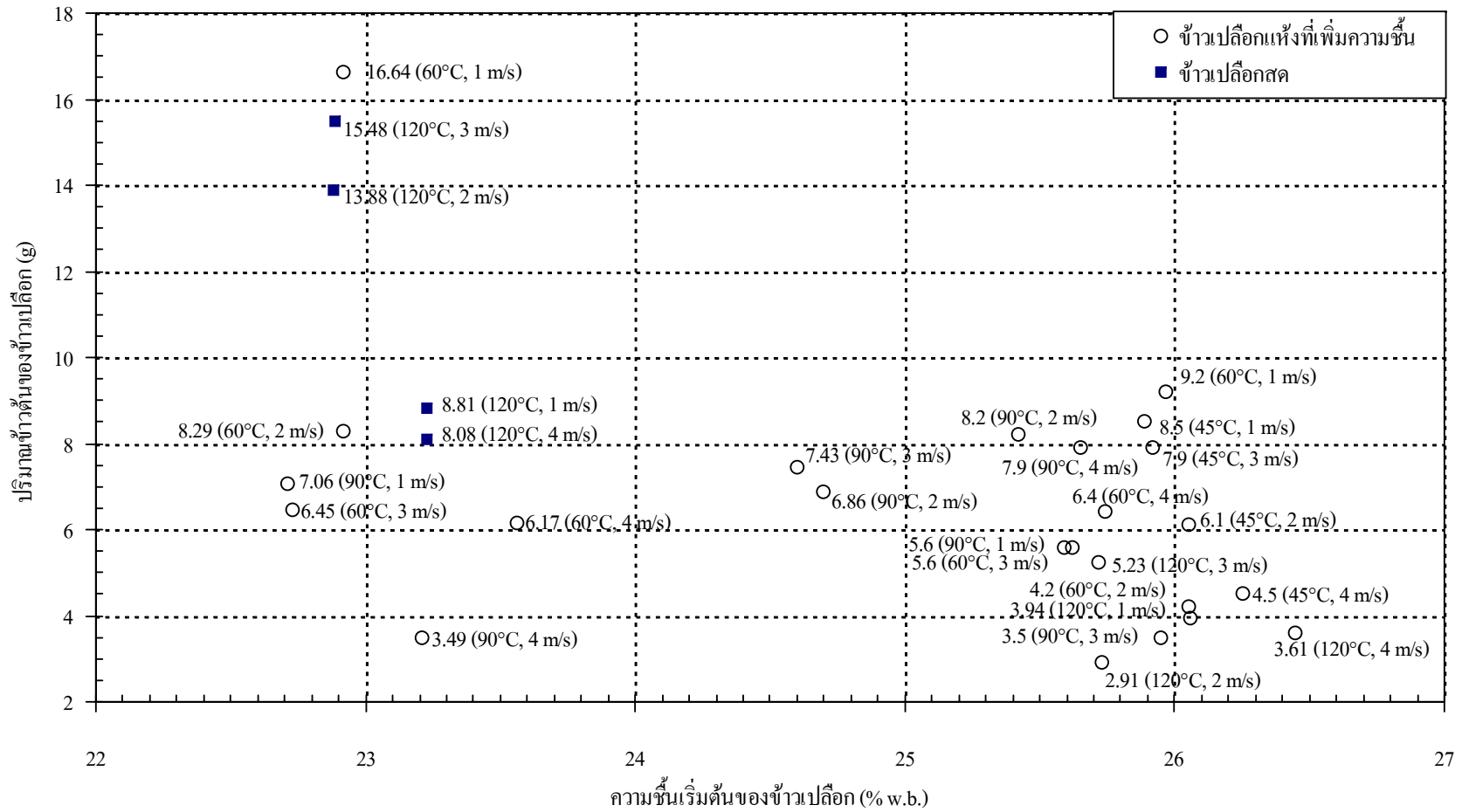
การทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกสดด้วยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 1-4 m/s โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายพบว่าปริมาณข้าวต้นมีค่าใกล้เคียงกับกรณีของการอบแห้งข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น แต่มีแนวโน้มสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีผลของการได้รับความชื้นซ้ำ แต่สาเหตุที่ทำให้ปริมาณข้าวต้นต่ำสันนิษฐานได้ว่าเกิดจาก การลดความชื้นด้วยความเร็วที่ไม่เหมาะสม การขัดสี และผลของเครื่องอบแห้ง เช่นเดียวกับกรณีของข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น ในส่วนของความขาวมีค่าในช่วง 69.5-72.1 โดยจะมีความขาวใกล้เคียงกับข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้นแต่จะมีสีออกเขียวมากกว่า ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สูง ซึ่งให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องสามารถนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์การเกษตรได้จริง แม้จะได้คุณภาพข้าวไม่ดีนักแต่เป็นแนวทางในการพัฒนาเพื่อให้ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งนี้ต่อไป



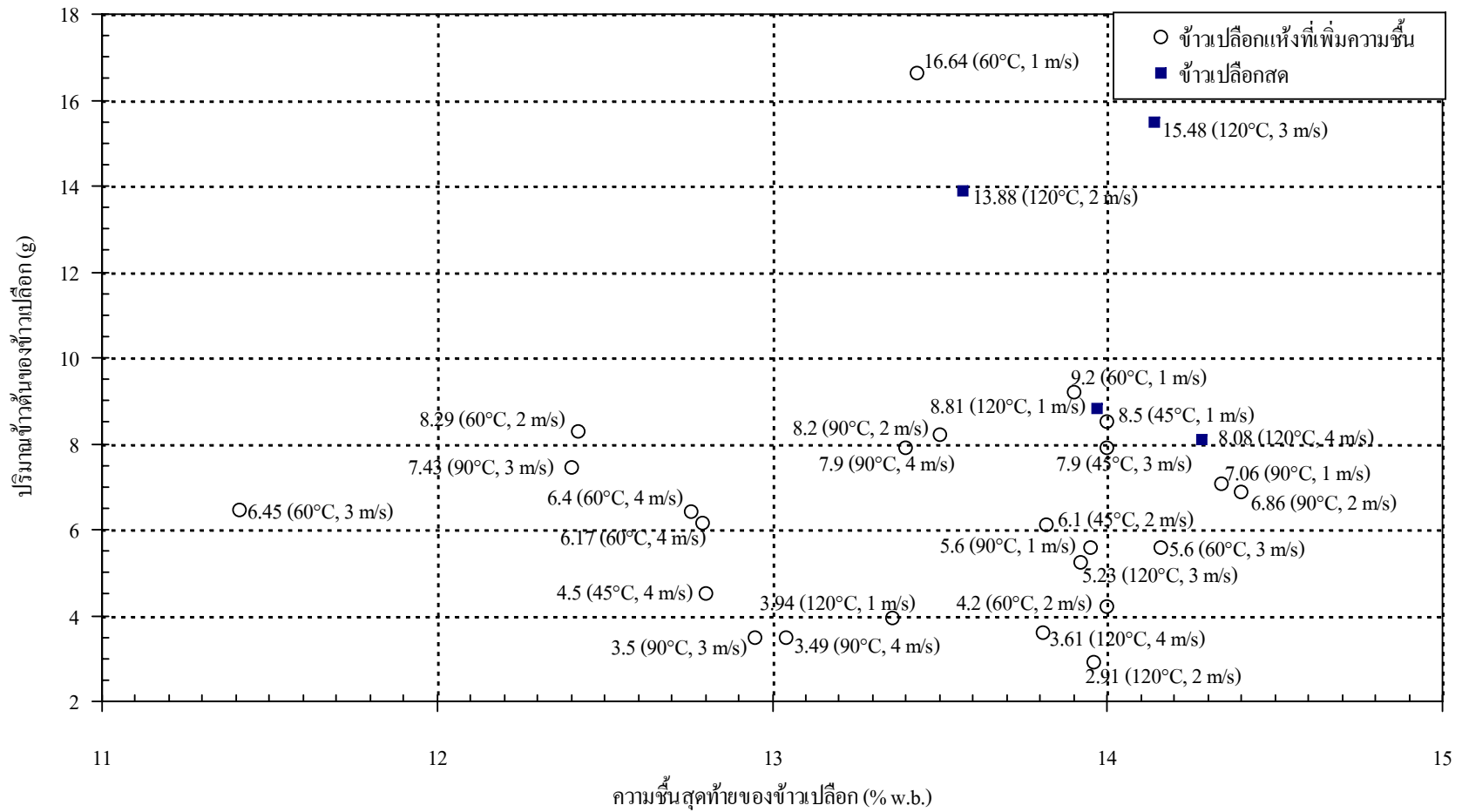
รูปที่ 6.20 ลักษณะของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวเต็มเมล็ด และข้าวหัก ที่ผ่านการอบแห้ง กรณีข้าวเปลือกสด และข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น



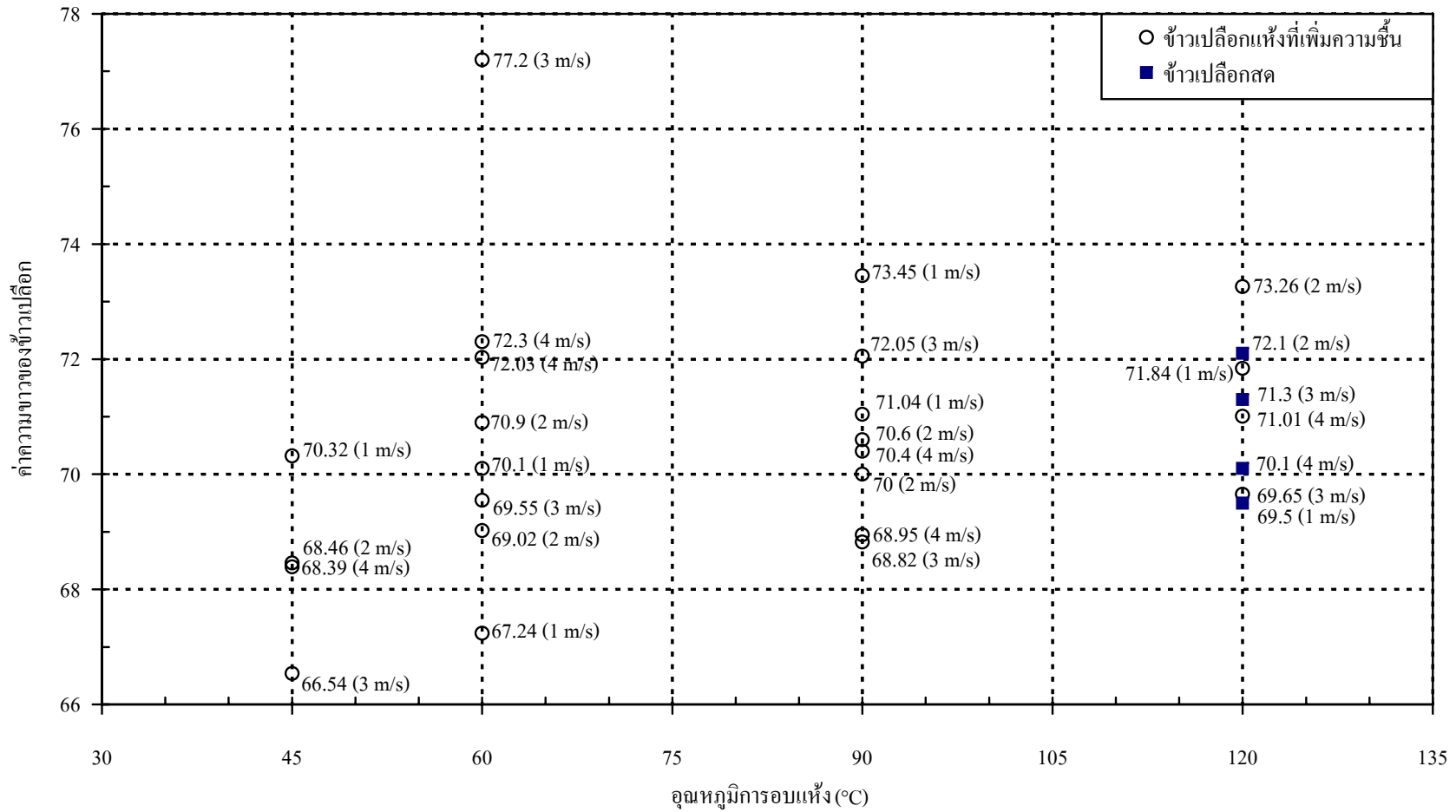
รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งข้าวเปลือกกับปริมาณข้าวต้น



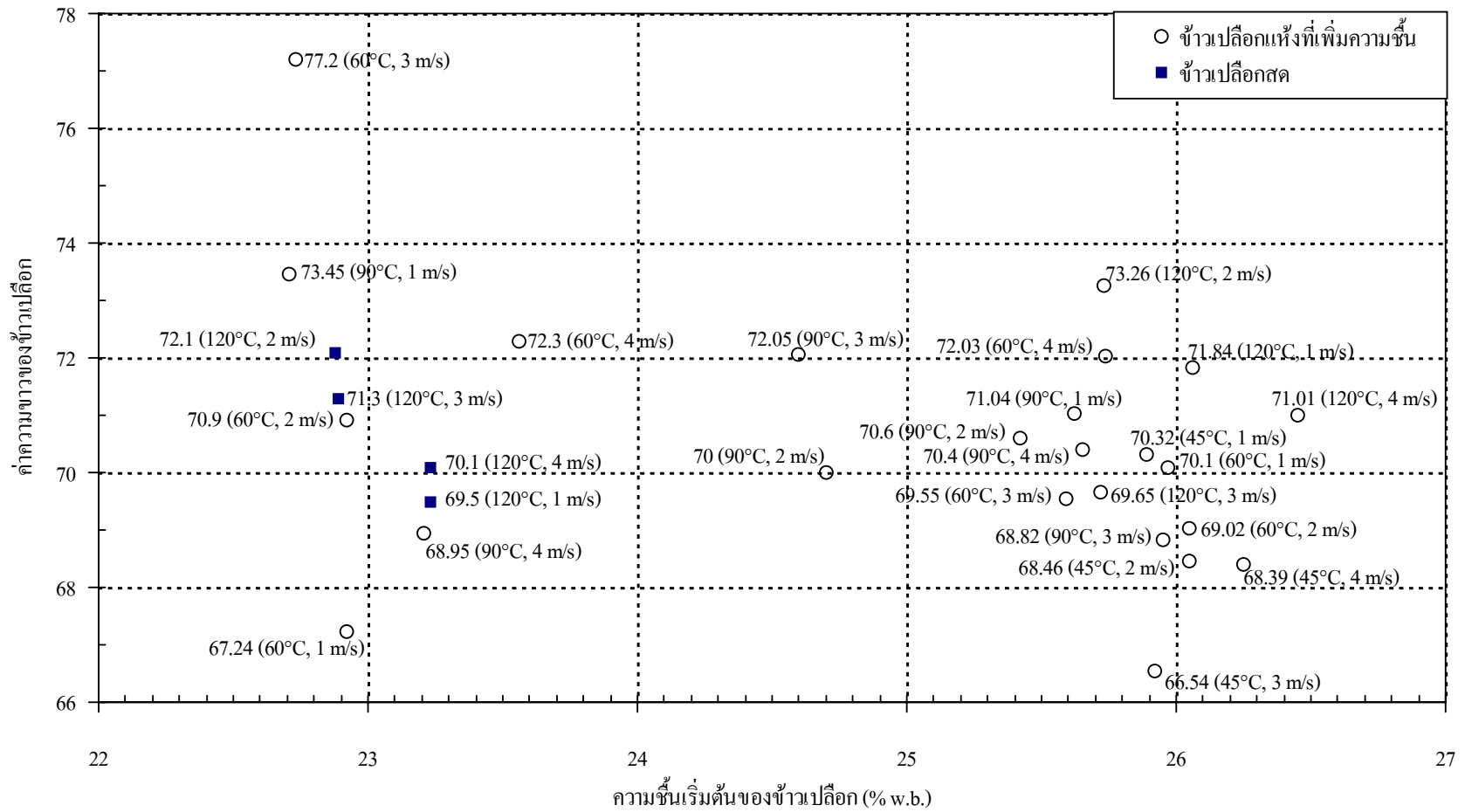
รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกกับปริมาณข้าวต้น



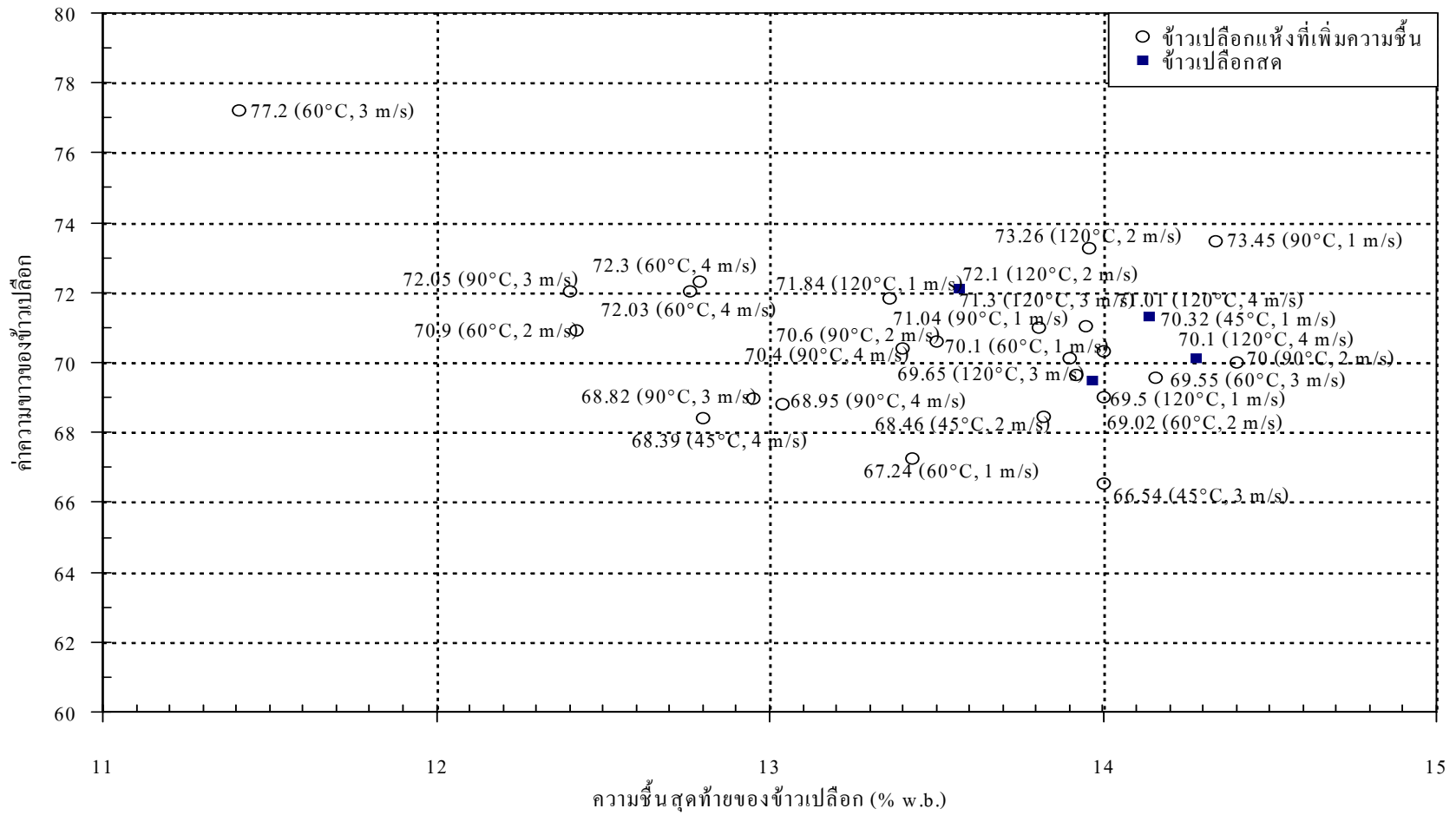
รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งกับปริมาณข้าวต้น



รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งข้าวเปลือกกับค่าความยาว



รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกกับค่าความยาว



รูปที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งกับค่าความชื้น

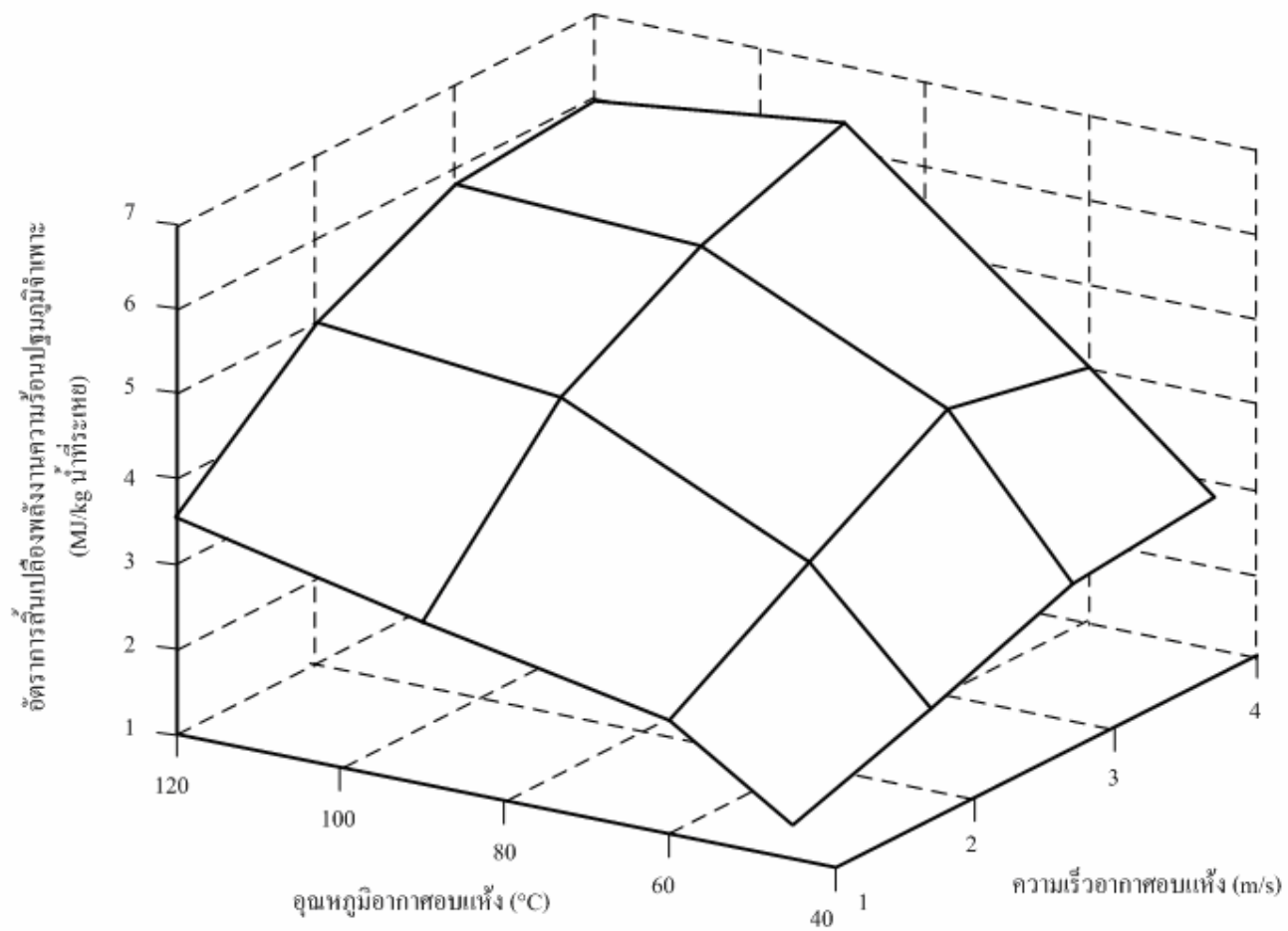
6.4 แนวทางอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง

จากผลการทดลองภายใต้สภาวะการอบแห้งดังนี้ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45, 60, 90 และ 120°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s และความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 20-26 % w.b. ปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลอง 2.5 kg สามารถหาแนวทางอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงโดยพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งได้ดังรูปที่ 6.27 และ 6.28

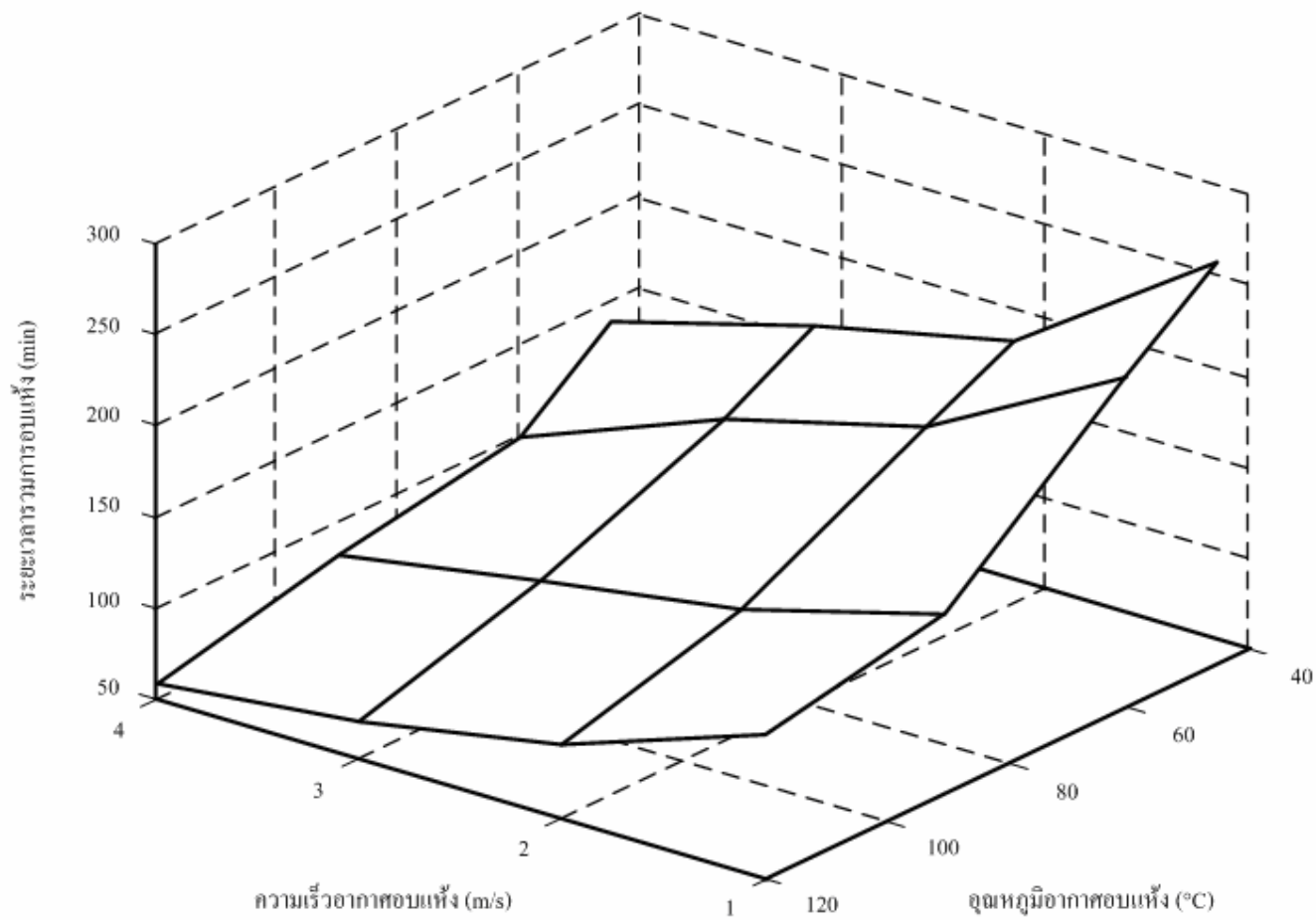
จากรูปที่ 6.27 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าต่ำสุดคือ 1.42 MJ/kg น้ำที่ระเหย ที่สภาวะอบแห้งที่อุณหภูมิ 45°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ และความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นสภาวะอบแห้งนี้จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาในส่วนของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

จากรูปที่ 6.28 ระยะเวลาการอบแห้งมีค่าน้อยที่สุดคือ 58 min ที่สภาวะอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ และความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าลดลง ดังนั้นสภาวะอบแห้งนี้จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาในส่วนของระยะเวลาการอบแห้ง

อย่างไรก็ตาม ในการพิจารณาแนวทางอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงต้องคำนึงถึงคุณภาพข้าวเปลือกเป็นสำคัญ ซึ่งผลการทดลองพบว่าปริมาณข้าวต้นมีค่าต่ำในทุกกรณีการอบแห้ง จึงยังไม่สามารถสรุปแนวทางอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงได้ โดยต้องมีการทำวิจัยเพื่อแก้ไข และปรับปรุงเรื่องคุณภาพข้าวเปลือกต่อไป



รูปที่ 6.27 ผลของอุณหภูมิ และความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐภูมิจำเพาะ



รูปที่ 6.28 ผลของอุณหภูมิ และความเร็อากาศอบแห้งที่มีต่อระยะเวลาการอบแห้งข้าวเปลือก

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวสรุปผลการวิจัย ปัญหาที่เกิดจากการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการทำวิจัยต่อไป แบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

7.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้กล่าวในบทที่ 6 สามารถสรุปเป็นประเด็นได้ดังนี้

- อุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือก สำหรับทุกค่าความเร็วที่ทำการทดลอง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจาก 45-120°C สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งได้กว่าสองเท่าทุกค่าความเร็วที่ทำการทดลอง

- ความเร็วอากาศอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือก เมื่อความเร็วอากาศอบแห้งสูงขึ้นระยะเวลาการอบแห้งจะลดลง ความเร็วอากาศอบแห้งเพิ่มจาก 1-2 m/s ทำให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงมากที่สุด รองลงมาคือ 2-3 m/s และ 3-4 m/s ตามลำดับ แสดงแนวโน้มการลดลงของระยะเวลาการอบแห้งจะน้อยลงเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งสูงมากขึ้น

- ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกมีผลต่ออัตราการอบแห้ง ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าจะมีระยะเวลาการอบแห้งน้อยกว่า และความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกจะมีค่าเข้าสู่ค่าเดียวกันคือ ความชื้นสมดุล สำหรับทุกค่าความชื้นเริ่มต้น โดยความชื้นสมดุลของแต่ละกรณีทดสอบจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

- การอบแห้งข้าวเปลือกสดที่ได้จากการเก็บเกี่ยวใช้ระยะเวลานานกว่าการอบแห้งข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น เพราะพันธะการยึดเหนี่ยวโมเลกุลของความชื้นของข้าวเปลือกสดมีค่าสูงกว่าเนื่องจากข้าวมีอัตราการหายใจสูงกว่า โดยมีแนวโน้มอัตราการอบแห้งสอดคล้อง และมีทิศทางเดียวกันกับข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น

- อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าสูงขึ้น แนวโน้มสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งสูงขึ้น และที่ความเร็วอากาศอบแห้งสูงกว่า 4 m/s อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

และมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะไม่ขึ้นกับความเร็วอากาศอบแห้งเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าสูง

- อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะของข้าวเปลือกสดมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น แต่มีค่าสูงกว่า และใช้ระยะเวลาการอบแห้งนานกว่า แม้จะมีความชื้นเริ่มต้นที่ต่ำกว่า

- ข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้นมีปริมาณข้าวต้นต่ำ และมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งกรณีการเป่าลมด้วยอุณหภูมิแวดล้อม และการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง โดยมีสาเหตุมาจากการทำให้ข้าวเปลือกได้รับความชื้นซ้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวในเมล็ดสูงมากขึ้น แต่ความขามมีค่าสูง และใกล้เคียงกันในทุกกรณี

- ข้าวเปลือกสดที่เป่าลมด้วยอุณหภูมิแวดล้อมมีปริมาณข้าวต้นสูง แต่กรณีที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งมีปริมาณข้าวต้นต่ำแต่มีแนวโน้มสูงกว่าข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น ความขามมีค่าสูง และมีค่าใกล้เคียงกับข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น

- แนวทางอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงยังไม่สามารถระบุได้ชัดเจน เนื่องจากต้องมีการปรับปรุงเรื่องคุณภาพข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งเสียก่อน แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน สภาพะอบแห้งที่มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุดคือ อุณหภูมิ 45°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s และเมื่อพิจารณาในส่วนของระยะเวลาการอบแห้ง สภาพะอบแห้งที่มีระยะเวลาการอบแห้งน้อยที่สุดคือ อุณหภูมิ 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s

7.2 สรุปปัญหาจากการทดลอง

- การวัดค่าความเร็วอากาศอบแห้งในการทดลองใช้การวัดที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าเครื่องเป่าลม และได้พบข้อผิดพลาดภายหลังจากการทดลองคือ อากาศร้อนที่เป่าขึ้นในท่ออบแห้งนั้นส่วนหนึ่งได้ถูกเหนี่ยวนำด้วยกระแสของข้าวเปลือกให้ไหลลงสู่ถังพักด้านล่าง ดังนั้นความเร็วจริงของอากาศในท่ออบแห้งจึงมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งถ้าหากอากาศร้อนไม่ร่วออกทางด้านล่าง อัตราการอบแห้งน่าจะสูงขึ้น และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานน่าจะมิต่ำลง

- ปริมาณข้าวต้นที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำ อาจมีสาเหตุจากหลายปัจจัยดังนี้ การให้ความชื้นซ้ำกับข้าวเปลือกซึ่งทำให้เกิดการแตกร้าวในเมล็ดสูงขึ้น การลดความชื้นด้วยอัตราเร็วที่ไม่เหมาะสม การขัดสีด้วยเครื่องที่ไม่ได้มาตรฐานหรือการตั้งค่าระยะห่างที่ไม่เหมาะสมของลูกกลิ้งกะเทาะ การใช้เวลาขัดสีที่นานเกินไป การทำงานของเครื่องอบแห้งที่ทำให้ข้าวเปลือกเกิดการกระทบตัวกันจนอาจเกิดความดำ และการสะสมของอุณหภูมิในเมล็ดข้าวจนเมล็ดข้าวมีอุณหภูมิสูง ประกอบกับเหตุผลข้างต้นจึงทำให้เกิดการแตกหักเป็นปริมาณมาก

7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป

งานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องได้จริง และสามารถประเมินศักยภาพการทำงานในเบื้องต้นได้ แต่ยังคงพบว่ามีปัญหาที่เกิดขึ้นบางประการ โดยหากสามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ เครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้ นับว่าเป็นประโยชน์อย่างมากต่อกระบวนการอบแห้ง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่น ๆ ต่อไปได้ จึงน่าจะมีการทำวิจัยต่อไปประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

- การทดลองให้มีการพักข้าวในการทำงานแต่ละรอบอย่างสม่ำเสมอ
- การทดลองอบแห้งที่มีการหมุนวนของอากาศ
- การออกแบบเพื่อหาขนาด และความยาวของท่ออบแห้งที่เหมาะสม
- การอบแห้งโดยใช้พันธุ์ข้าวต่าง ๆ

รายการอ้างอิง

- กรมการข้าว. (2550). วิทยาการก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว: การลดความชื้น [ออนไลน์]. ได้จาก:
http://www.ricethailand.go.th/rkb/data_007/rice_xx2-07_gather_index.html
- กัญญา เชื้อพันธุ์. (2547). คุณภาพข้าวทางกายภาพ. ใน งามชื่น คงเสรี (บรรณาธิการ). **คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย**. (หน้า 31-40). กรุงเทพฯ: บริษัทจิรวัดน์เอ็กซ์เพรส จำกัด.
- กิตติยา กิจควรรดี. (2547). การเก็บเกี่ยวและปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ได้ข้าวคุณภาพดี. ใน งามชื่น คงเสรี (บรรณาธิการ). **คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย**. (หน้า 1-16). กรุงเทพฯ: บริษัทจิรวัดน์เอ็กซ์เพรส จำกัด.
- จุฑาทิพย์ ทองเดชาสามารถ. (2545). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันแบบใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ใจทิพย์ วานิชชัง. (2538). การศึกษาวิธีการลดความชื้นและความชื้นก่อนสีของข้าวเปลือกที่มีต่อคุณภาพการสีของข้าว. รายงานการวิจัย สภาวิจัยแห่งชาติ.
- ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ. (2546). การอบแห้งเมล็ดพืชที่อุณหภูมิสูงโดยเทคนิคสเปาเต็คเบดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเข้าดาวน้กัมเมอร์ได้. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17**. 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี.
- ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสภฎา แจ้เงการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ: รวดเร็วและประหยัดพลังงาน. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2**. 27-29 กรกฎาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา.
- ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสภฎา แจ้เงการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). ผลกระทบของลมหมุนวนต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20**. 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา.
- ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาลิก. (2532). **กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์โอ.เอส.พรินติ้งเฮาส์
- มานิต สุจ้านง, วัชรินทร์ ดงบัง และ กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย. (2548). การอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ กข.10 ด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด. **วิศวกรรมสาร มข.** 32 (2): 207-216.

- ไมตรี แนวพนิช. (ม.ป.ป.). **คุณภาพของข้าวเปลือก**. กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ไมตรี แนวพนิช. (ม.ป.ป.). **หลักการลดความชื้นเมล็ดพืช**. กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- วิธีการวัดปริมาณความชื้นในข้าว. (2546).วิธีการสอบเทียบปริมาณความชื้นในข้าว [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.geocities.com/surachai_cbwm/standard.html
- เวียง อากรชี่, วิบูลย์ เทเพนทร์, สุเทพ กลสิกรรม และ อารีย์ ทิมินกุล. (2547). **ศึกษาวิธีการลดความชื้น ตัวอย่างข้าวเปลือกด้วยวิธีเร่งรีบ**. กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม.
- ศูนย์ข้อมูลการเกษตร. (2550). **สารสนเทศจากสมุดข้าวไทย**. สุพรรณบุรี: ศูนย์ข้อมูลการเกษตร ฝ่ายแผนงานพัฒนาการเกษตร สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดสุพรรณบุรี
- สมชาติ โสภณธฤทธิ์. (2540). **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ โสภณธฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, สุวัฒน์ ทรูทศวินท์ และ วุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์. (2545). **การออกแบบ ทดสอบ และหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น**. วารสารราชบัณฑิตยสถาน 27(1): 59-72.
- สมบัติ กำมอญ, สมเกียรติ ปรัชญาวารากร, ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์, พันธ์ ตั้งตระกูล และ สมชาติ โสภณธฤทธิ์. (2551). **เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวหอมมะลิด้วยเทคนิคฟลูอิดไลเซชัน**. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4**. 14-16 พฤษภาคม 2551 จังหวัดนครปฐม.
- อนุชา ใจกล้า, สมเกียรติ ปรัชญาวารากร, วาภูมิ วารัญญานนท์ และ สมชาติ โสภณธฤทธิ์. (2549). **เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการรักษาคุณภาพข้าวเปลือกที่อบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไลเซชัน**. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2**. 27-29 กรกฎาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). **ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ ศรีพาทกุล, สมเกียรติ ปรัชญาวารากร และ สมชาติ โสภณธฤทธิ์. (2540). **การอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไลซ์แบบต่อเนื่อง: แนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม** [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.energy-based.nrct.go.th/Article/Ts-3%20continuous%20fluidized%20bed%20paddy%20drying%20appropriate%20drying%20strategy.pdf>

- อารีย์ ทิมินกุล และ นิทัศน์ ตั้งพินิจกุล. (2547). **ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจสอบความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องวัดความชื้น** [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://210.246.186.28/AedWeb/48-7-ricemoisture.pdf>
- Bomdyopadhyay, S., and Roy, N.C. (1992). **Rice Process Technology**. New Delhi: Raju Primalani for Oxford&IBH Publishing Co. Pvt.Ltd.
- Donald, B. Brooker, Fred, N., Bakker-Arkema, and Carl, W. Hall. (1992). **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Jumah, Y. Rami, and Mujumdar, S. Arun. (2000). Fluidised Bed Grain Drying. In Mujumdar, S. Arun, and Suvachittanont, Sirikalaya (eds.). **Developments in Drying, Volume II: Drying of Foods and Agro-Products** (pp 229-240). Bangkok, Thailand: Kasetsart University Press.
- Madhiyanon, T., Soponronnarit, S., and Tia, W. (2000). Continuous Drying of paddy in two-dimensional spouted bed. **Kasetsart Journal (Nat. Sci.)** 34: 308-314.
- Prachayawarakorn, S., Poomsa-ad, N., and Soponronnarit, S. (2005). Quality maintenance and economy with high-temperature paddy-drying process. **Journal of Stored Products Research** 41: 333-351.
- Prachayawarakorn, S., Tia, W., Poopaiboon, K., and Soponronnarit, S. (2005). Comparison of performances of pulsed and conventional fluidized-bed dryers. **Journal of Stored Products Research** 41: 479-497.
- Soponronnarit, S. (1999). Fluidized-bed paddy drying. **ScienceAsia** 25: 51-56.
- Soponronnarit, S. (2000). Fluidised Bed Grain Drying. In Mujumdar, S. Arun and Suvachittanont, Sirikalaya (eds.). **Developments in Drying, Volume II: Drying of Foods and Agro-Products** (pp 135-147). Bangkok, Thailand: Kasetsart University Press.
- Tamon, H., Furuta, T., Adachi, S., Yamamoto, S., and วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. (2548). **เทคโนโลยีอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- Thakur, Kr. Abhay, and Gupta, A.K. (2006). Water absorption characteristics of paddy, brown rice and husk during soaking. **Journal of Food Engineering** 75: 252-257.
- Thompson, James F. (2003). **Measurement of Grain Moisture**. Rice Quality Workshop 2003 [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.plantsciences.ucdavis.edu/uccerice/QUALITY/rqw2003/C-14MoistureMeasurement2003.pdf>

- Thompson, James F. (2003). **Principles of Rice Drying**. Rice Quality Workshop 2003 [ออนไลน์]. ๒๕๔๓
๒๕๔๓: http://www.plantsciences.ucdavis.edu/uccerice/QUALITY/rqw2003/C-5Rice_drying_Principles.pdf
- Wetchacamai, S., Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Prachayawarakorn S., Panich-ing-orn, J., and Suthicharoenpanich, S. (2001). Drying of high moisture paddy by two-dimensional spouted bed technique. **Kasetsart Journal (Nat. Sci.)** 35: 93-103.
- White, Frank M. (1999). **Fluid Mechanics** (4th ed.). Singapore: McGraw-Hill Book.
- Wiset, L., Srzednicki, G., Driscoll, R.H., Nimmuntavin, C., and Siwapornrak, P. (2001). **Effects of high temperature drying on rice quality** [On-line]. Available: <http://cigr-ejournal.tamu.edu/submissions/volume3/FP%2001%20003.pdf>

ภาคผนวก ก

การพิสูจน์สมการ

ภาคผนวก ก เป็นการพิสูจน์สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณในวิทยานิพนธ์เรื่อง การทดลองและวิเคราะห์หาแนวทางอบแห้งข้าวเปลือกให้ได้ประสิทธิภาพสูงด้วยเครื่องอบแห้งแบบ ข้าวหล่นอิสระ แสดงดังต่อไปนี้

ก.1 สมการคำนวณหาค่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการเพิ่มความชื้นให้กับข้าวเปลือก

จากสมการหาค่าความชื้นมาตรฐานเปียก ซึ่งมีหน่วยเป็น % w.b.

$$M = 100 \times (w - d) / w$$

เมื่อ M = ความชื้นมาตรฐานเปียก, % w.b.

w = มวลของวัสดุชื้น, kg

d = มวลของวัสดุแห้ง, kg

ให้ M_1 เป็นความชื้นเริ่มต้น และ M_2 เป็นความชื้นสุดท้าย จะได้ว่า

$$M_1 = 100 \times (w_1 - d) / w_1 \tag{ก-1}$$

$$M_2 = 100 \times (w_2 - d) / w_2 \tag{ก-2}$$

ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในการเพิ่มความชื้นให้กับข้าวเปลือกคือ $w_2 - w_1$

จัดรูปสมการที่ (ก-1) และ (ก-2) ให้อยู่ในรูปของ w_1 และ w_2

$$w_1 = \frac{100d}{100 - M_1} \tag{ก-3}$$

$$w_2 = \frac{100d}{100 - M_2} \tag{ก-4}$$

นำสมการที่ (ก-4) มาลบกับสมการที่ (ก-3) จะได้

$$w_2 - w_1 = \frac{100d}{100 - M_2} - \frac{100d}{100 - M_1}$$

$$w_2 - w_1 = 100d \left\{ \frac{M_2 - M_1}{(100 - M_2)(100 - M_1)} \right\} \quad (\text{ก-5})$$

จัดรูปสมการที่ (ก-3) ใหม่ ให้อยู่ในรูปของ d

$$d = \frac{w_1(100 - M_1)}{100} \quad (\text{ก-6})$$

แทนสมการที่ (ก-6) ลงในสมการที่ (ก-5) จะได้

$$w_2 - w_1 = w_1(100 - M_1) \left\{ \frac{M_2 - M_1}{(100 - M_2)(100 - M_1)} \right\}$$

$$w_2 - w_1 = w_1 \left(\frac{M_2 - M_1}{100 - M_2} \right)$$

$$w_2 - w_1 = w_1 \left\{ \frac{(100 - M_1) - (100 - M_2)}{100 - M_2} \right\}$$

$$w_2 - w_1 = w_1 \left[\frac{100 - M_1}{100 - M_2} - 1 \right] \quad (\text{ก-7})$$

สมการที่ (ก-7) นี้คือ สมการคำนวณหาค่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการเพิ่มความชื้นให้กับข้าวเปลือก เมื่อ w_1 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ต้องการเพิ่มความชื้น

ก.2 สมการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก

พิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้งกับปริมาณน้ำที่ระเหยจากข้าวเปลือกในการอบแห้ง

$$\hat{E}_T = \frac{Q}{w_{in} - w_{final}}$$

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

$$\dot{m}_a = \rho_a A \bar{V}$$

$$\hat{E}_T = \frac{\rho_a A \bar{V} [(1 - W_a)C_a + C_v W_a] (T_{out} - T_{in}) \Delta t}{w_{in} - w_{final}}$$

เมื่อ	ρ_a	=	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3 (ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ T_{in} และ T_{out})
	A	=	พื้นที่หน้าตัดท่ออบแห้ง, m^2
	C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ (ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ T_{in} และ T_{out})
	C_v	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ (ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ T_{in} และ T_{out})
	\hat{E}_T	=	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ, MJ/kg น้ำที่ระเหย
	\dot{m}_a	=	อัตราไหลมวลของอากาศ, kg/s
	Q	=	พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้ง, MJ
	T_{out}	=	อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อน, $^{\circ}\text{C}$
	T_{in}	=	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน, $^{\circ}\text{C}$ (กำหนดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความชื้นสัมพัทธ์มีค่า 30°C และ 60% ตลอดการทดลอง)
	Δt	=	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, s
	\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ยกระแสอากาศในท่ออบแห้ง, m/s
	w	=	มวลข้าวเปียก, kg

W_a = อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง (ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ),
kg/kg-dry air

$w_{in} - w_{final}$ คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยจากข้าวเปลือกในการอบแห้งซึ่งสามารถหาได้ดังนี้
พิจารณาความชื้นข้าวเปลือกตามมาตรฐานเปียก

$$M_{in} = \frac{(w_{in} - d)}{w_{in}}$$

$$M_{final} = \frac{(w_{final} - d)}{w_{final}}$$

$$M_{in} - M_{final} = \frac{(w_{in} - d)}{w_{in}} - \frac{(w_{final} - d)}{w_{final}} = \frac{d(w_{in} - w_{final})}{w_{in} \cdot w_{final}}$$

$$\therefore w_{in} - w_{final} = \frac{(w_{in} \cdot w_{final}) \cdot (M_{in} - M_{final})}{d}$$

เมื่อ M_{in} = อัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานเปียกก่อนเริ่มการอบแห้ง
 M_{final} = อัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานเปียกเมื่อเสร็จสิ้นการอบแห้ง
 d = มวลน้ำแห้งซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$M_{final} = \frac{(w_{final} - d)}{w_{final}}$$

$$1 - M_{final} = \frac{d}{w_{final}}$$

$$d = w_{final} \cdot (1 - M_{final})$$

$$\therefore w_{in} - w_{final} = \frac{w_{in} \cdot (M_{in} - M_{final})}{(1 - M_{final})}$$

แทนค่า $w_{in} - w_{final}$ ลงในสมการคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐภูมิจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก จะได้

$$\hat{E}_T = \frac{\rho_a A \bar{V} [(1 - W_a) C_a + C_v W_a] (T_{out} - T_{in}) \Delta t}{\left(\frac{w_{in} \cdot (M_{in} - M_{final})}{(1 - M_{final})} \right)}$$

ภาคผนวก ข

การเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการคลุกข้าว และแช่ข้าว
การทดลองอบแห้งข้าวเปลือก
และการหาค่าความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett
m401 เทียบกับการหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ

ภาคผนวก ข แสดงการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการคลุกข้าว และแช่ข้าว (soak), การทดลองอบแห้งข้าวเปลือก และการหาค่าความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett m401 เทียบกับการหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ

วิธีการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกที่นิยมใช้กันทั่วไปสามารถพิจารณาได้ 2 แบบคือ วิธีการคลุกข้าว และวิธีการแช่ข้าว (soak) มีรายละเอียดดังนี้

- วิธีการคลุกข้าว

วิธีการนี้จะต้องทราบน้ำหนัก และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกแห้งที่จะทำการเพิ่มความชื้น เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการเพิ่มความชื้นดังสมการที่แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก (การทดลองใช้ข้าวเปลือกเริ่มต้น 2.5 kg) จากนั้นพรมน้ำให้ทั่วข้าวเปลือกแล้วทำการคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำข้าวเปลือกไปพักไว้ในภาชนะบรรจุมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศ พลิกกลับภาชนะบรรจุข้าวเปลือกทุก 30 min เพื่อให้น้ำกระจายอย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอเป็นระยะเวลาประมาณ 4-6 hr จนกระทั่งไม่เห็นน้ำเหลืออยู่ในภาชนะบรรจุ ขั้นตอนนี้จะใช้ระยะเวลาแตกต่างกันตามปริมาณข้าวเปลือกแห้งเริ่มต้น นำข้าวเปลือกไปเก็บไว้ในที่เย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 0-6°C เป็นเวลา 7 วัน (สมบัติ กำมอญ, 2551) เพื่อป้องกันไม่ให้ข้าวเกิดการงอก, ขึ้นรา และให้น้ำกระจายอย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอภายในเมล็ดข้าวเปลือก เมื่อนำไปทดลองต้องนำข้าวเปลือกออกมาพักที่อุณหภูมิแวดล้อมเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 24 hr เพื่อให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม แล้วจึงดำเนินการขั้นต่อไป

- วิธีการแช่ข้าว (soak)

วิธีการนี้ทำการแช่ข้าวเปลือกในน้ำ โดยให้น้ำท่วมข้าวเปลือกทั้งหมด ความชื้นของข้าวเปลือกจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ทำการแช่ข้าว

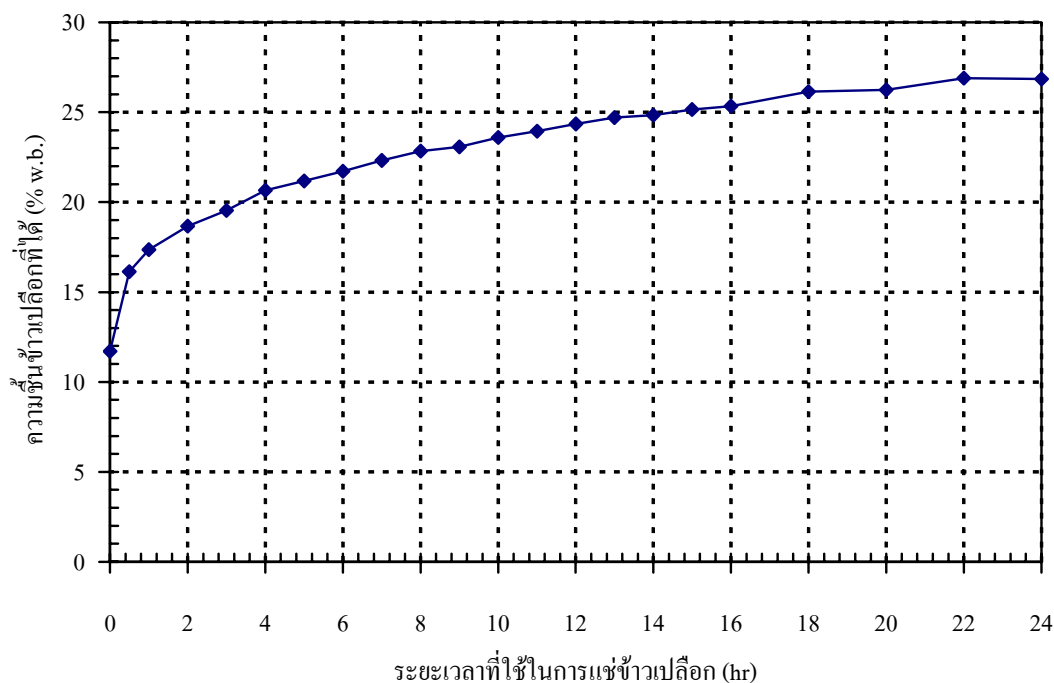
ทำการทดสอบโดยใช้น้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 25°C ในการแช่ข้าวเปลือกตัวอย่าง นำข้าวเปลือกที่แช่น้ำมาหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบตามช่วงระยะเวลาต่าง ๆ ผลการทดสอบพบว่าในช่วง 2 hr แรกของการแช่ข้าวความชื้นมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการแช่ข้าวเปลือกนานขึ้น จากข้อมูลโดยรวมจะเห็นว่าข้าวเปลือกที่แช่ไว้เป็นระยะเวลา 24 hr ความชื้นของข้าวเปลือกจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง กรณีนี้ความชื้นข้าวเปลือก เข้าสู่สู่ 27% w.b. ดังตารางที่ ข.1 และรูปที่ ข.1

(Abhay and Gupta, 2006) มีงานวิจัยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการแช่ข้าวเปลือก ความชื้นข้าวเปลือก และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือก พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการ

แช่ข้าวเปลือกกับความชื้นข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับผลการทดสอบ และเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือกมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าความชื้นอิมตัวของข้าวเปลือกมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ ข.1 แสดงข้อมูลระยะเวลาในการแช่ข้าวเปลือก, ค่าความชื้นข้าวเปลือกในช่วงเวลา 24 hr โดยการหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ

ระยะเวลาการแช่ ข้าวเปลือก (hr)	ค่าความชื้น (% w.b.)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	11.70	11.70	11.70	11.70
0.5	15.83	15.36	15.54	15.58
1	15.92	16.42	16.21	16.18
2	17.50	17.90	17.60	17.67
3	17.81	18.60	18.14	18.18
4	19.59	19.47	19.69	19.58
5	19.86	20.19	19.98	20.01
6	20.68	19.91	20.85	20.48
7	20.92	20.82	21.38	21.04
8	21.48	21.71	21.70	21.63
9	21.88	21.95	21.19	21.67
10	21.99	23.46	22.26	22.57
11	22.99	22.67	22.66	22.77
12	23.17	22.82	22.86	22.95
13	23.38	23.50	22.24	23.04
14	24.21	23.57	23.64	23.81
15	24.31	24.01	23.37	23.89
16	23.90	23.85	24.55	24.10
18	25.51	24.82	25.08	25.14
20	25.42	25.18	25.17	25.25
22	25.82	26.16	26.18	26.05
24	26.04	25.58	25.92	25.85



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการแช่ข้าวเปลือกกับค่าความชื้นข้าวเปลือก

ทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกทั้งสองวิธี เพื่อเปรียบเทียบผลของการอบแห้ง และการกระจายตัวของน้ำที่ซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวเปลือกของวิธีการเพิ่มความชื้นทั้งสองวิธี โดยควบคุมสภาวะการทดลองตามข้อมูลในตารางที่ ข.2 ผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งของการเพิ่มความชื้นทั้งสองวิธีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกทั้งสองวิธีทำให้น้ำซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวอย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอ แสดงดังตารางที่ ข.3 และรูปที่ ข.2

ค่าความชื้นที่แตกต่างกันนั้นอาจเกิดจากการที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ใช้อบแห้งมีค่าแตกต่างกัน และการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการคลุกข้าวอาจมีความชื้นไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากการคลุกเคล้าไม่เข้ากันหรือการพลิกกลับในช่วงที่พักข้าวเปลือก รูปที่ ข.3 แสดงความแตกต่างของความชื้นข้าวเปลือกจากการเพิ่มความชื้นทั้งสองวิธีนั้น ไม่มีทิศทางที่แน่นอน มีแนวโน้มกระจายอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 10\%$ ทำให้มั่นใจได้ว่าการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกทั้งสองวิธีจะทำให้ได้ข้าวเปลือกขึ้นที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันสามารถพิจารณาเทียบเคียงกันได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการแช่ข้าว (soak) เพื่อให้ได้ความชื้นที่สม่ำเสมอทั่วกัน ใช้ระยะเวลา และมีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่า

อย่างไรก็ตามการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการแช่ข้าว (soak) มีข้อพึงระวังที่สำคัญคือ ในขณะที่นำข้าวเปลือกขึ้นจากน้ำเมื่อครบกำหนดเวลา จะต้องผึ่ง และซับข้าวเปลือกให้แห้งจนไม่มีน้ำเกาะที่ผิวของข้าวเปลือก เพื่อให้ได้ค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ถูกต้องเมื่อนำข้าวเปลือกไปหาค่าความชื้น

ตารางที่ ข.2 แสดงข้อมูลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกทั้งสองวิธี

วิธีการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือก	วิธีการคลุกข้าว	วิธีการแช่ข้าว (16 hr)
ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก	24.7% w.b.	25.88% w.b.
ช่วงระยะเวลาเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก	2 min	2 min
ความเร็วรอบมอเตอร์ขับ (ความถี่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ขับ = 20 Hz)	593 rpm	593 rpm
ความเร็วอากาศอบแห้งในท่ออบแห้ง	4 m/s	4 m/s
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	90°C	90°C
ปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลอง (มวลข้าวเปียก)	2.5 kg	2.5 kg
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_{ambient})	30°C	30°C

หมายเหตุ : หลังจากผ่านการอบแห้งทำการพักข้าวเปลือกเป็นระยะเวลา 4-6 hr ก่อนทำการวัดค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ เพื่อลดอุณหภูมิข้าวให้มีค่าเท่ากับอากาศแวดล้อม และให้ความชื้นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมล็ดข้าว

ตารางที่ ข.3 แสดงข้อมูลความชื้นที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ ของข้าวเปลือกที่เพิ่มความชื้นทั้งสองวิธี และค่าความแตกต่างของความชื้นโดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นด้วยการแช่ข้าว (soak) เป็นกรณีเปรียบเทียบ

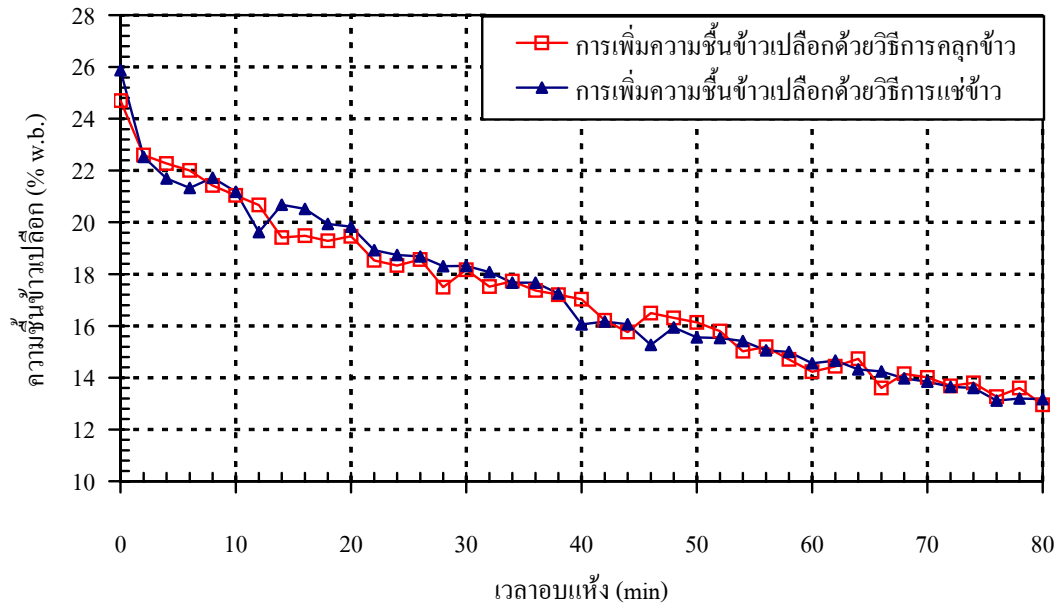
ช่วงระยะเวลาการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก (min)	การเพิ่มความชื้นด้วยวิธีการคลุกข้าว (% w.b.)	การเพิ่มความชื้นด้วยวิธีการแช่ข้าว (soak) (% w.b.)	% error ใช้วิธีการแช่ข้าวเป็นกรณีเปรียบเทียบ (%)
0	24.70	25.88	-4.56
2	22.60	22.53	0.33
4	22.27	21.69	2.65
6	22.00	21.33	3.16

ตารางที่ ข.3 แสดงข้อมูลความชื้นที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ ของข้าวเปลือกที่เพิ่มความชื้นทั้งสองวิธี และค่าความแตกต่างของความชื้น โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นด้วยการแช่ข้าว (soak) เป็นกรณีเปรียบเทียบ (ต่อ)

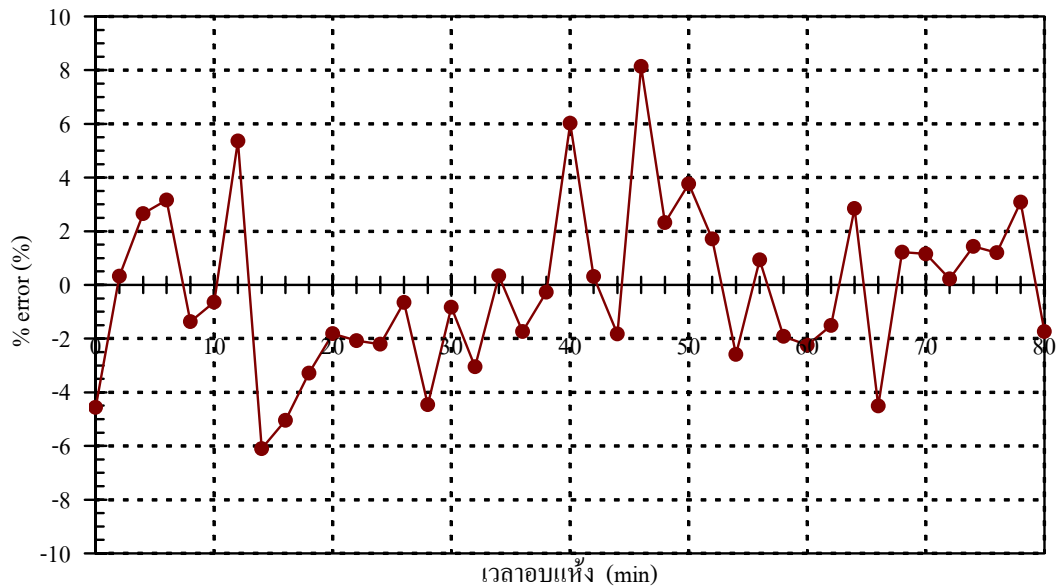
ช่วงระยะเวลาการเก็บ ตัวอย่างข้าวเปลือก (min)	การเพิ่มความชื้นด้วยวิธี การคลุกข้าว (% w.b.)	การเพิ่มความชื้นด้วยวิธี การแช่ข้าว (soak) (% w.b.)	% error ใช้วิธีการแช่ข้าวเป็น กรณีเปรียบเทียบ (%)
8	21.43	21.73	-1.37
10	21.04	21.18	-0.64
12	20.67	19.62	5.36
14	19.42	20.68	-6.09
16	19.48	20.52	-5.05
18	19.28	19.94	-3.29
20	19.46	19.83	-1.82
22	18.53	18.92	-2.08
24	18.33	18.74	-2.20
26	18.56	18.68	-0.65
28	17.50	18.31	-4.46
30	18.16	18.32	-0.83
32	17.52	18.07	-3.05
34	17.73	17.67	0.33
36	17.37	17.67	-1.74
38	17.20	17.25	-0.27
40	17.03	16.06	6.02
42	16.22	16.17	0.32
44	15.77	16.06	-1.82
46	16.50	15.26	8.14
48	16.31	15.94	2.32
50	16.14	15.55	3.77
52	15.79	15.53	1.71

ตารางที่ ข.3 แสดงข้อมูลความชื้นที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ ของข้าวเปลือกที่เพิ่มความชื้นทั้งสองวิธี และค่าความแตกต่างของความชื้น โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นด้วยการแช่ข้าว (soak) เป็นกรณีเปรียบเทียบ (ต่อ)

ช่วงระยะเวลาการเก็บ ตัวอย่างข้าวเปลือก (min)	การเพิ่มความชื้นด้วยวิธี การคลุกข้าว (% w.b.)	การเพิ่มความชื้นด้วยวิธี การแช่ข้าว (soak) (% w.b.)	% error ใช้วิธีการแช่ข้าวเป็น กรณีเปรียบเทียบ (%)
54	15.02	15.42	-2.59
56	15.19	15.05	0.93
58	14.71	15.00	-1.92
60	14.23	14.56	-2.24
62	14.44	14.66	-1.52
64	14.73	14.33	2.85
66	13.60	14.24	-4.50
68	14.15	13.98	1.22
70	14.00	13.84	1.16
72	13.68	13.65	0.23
74	13.80	13.60	1.44
76	13.27	13.11	1.20
78	13.60	13.19	3.08
80	12.95	13.18	-1.74



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกเปรียบเทียบกันระหว่างการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการคลุกข้าวกับการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการแช่ข้าว (soak) ด้วยความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C



รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความแตกต่างของความชื้นโดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นด้วยการแช่ข้าว (soak) เป็นกรณีเปรียบเทียบ

การพิจารณาความชื้นข้าวเปลือกจากการหาค่าความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett m401 เปรียบเทียบกับการหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ โดยใช้ข้าวเปลือกจากการทดลองเดียวกัน ดังข้อมูลการทดลองในตารางที่ ข.4 ผลการทดลองพบว่าค่าความชื้นที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ จากการวัดความชื้นทั้งสองวิธีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ ข.5, ข.6 และรูปที่ ข.4

ความแตกต่างของค่าความชื้นที่วัดได้โดยใช้การหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบเป็นค่าอ้างอิง พบว่าค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นกระจกระบาย ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มที่แน่นอน และตลอดระยะเวลาการอบแห้งนั้นมีค่าสูงสุด +3.41% และ -5.17% ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมากแสดงดังตารางที่ ข.6 และรูปที่ ข.5 ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนั้นมีสาเหตุที่คาดว่าจะทำให้เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett m401 เกิดความผิดพลาดขึ้น 3 ประการคือ

1. ปริมาณเมล็ดข้าวเปลือกที่ใส่ไปในการทดสอบหากไม่เท่ากันในการทดสอบแต่ละครั้ง จะทำให้ความต้านทานที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เท่ากันด้วยส่งผลให้ค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาดไปจากค่าความชื้นที่ได้จากวิธีมาตรฐาน โดยมีแนวโน้มของค่าที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณข้าวเปลือก ตัวอย่างว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง

2. วิธีการวัดหรือการหมุนบีดเพื่อบดข้าวเปลือกตัวอย่าง โดยหากมีการหมุนบีดเพื่อบดซ้ำหรือบดหลายครั้งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นมีค่าเปลี่ยนไป ทำให้ค่าความชื้นที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่บีด

3. ปุ่มกดเลือกวัสดุวัดค่าการอ่านของตัวอย่างทดสอบ หากเลือกปุ่มกดเลือกวัสดุวัดค่าต่างกันจะทำให้ค่าที่อ่านได้ของตัวอย่างทดสอบต่างกัน เนื่องจากค่าอ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าต่างกันไป (อารีย์ ทิมินกุล และ นิทัศน์ ตั้งพินิจกุล, 2547)

ในกรณีของสาเหตุที่ 2 และ 3 ได้มีการกำหนดให้มีลักษณะเช่นเดียวกันตลอดการทดสอบ แต่สำหรับสาเหตุที่ 1 ไม่สามารถใช้จำนวนหรือปริมาณที่เท่ากันได้ในการทดสอบแต่ละครั้ง เพราะข้าวเปลือกที่ทำการทดลองมีขนาดเมล็ดที่แตกต่างกันออกไป ในการทดสอบจึงได้พยายามคัดเลือกเมล็ดข้าวที่จะใช้ในการทดสอบให้มีขนาด และจำนวนที่ใกล้เคียงกัน เพื่อลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น

ในการทดลองนี้ใช้เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett สำหรับการหาค่าความชื้นข้าวเปลือกในขณะที่ทำการอบแห้งเพื่อต้องการความสะดวก รวดเร็ว และค่าความชื้นมีความน่าเชื่อถือ สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองจะนำข้าวเปลือกไปหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบต่อไป

ตารางที่ ข.4 แสดงข้อมูลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือก

ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก	24.1% w.b.
ช่วงระยะเวลาเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก	60 s หรือ 1 min
ความเร็วรอบมอเตอร์ขับ (ความถี่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ขับ = 20 Hz)	593 rpm
ความเร็วอากาศอบแห้งในท่ออบแห้ง	2 m/s
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	108.1°C
% rh _{อากาศอบแห้ง}	9.2%
ปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลอง (มวลข้าวเปียก)	2.2 kg
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_{ambient})	29.6°C
% rh _{ambient}	67%

หมายเหตุ : หลังจากผ่านการอบแห้งทำการพักข้าวเปลือกเป็นระยะเวลา 4-6 hr ก่อนทำการวัดค่าความชื้นวิธีตรงโดยใช้ตู้อบ เพื่อลดอุณหภูมิข้าวให้มีค่าเท่ากับอากาศแวดล้อม และให้ความชื้นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมล็ดข้าว

ตารางที่ ข.5 แสดงการหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยใช้ตู้อบ

ช่วงระยะเวลาการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก (min)	น้ำหนักกระป๋อง (g)	น้ำหนักมวลเปียก (g)	น้ำหนักมวลแห้ง (g)	ความชื้นข้าวเปลือก ([100*(w-d)/w] = % w.b.)
0	24.8	5.01	3.8	24.15
3	24.86	5.01	3.87	22.75
6	24.42	5.01	3.93	21.56
9	24.71	4.99	3.98	20.24
12	24.25	5.02	3.99	20.52
15	24.04	5.05	4.04	20.00
18	24.89	5.18	4.19	19.11
21	24.42	5.05	4.13	18.22
24	25.41	5.02	4.11	18.13
27	24.35	5.01	4.14	17.37
30	24.6	5.01	4.15	17.17

ตารางที่ ข.5 แสดงการหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้อูบ (ต่อ)

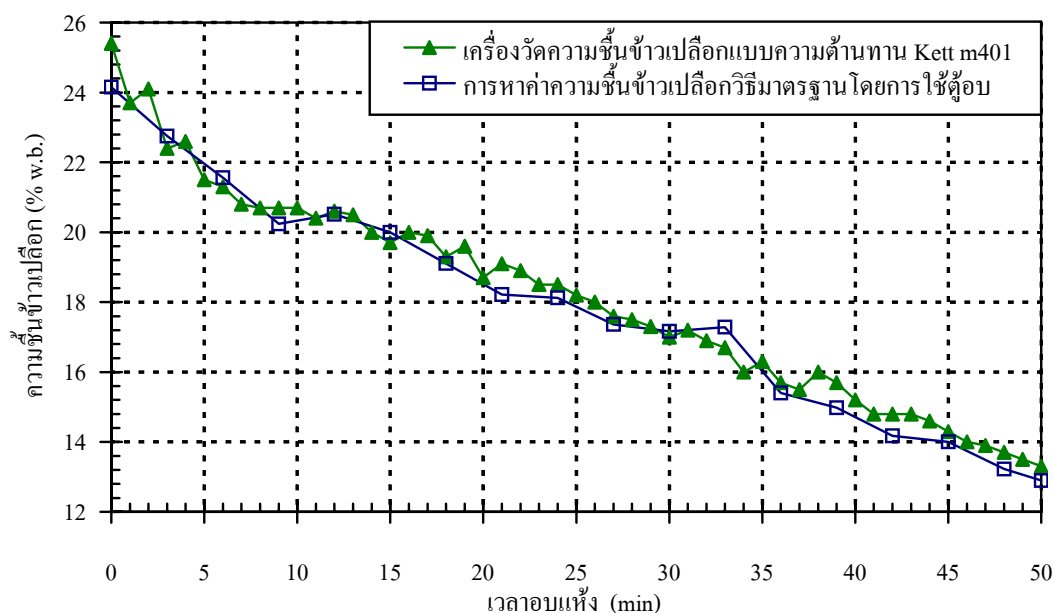
ช่วงระยะเวลาการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก (min)	น้ำหนักกระป๋อง (g)	น้ำหนักมวลเปียก (g)	น้ำหนักมวลแห้ง (g)	ความชื้นข้าวเปลือก ($[(100*(w-d)/w)] = \% \text{ w.b.}$)
33	25.44	5.09	4.21	17.29
36	24.31	5	4.23	15.40
39	24.62	5.14	4.37	14.98
42	23.96	5.15	4.42	14.17
45	25.23	5.07	4.36	14.00
48	23.91	4.99	4.33	13.23
50	25.56	5.04	4.39	12.90

ตารางที่ ข.6 แสดงข้อมูลความชื้นที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ จากการหาค่าความชื้นทั้งสองวิธี และค่าความแตกต่างโดยใช้การหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้อูบเป็นค่าอ้างอิง

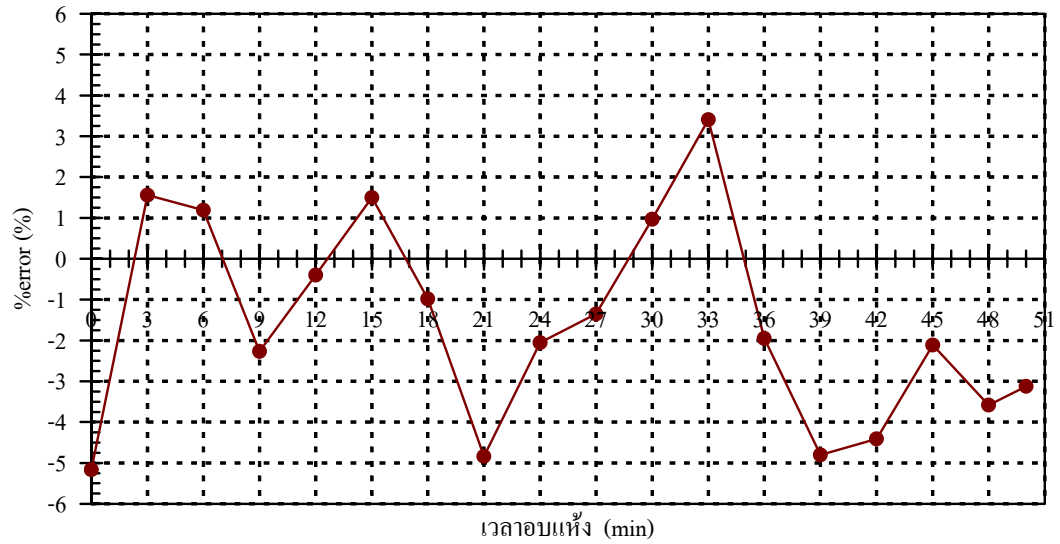
ช่วงระยะเวลาการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก (min)	เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett (% w.b.)	การหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรงโดยการใช้อูบ (% w.b.)	% error ใช้วิธีตรงเป็นค่าอ้างอิง(%)
0	25.4	24.15	-5.17
3	22.4	22.75	1.56
6	21.3	21.56	1.19
9	20.7	20.24	-2.27
12	20.6	20.52	-0.40
15	19.7	20.00	1.50
18	19.3	19.11	-0.98
21	19.1	18.22	-4.84
24	18.5	18.13	-2.05
27	17.6	17.37	-1.35
30	17	17.17	0.97
33	16.7	17.29	3.41
36	15.7	15.40	-1.95

ตารางที่ ข.6 แสดงข้อมูลความชื้นที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ จากการหาค่าความชื้นทั้งสองวิธี และค่าความแตกต่างโดยใช้การหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใส่ตู้อบเป็นค่าอ้างอิง (ต่อ)

ช่วงระยะเวลาการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก (min)	เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett (% w.b.)	การหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรงโดยการใส่ตู้อบ (% w.b.)	% error ใช้วิธีตรงเป็นค่าอ้างอิง(%)
39	15.7	14.98	-4.80
42	14.8	14.17	-4.41
45	14.3	14.00	-2.11
48	13.7	13.23	-3.58
50	13.3	12.90	-3.13



รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกเปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett m401 กับการหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรงโดยการใส่ตู้อบ ด้วยความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 108.1°C



รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความผิดพลาดของค่าความชื้นข้าวเปลือก
เมื่อใช้การหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรง โดยการใช้ตู้อบเป็นค่าอ้างอิง

ภาคผนวก ค

ทดสอบกะพ้อลำเลียง เครื่องทำความร้อน และเครื่องเป่าลม

ภาคผนวก ค แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบกะพ้อลำเลียง (conveyer), เครื่องทำความร้อน (heater) และเครื่องเป่าลม (blower) ที่ปรับใช้ในการทดลองการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค.1 กะพ้อลำเลียง (conveyer) ทำหน้าที่ลำเลียงข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วเคลื่อนที่ขึ้นไปในแนวดิ่งเพื่อเตรียมการอบแห้งรอบต่อไป และทำให้การอบแห้งดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ในส่วนของกะพ้อลำเลียงมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลองการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ คือ ปริมาณข้าวเปลือกที่เพียงพอที่ทำให้การอบแห้งดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง, ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนกับความเร็วรอบมอเตอร์ขับ, ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ขับกับความเร็วรอบของสายพานลำเลียง และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ขับกับค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือก (feed rate) ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ค.1.1 ปริมาณข้าวเปลือกที่เพียงพอที่ทำให้การอบแห้งดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาว่ามีการตักข้าวเต็มกะพ้อ สามารถหาได้จาก

ปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ = ปริมาณข้าวเปลือกที่กระจายอยู่เต็มพื้นที่ใต้กะพ้อตัก + (ปริมาณข้าวเปลือก 1 กะพ้อ × ครั้งหนึ่งของจำนวนกะพ้อตักบนสายพานลำเลียง) + (ปริมาณข้าวเปลือกตัวอย่างที่เก็บต่อรอบการทดสอบ × จำนวนรอบที่ทดสอบ)

ปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ = $213 + (72.51 \times 14) + (20 \times 50)$ g

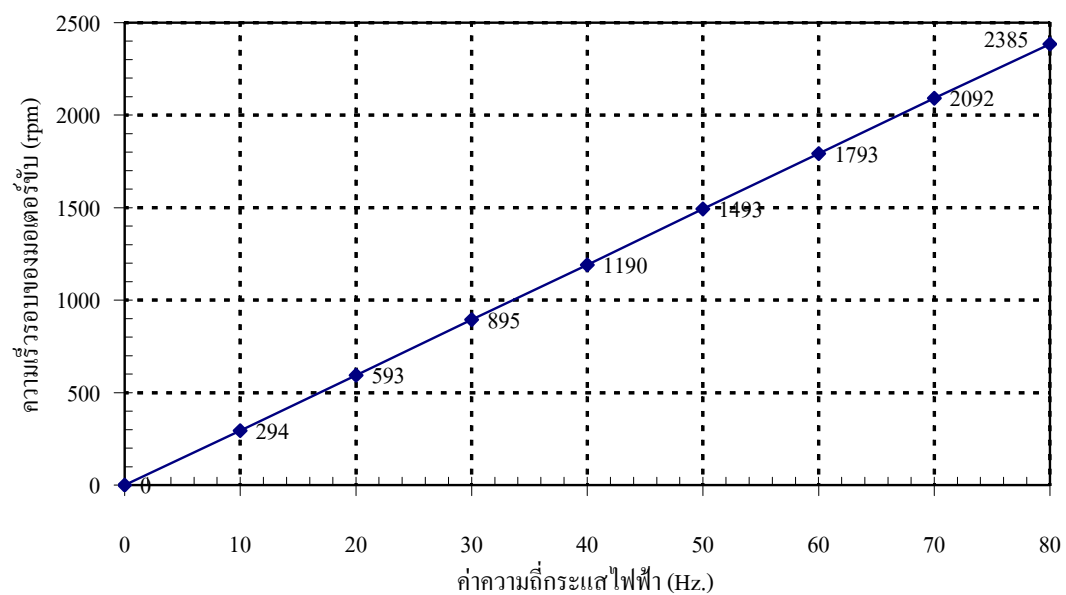
ปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ = $213 + 1015.14 + 1000 = 2228.14$ g

หมายเหตุ : จำนวนกะพ้อตักทั้งหมดมี 28 อัน และปริมาณข้าวเปลือกเต็ม 1 กะพ้อได้จากการเฉลี่ยการทดสอบ 10 ค่า

ค.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนกับความเร็วรอบมอเตอร์ขั้วมีลักษณะสอดคล้อง และแปรผันตรงต่อกัน เมื่อเพิ่มความถี่กระแสไฟฟ้าความเร็วรอบมอเตอร์ขั้วจะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น แสดงดังตารางที่ ค.1 และรูปที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลของความถี่กระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบมอเตอร์ขั้ว

ค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (Hz)	ความเร็วรอบมอเตอร์ขั้ว (rpm)	ความเร็วรอบของลูกกรอกตัวล่างของชุดกะพ้อลำเลียง (rpm)
0	0	0
10	294	77
20	593	155
30	895	234
40	1190	312
50	1493	392
60	1793	470
70	2092	547
80	2385	620



รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์ขั้ว

ค.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ขับ กับความเร็วรอบของสายพานลำเลียง ทั้งในกรณีของการทดลอง และการคำนวณ

กรณีการทดลอง ใช้ tachometer วัดที่กะพืดักโดยตรง

กรณีการคำนวณสามารถพิจารณาได้จาก

ความเร็วสัมผัสของสายพาน $V = \omega r$

เมื่อ $r = 7.62 \text{ cm}$

เวลาที่สายพานเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ = ความยาวของสายพาน / ความเร็วสัมผัสของสายพาน

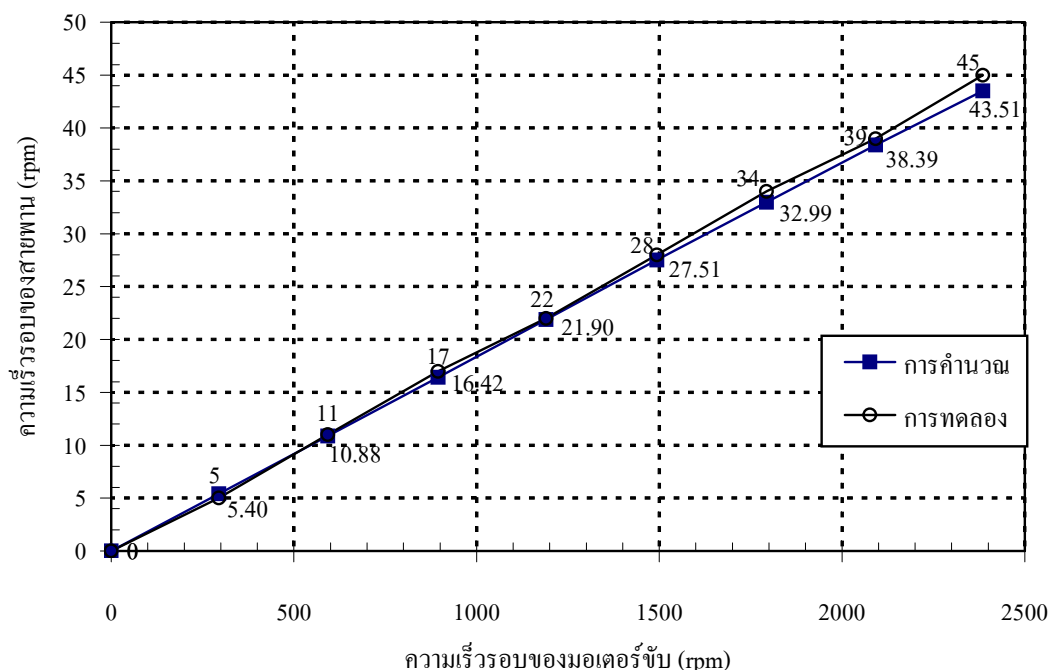
เวลาที่สายพานเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ = $6.822 \text{ m} / \omega r$

ค่าความเร็วรอบของสายพาน (rpm) = $(60 \text{ s}) / (6.822 \text{ m} / \omega r)$

จากการคำนวณ และการทดลองพบว่าค่าความเร็วรอบสายพานลำเลียงทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นเมื่อเพิ่มค่าความเร็วรอบมอเตอร์ขับ ค่าความแตกต่างที่ได้จากการวัด และการคำนวณเป็นผลจากความละเอียดของเครื่องมือวัด แสดงดังตารางที่ ค.2 และรูปที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 แสดงข้อมูลของความเร็วรอบมอเตอร์ขับกับความเร็วรอบสายพานลำเลียง

ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)	ความเร็วรอบสายพานลำเลียงจากการคำนวณ (rpm)	ความเร็วรอบสายพานลำเลียงจากการทดลอง (rpm)	ค่าความแตกต่าง (ใช้การคำนวณเป็นค่าอ้างอิง) (%)
0	0	0	0
294	5.40	5	-7.41
593	10.88	11	1.10
895	16.42	17	3.53
1190	21.90	22	0.46
1493	27.51	28	1.78
1793	32.99	34	3.06
2092	38.39	39	1.59
2385	43.51	45	3.42



รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ขับกับความเร็วรอบของสายพานลำเลียง

ค.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ขับ กับค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือก (feed rate)

ในการทดลองมีข้อจำกัดของการเลือกใช้ค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกเนื่องจากขนาดของท่ออบแห้งมีขนาดเล็ก (4.49 cm) ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราการป้อนข้าวเปลือกเพียงค่าเดียว โดยปัจจัยสำคัญในการเลือกค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกคือ ต้องการให้ข้าวเปลือกไหลตัวได้อย่างต่อเนื่อง และไม่เกิดการกองตัวบริเวณถังพักเพื่อให้การอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการพักตัวขณะทำการอบแห้ง ซึ่งค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่ทำให้มีสภาวะดังกล่าวที่ได้จากการทดสอบมีค่า 15.37 kg/min

การทดสอบได้ทำการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ขับ (ปรับความถี่กระแสไฟฟ้า) เพื่อปรับค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่เหมาะสมต่อสภาวะการทดลอง พบว่าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ขับต่ำกว่า 593 rpm (ความเร็วรอบสายพาน 11 rpm) ข้าวเปลือกที่ไหลภายในท่ออบแห้งจะไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นห้วง ๆ และหากเพิ่มปริมาณข้าวเปลือกให้มากขึ้นจะทำให้กะพ้อลำเลียงติดเนื่องจากข้าวเปลือกอัดตัวกันที่บริเวณด้านล่างของกะพ้อลำเลียง ขณะที่เมื่อความเร็วรอบมอเตอร์ขับสูงกว่า 683.6 rpm (ความเร็วรอบสายพาน 12.8 rpm) จะเกิดการกองตัวของข้าวเปลือกที่ถังพักด้านบนเนื่องจากอัตราการป้อนข้าวเปลือกมากกว่าอัตราการไหลตัวของข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้ง ทำให้มีสภาวะที่มีการพักตัวของข้าวเปลือก ดังนั้นในการทดสอบหาค่าที่เหมาะสมจึงพิจารณาในช่วงความเร็วรอบมอเตอร์ขับ 593-683.6 rpm (ความเร็วรอบสายพาน 11-12.8 rpm) ซึ่งพบว่าเมื่อพิจารณาตลอดการทดลอง ค่าความเร็วรอบ

มอเตอร์ซัฟที่มากกว่า 593 rpm จะมีข้าวเปลือกกองตัวที่ถ้งพักด้านบนในช่วงประมาณ 10-20 นาทีแรกของการทดลอง จึงเป็นสาเหตุให้เล็กค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือก 15.37 kg/min เพราะเป็นค่าที่ทำให้มีการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีกการพักตัวขณะทำการอบแห้ง

ทดสอบหาผลกระทบของค่าความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่ออัตราการป้อนข้าวเปลือก โดยทำการทดสอบ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย พบว่าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ซัฟค่าหนึ่ง ความเร็วอากาศอบแห้งที่เปลี่ยนไปมีผลต่อค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกในช่วง 0-1 kg/min ของการทดสอบความเร็วรอบมอเตอร์ซัฟ 4 ค่าคือ 593, 623.2, 653.4 และ 683.6 rpm และความเร็วอากาศอบแห้ง 0-5 m/s แสดงดังตารางที่ ก.3 และรูปที่ ก.3, ก.4

ตารางที่ ก.3 แสดงข้อมูลของความเร็วรอบมอเตอร์ซัฟ, แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม และอัตราการป้อนข้าวเปลือก

ความเร็วรอบมอเตอร์ซัฟ (rpm)	แรงดันไฟฟ้า ที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม (volt)	อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/min)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
593 (ความถี่กระแสไฟฟ้า 20 Hz.) (ความเร็วรอบสายพาน 11 rpm)	0	16.09	15.38	15.52	15.66
	30	15.56	15.61	15.26	15.48
	40	15.25	15.56	15.11	15.31
	50	15.67	15.40	15.57	15.55
	60	15.41	15.34	15.22	15.32
	70	15.03	15.54	15.25	15.27
	80	15.21	15.06	14.99	15.09
	90	15.33	14.95	15.12	15.13
	100	15.46	15.14	15.29	15.30
	110	15.44	15.20	15.48	15.37
	120	15.48	15.22	15.48	15.40
	130	15.48	15.39	15.54	15.47
	140	15.17	14.98	15.16	15.11
	150	15.49	15.72	15.01	15.41
	160	15.45	15.28	15.22	15.32
	170	15.40	15.83	15.17	15.46
180	15.62	15.44	15.57	15.54	

ตารางที่ ค.3 แสดงข้อมูลของความเร็วรอบมอเตอร์ขับ, แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม และ อัตราการป้อนข้าวเปลือก (ต่อ)

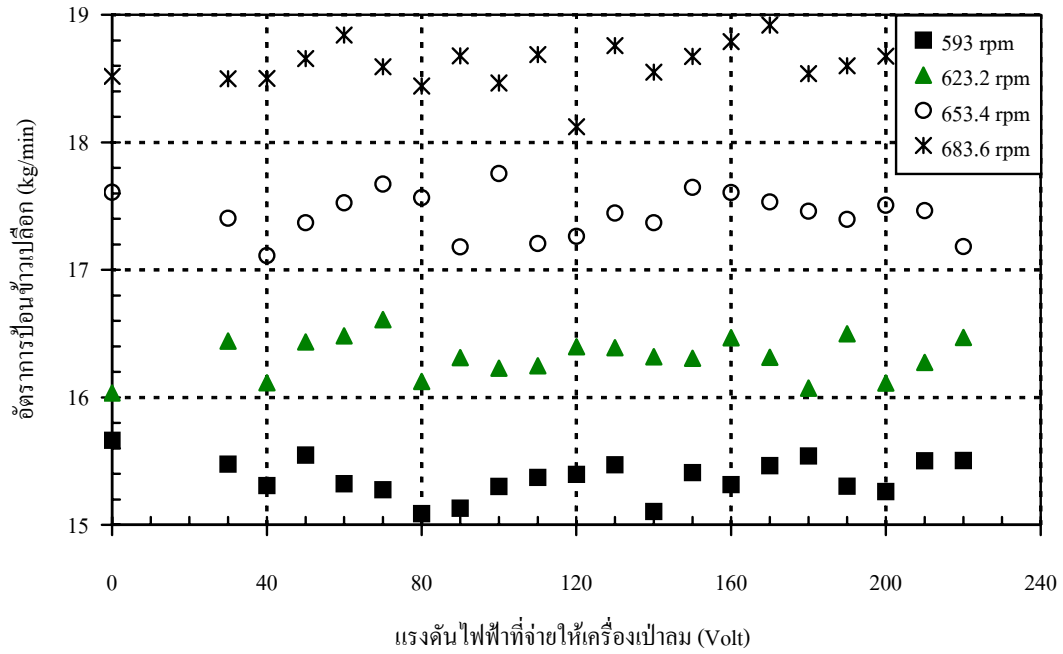
ความเร็วรอบมอเตอร์ขับ (rpm)	แรงดันไฟฟ้า ที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม (volt)	อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/min)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
	190	15.12	15.36	15.43	15.30
	200	15.08	15.26	15.45	15.26
	210	15.29	15.40	15.81	15.50
	220	15.68	15.32	15.51	15.51
ค่าเฉลี่ย	-	-	-	-	15.37
623.2 (ความถี่กระแสไฟฟ้า 21 Hz.) (ความเร็วรอบสายพาน 11.6 rpm)	0	15.75	16.20	16.15	16.03
	30	16.39	16.59	16.33	16.44
	40	15.97	16.35	16.03	16.12
	50	16.24	16.34	16.72	16.43
	60	16.54	16.31	16.59	16.48
	70	16.96	16.54	16.33	16.61
	80	16.36	15.97	16.05	16.13
	90	16.04	16.91	15.98	16.31
	100	16.06	16.44	16.19	16.23
	110	16.48	16.27	16.00	16.25
	120	16.35	16.17	16.68	16.40
	130	16.01	16.65	16.52	16.39
	140	16.15	16.51	16.29	16.32
	150	16.53	16.13	16.25	16.31
	160	16.36	16.30	16.75	16.47
	170	16.38	16.28	16.28	16.31
	180	16.32	16.31	15.59	16.07
	190	16.27	16.54	16.68	16.50
200	16.06	15.99	16.29	16.11	
210	15.93	16.45	16.44	16.27	

ตารางที่ ก.3 แสดงข้อมูลของความเร็วรอบมอเตอร์ขับ, แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม และ อัตราการป้อนข้าวเปลือก (ต่อ)

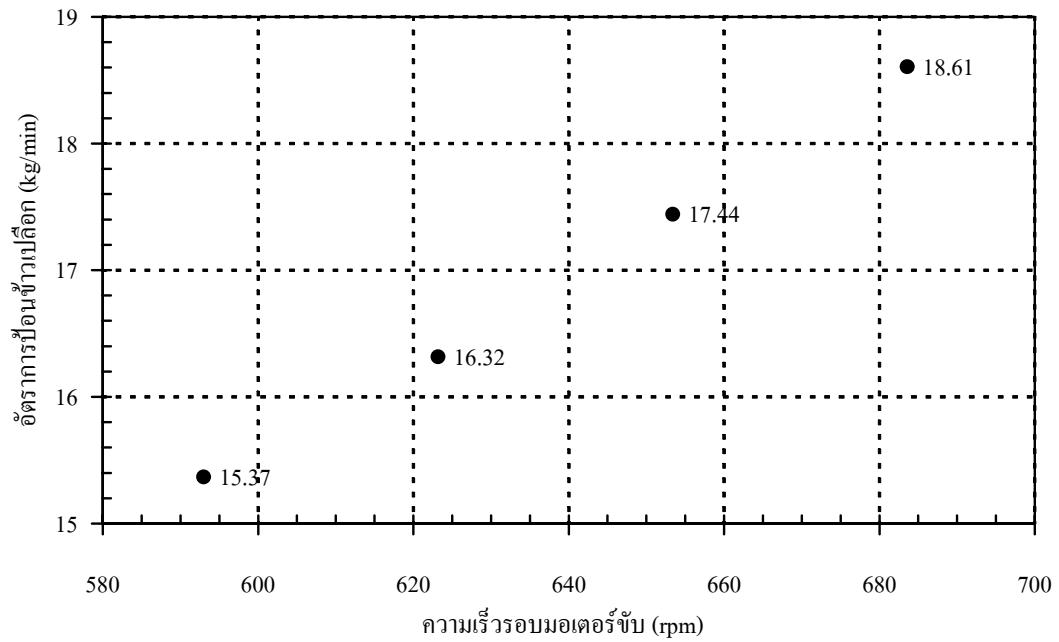
ความเร็วรอบมอเตอร์ขับ (rpm)	แรงดันไฟฟ้า ที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม (volt)	อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/min)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
	220	16.47	-	-	16.47
ค่าเฉลี่ย	-	-	-	-	16.32
653.4 (ความถี่กระแสไฟฟ้า 22 Hz.) (ความเร็วรอบสายพาน 12.2 rpm)	0	17.62	17.69	17.52	17.61
	30	17.54	17.14	17.53	17.40
	40	17.25	16.86	17.22	17.11
	50	17.00	17.65	17.46	17.37
	60	17.26	17.61	17.71	17.53
	70	17.60	17.51	17.90	17.67
	80	17.61	17.52	17.56	17.57
	90	17.35	17.02	17.17	17.18
	100	18.17	17.82	17.28	17.76
	110	16.93	17.46	17.23	17.21
	120	16.86	17.21	17.72	17.26
	130	17.62	17.66	17.05	17.44
	140	17.60	17.38	17.13	17.37
	150	17.66	17.67	17.61	17.65
	160	17.88	17.47	17.47	17.61
	170	17.68	17.18	17.74	17.53
	180	17.51	17.52	17.35	17.46
	190	16.75	17.89	17.55	17.40
	200	16.98	18.12	17.42	17.51
	210	17.49	17.59	17.31	17.46
220	16.86	17.28	17.41	17.18	
ค่าเฉลี่ย	-	-	-	17.44	
	0	18.43	18.58	18.55	18.52

ตารางที่ ค.3 แสดงข้อมูลของความเร็วรอบมอเตอร์ขับ, แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม และ อัตราการป้อนข้าวเปลือก (ต่อ)

ความเร็วรอบมอเตอร์ขับ (rpm)	แรงดันไฟฟ้า ที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม (volt)	อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/min)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
683.6 (ความถี่กระแสไฟฟ้า 23 Hz.) (ความเร็วรอบสายพาน 12.8 rpm)	30	18.13	18.82	18.54	18.50
	40	18.80	18.31	18.39	18.50
	50	18.38	18.93	18.66	18.66
	60	18.88	18.65	19.00	18.84
	70	18.86	18.52	18.40	18.59
	80	18.48	18.35	18.49	18.44
	90	18.42	18.87	18.74	18.68
	100	18.44	18.57	18.39	18.46
	110	18.98	18.12	18.97	18.69
	120	18.57	17.77	18.03	18.12
	130	18.70	18.80	18.78	18.76
	140	18.27	18.80	18.59	18.55
	150	18.60	18.81	18.61	18.67
	160	18.55	18.56	19.25	18.79
	170	18.65	19.15	18.96	18.92
	180	18.21	18.79	18.62	18.54
	190	18.94	18.58	18.28	18.60
	200	18.91	18.25	18.86	18.68
	210	-	-	-	-
220	-	-	-	-	
ค่าเฉลี่ย	-	-	-	18.61	



รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม (ความเร็วอากาศอบแห้ง) กับ อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่ความเร็วรอบมอเตอร์จับค่าต่าง ๆ



รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์จับกับอัตราการป้อนข้าวเปลือกเฉลี่ย

ค.2 เครื่องทำความร้อน (heater) มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1540 W ปรับค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ Variac ปรับค่าแรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน มีการพิจารณารายละเอียดดังนี้

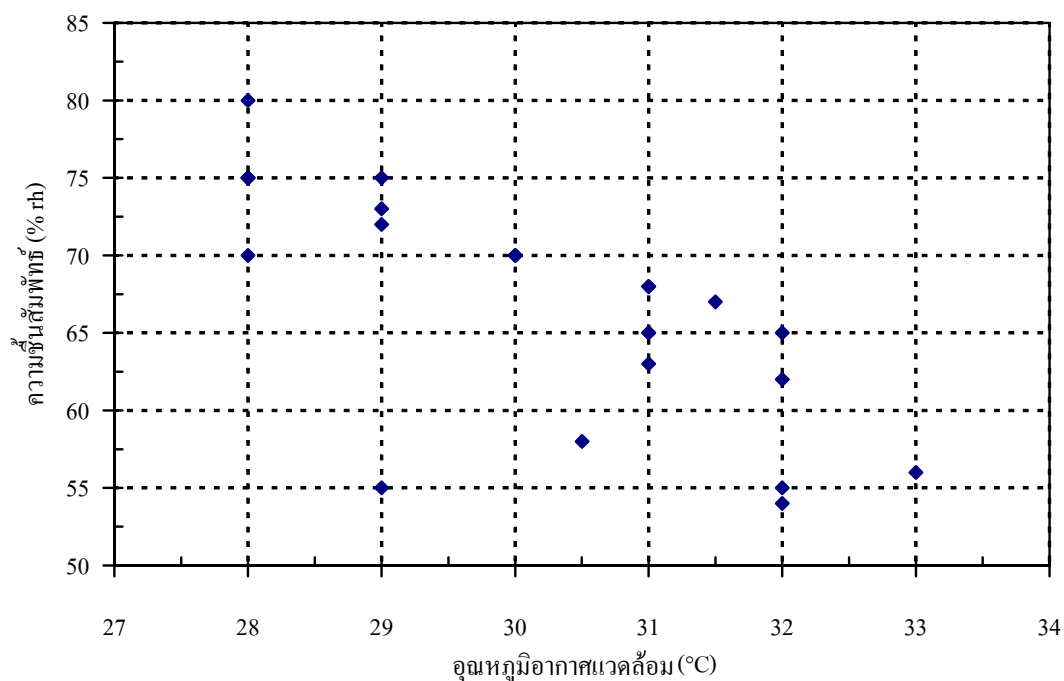
ค.2.1 อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมที่ทำการทดลองทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 28-33°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมมีค่าอยู่ในช่วง 54-80% โดยวันที่มีอุณหภูมิต่ำจะมีแนวโน้มของความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงสภาพอากาศซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม แสดงดังตารางที่ ค.4 และรูปที่ ค.5

ตารางที่ ค.4 แสดงข้อมูลอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศแวดล้อมในการทดลอง

อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (% rh)	ความชื้นสัมบูรณ์ (g moisture/kg dry air)
29	72	18.5
32	54	16.5
29	75	19.1
32	55	16.5
33	56	17.8
28	75	18.2
31	65	18.5
30.5	58	16
28	75	18.2
30	70	19
30	70	19
31	65	18.5
28	70	16.7
31	68	19.2
29	55	18.7
29	73	18.7
31.5	67	19.6
30	70	19
28	75	18.2
32	65	19.7
32	62	18.7

ตารางที่ ค.4 แสดงข้อมูลอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศแวดล้อมในการทดลอง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (% rh)	ความชื้นสัมบูรณ์ (g moisture/kg dry air)
31	63	18
31	68	19.3
28	80	19.3



รูปที่ ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมที่วัดได้

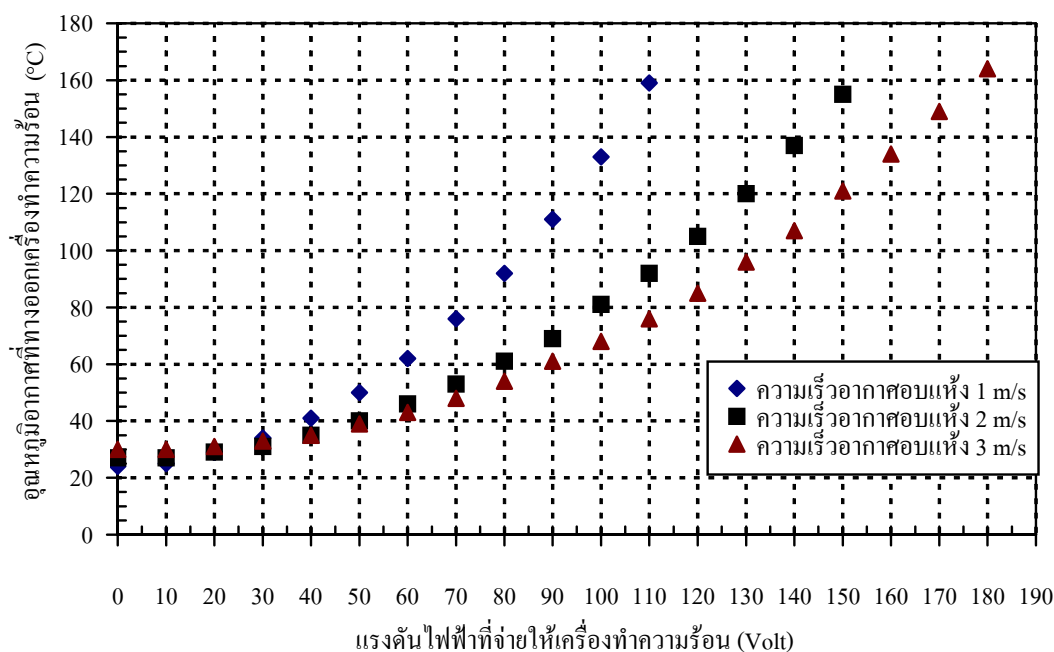
ค.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนกับอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ออกเครื่องทำความร้อน (ทางเข้าท่ออบแห้ง) ที่ค่าความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ

ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะสูงขึ้น โดยมีการเพิ่มในลักษณะของ exponential และเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อให้ได้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่เท่ากัน โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศอบแห้งสอดคล้องกัน เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่ต่างกันสองค่าคือ 23 และ 27°C พบว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีผลต่อการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อปรับค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง โดยที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ำกว่าจะใช้พลังงานสูงกว่าแต่มี

พฤติกรรม และการเพิ่มของอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สอดคล้องกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบเป็นค่าประมาณสำหรับการปรับค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งให้มีค่าตามที่ต้องการ โดยต้องคำนึงถึงอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเป็นสำคัญ แสดงดังตารางที่ ค.5, ค.6 และรูปที่ ค.6, ค.7

ตารางที่ ค.5 แสดงข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน, อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 23°C

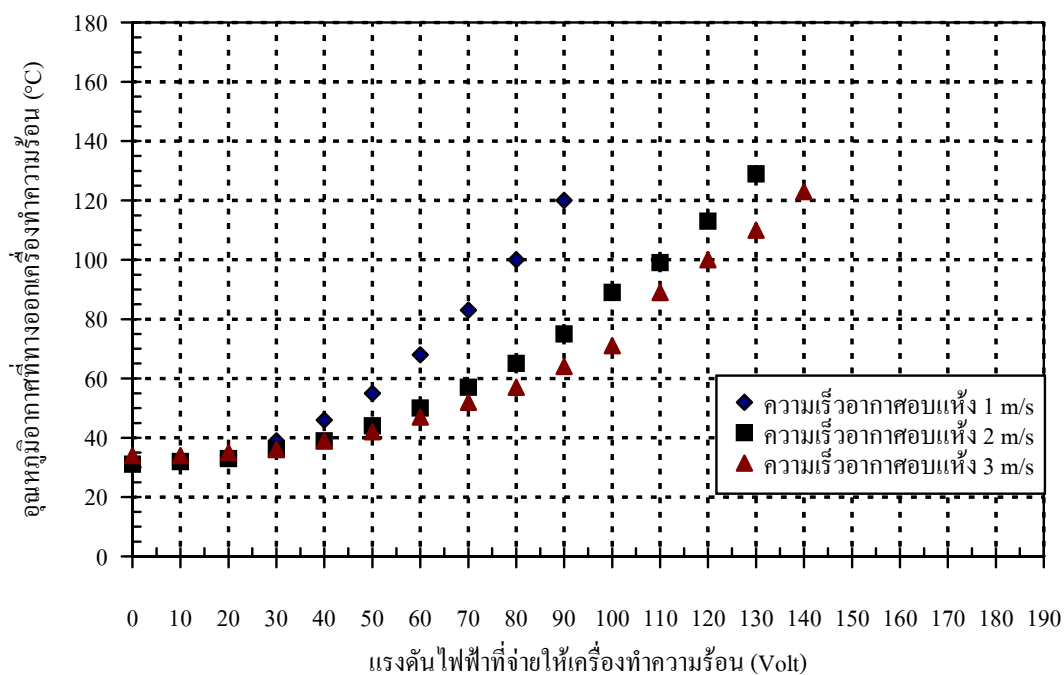
แรงดันไฟฟ้า เครื่องเป่าลม (Volt)	ความเร็ว อากาศ อบแห้ง (m/s)	อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ออกจากเครื่องทำความร้อน (°C)																		
		แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน (Volt)																		
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
40	1	24	25	29	34	41	50	62	76	92	111	133	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 ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนกับอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ออกจากเครื่องทำความร้อน กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 23°C

ตารางที่ ค.6 แสดงข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน, อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และ ความเร็วอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 27°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
40	1	31	32	34	39	46	55	68	83	100	120	-	-	-	-	-	-	-	-
70	2	31	32	33	36	39	44	50	57	65	75	89	99	113	129	-	-	-	-
110	3	34	34	35	36	39	42	47	52	57	64	71	89	100	110	123	-	-	-



รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ที่ออกจากเครื่องทำความร้อน กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 27 °C

ก.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ค่าความเร็วอากาศอบแห้งต่าง ๆ

การทดสอบได้พิจารณาความเร็วอากาศอบแห้ง 4 ค่าคือ 0.6, 1.4, 2.5 และ 3.6 m/s โดยปรับค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรม และแนวโน้มของความชื้นสัมพัทธ์พบว่าที่ความเร็วอากาศอบแห้งสูงขึ้นค่าความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นจะต่ำลง เนื่องจากเครื่องเป่าลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีการระบายความร้อนบางส่วนออกมากับลมที่เป่าดังนั้นเมื่อปรับความเร็วลมสูงขึ้นจึงทำให้ลมมีอุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นสัมพัทธ์จึงต่ำลง จากนั้นปรับเครื่องทำความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง เห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากันความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าใกล้เคียงกันมากสำหรับทุกค่าความเร็วอากาศอบแห้ง โดยเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นความชื้นสัมพัทธ์มีลักษณะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และที่อุณหภูมิมอบแห้งสูง ๆ ความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงอย่างช้า ๆ แสดงดังตารางที่ ก.7 และรูปที่ ก.8

ตารางที่ ก.7 แสดงข้อมูลของความเร็วอากาศอบแห้ง, อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์

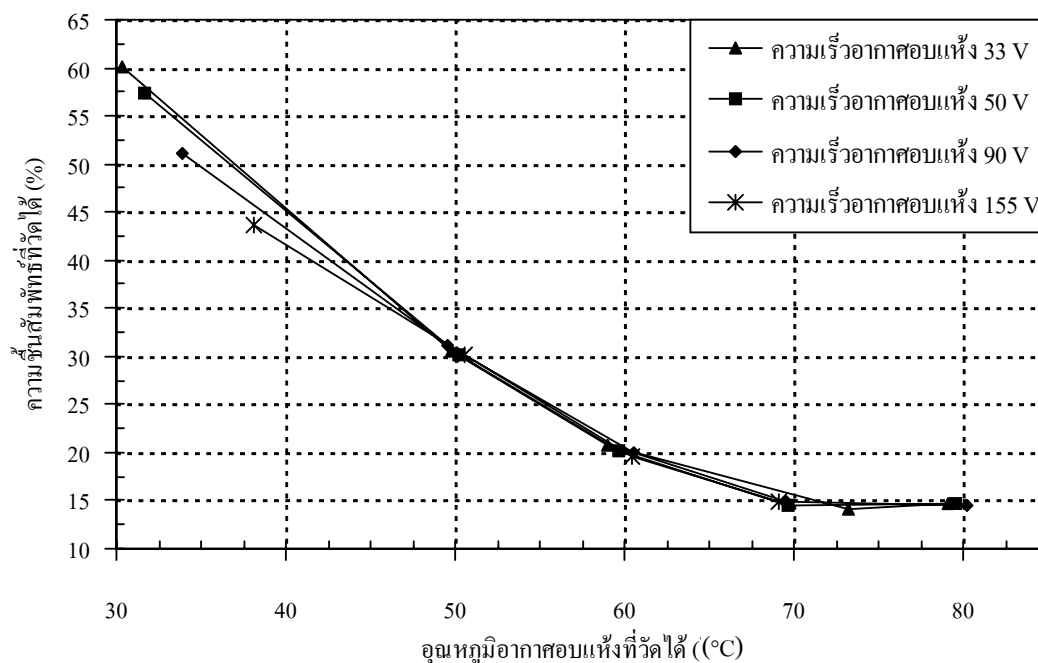
แรงดันไฟฟ้า เครื่องเป่าลม (Volt)	ความเร็วอากาศ อบแห้ง(m/s)	อุณหภูมิตดสอบ (°C)	อุณหภูมิที่วัดได้ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ (% rh)
33	0.6	No heat *	30.39	60.08
		50	49.81	30.46
		60	59.06	20.77
		70	73.19	14.08
		80	79.11	14.63
50	1.4	No heat *	31.63	57.30
		50	50.22	30.07
		60	59.67	20.22
		70	69.71	14.53
		80	79.61	14.60
90	2.5	No heat *	33.89	51.10
		50	49.51	31.22
		60	60.56	19.90
		70	69.61	14.87
		80	80.25	14.52

ตารางที่ ค.7 แสดงข้อมูลของความเร็วอากาศอบแห้ง, อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ (ต่อ)

แรงดัน ไฟฟ้า เครื่องเป่าลม (Volt)	ความเร็วอากาศ อบแห้ง(m/s)	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	อุณหภูมิที่วัดได้ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ (% rh)
155	3.6	No heat *	38.11	43.68
		50	50.51	30.20
		60	60.42	19.55
		70	69.12	14.94
		80	-	-

หมายเหตุ: * No heat หมายถึงกรณีที่ไม่มีเปิดเครื่องทำความร้อน

อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ ใช้ค่าเฉลี่ยจากข้อมูล 20 ค่า เก็บ
ต่อเนื่องกันทุก 2 วินาที



รูปที่ ค.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งกับความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ที่ตำแหน่ง
ทางเข้าท่ออบแห้ง กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ

หมายเหตุ: ใช้ robust high temperature probe และ testo 445 portable probe วัดค่าอุณหภูมิ (°C)
และความชื้นสัมพัทธ์ (% rh) ของอากาศร้อน มีรายละเอียดดังนี้

Robust high temperature probe (ϕ 12 mm) Teflon sintered filter

Measuring range 0 - 100% rh and -20-180°C

Accuracy $\pm 2\%$ rh (2–98% rh) and $\pm 0.4^\circ\text{C}$ (for 0–50°C), $\pm 0.5^\circ\text{C}$

ค.3 Orifice plate

ผู้ทำวิจัยได้ออกแบบ และคำนวณตามมาตรฐาน ISO 5167 มีลักษณะเป็นแบบ concentric orifice plate (square edge) จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างแบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps) แสดงดังรูป ค.9 มีรายละเอียดของค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	D	=	29.1	mm
เส้นผ่านศูนย์กลาง orifice plate	d	=	20	mm
ความหนาแผ่น orifice ($0.005D < e < 0.02D$)	e	=	0.5	mm
อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ($0.2 \leq \beta \leq 0.75$)	$\beta = (d/D)$	=	0.687	
กรณี $\beta > 0.6$ จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างมีค่าเป็น				
ระยะด้านเหนือหน้า $D \pm 0.1D$ ในงานวิจัยเลือกใช้ระยะ		=	29	mm
ระยะด้านปลายหน้า $0.5D \pm 0.01D$ ในงานวิจัยเลือกใช้ระยะ		=	14.3	mm
อุณหภูมิของไหล เลือกใช้ค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม T		=	30	$^\circ\text{C}$
ความหนาแน่นของอากาศ	ρ_a	=	1.165	kg/m^3
ความหนืดของอากาศ	μ	=	1.86×10^{-5}	$\text{Pa} \cdot \text{s}$

พิจารณาการไหลของของไหลระหว่างสองจุดใด ๆ โดยใช้สมการเบอร์นูลลี ภายใต้สมมติฐานคือ ไม่มีการส่งผ่านความร้อนทั้งโดยตรง และโดยอ้อม และไม่มีการส่งผ่านงาน กำหนดให้ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งของท่อขนาดใหญ่ และตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลาง orifice plate ดังรูปที่ ค.9 สามารถเขียนสมการได้เป็น

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

จัดรูปสมการใหม่เป็น

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

จากสมการอนุรักษ์มวล

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$\rho_1 A_1 \bar{V}_1 = \rho_2 A_2 \bar{V}_2$$

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

$$A_1 \bar{V}_1 = A_2 \bar{V}_2$$

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

$$\bar{V}_1 = \frac{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \bar{V}_2 = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \bar{V}_2 \quad (\text{ก-3})$$

นำ \bar{V}_1 กลับไปแทนในสมการเบอร์นูลลี (ก-2)

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

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

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

ดังนั้นสามารถหาค่าอัตราไหลปริมาตรที่ตำแหน่ง orifice plate ได้เป็น

$$Q_2 = A_2 \bar{V}_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{2g \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right]} \quad (\text{ก-5})$$

สมการที่ได้มาเป็นอัตราไหลปริมาตร โดยทางทฤษฎี ซึ่งต้องมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงเนื่องจากไม่ได้คิดความฝืดที่ต้านทานการไหล ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) และสัมประสิทธิ์การขยายตัว (ε) เพื่อสามารถนำไปใช้ได้กับการวัดค่าจริง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$Q_2 = A_2 \bar{V}_2 = \frac{C_d \varepsilon A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{2g \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right]} \quad (\text{ก-6})$$

โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์การขยายตัว (ε) พิจารณาได้จากสมการ

$$\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta P}{kP_1} \quad (\text{ก-7})$$

เมื่อ P_1 = ความดันสัมบูรณ์ที่ท่อก่อนถึง orifice plate, Pa

ΔP = ผลต่างความดันตกคร่อมที่ orifice plate, Pa

k = specific heat ratio = 1.4 (ที่อุณหภูมิอากาศ 30°C)

ความเร็วอากาศเฉลี่ยในท่ออบแห้ง (drying tube) สูงสุดที่ออกแบบคือ 5 m/s ใช้สมการอนุรักษ์มวลเพื่อหาค่าความเร็วอากาศเฉลี่ยในท่อตำแหน่งก่อนถึง orifice plate และที่ตำแหน่ง orifice plate

$$\dot{m}_{\text{drying tube}} = \dot{m}_{\text{orifice}}$$

$$(\rho A \bar{V})_{\text{drying tube}} = (\rho A \bar{V})_{\text{orifice}}$$

$$\left(\rho \frac{\pi D^2}{4} \bar{V} \right)_{\text{drying tube}} = \left(\rho \frac{\pi D^2}{4} \bar{V} \right)_{\text{orifice}}$$

อุณหภูมิของอากาศที่ผ่าน orifice plate มีค่า 30°C $\rho_{orifice} = 1.165 \text{ kg/m}^3$

อุณหภูมิของอากาศที่ผ่านเครื่องเป่าลมเข้าสู่ท่ออบแห้งมีค่าประมาณ 40°C $\rho_{drying tube} = 1.127 \text{ kg/m}^3$

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ orifice plate มีค่า 20 mm

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่ออบแห้งมีค่า 44.9 mm

$$\bar{V}_{orifice} = \frac{(\rho D^2)_{drying tube}}{(\rho D^2)_{orifice}} \bar{V}_{drying tube} = \frac{1.127 \times 44.9^2}{1.165 \times 20^2} \times 5$$

$$\bar{V}_{orifice} = 24.3781 \text{ m/s}$$

หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตำแหน่งก่อนถึง orifice plate และที่ตำแหน่ง orifice plate โดยใช้สมการ (ก-3) ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\bar{V}_1 = \left(\frac{20}{29.1} \right)^2 \bar{V}_2 = 0.4724 \bar{V}_2$$

เมื่อ 1 คือตำแหน่งก่อนถึง orifice plate และ 2 คือตำแหน่ง orifice plate

หาค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่ orifice plate จากสมการเบอร์นูลลีภายใต้สมมติฐานว่าไม่มีการส่งผ่านความร้อน และงาน

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{\bar{V}_2^2}{2g}$$

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

เมื่อพิจารณาที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน สามารถลดรูปสมการได้เป็น

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2)$$

แทนความสัมพันธ์ของความเร็วที่ตำแหน่งทั้งสอง

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (\bar{V}_2^2 - 0.4724\bar{V}_2^2) = \frac{\rho}{2} \bar{V}_2^2 (1 - 0.4724)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 182.6419 \text{ Pa}$$

แทนค่าลงในสมการ (ค-7) เพื่อหาสัมประสิทธิ์การขยายตัว (ε)

$$\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35(0.687^4)) \frac{\Delta P}{kP_1}$$

$$\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35(0.687^4)) \frac{182.6419}{1.4 \times 101325}$$

$$\varepsilon = 0.99937$$

สัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) หาได้จากสมการ Reader-Harris/Gallagher

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

$$\text{เมื่อ } L_1 = 1$$

$$L'_2 = 0.47$$

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

คำนวณหาค่า Re_D เป็นค่าเลขเรโนลด์ภายในท่อทางเข้าของอากาศ

$$\text{Re}_D = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} = \frac{1.165 \times (0.4724 \times 24.3781) \times (29.1/1000)}{1.86 \times 10^{-5}} = 20990.15827$$

แทนค่า Re_D เพื่อหาค่า C_d

$$C_d = 0.5961 + 0.01232 - 0.01072 + 0.005988 + 0.01979 + 0.01138 - 0.006115 + 0.001146$$

$$C_d = 0.62989$$

ทำการทดสอบโดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงานเพื่อตรวจสอบค่า C_d ที่ได้จากการคำนวณ พบว่ามีความสอดคล้องกันโดยค่า C_d กระจายตัวอยู่ในช่วง 0.61-0.68 สาเหตุที่ทำให้ค่า C_d ที่ได้จากการทดลองมีค่ากระจายตัว และต่างจากค่าที่คำนวณอาจมีสาเหตุจากการคำนวณ และการทดสอบใช้ของไหลทำงานคนละชนิดกัน ในการคำนวณอัตราไหลปริมาตรสูงสุดเป็นค่าออกแบบ การคำนวณแต่สำหรับการทดลองได้ปรับค่าปริมาตรการไหลจากช่วงต่ำสุดไปถึงช่วงสูงสุดของการทดลอง ดังจะเห็นได้จากรูปที่ ค.10 ซึ่งในช่วงที่ค่า Reynold's Number มีค่าต่ำ (อัตราไหลปริมาตรต่ำ) จะมีการกระจายของค่า C_d มากกว่าช่วงที่ค่า Reynold's Number สูง ทำให้ผลที่ได้จากการทดลองมีค่า C_d กระจายตัวเป็นช่วง แสดงดังตารางที่ ค.8 และรูปที่ ค.10

ตารางที่ ค.8 เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า C_d จากการทดสอบจริง โดยวัดปริมาตรน้ำแล้วจับเวลาเพื่อหาอัตราไหลปริมาตรจริง จากนั้นนำไปหาอัตราส่วนเทียบกับอัตราไหลปริมาตรทางทฤษฎี เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์อัตราไหล แสดงได้ดังนี้

อัตราไหลปริมาตรทางทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการเบอร์นูลลี ดังกล่าวไปข้างต้น

$$Q_T = A_T \bar{V}_T = A_T \sqrt{\frac{2\Delta P/\rho}{(1-\beta^4)}} \quad (\text{ค-8})$$

จากการทดสอบจะได้ความแตกต่างของสูงหัวทั้งสองตำแหน่งซึ่งสามารถนำมาหาความแตกต่างความดันได้เป็น

$$\Delta P = \rho_{\text{water}} g \frac{\Delta h}{1000}$$

นำความแตกต่างความดันแทนในสมการหาอัตราไหลปริมาตรทางทฤษฎี

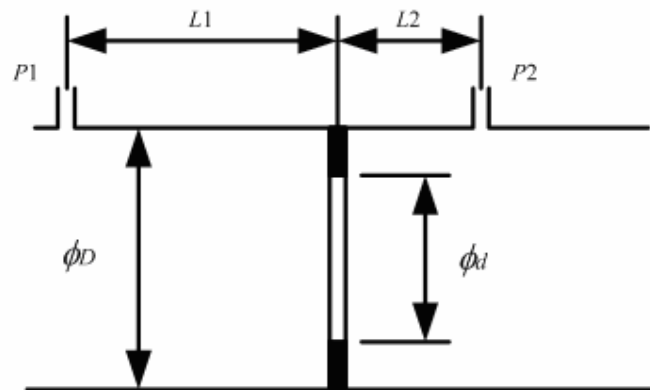
$$Q_T = A_T \bar{V}_T = A_T \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1000(1-\beta^4)}} \quad (\text{ก-9})$$

อัตราไหลปริมาณจริงหาได้จากการวัดปริมาณน้ำแล้วจับเวลา จากนั้นนำมาคำนวณ

$$Q_A = \frac{\bar{V}_A}{t}$$

นำค่าอัตราไหลปริมาณจริงจากสมการ (ก-9) หาค่าด้วยอัตราไหลปริมาณทางทฤษฎีจากสมการ (ก-8) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์อัตราไหล

$$C_d = \frac{Q_T}{Q_A}$$



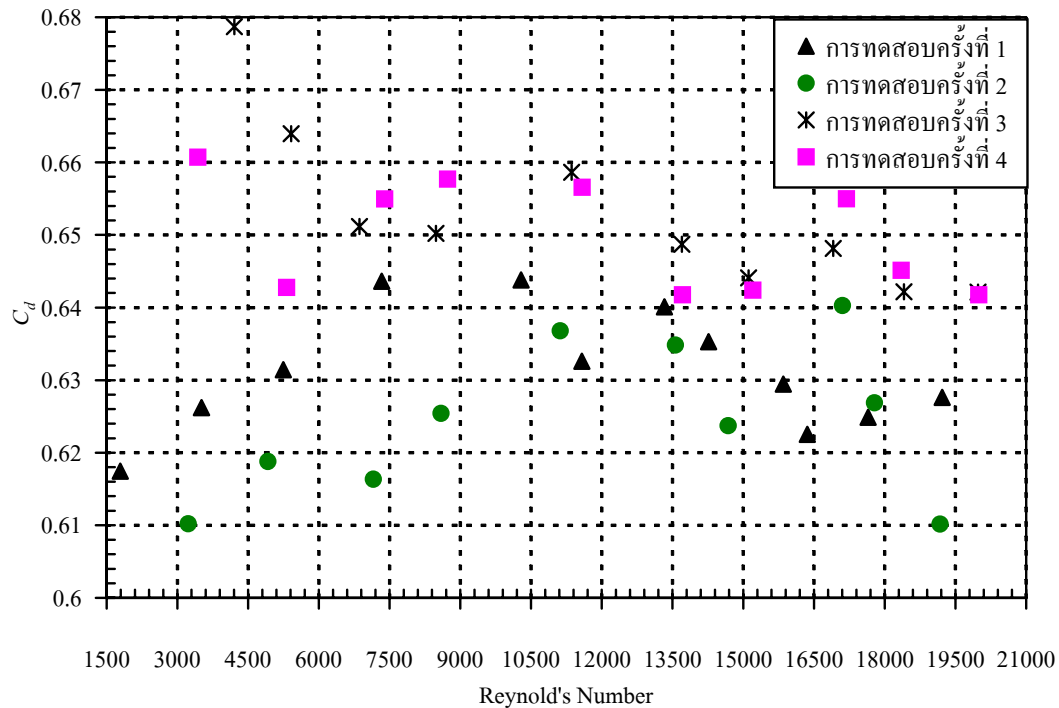
รูปที่ ก.9 แผนภาพแสดงลักษณะของท่อ orifice plate และจุดต่อสำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันแบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps)

ตารางที่ ค.8 ความสัมพันธ์การหาปริมาตรการไหล, ค่าความดันที่ตำแหน่งดกคร่อม orifice plate, ค่า Reynold's Number และค่า C_d กรณีใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน

ครั้งที่	ปริมาตร (l.)	เวลา (s)				สูงหัวที่ตำแหน่งก่อน เข้า orifice (mm.)				สูงหัวที่ตำแหน่งที่ผ่าน orifice (mm.)				Reynold's Number	C_d
		ครั้งที่ ที่ 1	ครั้งที่ ที่ 2	ครั้งที่ ที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ ที่ 1	ครั้งที่ ที่ 2	ครั้งที่ ที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ ที่ 1	ครั้งที่ ที่ 2	ครั้งที่ ที่ 3	เฉลี่ย		
1 (26.5°C)	5	133.71	144.06	143.63	140.47	765	766	770	767.00	763	765	769	765.67	1786.68	0.62
	5	69.96	71.96	72.65	71.52	749	753	749	750.33	744	748	744	745.33	3508.92	0.63
	10	94.06	97.03	95.84	95.64	726	727	728	727.00	715	716	717	716.00	5248.03	0.63
	10	68.06	69.46	67.84	68.45	678	679	680	679.00	657	659	659	658.33	7332.58	0.64
	10	47.65	48.56	50.15	48.79	544	543	543	543.33	503	503	502	502.67	10288.45	0.64
	10	43.18	43.18	43.71	43.36	542	542	542	542.00	489	488	489	488.67	11576.98	0.63
	10	37.15	37.9	37.96	37.67	554	555	554	554.33	485	486	485	485.33	13324.64	0.64
	12	41.21	42.84	42.59	42.21	563	562	562	562.33	482	482	482	482.00	14268.65	0.63
	12	37.46	38.5	38.03	38.00	758	755	752	755.00	656	655	651	654.00	15852.10	0.63
	15	46.84	45.68	45.53	46.02	752	753	750	751.67	641	643	641	641.67	16361.66	0.62
	15	41.75	42.9	43.34	42.66	742	740	742	741.33	614	613	616	614.33	17647.68	0.62
	15	38.93	39.81	38.78	39.17	723	727	723	724.33	574	577	574	575.00	19219.94	0.63
2 (26.3°C)	15	39	38.62	39.65	39.09	692	691	692	691.67	532	533	534	533.00	19174.56	0.61
	15	42.25	41.78	42.4	42.14	684	686	685	685.00	554	556	557	555.67	17785.34	0.63
	15	43.34	44.09	44.03	43.82	706	707	708	707.00	592	592	593	592.33	17104.82	0.64
	15	52.03	50.84	50.31	51.06	746	749	749	748.00	658	660	659	659.00	14679.46	0.62
	15	55	55.46	55.34	55.27	769	767	768	768.00	695	694	695	694.67	13562.12	0.63
	15	67.06	67.78	67.37	67.40	793	792	790	791.67	744	743	741	742.67	11120.12	0.64
	10	57.62	58.9	57.93	58.15	809	806	808	807.67	778	776	778	777.33	8593.10	0.62
	10	69.21	69.93	70.31	69.82	813	816	813	814.00	792	794	791	792.33	7157.16	0.62
	10	99.37	102.59	102.59	101.52	826.5	824.5	823.5	824.83	816	814	814	814.67	4922.24	0.62
	10	154.25	154	155.96	154.74	826	834.5	826	828.83	821	830	822	824.33	3229.29	0.61

ตารางที่ ค.8 ความสัมพันธ์การหาปริมาตรกรไหล, ค่าความดันที่ตำแหน่งตกร้อม orifice plate,
ค่า Reynold's Number และค่า C_d กรณีใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน (ต่อ)

ครั้งที่	ปริมาตร (l.)	เวลา (s)				สูงหัวที่ตำแหน่งก่อน เข้า orifice (mm.)				สูงหัวที่ตำแหน่งที่ผ่าน orifice (mm.)				Reynold's Number	C_d
		ครั้งที่ ที่ 1	ครั้งที่ ที่ 2	ครั้งที่ ที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ ที่ 1	ครั้งที่ ที่ 2	ครั้งที่ ที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ ที่ 1	ครั้งที่ ที่ 2	ครั้งที่ ที่ 3	เฉลี่ย		
3 (26.3°C)	20	50.12	50	49.96	50.03	713	712	714	713.00	558	555.5	559	557.50	19976.90	0.64
	20	54.15	53.96	54.78	54.30	750	753	752	751.67	619	620	620	619.67	18405.88	0.64
	20	58.9	59.56	58.87	59.11	780	781	781	780.67	671	671	672	671.33	16907.09	0.65
	20	65.56	66.78	66	66.11	800.5	802	802	801.50	712	714	713	713.00	15116.13	0.64
	15	54	54.78	55.34	54.71	816.5	819.5	815.5	817.17	744	748.5	744	745.50	13700.95	0.65
	15	65.75	66.37	65.75	65.96	833.5	836	833	834.17	785	788	786	786.33	11364.03	0.66
	15	87.34	89.15	88.65	88.38	852	848	851	850.33	824	821	824	823.00	8480.80	0.65
	10	71.68	74.43	72.4	72.84	866	859.5	857	860.83	848	842	839	843.00	6860.40	0.65
	10	92.12	91.87	93.12	92.37	862	860	866.5	862.83	851	849.5	856	852.17	5409.64	0.66
	10	117.15	118.5	120.87	118.84	864.5	867	868	866.50	858.5	860.5	862	860.33	4204.72	0.68
4 (26.3°C)	20	49.87	49.81	50.25	49.98	719	719	720	719.33	563	564	563	563.33	19996.89	0.64
	20	54.4	54.9	54.09	54.46	755	756	758	756.33	625	626	628	626.33	18349.55	0.64
	20	58.46	58.12	57.84	58.14	780	782	784	782.00	670	671	673	671.33	17189.16	0.65
	20	65.46	65.84	65.9	65.73	805	804	806	805.00	716	715	714	715.00	15203.52	0.64
	20	72.96	72.75	72.96	72.89	820	821	825	822.00	746	748	752	748.67	13710.77	0.64
	15	64.43	64.87	64.84	64.71	839	838	840	839.00	789	788	790	789.00	11582.37	0.66
	10	56.53	57.93	57.18	57.21	851	855	860	855.33	822	827	832	827.00	8733.78	0.66
	10	67.21	66.81	68.62	67.55	857.5	866	862	861.83	837	845	842	841.33	7397.68	0.65
	10	93.53	92.81	95.53	93.96	872	876	873	873.67	860	865	863	862.67	5318.29	0.64
	10	143.93	146.12	146.84	145.63	874.5	878.5	874	875.67	870	874	870	871.33	3431.22	0.66



รูปที่ ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_d กับค่า Reynold's Number จากการทดสอบ

ค.4 เครื่องเป่าลม (blower) มีกำลังไฟสูงสุด 600 W ปรับค่ากำลังไฟโดยใช้ Variac ปรับค่าแรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม มีการนำ orifice plate มาใช้วัดค่าอัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องเป่าลม มีรายละเอียดดังนี้

นำชุด orifice plate ไปทดสอบกับชุดการทดลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ของการปรับแรงดันไฟฟ้าและความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้ง โดยทำการติดตั้งที่ทางเข้าอากาศก่อนที่จะเข้าเครื่องเป่าลม

ทดสอบปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม วัดค่าผลต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer คำนวณหาค่าความเร็วที่ตำแหน่ง orifice plate ใช้กฎการอนุรักษ์มวลคำนวณหาค่าความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้งที่ต้องการ ดังข้อมูลในตารางที่ ค.9

การวัดความเร็วจะทำการวัดที่ก่อนทางเข้าเครื่องเป่าลม โดยพิจารณาผลกระทบของทางเข้า (entrance effect) พิจารณาการไหลในท่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นระยะที่ไม่มีผลกระทบเนื่องจากทางเข้ามีค่าเป็น $\frac{L_e}{d} \approx 4.4Re_d^{1/6}$ (White, 1999) จากความเร็วอากาศออกแบบที่สูงสุดมีค่า Reynolds-Number $\sim 10^5$ จะได้ $L_e/d \sim 30$ ดังนั้นจึงติดตั้งเครื่องมือวัด (orifice และ U-tube manometer) ห่างจากทางเข้าเป็นระยะ 120 cm หรือ $L_e/d \sim 41.24$

ผลการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง ได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก เมื่อปรับเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม ผลต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer ในช่วงแรกมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าถึงประมาณ 30 V. จึงเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน และมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer กับความเร็วอากาศเฉลี่ยในท่ออบแห้งพบว่าในช่วงที่ผลต่างความสูงของระดับน้ำเพิ่มขึ้นในช่วงแรกความเร็วอากาศเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มลดลงเมื่อผลต่างความสูงของระดับน้ำมีค่ามากขึ้น แสดงดังรูปที่ ก.11 และ ก.12

การคำนวณความเร็วอากาศที่ผ่านแผ่น orifice plate

จากความสัมพันธ์ของความเร็วภายในท่ออบแห้งกับตำแหน่ง orifice plate ดังที่กล่าวข้างต้น

$$\bar{V}_{orifice} = \frac{(\rho D^2)_{drying\ tube}}{(\rho D^2)_{orifice}} \bar{V}_{drying\ tube} = \frac{1.127 \times 44.9^2}{1.165 \times 20^2} \times \bar{V}_{drying\ tube} = 4.8756 \bar{V}_{drying\ tube}$$

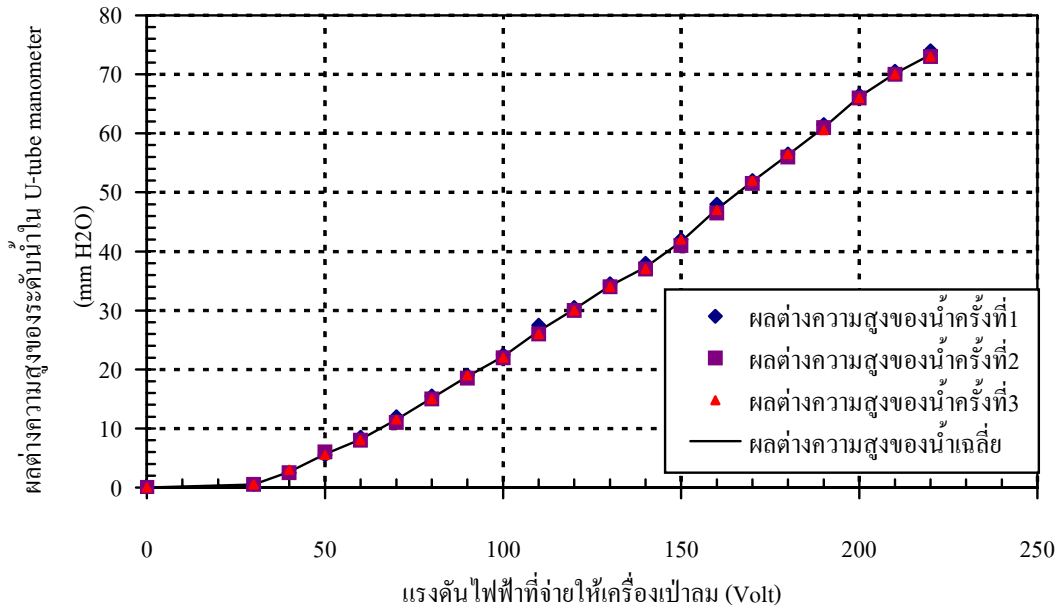
$$\text{หรือ } \bar{V}_{drying\ tube} = 0.2051 \bar{V}_{orifice}$$

ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วทั้งสองตำแหน่งในรูปของสูงหัวที่วัดได้จาก U-tube manometer เป็น

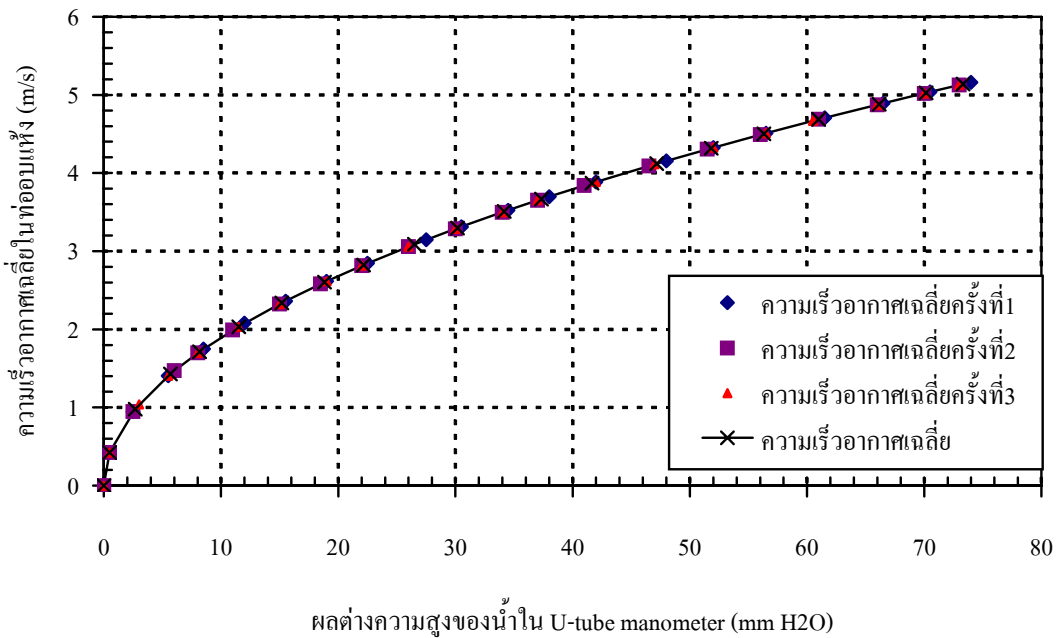
$$\bar{V}_{drying\ tube} = 0.2051 C_d \varepsilon \sqrt{\frac{2\Delta P/\rho}{(1-\beta^4)}} = 0.2051 C_d \varepsilon \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1000(1-\beta^4)}}$$

ตารางที่ ก. 9 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม, ผลต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer, ความเร็วอากาศที่ตำแหน่งคอคออดแผ่น orifice plate และความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้ง

แรงดัน ไฟฟ้า ที่จ่ายให้เครื่อง เป่าลม (Volt)	ผลต่างความสูงของระดับน้ำ (mm H ₂ O)				\bar{V}_{avg1} ที่ orifice plate (m/s)			\bar{V}_{avg2} ในท่ออบแห้ง $\bar{V}_{avg2} = 0.2051 \bar{V}_{avg1}$ (m/s)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	1	2	3	
0	0	0	0	0.0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
30	0.5	0.5	0.5	0.5	2.07	2.07	2.07	0.42	0.42	0.42	0.42
40	2.5	2.5	3	2.7	4.62	4.62	5.07	0.95	0.95	1.04	0.98
50	5.5	6	5.5	5.7	6.86	7.16	6.86	1.41	1.47	1.41	1.43
60	8.5	8	8	8.2	8.53	8.27	8.27	1.75	1.70	1.70	1.71
70	12	11	11.5	11.5	10.13	9.70	9.92	2.08	1.99	2.03	2.03
80	15.5	15	15	15.2	11.52	11.33	11.33	2.36	2.32	2.32	2.34
90	19	18.5	19	18.8	12.75	12.58	12.75	2.61	2.58	2.61	2.60
100	22.5	22	22	22.2	13.87	13.72	13.72	2.85	2.81	2.81	2.82
110	27.5	26	26	26.5	15.34	14.91	14.91	3.15	3.06	3.06	3.09
120	30.5	30	30	30.2	16.15	16.02	16.02	3.31	3.29	3.29	3.29
130	34.5	34	34	34.2	17.18	17.05	17.05	3.52	3.50	3.50	3.51
140	38	37	37	37.3	18.03	17.79	17.79	3.70	3.65	3.65	3.67
150	42	41	42	41.7	18.95	18.73	18.95	3.89	3.84	3.89	3.87
160	48	46.5	47	47.2	20.26	19.94	20.05	4.16	4.09	4.11	4.12
170	52	51.5	52	51.8	21.09	20.99	21.09	4.33	4.30	4.33	4.32
180	56.5	56	56.5	56.3	21.98	21.89	21.98	4.51	4.49	4.51	4.50
190	61.5	61	60.5	61.0	22.94	22.84	22.75	4.70	4.69	4.67	4.69
200	66.5	66	66	66.2	23.85	23.76	23.76	4.89	4.87	4.87	4.88
210	70.5	70	70	70.2	24.56	24.47	24.47	5.04	5.02	5.02	5.02
220	74	73	73	73.3	25.16	24.99	24.99	5.16	5.13	5.13	5.14



รูปที่ ค.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมกับผลต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer



รูปที่ ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer กับความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้ง

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก

ตารางที่ ง.1 แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง สภาพอากาศแวดล้อม และสภาพอากาศอบแห้ง กรณีการอบแห้งทั้งหมด

อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (°C)	สภาวะการอบแห้ง		วันที่ทำการทดลอง	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม (%)
	ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น (% w.b.)	ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			
45	25.89	1	6 เมษายน 2551	26	-
	26.05	2	5 เมษายน 2551	30	-
	25.92	3	8 พฤษภาคม 2551	29	72
	26.25	4	1 เมษายน 2551	32	-
60	22.92	2	22 มีนาคม 2551	30	-
	25.04	2	25 เมษายน 2551	30.5	-
	25.97	1	23 เมษายน 2551	31	-
	26.05	2	9 พฤษภาคม 2551	30	80
	25.59	3	7 พฤษภาคม 2551	28	75
	25.74	4	10 พฤษภาคม 2551	32	55
90	25.62	1	8 เมษายน 2551	31	68
	25.42	2	8 เมษายน 2551	28	70
	25.95	3	7 เมษายน 2551	29	65
	25.65	4	7 เมษายน 2551	30	70

ตารางที่ ง.1 แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง สภาพอากาศแวดล้อม และสภาพอากาศอบแห้ง กรณีการอบแห้งทั้งหมด (ต่อ)

สภาวะการอบแห้ง			วันที่ทำการทดลอง	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม (%)
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (°C)	ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น (% w.b.)	ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			
120	21.4	2	7 พฤษภาคม 2551	32	65
	21.91	2	2 พฤษภาคม 2551	31.5	67
	21.81	4	8 พฤษภาคม 2551	32	62
	23.28	4	2 พฤษภาคม 2551	28	75
	26.06	1	22 พฤษภาคม 2551	28	80
	25.73	2	22 พฤษภาคม 2551	31	72.5
	25.72	3	21 พฤษภาคม 2551	31	68
	26.45	4	21 พฤษภาคม 2551	30.8	62.9
120 (ข้าวเปลือกสด)	23.23	1	22 พฤษภาคม 2551	28	80
	22.88	2	23 พฤษภาคม 2551	31	72.5
	22.89	3	21 พฤษภาคม 2551	31	68
	23.23	4	21 พฤษภาคม 2551	30.9	62.9

ตารางที่ ง.2 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
0	0.00	26.03	25.75	25.89	26.20	25.90	26.05	25.81	26.04	25.92	26.01	26.49	26.25
2	0.20	25.35	25.37	25.36	25.31	25.53	25.42	25.85	25.38	25.61	25.46	25.53	25.50
4	0.41	25.75	25.14	25.45	25.60	25.51	25.56	25.04	25.19	25.12	25.00	25.04	25.02
6	0.61	25.54	25.00	25.27	25.19	25.48	25.33	24.80	24.79	24.79	25.10	24.52	24.81
8	0.82	24.83	24.62	24.72	25.29	24.91	25.10	24.78	24.88	24.83	24.40	24.75	24.58
10	1.02	24.72	24.64	24.68	24.97	25.00	24.98	24.83	24.63	24.73	24.30	23.98	24.14
12	1.23	25.00	24.39	24.69	24.37	25.04	24.70	24.48	23.95	24.21	23.91	23.82	23.86
14	1.43	24.56	24.80	24.68	23.50	23.38	23.44	23.56	23.89	23.73	23.94	23.70	23.82
16	1.64	24.67	24.35	24.51	23.66	23.91	23.78	23.00	23.20	23.10	23.33	22.80	23.07
18	1.84	24.49	23.85	24.17	23.73	23.40	23.56	23.07	23.18	23.12	23.06	22.58	22.82
20	2.05	24.50	24.65	24.58	23.47	23.34	23.40	23.31	22.85	23.08	22.96	22.70	22.83
25	2.56	24.13	24.01	24.07	22.99	22.61	22.80	22.40	22.69	22.55	22.42	22.32	22.37
30	3.07	23.94	23.54	23.74	22.75	22.63	22.69	21.93	21.98	21.95	21.90	21.85	21.87

ตารางที่ ง.2 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
35	3.59	23.76	22.97	23.36	22.51	22.30	22.40	21.94	21.66	21.80	21.43	21.38	21.40
40	4.10	22.73	22.93	22.83	22.00	21.85	21.93	21.34	21.25	21.29	20.69	20.80	20.75
45	4.61	22.77	22.69	22.73	21.60	21.17	21.38	20.88	20.72	20.80	20.44	20.16	20.30
50	5.12	22.60	22.44	22.52	21.28	21.23	21.26	20.40	20.25	20.33	20.07	19.87	19.97
55	5.64	21.96	22.17	22.06	20.43	21.19	20.81	20.14	20.40	20.27	19.27	19.37	19.32
60	6.15	22.26	21.66	21.96	20.13	20.48	20.30	19.69	19.42	19.55	18.65	18.78	18.71
65	6.66	21.94	21.88	21.91	20.66	19.74	20.20	19.60	18.88	19.24	18.72	18.47	18.60
70	7.17	21.32	21.63	21.48	19.94	20.15	20.05	19.15	19.05	19.10	18.26	18.18	18.22
75	7.69	21.28	21.24	21.26	19.74	19.90	19.82	18.05	18.60	18.32	17.70	17.43	17.57
80	8.20	21.17	21.00	21.08	19.68	19.70	19.69	18.11	18.03	18.07	17.27	17.58	17.43
85	8.71	21.02	20.90	20.96	19.27	19.22	19.24	17.91	18.04	17.97	17.36	16.94	17.15
90	9.22	20.33	20.49	20.41	18.73	18.78	18.75	17.74	17.65	17.69	16.75	16.84	16.80
95	9.73	20.47	20.39	20.43	18.56	18.50	18.53	17.70	17.32	17.51	16.64	16.47	16.56

ตารางที่ ง.2 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
100	10.25	20.36	20.90	20.63	17.88	18.29	18.08	16.99	17.05	17.02	16.24	15.90	16.07
105	10.76	19.85	19.71	19.78	17.70	17.85	17.78	16.67	16.69	16.68	15.83	15.73	15.78
110	11.27	20.13	19.83	19.98	18.01	17.62	17.82	16.09	16.01	16.05	15.66	15.63	15.64
115	11.78	19.64	19.34	19.49	17.50	17.68	17.59	16.23	16.09	16.16	15.23	15.09	15.16
120	12.30	19.24	18.99	19.11	17.16	17.44	17.30	15.76	15.69	15.73	14.99	15.07	15.03
130	13.32	19.02	18.75	18.88	16.74	16.91	16.82	15.12	15.47	15.30	14.32	14.03	14.18
140	14.35	18.37	18.47	18.42	16.10	16.39	16.25	15.02	14.78	14.90	14.16	13.93	14.05
150	15.37	18.12	17.62	17.87	15.85	15.62	15.74	14.71	14.49	14.60	13.62	13.73	13.67
160	16.39	17.65	17.60	17.63	15.25	15.20	15.23	14.35	14.24	14.30	13.47	13.36	13.42
170	17.42	17.40	17.17	17.29	14.92	15.11	15.02	13.89	14.10	14.00	13.25	12.99	13.12
180	18.44	17.22	16.69	16.96	14.47	14.55	14.51	-	-	-	12.89	12.70	12.80
190	19.47	16.69	16.22	16.45	14.01	14.20	14.11	-	-	-	-	-	-
200	20.49	16.18	16.58	16.38	13.85	13.79	13.82	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ๓.2 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
210	21.52	15.88	16.03	15.96	-	-	-	-	-	-	-	-	-
220	22.54	15.92	15.54	15.73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230	23.57	15.05	15.48	15.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
240	24.59	15.10	15.00	15.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	25.62	14.98	14.64	14.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-
260	26.64	14.31	14.45	14.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-
270	27.67	13.80	14.20	14.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
0	0.00	26.06	25.89	25.97	26.04	26.07	26.05	25.59	25.60	25.59	25.39	26.10	25.74
2	0.20	25.52	25.36	25.44	25.39	24.65	25.02	25.22	25.07	25.15	25.00	24.79	24.89
4	0.41	25.12	25.27	25.19	25.00	24.42	24.71	24.65	24.77	24.71	24.45	24.03	24.24
6	0.61	25.00	24.69	24.85	24.84	24.72	24.78	23.78	24.16	23.97	23.79	23.59	23.69
8	0.82	24.64	24.68	24.66	24.73	24.32	24.52	23.63	24.37	24.00	23.90	23.14	23.52
10	1.02	24.45	24.65	24.55	24.01	23.88	23.94	23.82	23.57	23.70	23.45	23.10	23.28
12	1.23	24.51	23.96	24.24	-	24.03	24.03	23.78	23.48	23.63	22.81	22.73	22.77
14	1.43	24.29	23.91	24.10	23.57	23.44	23.50	23.45	23.11	23.28	22.83	22.42	22.62
16	1.64	24.17	24.21	24.19	23.64	23.45	23.55	23.00	23.17	23.08	22.50	22.29	22.40
18	1.84	24.26	23.40	23.83	23.10	23.35	23.23	22.64	22.85	22.75	21.92	21.97	21.95
20	2.05	23.43	23.68	23.56	23.36	23.00	23.18	22.75	22.74	22.74	21.77	21.41	21.59
25	2.56	23.05	23.01	23.03	22.67	22.41	22.54	22.05	22.19	22.12	20.76	21.17	20.96
30	3.07	22.94	22.35	22.64	22.07	22.33	22.20	21.60	21.40	21.50	20.41	20.47	20.44

ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
35	3.59	22.32	22.34	22.33	21.64	22.01	21.82	20.84	21.07	20.95	19.90	20.06	19.98
40	4.10	22.02	21.87	21.95	21.62	21.39	21.50	20.69	20.75	20.72	19.47	19.58	19.53
45	4.61	21.84	21.63	21.73	21.09	20.83	20.96	20.33	20.42	20.38	18.71	18.57	18.64
50	5.12	21.34	21.73	21.53	21.00	19.21	20.10	20.18	19.76	19.97	18.36	18.26	18.31
55	5.64	21.18	20.80	20.99	20.25	20.49	20.37	19.50	19.57	19.54	17.72	17.78	17.75
60	6.15	20.49	20.57	20.53	19.80	19.15	19.48	18.94	19.10	19.02	17.46	17.06	17.26
65	6.66	20.46	20.43	20.44	19.52	19.40	19.46	18.98	18.33	18.65	16.93	16.63	16.78
70	7.17	20.40	20.26	20.33	19.29	19.01	19.15	18.18	18.24	18.21	16.08	16.15	16.11
75	7.69	20.19	19.96	20.08	18.30	18.79	18.54	17.80	17.86	17.83	15.88	15.58	15.73
80	8.20	19.70	19.85	19.78	17.78	17.21	17.49	17.79	17.44	17.62	15.50	15.45	15.48
85	8.71	19.19	19.37	19.28	17.49	17.30	17.39	17.26	17.07	17.16	14.86	14.90	14.88
90	9.22	19.18	19.29	19.24	17.58	16.49	17.03	16.31	16.54	16.43	14.73	14.47	14.60
95	9.73	18.77	18.55	18.66	16.82	16.90	16.86	16.41	16.14	16.28	14.26	14.02	14.14

ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
100	10.25	18.40	18.32	18.36	16.90	16.51	16.71	15.90	16.19	16.04	14.03	13.97	14.00
105	10.76	18.30	18.16	18.23	16.91	16.47	16.69	15.37	15.60	15.49	13.52	13.71	13.62
110	11.27	17.82	17.84	17.83	16.37	16.56	16.47	15.48	15.27	15.38	13.20	13.40	13.30
115	11.78	17.46	17.58	17.52	15.94	16.26	16.10	15.15	15.33	15.24	13.02	13.05	13.04
120	12.30	17.35	17.46	17.40	16.28	15.80	16.04	14.87	14.76	14.81	12.77	12.75	12.76
130	13.32	16.85	17.10	16.97	15.08	-	15.08	14.92	14.49	14.71	-	-	-
140	14.35	16.61	16.44	16.53	15.03	14.98	15.01	14.29	14.03	14.16	-	-	-
150	15.37	16.39	16.22	16.30	14.45	14.56	14.51	-	-	-	-	-	-
160	16.39	16.02	16.00	16.01	14.21	14.28	14.25	-	-	-	-	-	-
170	17.42	15.43	15.43	15.43	14.03	13.96	14.00	-	-	-	-	-	-
180	18.44	15.31	15.18	15.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
190	19.47	15.11	15.37	15.24	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	20.49	15.02	14.88	14.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
210	21.52	14.68	14.51	14.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
220	22.54	14.30	14.20	14.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230	23.57	13.98	13.81	13.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
ข้าวเปลือก (min)		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
0	0.00	25.59	25.65	25.62	25.46	25.39	25.42	25.97	25.94	25.95	25.95	25.35	25.65
2	0.20	25.13	24.97	25.05	24.93	24.93	24.93	25.11	24.39	24.75	24.76	24.47	24.62
4	0.41	25.24	24.41	24.83	24.60	24.62	24.61	24.79	24.56	24.68	23.92	23.88	23.90
6	0.61	24.30	23.56	23.93	23.99	23.95	23.97	23.96	23.93	23.95	23.77	23.41	23.59
8	0.82	24.09	24.30	24.19	23.33	23.74	23.53	23.84	23.50	23.67	22.98	23.19	23.08
10	1.02	23.73	23.54	23.64	23.77	23.07	23.42	23.74	23.55	23.64	23.01	22.54	22.78
12	1.23	23.65	23.01	23.33	23.19	22.98	23.09	23.14	22.90	23.02	22.81	22.70	22.76
14	1.43	23.17	22.94	23.05	22.96	22.76	22.86	22.93	22.27	22.60	22.66	22.20	22.43
16	1.64	22.92	23.15	23.04	23.18	22.48	22.83	22.26	22.39	22.32	21.91	21.63	21.77
18	1.84	22.93	22.90	22.92	22.43	22.16	22.30	22.16	21.84	22.00	21.62	21.33	21.47
20	2.05	22.64	22.33	22.48	22.14	21.79	21.97	22.15	21.72	21.93	20.95	21.14	21.05
25	2.56	22.52	22.04	22.28	21.65	21.72	21.68	21.24	21.54	21.39	20.41	20.30	20.35
30	3.07	21.55	21.69	21.62	20.93	20.93	20.93	20.73	20.52	20.62	19.84	19.67	19.75

ตารางที่ ๓.4 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
35	3.59	20.89	20.73	20.81	20.57	19.97	20.27	20.45	20.09	20.27	19.19	19.49	19.34
40	4.10	20.54	20.47	20.51	19.91	19.97	19.94	19.61	19.58	19.60	18.81	18.33	18.57
45	4.61	20.47	20.39	20.43	19.28	19.22	19.25	19.10	18.97	19.04	18.08	17.85	17.97
50	5.12	19.97	20.05	20.01	18.59	19.13	18.86	18.73	18.35	18.54	17.53	17.07	17.30
55	5.64	19.79	19.68	19.74	18.54	18.34	18.44	17.98	17.90	17.94	16.90	16.63	16.76
60	6.15	19.21	18.80	19.01	18.19	17.79	17.99	17.26	17.42	17.34	16.33	15.88	16.10
65	6.66	18.93	18.62	18.78	17.90	17.46	17.68	16.87	16.42	16.64	15.72	15.31	15.51
70	7.17	18.36	18.33	18.35	17.24	17.25	17.24	16.12	16.37	16.24	15.23	14.78	15.01
75	7.69	18.39	17.95	18.17	16.54	16.52	16.53	15.80	15.57	15.68	14.36	14.53	14.44
80	8.20	17.78	17.49	17.64	16.62	16.06	16.34	15.54	15.19	15.37	14.09	14.19	14.14
85	8.71	17.44	17.26	17.35	16.06	16.36	16.21	14.62	15.27	14.94	13.69	13.64	13.66
90	9.22	17.09	16.84	16.97	15.48	15.36	15.42	14.41	14.24	14.33	13.49	13.32	13.40
95	9.73	16.83	16.69	16.76	15.43	15.70	15.56	14.51	14.15	14.33	-	-	-

ตารางที่ ง.4 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
100	10.25	16.59	16.34	16.47	15.27	15.28	15.28	14.07	13.74	13.90	-	-	-
105	10.76	15.98	16.10	16.04	14.76	14.73	14.74	13.66	13.40	13.53	-	-	-
110	11.27	15.61	15.86	15.73	14.62	14.39	14.51	13.25	12.83	13.04	-	-	-
115	11.78	15.45	15.75	15.60	14.29	14.31	14.30	-	-	-	-	-	-
120	12.30	15.07	15.10	15.09	13.80	13.87	13.83	-	-	-	-	-	-
130	13.32	14.57	14.73	14.65	13.73	13.41	13.57	-	-	-	-	-	-
140	14.35	14.38	14.01	14.20	13.39	13.61	13.50	-	-	-	-	-	-
150	15.37	14.10	13.80	13.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 5.5 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
ข้าวเปลือก (min)		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
0	0.00	26.24	25.88	26.06	25.88	25.59	25.73	26.08	25.36	25.72	26.96	25.93	26.45
2	0.20	25.47	25.14	25.31	24.81	24.91	24.86	24.44	24.48	24.46	24.39	25.05	24.72
4	0.41	25.16	24.94	25.05	24.42	24.43	24.42	24.13	23.95	24.04	24.01	25.04	24.53
6	0.61	24.33	24.50	24.42	24.05	24.08	24.07	23.68	23.63	23.66	23.09	24.58	23.83
8	0.82	24.52	24.17	24.35	23.62	23.62	23.62	23.32	23.31	23.31	22.60	22.72	22.66
10	1.02	23.66	23.99	23.83	23.49	23.26	23.37	22.88	23.18	23.03	22.24	22.55	22.39
12	1.23	23.24	23.21	23.22	22.79	22.59	22.69	22.54	22.77	22.65	22.12	21.66	21.89
14	1.43	22.96	23.06	23.01	22.29	22.47	22.38	22.38	22.29	22.34	21.05	21.28	21.16
16	1.64	22.86	22.47	22.66	22.24	22.25	22.24	21.95	21.88	21.92	21.55	20.82	21.19
18	1.84	22.36	22.67	22.52	21.99	21.95	21.97	21.35	21.41	21.38	20.46	20.54	20.50
20	2.05	22.64	22.71	22.67	21.37	21.52	21.44	20.79	21.22	21.01	20.70	20.25	20.48
25	2.56	22.09	22.21	22.15	20.74	20.85	20.80	20.33	20.35	20.34	19.48	20.03	19.75
30	3.07	21.36	21.33	21.35	20.19	20.05	20.12	19.54	19.40	19.47	18.46	18.58	18.52

ตารางที่ ๓.5 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
35	3.59	21.24	20.94	21.09	19.53	19.34	19.44	18.86	18.66	18.76	17.94	17.44	17.69
40	4.10	20.69	20.43	20.56	18.98	19.14	19.06	17.90	18.17	18.03	16.92	17.01	16.97
45	4.61	20.25	19.80	20.03	18.33	18.50	18.42	17.18	17.51	17.35	16.21	16.00	16.11
50	5.12	19.58	19.66	19.62	17.65	17.98	17.81	16.55	16.60	16.57	14.71	15.62	15.16
55	5.64	19.23	19.42	19.32	17.06	17.08	17.07	15.69	15.78	15.74	14.33	14.50	14.42
60	6.15	18.68	18.78	18.73	16.47	16.65	16.56	14.96	15.14	15.05	13.93	13.69	13.81
65	6.66	18.66	18.31	18.49	16.01	16.06	16.03	14.86	14.30	14.58	-	-	-
70	7.17	18.24	17.96	18.10	15.62	15.65	15.64	14.04	13.8	13.92	-	-	-
75	7.69	17.82	17.61	17.72	15.23	14.96	15.09	-	-	-	-	-	-
80	8.20	17.32	17.30	17.31	14.94	14.60	14.77	-	-	-	-	-	-
85	8.71	16.79	16.65	16.72	14.03	14.26	14.15	-	-	-	-	-	-
90	9.22	16.25	16.23	16.24	13.97	13.96	13.96	-	-	-	-	-	-
95	9.73	15.80	16.03	15.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ๓.5 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
100	10.25	15.81	15.81	15.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-
105	10.76	15.45	15.42	15.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110	11.27	15.09	15.27	15.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
115	11.78	14.80	15.00	14.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	12.30	14.77	14.60	14.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-
130	13.32	13.75	13.98	13.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
140	14.35	13.40	13.31	13.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ง.6 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ใช้ข้าวเปลือกสดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b. กรณีความเร็วอากาศ
อบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
0	0.00	23.42	23.04	23.23	22.96	22.80	22.88	23.25	22.52	22.89	23.34	23.11	23.23
2	0.20	23.04	22.98	23.01	22.99	22.76	22.88	22.76	22.57	22.66	22.50	22.41	22.46
4	0.41	23.26	22.87	23.07	22.80	22.35	22.58	22.61	22.13	22.37	22.83	22.59	22.71
6	0.61	23.22	22.64	22.93	22.50	22.03	22.26	22.05	21.98	22.01	22.32	22.40	22.36
8	0.82	22.99	22.76	22.87	22.46	22.34	22.40	21.97	21.68	21.83	21.22	21.47	21.34
10	1.02	23.00	22.78	22.89	22.05	22.08	22.07	21.48	21.01	21.25	21.29	21.02	21.15
12	1.23	22.56	22.69	22.63	22.05	21.49	21.77	21.49	20.95	21.22	21.43	20.94	21.18
14	1.43	22.25	22.04	22.14	21.52	21.18	21.35	20.93	20.95	20.94	21.19	20.69	20.94
16	1.64	22.45	22.24	22.35	21.43	21.09	21.26	20.52	20.85	20.69	20.66	20.54	20.60
18	1.84	22.05	21.58	21.82	21.26	20.98	21.12	20.97	20.81	20.89	20.62	20.65	20.63
20	2.05	21.20	21.14	21.17	20.97	20.48	20.73	20.68	21.08	20.88	20.43	20.42	20.43
25	2.56	21.06	20.71	20.88	20.42	20.31	20.37	20.41	20.60	20.51	20.12	19.74	19.93

ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ใช้ข้าวเปลือกสดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
30	3.07	20.90	20.63	20.77	20.16	20.21	20.18	19.78	19.91	19.85	19.49	19.05	19.27
35	3.59	20.27	19.89	20.08	19.88	19.38	19.63	19.52	19.59	19.56	19.04	19.11	19.07
40	4.10	20.39	19.79	20.09	19.32	19.47	19.40	19.05	18.81	18.93	18.18	18.74	18.46
45	4.61	20.00	19.82	19.91	19.13	19.14	19.13	19.11	19.00	19.05	18.21	18.30	18.26
50	5.12	19.71	19.79	19.75	18.75	18.58	18.66	18.38	18.43	18.41	17.27	17.30	17.28
55	5.64	19.66	19.18	19.42	18.49	18.51	18.50	18.22	18.19	18.21	17.55	17.11	17.33
60	6.15	19.11	19.30	19.20	18.30	18.31	18.30	17.87	18.09	17.98	16.40	16.52	16.46
65	6.66	19.06	18.90	18.98	18.03	17.85	17.94	17.38	17.26	17.32	15.97	16.00	15.99
70	7.17	18.92	18.68	18.80	17.76	17.65	17.70	17.30	17.52	17.41	15.77	15.80	15.78
75	7.69	18.86	18.74	18.80	17.15	17.19	17.17	16.88	16.59	16.73	15.17	15.32	15.24
80	8.20	18.30	18.40	18.35	16.94	17.18	17.06	16.50	16.65	16.57	15.21	15.24	15.22
85	8.71	18.34	17.81	18.07	16.87	16.69	16.78	16.12	15.76	15.94	14.76	14.50	14.63

ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ใช้ข้าวเปลือกสดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
90	9.22	18.17	17.98	18.08	16.61	16.57	16.59	15.09	15.29	15.19	14.19	14.36	14.28
95	9.73	17.99	18.08	18.04	16.14	16.25	16.19	14.98	14.93	14.96	-	-	-
100	10.25	17.85	17.60	17.72	16.10	16.33	16.21	14.76	14.85	14.81	-	-	-
105	10.76	17.54	17.50	17.52	15.71	15.73	15.72	14.62	14.67	14.64	-	-	-
110	11.27	17.07	17.19	17.13	15.84	15.84	15.84	14.04	14.24	14.14	-	-	-
115	11.78	17.26	17.11	17.19	15.43	15.38	15.41	-	-	-	-	-	-
120	12.30	17.02	16.83	16.93	15.38	15.04	15.21	-	-	-	-	-	-
130	13.32	16.51	16.90	16.70	14.81	15.41	15.11	-	-	-	-	-	-
140	14.35	16.04	16.18	16.11	14.41	14.29	14.35	-	-	-	-	-	-
150	15.37	15.81	15.96	15.89	13.87	13.57	13.72	-	-	-	-	-	-
160	16.39	15.20	15.41	15.30	13.48	13.65	13.57	-	-	-	-	-	-
170	17.42	15.22	14.72	14.97	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ง.6 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ใช้ข้าวเปลือกสดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)											
		ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)			ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	1			2			3			4		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
180	18.44	14.69	14.61	14.65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
190	19.47	14.43	14.24	14.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	20.49	14.31	13.98	14.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
210	21.52	13.80	14.15	13.97	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 7.7 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความเร็วอากาศ
 อบแห้ง 2 m/s ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 22.92% w.b.

ระยะเวลาเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)
เวลารวมทั้งหมด	เวลาอบแห้งจริง	
0	0.00	22.92
2	0.20	22.91
4	0.41	22.59
6	0.61	22.19
8	0.82	21.77
10	1.02	22.00
12	1.23	21.35
14	1.43	21.52
16	1.64	20.80
18	1.84	20.72
20	2.05	20.30
22	2.25	20.68
24	2.46	20.13
26	2.66	20.22
28	2.87	19.80
30	3.07	19.97
32	3.28	19.56
34	3.48	19.57
36	3.69	19.32
38	3.89	19.06
40	4.10	18.94
42	4.30	18.45
44	4.51	18.41
46	4.71	18.55
48	4.92	18.04
50	5.12	17.95

ตารางที่ ง.7 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความเร็วอากาศ
อบแห้ง 2 m/s ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 22.92% w.b. (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)
เวลารวมทั้งหมด	เวลาอบแห้งจริง	
52	5.33	17.90
54	5.53	17.25
56	5.74	17.54
58	5.94	17.32
60	6.15	17.16
62	6.35	17.10
64	6.56	17.07
66	6.76	16.83
68	6.97	16.49
70	7.17	16.15
72	7.38	16.33
74	7.58	15.99
76	7.79	15.84
78	7.99	15.81
80	8.20	15.61
82	8.40	15.34
84	8.61	15.30
86	8.81	15.42
88	9.02	14.94
90	9.22	14.71
92	9.43	15.03
94	9.63	14.88
96	9.84	14.66
98	10.04	14.74
100	10.25	14.58
102	10.45	14.74

ตารางที่ ง.7 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความเร็วอากาศ
อบแห้ง 2 m/s ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 22.92% w.b. (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)
เวลารวมทั้งหมด	เวลาอบแห้งจริง	
104	10.66	14.18
106	10.86	13.97
108	11.07	13.90
110	11.27	14.00
112	11.48	13.58
114	11.68	13.54
116	11.89	13.61
118	12.09	13.73
120	12.30	13.53
122	12.50	13.24
124	12.71	13.23
126	12.91	13.19
128	13.12	12.93
130	13.32	12.89
132	13.53	12.64
134	13.73	12.22
136	13.94	12.77
138	14.14	12.59
140	14.35	12.42

ตารางที่ ง.8 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความเร็วอากาศ
 อบแห้ง 2 m/s ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 25.04 และ 26.05% w.b.

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)					
		ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก			ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	25.04% w.b.			26.05% w.b.		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
0	0.00	25.00	25.08	25.04	26.04	26.07	26.05
2	0.20	24.26	24.50	24.38	25.39	24.65	25.02
4	0.41	24.22	24.18	24.20	25.00	24.42	24.71
6	0.61	24.22	23.89	24.05	24.84	24.72	24.78
8	0.82	23.58	23.88	23.73	24.73	24.32	24.52
10	1.02	23.86	23.29	23.57	24.01	23.88	23.94
12	1.23	23.17	22.91	23.04	-	24.03	24.03
14	1.43	22.73	22.83	22.78	23.57	23.44	23.50
16	1.64	22.66	22.54	22.60	23.64	23.45	23.55
18	1.84	22.59	22.32	22.45	23.10	23.35	23.23
20	2.05	22.00	21.70	21.85	23.36	23.00	23.18
25	2.56	21.44	21.50	21.47	22.67	22.41	22.54
30	3.07	21.58	21.25	21.42	22.07	22.33	22.20
35	3.59	20.74	21.06	20.90	21.64	22.01	21.82
40	4.10	20.41	20.56	20.49	21.62	21.39	21.50
45	4.61	20.64	20.51	20.57	21.09	20.83	20.96
50	5.12	19.94	19.97	19.95	21.00	19.21	20.10
55	5.64	19.86	19.14	19.50	20.25	20.49	20.37
60	6.15	19.70	19.26	19.48	19.80	19.15	19.48
65	6.66	18.79	18.98	18.89	19.52	19.40	19.46
70	7.17	18.51	18.39	18.45	19.29	19.01	19.15
75	7.69	18.17	18.04	18.10	18.30	18.79	18.54

ตารางที่ ง.8 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความเร็วอากาศ
อบแห้ง 2 m/s ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 25.04 และ 26.05% w.b. (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)					
		ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก			ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลา อบแห้งจริง	25.04% w.b.			26.05% w.b.		
		ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ค่าเฉลี่ย
80	8.20	17.42	18.08	17.75	17.78	17.21	17.49
85	8.71	17.79	17.50	17.64	17.49	17.30	17.39
90	9.22	17.40	17.19	17.30	17.58	16.49	17.03
95	9.73	16.74	16.95	16.84	16.82	16.90	16.86
100	10.25	16.54	16.47	16.51	16.90	16.51	16.71
105	10.76	16.19	16.26	16.23	16.91	16.47	16.69
110	11.27	16.03	16.16	16.09	16.37	16.56	16.47
115	11.78	16.30	16.42	16.36	15.94	16.26	16.10
120	12.30	16.11	16.06	16.09	16.28	15.80	16.04
130	13.32	15.99	15.60	15.80	15.08	-	15.08
140	14.35	15.17	15.30	15.23	15.03	14.98	15.01
150	15.37	13.93	14.15	14.04	14.45	14.56	14.51
160	16.39	13.48	13.61	13.55	14.21	14.28	14.25
170	17.42	13.46	13.33	13.40	14.03	13.96	14.00
180	18.44	12.79	13.24	13.02	-	-	-

ตารางที่ ง.9 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศ
อบแห้ง 2 m/s กรณีความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ

ระยะเวลาเก็บ ตัวอย่างข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)								
		ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก			ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก			ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลาอบ แห้งจริง	21.4% w.b.			21.91% w.b.			25.73% w.b.		
		ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย
0	0.00	21.59	21.21	21.40	22.00	21.82	21.91	25.88	25.59	25.73
2	0.20	20.89	20.42	20.65	21.27	21.13	21.20	24.81	24.91	24.86
4	0.41	19.94	20.25	20.10	21.00	20.62	20.81	24.42	24.43	24.42
6	0.61	19.45	19.79	19.62	19.97	20.41	20.19	24.05	24.08	24.07
8	0.82	19.11	18.81	18.96	19.59	19.50	19.54	23.62	23.62	23.62
10	1.02	18.57	18.52	18.55	19.54	19.62	19.58	23.49	23.26	23.37
12	1.23	18.17	18.11	18.14	19.10	19.04	19.07	22.79	22.59	22.69
14	1.43	17.48	17.72	17.60	19.16	18.83	18.99	22.29	22.47	22.38
16	1.64	17.56	17.41	17.48	17.62	18.29	17.95	22.24	22.25	22.24
18	1.84	17.54	17.42	17.48	18.22	17.97	18.10	21.99	21.95	21.97
20	2.05	17.04	17.22	17.13	18.12	17.72	17.92	21.37	21.52	21.44
25	2.56	16.35	16.55	16.45	17.29	17.23	17.26	20.74	20.85	20.80
30	3.07	16.19	16.02	16.10	16.95	16.64	16.79	20.19	20.05	20.12
35	3.59	15.40	15.62	15.51	16.30	16.09	16.19	19.53	19.34	19.44
40	4.10	14.93	14.75	14.84	15.99	16.14	16.07	18.98	19.14	19.06
45	4.61	14.63	14.39	14.51	15.63	15.70	15.66	18.33	18.50	18.42
50	5.12	14.10	14.58	14.34	15.36	15.39	15.38	17.65	17.98	17.81
55	5.64	13.99	14.21	14.10	15.03	14.91	14.97	17.06	17.08	17.07
60	6.15	13.85	13.95	13.90	14.64	14.79	14.72	16.47	16.65	16.56
65	6.66	-	-	-	14.55	14.34	14.45	16.01	16.06	16.03
70	7.17	-	-	-	14.18	14.03	14.11	15.62	15.65	15.64
75	7.69	-	-	-	13.91	13.99	13.95	15.23	14.96	15.09

ตารางที่ ง.9 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศ
อบแห้ง 2 m/s กรณีความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บ		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)								
ตัวอย่างข้าวเปลือก		ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก			ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก			ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก		
(min)										
เวลารวม	เวลาอบ	21.4% w.b.			21.91% w.b.			25.73% w.b.		
ทั้งหมด	แห้งจริง	ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย
80	8.20	-	-	-	-	-	-	14.94	14.60	14.77
85	8.71	-	-	-	-	-	-	14.03	14.26	14.15
90	9.22	-	-	-	-	-	-	13.97	13.96	13.96

ตารางที่ ง.10 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศ
อบแห้ง 4 m/s กรณีความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ

ระยะเวลาเก็บ		ความชื้นข้าวเปลือก (% w.b.)								
ตัวอย่างข้าวเปลือก		ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก			ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก			ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก		
(min)										
เวลารวม	เวลาอบ	21.81% w.b.			23.28% w.b.			26.45% w.b.		
ทั้งหมด	แห้งจริง	ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย
0	0.00	21.91	21.70	21.81	23.33	23.22	23.28	26.96	25.93	26.45
2	0.20	20.75	20.57	20.66	22.06	21.85	21.96	24.39	25.05	24.72
4	0.41	20.56	20.04	20.30	21.60	21.49	21.55	24.01	25.04	24.53
6	0.61	19.72	19.46	19.59	19.70	19.89	19.80	23.09	24.58	23.83
8	0.82	19.07	19.23	19.15	19.66	19.42	19.54	22.60	22.72	22.66
10	1.02	18.67	18.88	18.77	18.57	18.55	18.56	22.24	22.55	22.39
12	1.23	18.64	18.20	18.42	18.56	17.90	18.23	22.12	21.66	21.89
14	1.43	17.85	18.02	17.94	17.68	17.78	17.73	21.05	21.28	21.16
16	1.64	17.41	17.38	17.40	17.53	17.54	17.54	21.55	20.82	21.19
18	1.84	17.54	17.05	17.29	17.26	17.15	17.21	20.46	20.54	20.50
20	2.05	17.00	16.85	16.93	16.81	16.80	16.81	20.70	20.25	20.48

ตารางที่ ง.10 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศ
อบแห้ง 4 m/s กรณีความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ (ต่อ)

ระยะเวลาเก็บ ตัวอย่างข้าวเปลือก (min)		ความชื้นข้าวเปลือก (%w.b.)								
		ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก			ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก			ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก		
เวลารวม ทั้งหมด	เวลาอบ แห้งจริง	21.81% w.b.			23.28% w.b.			26.45% w.b.		
		ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย	ตัวอย่าง1	ตัวอย่าง2	ค่าเฉลี่ย
25	2.56	16.27	16.05	16.16	16.49	16.16	16.32	19.48	20.03	19.75
30	3.07	15.94	15.47	15.71	15.56	15.28	15.42	18.46	18.58	18.52
35	3.59	14.65	14.92	14.78	14.81	14.72	14.77	17.94	17.44	17.69
40	4.10	14.20	14.39	14.30	14.18	14.09	14.13	16.92	17.01	16.97
45	4.61	14.25	13.82	14.03	13.47	12.97	13.22	16.21	16.00	16.11
50	5.12	13.72	13.62	13.67	-	-	-	14.71	15.62	15.16
55	5.64	13.01	13.04	13.02	-	-	-	14.33	14.50	14.42
60	6.15	12.74	12.37	12.56	-	-	-	13.93	13.69	13.81

ตารางที่ ง.11 แสดงข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฏิกิริยาจำเพาะ กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง และอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ ที่ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกประมาณ 26% w.b. และข้าวเปลือกสด

อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (°C)	ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)	ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก(% w.b.)	ระยะเวลาการอบแห้งจนถึงความชื้น 14% w.b. (min)	ρ_{a_avg} (kg/m ³)	C_{a_avg} (kJ/kg K)	C_{v_avg} (kJ/kg K)	มวลข้าวเปลือกสุดท้าย (kg)	มวลข้าวเปลือกเฉลี่ย (kg)	$E_T = Q/(w_{in} - w_{final})$ (MJ/kg น้ำที่ระเหย)
45	1	25.89	270	1.1390	1.0055	1.8669	2.04	2.27	1.42
	2	26.05	194				2.12	2.31	1.98
	3	25.92	170				2.14	2.32	2.62
	4	26.25	140				2.17	2.335	2.79
60	1	25.97	230	1.1165	1.0060	1.8694	2.08	2.29	2.34
	2	26.05	170				2.14	2.32	3.39
	3	25.59	142				2.17	2.34	4.39
	4	25.74	100				2.23	2.365	4.02
90	1	25.62	148	1.0695	1.0073	1.8750	2.17	2.335	2.92
	2	25.42	118				2.2	2.35	4.71
	3	25.95	100				2.23	2.365	5.68
	4	25.65	82				2.27	2.385	6.32

ตารางที่ ง.11 แสดงข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฏิกิริยาจำเพาะ กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง และอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ ที่ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกประมาณ 26% w.b. และข้าวเปลือกสด (ต่อ)

อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (°C)	ความเร็วอากาศอบแห้ง (m/s)	ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก(% w.b.)	ระยะเวลาการอบแห้งจนถึงความชื้น 14% w.b. (min)	ρ_{a_avg} (kg/m ³)	C_{a_avg} (kJ/kg K)	C_{v_avg} (kJ/kg K)	มวลข้าวเปลือกสุดท้าย (kg)	มวลข้าวเปลือกเฉลี่ย (kg)	$E_T = Q/(w_{in} - w_{final})$ (MJ/kg น้ำที่ระเหย)
120	1	26.06	128	1.0320	1.0089	1.8814	2.18	2.34	3.52
	2	25.73	90				2.25	2.375	5.02
	3	25.72	70				2.29	2.395	5.81
	4	26.45	58				2.32	2.41	6.00
120 ข้าวเปลือกสด	1	23.23	210	1.0320	1.0089	1.8814	2.1	2.3	7.68
	2	22.88	145				2.16	2.33	10.88
	3	22.89	115				2.2	2.35	12.82
	4	23.23	95				2.24	2.37	13.48

ตารางที่ ง.12 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิจำพะของเครื่องอบแห้ง
แบบต่าง ๆ

ชนิดของเครื่องอบแห้ง	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิ อบแห้ง (°C)	เวลา อบแห้ง (min)	ความชื้น เริ่มต้น (% d.b.)	ความชื้น สุดท้าย (% d.b.)	อัตราการ สิ้นเปลืองพลังงาน (MJ/kg น้ำที่ระเหย)
หล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง (ข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น)	1	45	27.67	34.93	16.28	1.42
	2		19.88	35.23		1.98
	3		17.42	34.99		2.62
	4		14.35	35.59		2.79
	1	60	23.57	35.08		2.34
	2		17.42	35.23		3.39
	3		14.55	34.39		4.39
	4		10.25	34.66		4.02
	1	90	15.17	34.44		2.92
	2		12.09	34.08		4.71
	3		10.25	35.04		5.68
	4		8.4	34.5		6.32
	1	120	13.12	35.24		3.52
	2		9.22	34.64		5.02
	3		7.17	34.63		5.81
	4		5.94	35.96		6
(ข้าวเปลือกสด)	1	120	21.52	30.26	7.68	
	2		14.86	29.67	10.88	
	3		11.78	29.68	12.82	
	4		9.73	30.26	13.48	
หล่นอิสระ ¹ (600 g) (1.5 kg)	6.642	80	0.485	23	15.5	2.4
		100	0.453			3.14
		120	0.343			3.03
		100	0.537			1.43

ตารางที่ ง.12 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะของเครื่องอบแห้ง
แบบต่าง ๆ (ต่อ)

ชนิดของเครื่องอบแห้ง	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิ อบแห้ง (°C)	เวลา อบแห้ง (min)	ความชื้น เริ่มต้น (% d.b.)	ความชื้น สุดท้าย (% d.b.)	อัตราการ สิ้นเปลืองพลังงาน (MJ/kg น้ำที่ระเหย)	
ฟลูอิดไดซ์เบดฐานสั้น ²	1.4	125	1	26.8	23.7	5.47	
		133		24.1	20.7	4.69	
		140		28	23	3.8	
สเปาเต็ดเบด ³	24.8	110	28	33.5	19	12.2	
					20	11.7	
					17.5	11	
					17.5	10.3	
					16.5	12.7	
					15	12	
		130			14.5	11.1	
					12.5	10.7	
					150	15	13.9
						13	13.3
						13	13.1
						12	12.2

หมายเหตุ : ¹ จุฑาทิพย์ ทองเดชาสามารถ, 2545

² สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, สุวัฒน์ ตรีทัศน์วินท์ และวุฒิกรณ จริยตันดิเวทย์, 2545

³ ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และสมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2546

ตารางที่ ง.13 แสดงข้อมูลปริมาณข้าวคั่ว และความขาว เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้าย ที่สภาวะ
อบแห้งต่าง ๆ โดยใช้มวลตัวอย่างข้าวเปลือก 100 g

สภาวะอบแห้ง		ความชื้นเริ่มต้น (% w.b.)	ความชื้นสุดท้าย (% w.b.)	ระยะเวลาการอบแห้ง(min)		ปริมาณข้าวคั่ว (g)	เครื่องวัดสี Minolta		
อุณหภูมิ (°C)	ความเร็ว (m/s)			เวลารวมทั้งหมด	เวลาอบแห้งจริง		L	a	b
ข้าวเปลือกคัดเมล็ดพันธุ์ กรรมกรข้าว		-	11.7	-		54.76	65.22	0.88	6.76
ข้าวเปลือกเพิ่มความชื้นด้วยการแช่ข้าว เป่าลมอุณหภูมิ 31.8°C, 1 m/s		27.74	16.66	12.25 hr		6.05	68.25	0.25	6.64
ข้าวเปลือกสด เป่าลมอุณหภูมิ 28.8°C, 0.7 m/s		23.36	14.75	57.3 hr		56.97	69.11	0.13	8.03
45	1	25.89	14	270	27.67	8.5	70.32	0.63	7.48
	2	26.05	13.82	200	20.49	6.1	68.46	1.03	7.99
	3	25.92	14	170	17.42	7.9	66.54	0.56	5.97
	4	26.25	12.8	180	18.44	4.5	68.39	0.06	8.04
60	1	22.92	13.43	160	16.39	16.64	67.24	1.12	8.07
	2	22.92	12.42	140	14.35	8.29	70.9	1.09	8.02
	3	22.73	11.41	150	15.37	6.45	77.2	1.16	7.96
	4	23.56	12.79	130	13.32	6.17	72.3	0.25	7.75
	1	25.97	13.9	230	23.57	9.2	70.1	0.03	6.78
	2	26.05	14	170	17.42	4.2	69.02	0.91	8.67

ตารางที่ ง.13 แสดงข้อมูลปริมาณข้าวคั่ว และความขาว เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้าย ที่สภาวะอบแห้งต่าง ๆ โดยใช้มวลตัวอย่างข้าวเปลือก 100 g (ต่อ)

สภาวะอบแห้ง		ความชื้นเริ่มต้น (% w.b.)	ความชื้นสุดท้าย (% w.b.)	ระยะเวลาการอบแห้ง(min)		ปริมาณข้าวคั่ว (g)	เครื่องวัดสี Minolta		
อุณหภูมิ (°C)	ความเร็ว (m/s)			เวลารวมทั้งหมด	เวลาอบแห้งจริง		L	a	b
60	3	25.59	14.16	140	14.35	5.6	69.55	0.26	6.92
	4	25.74	12.76	120	12.30	6.4	72.03	1.3	7.19
90	1	22.71	14.34	110	11.27	7.06	73.45	0.28	7.27
	2	24.7	14.4	90	9.22	6.86	70	0.87	9.68
	3	24.6	12.4	90	9.22	7.43	72.05	0.15	6.99
	4	23.21	12.95	80	8.20	3.49	68.95	0.56	7.24
	1	25.62	13.95	150	15.37	5.6	71.04	0.92	8.03
	2	25.42	13.5	130	13.32	8.2	70.6	1.01	6.77
	3	25.95	13.04	110	11.27	3.5	68.82	0.49	8.1
	4	25.65	13.4	90	9.22	7.9	70.4	0.26	6.66
ข้าวเปลือกสด 120	1	23.23	13.97	210	21.52	8.81	69.5	0.07	7.01
	2	22.88	13.57	160	16.39	13.88	72.1	1.12	7.33
	3	22.89	14.14	110	11.27	15.48	71.3	0.64	6.54
	4	23.23	14.28	90	9.22	8.08	70.1	0.09	8.07

ตารางที่ ง.13 แสดงข้อมูลปริมาณข้าวคั่ว และความขาว เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้าย ที่สภาวะอบแห้งต่าง ๆ โดยใช้มวลตัวอย่างข้าวเปลือก 100 g (ต่อ)

สภาวะอบแห้ง		ความชื้นเริ่มต้น (% w.b.)	ความชื้นสุดท้าย (% w.b.)	ระยะเวลาการอบแห้ง(min)		ปริมาณข้าวคั่ว (g)	เครื่องวัดสี Minolta		
อุณหภูมิ (°C)	ความเร็ว (m/s)			เวลารวมทั้งหมด	เวลาอบแห้งจริง		L	a	b
120	1	26.06	13.36	140	14.35	3.94	71.84	0.15	6.8
	2	25.73	13.96	90	9.22	2.91	73.26	-0.21	6.16
	3	25.72	13.92	70	7.17	5.23	69.65	0.02	5.37
	4	26.45	13.81	60	6.15	3.61	71.01	0	7.21

ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสภณา แจ่มการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ: รวดเร็วและประหยัดพลังงาน. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2. 27-29 กรกฎาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา

ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสภณา แจ่มการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). ผลกระทบของลมหมุนวนต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา

เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2551). ผลของความเร็วอากาศต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22. 15-17 ตุลาคม 2551 กรุงเทพมหานคร

ประวัติผู้เขียน

นายเกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว เกิดเมื่อวันที่ 19 สิงหาคม พ.ศ. 2521 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านสันโค้ง(เชิงราชจรูญราษฎร์) ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-5 ที่โรงเรียนสามัคคีวิทยาคม การศึกษานอกโรงเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่ศูนย์บริการการศึกษานอกโรงเรียนอำเภอเมือง เชียงราย จังหวัดเชียงราย และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2544 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษา ได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมเครื่องกล และทำงานตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปี พ.ศ. 2546 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้เป็นวิศวกรซ่อมบำรุงห้องปฏิบัติการทดสอบหัวอ่านและบันทึกข้อมูล มทส-ซีเกท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และผู้คุมปฏิบัติการ วิชาปฏิบัติการ วิศวกรรมเครื่องกล 1, 2 และวิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม 1, 2 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการดังนี้
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2 เรื่อง เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ ข้าวหล่นอิสระ: รวดเร็วและประหยัดพลังงาน
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 เรื่อง ผลกระทบของลมหมุนวน ต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 เรื่อง ผลของความเร็วจานต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง