

การหาจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมของการอบแห้งข้าวเปลือก
ด้วยวิธีเป่าพ่น-หล่นหน่วง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**DETERMINATION OF THE APPROPRIATE
OPERATING POINT OF RICE PADDY DRYING USING
THE SPOUTED-SUSTAINED FALL METHOD**

Supitchar Meesukchaosumrun



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

การหาจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่น-หล่นหน่วง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.กิริติ สุตักษณ์)

ประธานกรรมการ



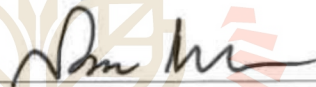
(รศ. ดร.ทวิช จิตรสมบุญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ศ. ดร.สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.ศักดิ์มน เทพหัสติน ณ อุษรยา)

กรรมการ



(ผศ. ดร.วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน)

กรรมการ



(อ. ดร.ธีทัต คลวิชัย)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิ๋จันจ้ง)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ : การหาจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่น-หล่นหน่วง (DETERMINATION OF THE APPROPRIATE OPERATING POINT OF RICE PADDY DRYING USING THE SPOUTED-SUSTAINED FALL METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, 237 หน้า.

เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง คือ เครื่องอบแห้งเมล็ดผลการเกษตรรูปแบบใหม่ ซึ่งใช้การเป่าพ่นเมล็ดด้วยลมร้อนขึ้นแนวตั้งภายในท่อแล้วให้ตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงโดยมีการชะลอการตกของเมล็ดด้วยชั้นตะแกรงเพื่อหน่วงเวลาให้อากาศอบแห้งได้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดลองเครื่องอบแห้งนี้เพื่อเสาะหาจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความเร็วอากาศอบแห้ง อัตราไหลข้าว เวลาพักข้าว การหน่วงการไหลข้าว และสายพันธุ์ข้าว ที่มีต่ออัตราอบแห้ง อัตราสิ้นเปลืองพลังงานป้อนภูมิจำเพาะ การใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ และคุณภาพข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้ง พบว่าปัจจัยเหล่านี้มีอิทธิพลต่อการอบแห้งอย่างมาก เช่น อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C ความเร็วอากาศที่อลมเข้า 17 20 และ 23 m/s ระยะยกที่อลมเป่า 4 5 และ 6 cm (อัตราไหลข้าว) มวลข้าวเริ่มต้น 10 20 และ 30 kg (เวลาพักข้าว) จำนวนตะแกรงหน่วงข้าว 0 6 และ 11 ชั้น (การหน่วงการไหลข้าว) ทำให้อบแห้งได้รวดเร็วแตกต่างกัน และใช้พลังงานป้อนภูมิจำเพาะต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการเพิ่มความเร็วก๊าซส่งผลให้อัตราอบแห้งสูงขึ้น แต่การใช้พลังงานป้อนภูมิจำเพาะก็สูงขึ้นไปด้วย ปริมาณข้าวต้น (head rice yield) มีแนวโน้มลดลงตามอัตราอบแห้งที่เพิ่มขึ้นยกเว้นกรณีการเพิ่มมวลข้าวเริ่มต้นซึ่งสามารถเพิ่มอัตราอบแห้ง และเพิ่มปริมาณข้าวต้นได้พร้อมกัน สำหรับพันธุ์ข้าวเปลือกใช้ ชัยนาท1 และ กข105 พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของปริมาณข้าวต้นในช่วงแรกของการอบแห้งเนื่องจากการเกิดเจล (gelatinization) ภายในเมล็ดข้าวพันธุ์ชัยนาท1 แต่ไม่พบในพันธุ์กข105 ผลการทดลองได้ชุดเงื่อนไขอบแห้งที่ดีใน 3 แนวทาง คือ 1) เงื่อนไขที่ให้อัตราอบแห้งสูงสุด 2) เงื่อนไขที่ให้ผลรวมระหว่างพลังงานป้อนภูมิจำเพาะกับพลังงานทุติยภูมิจำเพาะมีค่าต่ำสุด และ 3) เงื่อนไขที่ให้ปริมาณข้าวต้นสูงสุด นอกจากการทดลองแล้วยังได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้สมการสมดุลมวล พลังงาน และอัตราอบแห้ง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งได้พอควรแต่ลดการใช้พลังงานป้อนภูมิจำเพาะได้เล็กน้อย ขณะที่การเพิ่มความยาวท่อลมเป่าทำให้อัตราอบแห้งเพิ่มขึ้น และลดการใช้พลังงานป้อนภูมิจำเพาะลงอย่างชัดเจน การวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันความชื้น (moisture content gradient) และสัดส่วนปริมาตรคล้ายยาง (rubbery state volume ratio) ทั้งขณะและภายหลังการอบแห้งกับปริมาณข้าวต้นที่ได้จากการทดลอง เมื่ออบแห้งด้วยชุดเงื่อนไขที่ดีใน 3 แนวทาง ทำให้ได้แนวทางป้องกันรอยร้าวในเมล็ดข้าว คือ 1) ค่าความชันความชื้นควรต่ำกว่า 3% w.b./mm ก่อน

เข้าสู่ท่อลมเป่า และ 2) ค่าสัดส่วนปริมาตรก๊าซอย่างขณะอบแห้งและขณะลดอุณหภูมิควรมีค่าใกล้เคียงกัน ยังพบว่าในเครื่องอบแห้งต้นแบบนี้ ถ้าเพิ่มมวลข้าวเริ่มต้นเป็น 60 kg จะทำให้เกิดรอยร้าวน้อยที่สุด ดังนั้นจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมของการอบแห้งนี้คือ ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศท่อลมเข้า 20 m/s ระยะยกท่อลมเป่า 6 cm จำนวนตะแกรงแห้งข้าว 11 ชั้น และมวลข้าวเริ่มต้น 60 kg ซึ่งเงื่อนไขอบแห้งนี้สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 23% ถึง 14% w.b. ด้วยอัตราอบแห้งเฉลี่ย 0.0459 kg water evaporated/min โดยใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะและพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ 3.68 และ 2.13 MJ/kg water evaporated ตามลำดับ และยังเชื่อได้ว่าจะได้ปริมาณข้าวต้นและความขาวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



SUPITCHAR MEESUKCHAOSUMRUN : DETERMINATION OF THE
APPROPRIATE OPERATING POINT OF RICE PADDY DRYING USING
THE SPOUTED-SUSTAINED FALL METHOD. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. TAWIT CHITSOMBOON, Ph.D., 237 PP.

SPOUTED-SUSTAINED FALL PADDY DRYER/ SPOUTED BED DRYER/
APPROPRIATE OPERATING POINT OF PADDY DRYER/ EFFICIENT DRYER

Spouted-sustained fall dryer is a new type of agricultural grain dryer in which grains are spouted by upward hot air inside a vertical tube and then fallen by gravity. Grain falling is retarded with stacking wire mesh layers to extend falling time to increase efficiency of drying. This research aimed to design, construct and test this dryer to determine the appropriate operating point. The many parameters such as: drying air temperature, air velocity, paddy circulation rate, resting period, retarding of paddy flow and rice varieties were investigated to determine their effects on drying rate (DR), primary specific energy consumption (PSEC), secondary specific energy consumption (SSEC), and qualities of rice paddy. The results showed that these parameters significantly influence the outcomes of the drying. For instance, air temperatures of 80, 100 and 120°C, inlet air velocities of 17, 20 and 23 m/s, entrance heights of 4, 5 and 6 cm (paddy circulation rate), initial paddy masses of 10, 20 and 30 kg (resting period), wire mesh layers of 0, 6 and 11 (retarding of paddy flow) gave significant differences in DR and PSEC values. Increasing of air velocity especially resulted in increasing DR but also PSEC. The head rice yield (HRY) tended to decrease according to the increase of DR except in the case of the initial paddy mass was added which led to the increase of both DR and HRY. Rice varieties, Chai

Nat 1 and Khao Dawk Mali 105 were selected in this study. It was found that Chai Nat 1 yielded better HRY than Khao Dawk Mali 105 perhaps due to its more gelatinization at the beginning of drying process. The results of this experiment had revealed three good drying conditions, namely: 1) the highest DR condition, 2) the lowest sum of PSEC and SSEC condition and 3) the highest HRY condition. In addition to this experiment, a computer program was developed using MATLAB software in order to numerically simulate the drying process wherein drying rate and equilibrium equations of mass and energy were used. The results showed that increasing temperature gave increasing DR but slightly decreasing SPEC; while increasing the length of draft tubes leading to higher DR and significantly lower SPEC. Moisture content gradient (MCG) and rubbery state volume ratio (RSVR) during and after drying were analyzed to see their relationship with the experiment's HRY values, when drying with three good drying conditions. From the analysis, to prevent fissuring, two conditions must be met: 1) MCG value should be lower than 3% w.b./mm, 2) RSVR value when drying and when cooling should be similar. It was also found that if initial paddy mass was increased to 60 kg, minimum rice fissuring would be achieved. Thus, the appropriate operating conditions of this drying were determined to be: drying temperature at 120°C, drying air velocity at 20 m/s, draft tube entrance height at 6 cm, 11 wire mesh layers and initial paddy mass at 60 kg. These drying conditions could decrease moisture content of paddy from 23% to 14% w.b. with average DR of 0.0459 kg water evaporated/min at SPEC and SSEC of about 3.68 and 2.13 MJ/kg water evaporated respectively. At these conditions it is believed that the values of HRY and whiteness of rice would still be acceptable.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature ศศิวิทย์ มีสลับเจ้าสำราญ

Advisor's Signature [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะการส่งเสริมของบุคคลและองค์กรคือ : รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตา เอาใจใส่ อบรมดูแล และอดทนต่อผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง ผู้วิจัยจึงสามารถสำเร็จการศึกษานี้ได้

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล และอาจารย์ ดร.โสทรญา แข็งการ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอักษรวิทยา คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ และคุณณิชาภัทร สิทธิคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณศรัทธา โพธิ์สว่าง คุณสมยง พิมพ์พรม คุณคมสัน ภายเดช คุณคมสันต์ ต่ายทรัพย์ และคุณจ่านงค์ ผายสระน้อย เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณศรารุช ราชบุรี คุณพรพิไล กิติรัตน์ตระการ คุณศักดิ์ศรีณ์ มีสุขเจ้าสำราญ คุณอรรรณพันธ์ มีสุขเจ้าสำราญ คุณจิรัฏฐ์ มีสุขเจ้าสำราญ คุณชัยยุทธ์ ปรีชา คุณชัยฤกษ์ เชื้อประสาท คุณวัลภา วงศ์ศิริจันทร์ คุณภูวศิษย์ วงศ์เพียร คุณศศิวิมล โชคชัย และทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาที่มีได้มีรายชื่อข้างต้น ตลอดจนครูอาจารย์ในอดีตทุกท่านที่ได้สั่งสอน อบรม และให้ความรู้

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด แม้จะด้วยความยากลำบากสักเพียงใด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตได้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษกของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฑ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ป
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัย : การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่น-หล่นหนอง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ความชื้นวัสดุ.....	6
2.2 ประเภทของความชื้น.....	6
2.3 ความชื้นสัมพัทธ์.....	7
2.4 ความชื้นสมดุลของวัสดุ.....	7
2.5 การถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้ง.....	8
2.5.1 การถ่ายเทความร้อน.....	8
2.5.2 การถ่ายเทมวล.....	10
2.6 หลักการอบแห้ง.....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7	กลไกการแพร่ความชื้นภายในเมล็ด.....	13
2.8	อัตราการอบแห้ง.....	14
2.9	การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่	14
2.10	การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งลดลง	15
2.11	การเกิดรอยร้าวในเมล็ดข้าว.....	16
2.12	การพักในที่อับอากาศ (Tempering)	17
2.13	Gelatinization	18
2.14	Glass Transition Temperature	19
2.15	ลักษณะทางกายภาพของข้าว	22
2.15.1	น้ำหนักเมล็ด	22
2.15.2	ขนาดรูปร่างเมล็ด	22
2.15.3	ความขาวของข้าวสาร	23
2.15.4	คุณภาพการสี.....	23
2.16	ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
2.16.1	ข้าวเปลือกพันธุ์ ชัยนาท 1	24
2.16.2	ข้าวเปลือกพันธุ์ กข 105 หรือขาวดอกมะลิ 105	24
2.17	การลดความชื้นข้าวเปลือก	25
2.17.1	วิธีธรรมชาติ	25
2.17.2	การใช้เครื่องอบ.....	26
2.18	วิธีการหาค่าความชื้น	27
2.18.1	การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง.....	27
2.18.2	การหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม.....	27
2.19	เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น (Spouted bed dryer).....	27
3	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
3.1	งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น	32
3.2	งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบด	39
3.3	งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ.....	42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน	45
3.5	งานวิจัยการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคอื่น ๆ.....	46
3.6	ผลของอุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว (Glass transition temperature) ที่มีต่อการอบแห้ง.....	50
4	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	54
4.1	องค์ประกอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	54
4.1.1	เครื่องเป่าลม	54
4.1.2	ตำแหน่งทางเข้าอากาศอบแห้ง	54
4.1.3	เครื่องทำความร้อน	54
4.1.4	ท่อลมเป่า.....	54
4.1.5	ท่อครอบ.....	55
4.1.6	ตะแกรงหน่วงข้าว.....	55
4.1.7	ถังพักข้าวเปลือก.....	55
4.1.8	ชุดวัดอัตราการไหลข้าวเปลือก.....	55
4.1.9	เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล	55
4.1.10	อุปกรณ์วัดอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์สูง.....	56
4.2	หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	56
5	วิธีดำเนินการวิจัย	69
5.1	ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น	69
5.2	ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก	69
5.3	ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบ ด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	70
5.4	ขั้นตอนการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก.....	71
5.4.1	เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน	72
5.4.2	การหาค่าความชื้น โดยวิธีการใช้ตู้อบ	72
5.5	ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว	73
5.5.1	การทำความสะอาด	73
5.5.2	การกะเทาะเปลือก.....	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5.3	การขีดขาว.....	73
5.5.4	การคัดแยกปลายข้าว	73
5.5.5	การวิเคราะห์คุณภาพข้าว.....	74
5.6	ขั้นตอนการหาอัตราการอบแห้ง	74
5.7	ขั้นตอนการหาค่าพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ	74
5.8	ขั้นตอนการหาค่าพลังงานรวมจำเพาะ	75
5.9	สถานที่ทำการวิจัย	75
5.10	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	75
5.11	วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	76
5.12	การเก็บรวบรวมข้อมูลการทดลอง.....	76
5.13	การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง	76
5.14	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	77
5.15	ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	77
5.16	ขั้นตอนการศึกษาลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งด้วยแบบจำลอง.....	77
5.17	ขั้นตอนการพัฒนากระบวนการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	78
6	ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	79
6.1	การทดลองกลุ่มปัจจัยหลัก.....	79
6.1.1	อัตราอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก แบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	79
6.1.2	อัตราสิ้นเปลืองพลังงานในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก แบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	90
6.1.3	คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง แบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	101
6.2	การทดลองกลุ่มปัจจัยรอง.....	112
6.2.1	ผลของมวลข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก แบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	113

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.2	ผลของจำนวนชั้นตะแกรงในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก แบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	120
6.2.3	ผลของพันธุ์ข้าวในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก แบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	127
6.3	การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกชนิดอื่น ๆ	133
7	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	139
7.1	การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	139
7.1.1	สมมุติฐานการสร้างแบบจำลอง	139
7.1.2	ระบบสมการอนุพันธ์ควบคุม	140
7.1.3	สมการประกอบที่สำคัญ	143
7.2	กระบวนการจำลองผล	148
7.3	การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	149
7.4	ลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	155
7.4.1	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือก ระหว่างการอบแห้ง	156
7.4.2	ความเร็วข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้ง แบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	156
7.4.3	อุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือก และอากาศอบแห้งในถังพัก	159
7.5	ผลของอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงต่ออัตราการอบแห้ง และการใช้พลังงาน	162
7.6	ผลของความยาวท่อลมเป่าต่อจลนศาสตร์การอบแห้ง และการใช้พลังงาน	166
8	แนวทางป้องกันการแตกร้าวข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง	173
8.1	การแตกร้าวของเมล็ดข้าวเนื่องจากการอบแห้ง	173
8.2	การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสถานะข้าวเปลือก	178
8.3	การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดข้าว	179

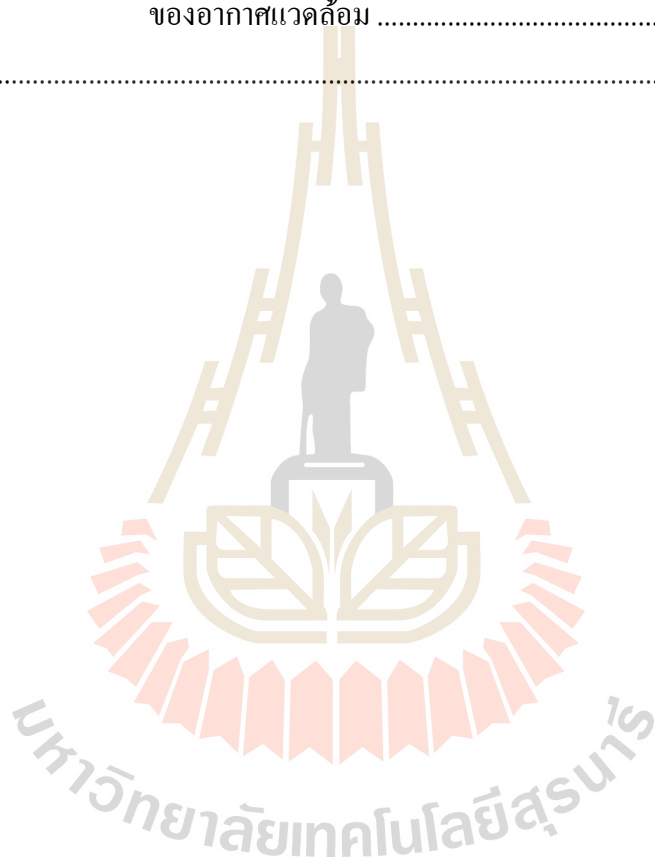
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
8.4	เงื่อนไขการอบแห้งสำหรับการจำลองและ ปริมาณข้าวต้นที่ได้จากการอบแห้ง.....180
8.5	ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยร้าวในเมล็ดข้าว.....183
8.5.1	การเกิดรอยร้าวขณะอบแห้ง : ความชื้นความชื้น.....183
8.5.2	การเกิดรอยร้าวเนื่องจาก : อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง.....187
8.6	แนวทางป้องกันการแตกร้าวข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้ง แบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง.....193
9	สรุปและข้อเสนอแนะ.....201
9.1	สรุปผลการวิจัย.....201
9.2	สรุปปัญหาจากการทดลอง.....205
9.3	ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป.....205
	รายการอ้างอิง.....206
	ภาคผนวก
ภาคผนวก ก.	การพิสูจน์สมการ.....214
ก.1	สมการคำนวณค่าอัตราอบแห้งเฉลี่ย.....215
ก.2	สมการคำนวณหาค่าพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะ ที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก.....217
ก.3	สมการคำนวณหาค่าพลังงานทุติยภูมิเฉพาะและ พลังงานรวมเฉพาะที่ใช้ในการอบแห้ง.....218
ก.4	สมการคำนวณหาร้อยละข้าวต้นและ ค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร.....219
ภาคผนวก ข.	ข้อมูลเครื่องมือทดสอบ.....221
ข.1	Orifice plate.....222
ข.2	เครื่องเป่าลม.....225
ข.3	เครื่องทำความร้อน.....226
ข.4	อัตราการไหลข้าวเปลือก.....228
ข.5	ความเร็วอากาศในท่อลมเป่า.....229

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ข.6	สัดส่วนช่องว่างในท่อครอบ	230
ข.7	การใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลม.....	231
ข.8	ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ของอากาศแวดล้อม	234
ประวัติผู้เขียน.....		237



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ประโยชน์และข้อจำกัดเครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไป29
2.2	ลักษณะเฉพาะและการประยุกต์ใช้งานเทคนิคเป่าพ่นที่ได้รับการปรับปรุง30
6.1	การเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบกลุ่ม (batch paddy dryer).....136
6.2	การเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่อง (continuous paddy dryer)137
7.1	สมบัติของข้าวเปลือกที่ใช้ในการจำลอง147
7.2	สมบัติของอากาศอบแห้งที่ใช้ในการจำลอง.....147
7.3	เงื่อนไขจำลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง150
7.4	ขนาดเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง.....150
8.1	เงื่อนไขจำลองอบแห้ง เพื่อศึกษาการแตกตัวของข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง.....181
8.2	ขนาดเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง.....181
ข.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า inverter set point, ค่าความดันตกคร่อม orifice plate และค่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเข้า226
ข.2	กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องเป่าลม เฉลี่ยตลอดการอบแห้ง มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 20 kg.....233
ข.3	แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อากาศแวดล้อม (ปัจจัยหลัก).....234
ข.4	แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อากาศแวดล้อม (ปัจจัยรอง).....235

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง..... 5
2.1	ลักษณะทั่วไปของเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอมแบบคายน้ำ สำหรับวัสดุทางการเกษตร.....8
2.2	การแพร่ของมวลจากเมล็ดของแข็งไปยังของไหล..... 11
2.3	การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่และลดลง..... 15
2.4	รอยร้าวในเมล็ดข้าว ขณะอบแห้งและภายหลังจากการอบแห้ง (ไมตรี แนวพนิช, ม.ป.ป.).....17
2.5	SEM ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ (Tirawanichakul et al., 2004)19
2.6	ผลทดสอบข้าวกล้อง (พันธุ์ Drew, 14.4% w.b.) ด้วยเทคนิค TMA (Sun et al., 2002)20
2.7	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแก้วของข้าวพันธุ์ Drew และ Bengal (Siebenmorgen et al., 2004)21
2.8	ภาพโครงสร้างเครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไป (conventional spouted bed), (Madhiyanon, 2001)28
4.1	แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง ที่ใช้ในงานวิจัย..... 58
4.2	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงที่ใช้ในการทดลอง 59
4.3	เครื่องเป่าลม (blower) ของ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ขนาด 2.2 kW..... 60
4.4	Inverter ของ Frecon รุ่น F003b-4 ขนาด 2.2 kW 60
4.5	Pressure transmitter ของ Kimo รุ่น CP103-PO ช่วงการวัด 0-50 kPa..... 61
4.6	Orifice plate ที่ใช้ในงานวิจัย 61
4.7	ขดลวดความร้อน ขนาด 4.0 kW ที่ใช้ในงานวิจัย..... 62
4.8	PID Temperature controller ของ Linking รุ่น LT400 62
4.9	ตะแกรงหน่วงข้าว (wire mesh) ที่ใช้ในงานวิจัย..... 63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	การติดตั้งตะแกรงหน่วงข้าว.....63
4.11	ถังพักข้าวเปลือก ที่ใช้ในงานวิจัย.....64
4.12	ถังวัดอัตราการไหลข้าว 64
4.13	การติดตั้งถังวัดอัตราการไหล และ load cell.....65
4.14	ชุดควบคุม load cell.....66
4.15	โซลินอยด์วาล์วควบคุมการเปิดปิดถังวัดอัตราการไหลข้าว.....66
4.16	เครื่องรับและส่งสัญญาณแอนะล็อกและดิจิทัลของ NI รุ่น USB 6008 67
4.17	โปรแกรม LabVIEW เพื่อวัดอัตราการไหลข้าว และควบคุมถังวัดอัตราการไหลข้าว.....67
4.18	เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger) ของ Hioki รุ่น 8420-0168
4.19	อุปกรณ์วัดอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์สูง ของ Vaisala รุ่น HMT335.....68
6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้งกับความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C81
6.2	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้งกับความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C 81
6.3	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้งกับความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C 82
6.4	ความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C..... 82
6.5	ความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C 83
6.6	ความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C 83
6.7	ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย.....84
6.8	ผลของความเร็วยานพาหนะที่ลมเข้าต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย86
6.9	ผลของระยะยกที่ลมเป่าต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย.....87
6.10	ผลของอัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย.....87
6.11	อุณหภูมิข้าวเปลือกขณะอบแห้งที่ระยะความสูง 45 cm จากพื้นถึงพัก.....88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12	ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความเร็วอากาศที่อลมเข้า และระยะยกที่อลมเป่า ที่มีต่อการเพิ่มอัตราอบแห้งเฉลี่ย.....89
6.13	ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่มีต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ.....90
6.14	ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 32.25°C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม 50.60%91
6.15	ผลของความเร็วอากาศที่อลมเข้าต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ93
6.16	ผลของระยะยกที่อลมเป่าต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ.....93
6.17	ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ94
6.18	ผลของความเร็วอากาศที่อลมเข้าต่อพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ.....95
6.19	ผลของระยะยกที่อลมเป่าต่อพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ96
6.20	ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อพลังงานรวมจำเพาะ.....96
6.21	ผลของระยะยกที่อลมเป่าต่อพลังงานรวมจำเพาะ.....98
6.22	ผลของความเร็วอากาศที่อลมเข้าต่อพลังงานรวมจำเพาะ98
6.23	ผลของอุณหภูมิ ความเร็วอากาศที่อลมเข้า และระยะยกที่อลมเป่า ต่อพลังงานรวมจำเพาะ.....99
6.24	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราอบแห้งเฉลี่ยกับพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ99
6.25	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราอบแห้งเฉลี่ยกับพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ100
6.26	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราอบแห้งเฉลี่ยกับพลังงานรวมจำเพาะ.....100
6.27	ปริมาณข้าวต้นที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b. เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C.....102
6.28	ปริมาณข้าวต้นที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b. เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C.....102
6.29	ปริมาณข้าวต้นที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b. เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C.....103
6.30	ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C.....104
6.31	ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C.....105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.32 ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C	105
6.33 ดัชนีความขาวข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C	106
6.34 ดัชนีความขาวข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C	107
6.35 ดัชนีความขาวข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C	107
6.36 ดัชนีความขาวข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C.....	108
6.37 ดัชนีความเหลืองข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C	109
6.38 ดัชนีความเหลืองข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C	110
6.39 ดัชนีความเหลืองข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C	110
6.40 ดัชนีความเหลืองข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C	111
6.41 ผลของอุณหภูมิข้าวเปลือกต่อดัชนีความขาวข้าวสาร	111
6.42 ผลของอุณหภูมิข้าวเปลือกต่อดัชนีความเหลืองข้าวสาร.....	112
6.43 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก.....	113
6.44 ผลของมวลข้าวเปลือกต่ออุณหภูมิข้าวเปลือก ที่ระยะความสูง 45 cm จากพื้นถึงพัก	114
6.45 ผลของมวลข้าวเปลือกต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย	115
6.46 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อพลังงานรวมจำเพาะ	116
6.47 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b.....	117
6.48 ผลของระยะเวลาพักต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b.....	118
6.49 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ระหว่างการอบแห้ง.....	119
6.50 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อดัชนีความขาวข้าวสาร	119
6.51 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อดัชนีความเหลืองข้าวสาร	120
6.52 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก.....	121
6.53 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย	122
6.54 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่ออุณหภูมิข้าวเปลือก ที่ระยะความสูง 45 cm จากพื้นถึงพัก	122
6.55 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อพลังงานรวมจำเพาะ	124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.56 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b.	124
6.57 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ระหว่างการอบแห้ง.....	125
6.58 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อดัชนีความขาวข้าวสาร	126
6.59 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อดัชนีความเหลืองข้าวสาร	126
6.60 ผลของพันธุ์ข้าวต่อลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก.....	127
6.61 ผลของพันธุ์ข้าวต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย.....	128
6.62 อุณหภูมิข้าวเปลือกพันธุ์ข105 และพันธุ์ชัยนาท1 ที่ระยะความสูง 45 cm จากพื้นถึงพัก	129
6.63 ผลของพันธุ์ข้าวต่อพลังงานรวมจำเพาะ	129
6.64 ผลของพันธุ์ข้าวต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b.....	131
6.65 ผลของพันธุ์ข้าวต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ระหว่างการอบแห้ง.....	132
6.66 ผลของพันธุ์ข้าวต่อดัชนีความขาวข้าวสาร	132
6.67 ผลของพันธุ์ข้าวต่อดัชนีความเหลืองข้าวสาร	133
7.1 การแบ่งชั้นบางเพื่อสร้างแบบจำลอง (ก) ส่วนสเปาต์, (ข) ส่วนหล่นหน่วง และ (ค) ส่วนควาน์คัมเมอร์.....	141
7.2 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับผลการทดลองที่ 1-4.....	151
7.3 ผลจำลองอุณหภูมิข้าวเปลือกและอากาศในถังพักที่ความสูง 25 cm เทียบกับผลการทดลอง.....	152
7.4 ผลจำลองอุณหภูมิข้าวเปลือกและอากาศในถังพักที่ความสูง 45 cm เทียบกับผลการทดลอง.....	152
7.5 ผลจำลองอุณหภูมิก๊าซที่ทางออกท่อลมเป่าเทียบกับผลการทดลองที่ 1-4.....	153
7.6 ผลจำลองอุณหภูมิก๊าซที่ทางออกท่อครอบเทียบกับผลการทดลองที่ 1-4.....	153
7.7 ผลจำลองความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางออกท่อลมเป่า เทียบกับผลการทดลองที่ 1-4.....	154
7.8 ผลจำลองความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางออกท่อครอบ เทียบกับผลการทดลองที่ 1-4.....	154

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.9 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือกตลอดช่วงการอบแห้ง	157
7.10 ผลจำลองอุณหภูมิข้าวเปลือกตลอดช่วงการอบแห้ง.....	157
7.11 ผลจำลองความเร็วข้าวเปลือกตลอดความยาวท่อลมเป่า.....	158
7.12 ผลจำลองความเร็วข้าวเปลือกตลอดความยาวท่อครอบ.....	158
7.13 ผลจำลองความเร็วข้าวเปลือกตลอดความสูงชั้นเมล็ดในถังพัก	158
7.14 ผลจำลองอุณหภูมิข้าวเปลือกและอากาศตลอดความสูงชั้นเมล็ดในถังพัก	160
7.15 ผลจำลองความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งตลอดความสูงชั้นเมล็ดในถังพัก	161
7.16 ผลจำลองความชื้นภายในเมล็ดระหว่างการอบแห้งในถังพัก รอบอบแห้งที่ 1	161
7.17 ผลจำลองความชื้นภายในเมล็ดก่อนและหลังการอบแห้งในถังพัก.....	162
7.18 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือก เมื่อใช้การทดลองที่ 3 อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120-180°C.....	163
7.19 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือก เมื่อใช้การทดลองที่ 4 อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120-180°C.....	163
7.20 อัตราอบแห้งเฉลี่ยกับพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะ จากผลการทดลองและผลจำลองอบแห้ง	164
7.21 อัตราอบแห้งเฉลี่ยกับพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ จากผลการทดลองและผลจำลองอบแห้ง	165
7.22 อัตราอบแห้งเฉลี่ยกับพลังงานรวมจำเพาะ จากผลการทดลองและผลจำลองอบแห้ง.....	165
7.23 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือก เมื่อใช้ความยาวท่อลมเป่า 1-8 m.....	166
7.24 ผลการจำลองความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งในถังพัก เมื่อใช้ความยาวท่อลมเป่า 1 m.....	168
7.25 ผลการจำลองความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งในถังพัก เมื่อใช้ความยาวท่อลมเป่า 2 m.....	168
7.26 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงในแต่ละรอบการอบแห้ง เมื่อท่อลมเป่ายาว 1-8 m	169

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.27	ผลจำลองอัตราอบแห้งเฉลี่ยในแต่ละรอบการอบแห้ง เมื่อที่อลมเปายาว 1-8 m169
7.28	ผลจำลองอัตราอบแห้งเฉลี่ย เมื่อที่อลมเปายาว 1-10 m171
7.29	ผลจำลองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ เมื่อที่อลมเปายาว 1-10 m171
7.30	ผลจำลองอัตราอบแห้งเฉลี่ยและพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ เมื่อที่อลมเปายาว 1-10 m172
8.1	อุณหภูมิเปลี่ยนแก้วของข้าวพันธุ์ Drew และ Bengal (Siebenmorgen et al., 2004).....174
8.2	อุณหภูมิและความชื้นภายในข้าวขณะอบแห้ง (Siebenmorgen et al., 2004).....175
8.3	อุณหภูมิและความชื้นภายในข้าว ณ ตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 8.2 ขณะอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิสูง (Siebenmorgen et al., 2004)176
8.4	อุณหภูมิและความชื้นภายในข้าว ณ ตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 8.2 เมื่อใช้อุณหภูมิพัก ในที่อับอากาศสูงและต่ำกว่า Tg (Siebenmorgen et al., 2004)177
8.5	ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ (relative head rice yield, RHR) ขณะทดลองอบแห้ง182
8.6	ผลจำลองอุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ด ออบแห้งรอบที่ 1 ด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 1184
8.7	ผลจำลองอุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ด ออบแห้งรอบที่ 1 ด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 2184
8.8	ผลจำลองอุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ด ออบแห้งรอบที่ 1 ด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 3185
8.9	ความชันความชื้นเมล็ดข้าวและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 1.....185
8.10	ความชันความชื้นเมล็ดข้าวและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 2.....186
8.11	ความชันความชื้นเมล็ดข้าวและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 3.....186

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
8.12	อุณหภูมิเมล็ดข้าวเฉลี่ยและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 1.....	188
8.13	อุณหภูมิเมล็ดข้าวเฉลี่ยและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 2.....	189
8.14	อุณหภูมิเมล็ดข้าวเฉลี่ยและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 3.....	189
8.15	สัดส่วนปริมาตรคล้ายขางและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 1.....	190
8.16	สัดส่วนปริมาตรคล้ายขางและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 2.....	190
8.17	สัดส่วนปริมาตรคล้ายขางและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 3.....	191
8.18	ความชันความชื้นเมล็ดข้าวที่เงื่อนไขการทดลองที่ 1 เมื่อใช้มวลข้าวเปลือก 20 และ 60 kg.....	194
8.19	ความชันความชื้นเมล็ดข้าวที่เงื่อนไขการทดลองที่ 2 เมื่อใช้มวลข้าวเปลือก 20 และ 60 kg.....	194
8.20	อุณหภูมิเมล็ดข้าวเฉลี่ยที่เงื่อนไขการทดลองที่ 1 เมื่อใช้มวลข้าวเปลือก 20 และ 60 kg.....	195
8.21	อุณหภูมิเมล็ดข้าวเฉลี่ยที่เงื่อนไขการทดลองที่ 2 เมื่อใช้มวลข้าวเปลือก 20 และ 60 kg.....	195
8.22	สัดส่วนปริมาตรคล้ายขางที่เงื่อนไขการทดลองที่ 1 ที่มวลข้าวเปลือก (a) 20 kg, (b) 60 kg.....	196
8.23	สัดส่วนปริมาตรคล้ายขางที่เงื่อนไขการทดลองที่ 2 ที่มวลข้าวเปลือก (a) 20 kg, (b) 60 kg.....	197
8.24	ผลของระยะเวลาพักต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b. จากการทดลอง และระยะเวลาพักที่เหมาะสมต่อการรักษาปริมาณข้าวต้น ซึ่งได้จากแบบจำลอง.....	198

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.25 ผลของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย จากการทดลองและการจำลอง	199
8.26 ผลของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่อพลังงานรวมจำเพาะ จากการทดลองและการจำลอง	199
ก.1 แผนภาพสารสีตามความยาวคลื่นแสงระดับนาโนเมตรของ CIE 1931.....	220
ข.1 แผนภาพแสดงลักษณะของท่อ orifice plate และ จุดต่อสำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดัน แบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps).....	222
ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง inverter set point กับความเร็วอากาศ อบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเข้า	227
ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ในท่อลมเข้าขณะเครื่องทำความร้อนใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (4.0 kW) และขณะปิดเครื่องทำความร้อน	227
ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับอัตราการไหลข้าวเปลือก ที่ความเร็วอากาศในท่อลมเข้าต่าง ๆ เมื่อระยะยกท่อลมเป่า 4 cm และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 20 kg	228
ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศในท่อลมเข้ากับ อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยตลอดการอบแห้ง (ช่วงความชื้นข้าวเปลือก 12-24%w.b.) ที่ระยะยกท่อลมเป่าต่าง ๆ เมื่อมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 20 kg	229
ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศในท่อลมเข้ากับความเร็วอากาศในท่อลมเป่า ที่ระยะยกท่อลมเป่าต่าง ๆ เมื่อข้าวเปลือกมีมวลเริ่มต้น 20 kg และความชื้น 12-14%w.b.	230
ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศในท่อลมเข้ากับสัดส่วนการรั่วไหล ของอากาศเข้าถังพัก ที่ระยะยกท่อลมเป่าต่าง ๆ เมื่อข้าวเปลือก มีมวลเริ่มต้น 20 kg และความชื้น 12-14%w.b.	231

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
<p>ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศในท่อลมเข้ากับสัดส่วนช่องว่าง ในท่อครอบขณะอบแห้งข้าวเปลือก ที่ระยะยกท่อลมเป่าต่าง ๆ และตะแกรงหว่งข้าวเท่ากับ 0 และ 11 ชั้น เมื่อข้าวเปลือก มีมวลเริ่มต้น 20 kg และความชื้น 12-14%w.b.232</p>	232
<p>ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศในท่อลมเข้ากับกำลังไฟฟ้า ที่ป้อนให้เครื่องเป่าลมเฉลี่ยตลอดการอบแห้ง (ช่วงความชื้นข้าวเปลือก 12-24%w.b.) ที่ระยะยกท่อลมเป่า และอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 20 kg233</p>	233
<p>ข.10 อุณหภูมิเฉลี่ยกับความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศแวดล้อม ช่วงทำการทดลองปัจจัยหลัก.....236</p>	236
<p>ข.11 อุณหภูมิเฉลี่ยกับความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศแวดล้อม ช่วงทำการทดลองปัจจัยรอง.....236</p>	236



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงความร้อน, m^2/s
β	=	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter ratio = d/D)
ε	=	สภาพเปล่งรังสี, สัมประสิทธิ์การขยายตัว (expansion coefficient), ค่าความพรุน
ε_c	=	สัดส่วนช่องว่างในท่อครอบ, %
σ	=	Stefan-Boltzmann constant, $W/(m^2 K^4)$
ρ	=	ความหนาแน่น, kg/m^3
ϕ	=	ค่าภาวะทรงกลมของวัสดุ, m^2/m^2
μ_a	=	ความหนืดของอากาศในกองวัสดุ, $kg/(m.s)$
μ_s	=	ความหนืดของอากาศที่ผิววัสดุ, $kg/(m.s)$
λ	=	ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ, J/kg
A	=	พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน, พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งและของไหล, พื้นที่ผิวของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พื้นที่หน้าตัดท่ออบแห้ง, m^2
a_p	=	พื้นที่ผิวของวัสดุต่อปริมาตรของเบค, m^2/m^3
a^*	=	ความเป็นสีแดง-เขียว, %
b^*	=	ความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน, %
C	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, $J/(kg K)$
C_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร, kg/m^3
C_{AS}	=	ความเข้มข้นของมวลสารที่อิ่มตัว, kg/m^3
C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, $kJ/(kg K)$
C_D	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอากาศ
C_d	=	สัมประสิทธิ์อัตราไหล (discharge coefficient)
C_v	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, $kJ/(kg K)$
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, mm
D_{AB}, D_{eff}	=	สัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจาย, สัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/s
D_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดของแข็ง, mm
DR	=	อัตราอบแห้ง, $kg \text{ water evaporated}/min$
d	=	มวลของวัสดุแห้ง, kg , เส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice plate, mm

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

E_P	=	พลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ, MJ/kg water evaporated
E_S	=	พลังงานทฤษฎีจำเพาะ, MJ/kg water evaporated
E_T	=	พลังงานรวมจำเพาะ, MJ/kg water evaporated
G	=	ฟลักซ์ของมวล, kg/m ² s
g	=	แรงโน้มถ่วง, m/s ²
HRV	=	ปริมาณข้าวต้น, %
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, J/kg
h', h	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/(m ² °C)
h'_D	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, kg/(m ² s)
I_B	=	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมขณะอบแห้ง, amp
k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัตถุ, W/(m °C)
		specific heat ratio
L^*	=	ความเป็นสีขา-ดำ, %
M	=	ความชื้นภายในข้าวเปลือก, decimal d.b.
\bar{M}	=	ความชื้นภายในเมล็ดเฉลี่ย, decimal d.b.
MaxMG=	=	ความชันความชื้นภายในเมล็ดสูงสุด, %w.b./mm
MCG	=	ค่าความชันความชื้นเฉลี่ยภายในเมล็ด, %w.b./mm
M_c	=	ค่าความชื้นวิกฤต, decimal d.b. หรือ % d.b.
M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, decimal d.b. หรือ % d.b.
M_e	=	ความชื้นสมดุล, decimal d.b. หรือ % d.b.
M_f	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย, decimal w.b.
M_i	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น, decimal w.b.
MinMG=	=	ความชันความชื้นภายในเมล็ดต่ำสุด, %w.b./mm
M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก, decimal w.b. หรือ % w.b.
\dot{m}	=	อัตราการไหล, kg/s
\dot{m}_v	=	อัตราอบแห้งเฉลี่ย, % w.b./min.
\bar{m}_w	=	มวลความชื้นทั้งหมดที่ระเหยจากกองข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง, kg
N_A	=	ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท, kg/s
Nu	=	Nusselt number

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P	=	ความดัน, Pa
P_f	=	ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
Pr	=	Prandtl number
Δp	=	ผลต่างความดันตกคร่อมที่แผ่น orifice plate, Pa
Q	=	พลังงานความร้อน, J, อัตราไหลปริมาตร, m^3/s
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
R	=	รัศมีวงกลม, m
Re	=	Reynolds number
RH	=	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ, %
RHRY	=	ปริมาณข่าวต้นสัมพัทธ์, %
RSVR	=	สัดส่วนปริมาตรสถานะคล้ายยาง, m^3/m^3
r	=	ระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง, m
S	=	พื้นที่ผิวแท้จริงของวัสดุ, m^2
SEM	=	Scanning electron microscope
Sc	=	Schmidt number
Sh	=	Sherwood number
SP	=	Inverter set point, %
SPEC	=	พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ, MJ/kg water evaporated
SSEC	=	พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ, MJ/kg water evaporated
SSFD	=	เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง
s	=	พื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุจริง, m^2
T	=	อุณหภูมิ, °C
T_∞	=	อุณหภูมิของกระแสของไหล, อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม, °C, K
T_a	=	อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, °C
T_{abs}	=	อุณหภูมิอากาศอบแห้งภายในชั้นเมล็ด, K
T_g	=	Glass transition temperature, °C
T_{in}	=	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน, °C
T_{out}	=	อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อน, °C
T_s	=	อุณหภูมิที่ผิวของเมล็ดของแข็ง, อุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, °C, K

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

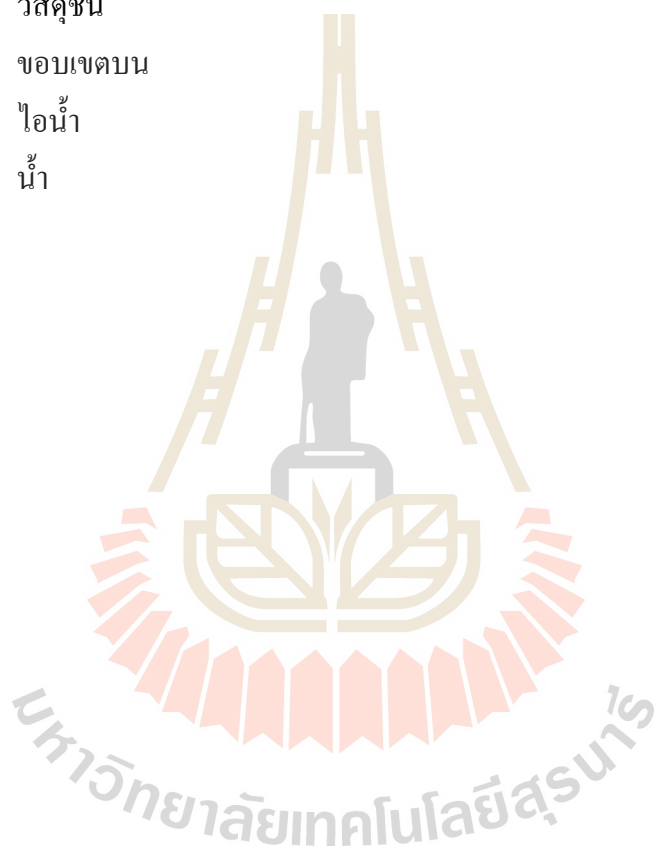
T_{wb}	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียก, °C
TG	=	ความชันอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าว, °C/mm
TSEC	=	พลังงานรวมจำเพาะ, MJ/kg water evaporated
t	=	เวลา, s
Δt_T	=	ระยะเวลาอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นถึงความชื้นต่ำกว่า 14% w.b., min
V	=	ความเร็ว, m/s, ปริมาตรทรงกลม, m ³
\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ยกระแสอากาศในท่อลมเข้า, m/s
V_B	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมขณะอบแห้ง, volt
V_c	=	ปริมาตรช่องว่างอากาศในท่อครอบ, m ³
V_{pc}	=	ปริมาตรข้าวเปลือกจริงในท่อครอบ, m ³
W, W_a	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง (ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ), kg/kg-dry air
WI	=	Whiteness index
w	=	มวลของวัสดุขึ้น, kg
w_i, w_f	=	มวลข้าวเปียกเริ่มต้นและสุดท้าย ตามลำดับ, kg
x	=	ระยะทางที่มวลสารเคลื่อนที่ไป, พิกัดมวลสาร, m
x_w	=	เศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศ
x_{ws}	=	เศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัว
YI	=	Yellowness index
y	=	ตำแหน่งตามแนวคิ่ง, m
Z	=	ระดับจากจุดอ้างอิง, m

สัญลักษณ์ล่าง

a	=	อากาศ
abs	=	สัมบูรณ์
amb	=	บรรยากาศแวดล้อม
avg	=	ค่าเฉลี่ย
eq	=	สมดุล
i	=	เงื่อนไขที่เป็นไปไม่ได้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

in	=	เริ่มต้น
j	=	เงื่อนไขที่ถูกต้อง
$layer$	=	ชั้นบาง
$lower$	=	ขอบเขตล่าง
p	=	วัตถุ, วัสดุ, เมล็ด
pw	=	วัสดุขึ้น
$upper$	=	ขอบเขตบน
v	=	ไอน้ำ
w	=	น้ำ



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นพืชเพื่อการบริโภคดำรงชีพของคนไทย และเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ ไทยมาช้านาน รวมถึงการส่งออกเพื่อสร้างรายได้ต่อการพัฒนาประเทศ การอบแห้งข้าวเปลือก ภายหลังการเก็บเกี่ยวมีความสำคัญมากมีจะนั้นผลผลิตข้าวเต็มเมล็ดและคุณภาพข้าวสารภายหลัง การขัดสีจะต่ำ โดยปกติเกษตรกรจะเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกที่ประมาณช่วงความชื้น 22-25% มาตรฐาน เปียก และจะต้องรีบลดความชื้นสู่ระดับ 12-14% มาตรฐานเปียก ภายใน 2-3 วันเพื่อให้ได้คุณภาพ ข้าวที่ดีในระหว่างการเก็บรักษาและการขัดสีให้เป็นข้าวสาร

การลดความชื้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการตากในนาข้าวบนตอซัง การตากริม ถนน การตากบนลานปูน วิธีการตากเหล่านี้มีข้อเสียคือการลดความชื้นของข้าวเปลือกขึ้นกับสภาพ ภูมิอากาศ ใช้เวลา แรงงานและพื้นที่เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ข้าวเปลือกยังมีการปนเปื้อนและมีความเสียหายปริมาณสูง ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเชิงกล (mechanical dryers) ซึ่งกำลังเข้ามามีบทบาทสำคัญในการลดการสูญเสียเนื่องจากการลดความชื้น ของข้าวเปลือก ลดความเสี่ยงเนื่องจากสภาพภูมิอากาศ ประหยัดเวลา และช่วยรักษาระดับคุณภาพ ข้าว (ขุนพล สังข์อริยกุล, 2544)

ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งมีหลากหลายรูปแบบที่เป็นที่นิยมในเชิงพาณิชย์ เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบไหลคลุกเคล้า (LSU) เครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน และเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง เป็นต้น ซึ่งแต่ละชนิดมีระดับการใช้พลังงาน ระยะเวลาอบแห้ง ช่วงการทำงานที่เหมาะสม ขั้นตอนการอบแห้ง และได้คุณภาพข้าวเปลือกที่แตกต่างกัน

ในการวิจัยของ รศ.ดร. ทวิช จิตรสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้คิดค้น เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกชนิดใหม่คือเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ (กรมทรัพย์สินทางปัญญา, 2550) ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาผลกระทบของ อุณหภูมิอากาศ ความเร็วอากาศ ระยะเวลาการพักข้าวเปลือก อุณหภูมิเปลี่ยนแก้วของข้าวเปลือก (glass transition temperature) และความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่มีผลต่ออัตราอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพข้าวเปลือกที่ได้ ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า การไหลอย่างคลุกเคล้าระหว่างข้าวเปลือกและลมร้อนด้วยความเร็ว สัมพัทธ์ที่สูงของเครื่องอบแห้งนี้ ทำให้การถ่ายเทความร้อนและความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว

เนื่องจากผลของความหนาของชั้นซิดผิวที่ลดลง และความพรุนในชั้นเมล็ดที่สูงขึ้นระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้ง (เกรียงไกร เพชรน้ำเขียว และคณะ, 2551) อีกทั้งการใช้อุณหภูมิความร้อนที่สูงช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดให้สูงขึ้น (ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณะ, 2549) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้เครื่องอบแห้งนี้ยังมีการพัดตัวของข้าวโดยอัตโนมัติ ซึ่งมีเวลาให้ข้าวเกิดการกระจายความชื้นภายในออกมาที่ผิว ส่งผลให้ความชื้นที่ผิวเมล็ดมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเข้าสู่การอบแห้งในรอบต่อไป จึงสามารถถึงความชื้นที่ผิวออกได้อย่างรวดเร็วกว่าปกติ ทำให้การใช้พลังงานโดยรวมลดลงและอัตราอบแห้งค่อนข้างคงที่ตลอดกระบวนการ (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2552ก) โดยการกระจายความชื้นภายในอย่างสม่ำเสมอขณะพัก ยังช่วยลดความเค้นสะสมที่ตกค้างภายในเมล็ด ซึ่งช่วยลดการเกิดรอยร้าวเนื่องจากกระบวนการอบแห้งได้ ทำให้ได้ปริมาณข้าวต้นที่สูง แม้จะทำการอบแห้งจนข้าวเปลือกมีความชื้นที่ต่ำมากกว่าปกติก็ตาม (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2552ข)

เพื่อต่อยอดงานวิจัยดังกล่าว จึงนำมาสู่การออกแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกของงานวิจัยนี้ โดยข้าวเปลือกและลมร้อนควรไหลอย่างคลุกเคล้าด้วยความเร็วสัมพัทธ์ที่สูง และมีระยะเวลาสัมผัสระหว่างลมร้อนและข้าวเปลือกที่สูงขึ้น ใช้อุณหภูมิความร้อนที่สูงในช่วง 80-120°C และควรมีกระบวนการหมุนงข้าวระหว่างการตกลงอย่างอิสระ ซึ่งน่าจะทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็วและประหยัดพลังงาน โดยที่ข้าวเปลือกยังคงมีคุณภาพดี

1.2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัย : การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าฟ่น-หล่นหน่วง

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าฟ่น-หล่นหน่วง (spouted-sustain fall rice paddy dryer, SSFD) ที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ ใช้วิธีการเป่าฟ่นข้าวเปลือกด้วยลมร้อนในทอกลมที่ตั้งอยู่ในแนวดิ่ง ทำให้ข้าวเปลือกลอยตัวจากด้านล่างของทอ สู่ปลายด้านบนของทอ จากนั้นปล่อยข้าวออกสู่ท่อครอบที่ใหญ่กว่าแล้วให้ข้าวตกลงด้านล่างพร้อมกับลมร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ในระหว่างการตกลงมาจะมีตะแกรงเพื่อชะลอการตกของข้าวเป็นชั้น ๆ ทำให้ข้าวมีระยะเวลาสัมผัสลมร้อนมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง จากนั้นข้าวจะตกลงสู่ถังพักด้านล่าง เพื่อรอการไหลไปเข้าท่อเป่าฟ่นในรอบต่อไป จนกระทั่งข้าวเปลือกแห้งได้ระดับตามที่ต้องการ

เครื่องอบแห้งนี้เป็นการผสมผสานข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด (spouted bed) กับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ กล่าวคือมีการพ่นข้าวเปลือกขึ้นไปในทอแนวดิ่งเหมือนกับเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด การเป่าฟ่นกระทำผ่านทอกลมเป่า (draft tube) ในแนวดิ่ง ทอกลมเป่าในเครื่องนี้ทำหน้าที่สองอย่างพร้อมกัน ไปด้วยคือเลี้ยงข้าวขึ้นที่สูงและอบแห้ง การเป่าฟ่นจะทำให้ข้าวและลมร้อนไหลอย่างคลุกเคล้าด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและ

ความชื้นเป็นอย่างดี เนื่องจากการเป่าพ่นข้าวต้องใช้ลมร้อนปริมาณมาก จึงทำให้อากาศที่ออกจากปลายท่ออบแห้งยังคงมีศักยภาพในการอบแห้งเหลืออยู่มาก ดังนั้นในการอบแบบสเปาเต็ดเบดจึงมักต้องวนเอาอากาศอบแห้งส่วนหนึ่งกลับมาใช้อีกซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและส่งผลถึงราคาและการใช้พลังงานของเครื่องอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ท่อลมเป่าที่มีความยาวมากกว่าทั่วไป และบังคับให้ข้าวตกหล่นลงด้านล่างพร้อมกับลมร้อนในท่อครอบ ซึ่งในท่อครอบนี้ยังจัดให้มีการชะลอการตกของข้าวด้วยตะแกรงเป็นชั้น ๆ ส่งผลให้ข้าวมีเวลารับความร้อน (residence time) นานยิ่งขึ้นกว่าการปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระ จึงเป็นการใช้ลมร้อนอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ การที่ข้าวกองตัวเป็นชั้นบาง (thin layer) บนตะแกรงจะทำให้ลมร้อนสามารถไหลผ่านได้โดยง่าย ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจึงน่าจะดีกว่าการกองตัวแน่น (packed bed) ดังที่เกิดขึ้นกับเครื่องอบแห้งแบบ LSU สำหรับเมล็ดข้าวจะตกลงสู่ถังพักด้านล่างเพื่อรอการไหลไปเข้าท่อเป่าพ่นในรอบต่อไป ระยะเวลาที่ข้าวพักตัวในถังพักจะช่วยให้เกิดการแพร่กระจายความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิว ดังนั้นการอบแห้งในรอบถัดไปน่าจะสามารถลดความชื้นของข้าวได้ง่ายกว่าปกติ นอกจากนี้ การพักในถังพักยังส่งผลให้ความชันความชื้นภายในเมล็ด (moisture content gradient, MCG) ลดลง ทำให้ความเค้นตึงลดลงด้วย ดังนั้นจึงคาดว่าแม้จะอบแห้งจนถึงระดับความชื้นต่ำที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา ค่าความเค้นตึงสูงสุดจะไม่เกินค่าความแข็งแรงของเมล็ดข้าวที่รับได้ และไม่เกิดการร้าวภายในเมล็ด ทำให้สามารถขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวต้นที่สูง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาข้อมูลเชิงวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาการการเกษตรของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งนี้ (SSFD) โดยทำการปรับปัจจัยการทดลองคือ อุณหภูมิอากาศ ความเร็วอากาศ อัตราการไหลของข้าว อัตราการหมุนวงกลมไหล ระยะเวลาพักข้าว รวมทั้งสายพันธุ์ของข้าว และวิเคราะห์ประเด็นการเปลี่ยนแก้ว (glass transition) เพื่อเสาะหาจุดหรือย่านปฏิบัติการที่เหมาะสม เพื่อประโยชน์ในการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ประหยัดเวลา (อบอย่างรวดเร็ว) รวมทั้งได้คุณภาพข้าวสารที่ดี (มีการแตกหักน้อย และมีความขาวสูง) นอกจากนี้ยังจะทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองการอบแห้งโดยการใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB เพื่อทำนายผลที่นอกเหนือจากการทดลอง ซึ่งวิธีการนี้เป็นการประหยัดเวลาและงบประมาณในการวิจัย

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่น-หล่นหน่วงโดยพิจารณาผลของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการไหลของข้าว อัตราการหมุนวงกลมไหลของข้าว ระยะเวลาพักข้าว สายพันธุ์ของข้าว และวิเคราะห์ประเด็นอุณหภูมิเปลี่ยนแก้วของ

ข้าวเปลือก (glass transition temperature, T_g) ที่มีต่ออัตราอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพข้าวเปลือกที่ได้

1.3.2 วิเคราะห์หาเงื่อนไขหรือแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม ที่เพิ่มอัตราอบแห้ง ลดการใช้พลังงาน ขณะที่คุณภาพของข้าวเปลือกอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่น-หล่นหน่วง

1.3.3 สร้างแบบจำลองการอบแห้งโดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความยาวท่อลมเป่า ที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่น-หล่นหน่วง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่น-หล่นหน่วง เครื่องอบแห้งจะเป็นเครื่องขนาดเล็กระดับห้องปฏิบัติการ มีขนาดบรรจุข้าวเปลือก 30 kg

1.4.2 พิจารณาผลของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการไหลของข้าว อัตราการหน่วงการไหลของข้าว ระยะเวลาพักข้าว สายพันธุ์ของข้าว และวิเคราะห์ประเด็นอุณหภูมิเปลี่ยนแก้วของข้าวเปลือก (glass transition temperature, T_g) ที่มีต่ออัตราอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพข้าวเปลือกที่ได้

1.4.3 ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นมีค่าอยู่ในช่วงการเก็บเกี่ยวจริงประมาณ 22-25% w.b.

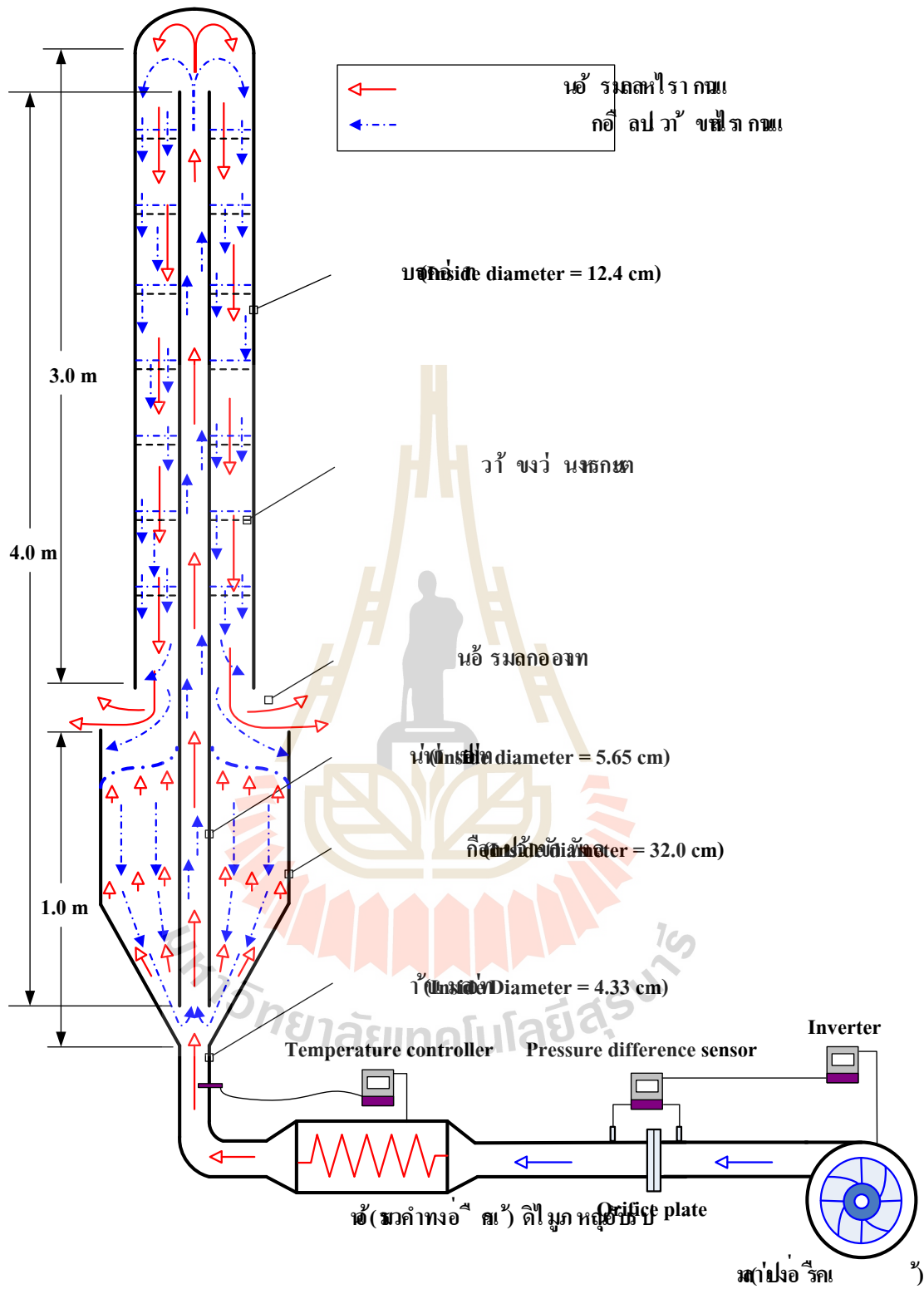
1.4.4 ความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีค่าประมาณ 14% w.b.

1.4.5 ใช้แบบจำลองเมล็ดรูปทรงกลมใน 1 มิติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้จุดปฏิบัติการที่ดีของเครื่องอบแห้งชนิดใหม่ ซึ่งอาจขยายผลสู่เครื่องขนาดใหญ่เชิงพาณิชย์ได้

1.5.2 ได้แนวทางและข้อมูลในการปรับปรุงเครื่องอบแห้งให้ดียิ่งขึ้นต่อไป



รูปที่ 1.1 แผนภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและคำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยแบ่งเป็น ความชื้นวัสดุ ประเภทของความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นสมดุลของวัสดุ การถ่ายเทความร้อนและมวล ในการอบแห้ง หลักการอบแห้ง กลไกการแพร่ความชื้นภายในเมล็ด อัตราการอบแห้ง การเกิดรอยแตกในเมล็ดข้าว การพักในที่อับอากาศ Gelatinization Glass transition temperature ลักษณะทางกายภาพของข้าว ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย การลดความชื้นข้าวเปลือก และวิธีการหาค่าความชื้น

2.1 ความชื้นวัสดุ

ความชื้นเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้ 2 แบบคือ

2.1.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก เป็นค่าที่นิยมใช้กันในวงการค้า

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

2.1.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง เป็นค่าที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เนื่องจากมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง

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

เมื่อ w = มวลของวัสดุชื้น, kg
 d = มวลของวัสดุแห้ง, kg

2.2 ประเภทของความชื้น

ความชื้นเมล็ดสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้ำและเมล็ด ดังนี้

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

2.2.2 ความชื้นภายในเมล็ด เป็นความชื้นที่เมล็ดสามารถดูดซับไว้ภายในได้ จึงระเหยได้ยากกว่า อัตราการระเหยหรืออัตราการคายความชื้นขึ้นอยู่กับระดับความชื้นภายในเมล็ด ลักษณะหรือชนิดของเมล็ด อุณหภูมิ และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการลดความชื้น

2.2.3 ความชื้นซึ่งไม่สามารถทำให้ระเหยออกได้ เป็นความชื้นในเมล็ดซึ่งโมเลกุลของน้ำยึดติดแน่นกับโมเลกุลของแป้ง และ โปรตีน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเมล็ด (ต่ำกว่า 2% w.b.) (ไมตรี แนวพนิช, ม.ป.ป.)

2.3 ความชื้นสัมพัทธ์

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

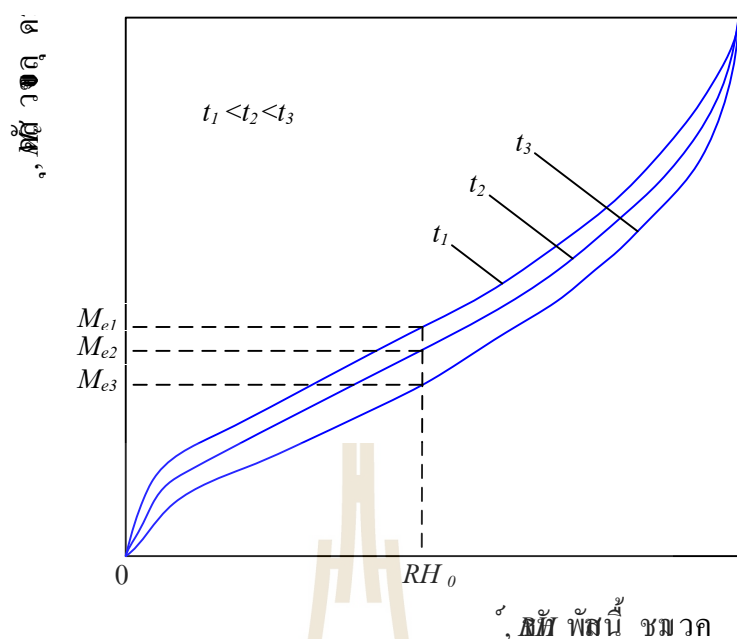
$$RH = \frac{x_w}{x_{ws}} \times 100 \quad (2.3)$$

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

ค่าความชื้นสัมพัทธ์บ่งบอกถึงศักยภาพในการรับความชื้นของอากาศขณะนั้น หากอากาศที่ใช้อบแห้งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงถึงระดับหนึ่งอากาศจะไม่สามารถรับความชื้นเพิ่มจากเมล็ดได้อีก (สอดคล้องกับค่าความชื้นสมดุลของวัสดุ) ดังนั้นจึงไม่เกิดการอบแห้งขึ้น

2.4 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

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



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอร์มแบบคายน้ำ สำหรับวัสดุทางการเกษตร

พิจารณาในด้านการอบแห้ง ค่าความชื้นสมดุลบ่งบอกถึงระดับความชื้นเมล็ดต่ำสุดที่สภาวะอากาศอบแห้งนั้นจะสามารถทำได้ ตัวอย่างเช่น การอบแห้งเมล็ดที่มีความชื้นสูงด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิ t_1 และความชื้นสัมพัทธ์ RH_0 พิจารณาตามรูปที่ 2.1 พบว่าค่าความชื้นสมดุลในกรณีนี้เท่ากับ Me_1 ดังนั้นเมื่อเมล็ดมีความชื้นลดลงเท่ากับ Me_1 แล้ว หลังจากนั้นหากอบแห้งด้วยสภาวะอากาศอบแห้งเดิม จะไม่สามารถลดความชื้นเมล็ดเพิ่มได้อีก เนื่องจากเกิดความสมดุลระหว่างความดันไอภายในเมล็ดกับความดันของความชื้นในอากาศอบแห้งจึงไม่เกิดการถ่ายเทมวลความชื้นขึ้นระหว่างเมล็ดกับอากาศ

2.5 การถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้ง

2.5.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนระหว่างสองสิ่งใด ๆ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ทิศทางการถ่ายเทความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ และอัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับระดับความแตกต่างของอุณหภูมิ แบ่งได้เป็นการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

2.5.1.1 การนำความร้อน (conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างโมเลกุลของสสารชนิดหนึ่งที่อยู่ติดกัน สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ถ้าเกิดขึ้นใน

ของเหลวหรือก๊าซอาจเรียกว่า การแพร่ แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดังสมการ Fourier's law of heat conduction

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

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

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

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

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

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

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

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

พิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นฉนวน เมื่อระบบอยู่ในสมดุล และสมมติว่าการแผ่รังสีความร้อนน้อยมาก อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาจากกระแสการไหลจะมีค่าเท่ากับการนำความร้อนที่ผิวของแข็ง จะได้ว่า

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

เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง D_p และจัดเทอมใหม่จะได้ว่า

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

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

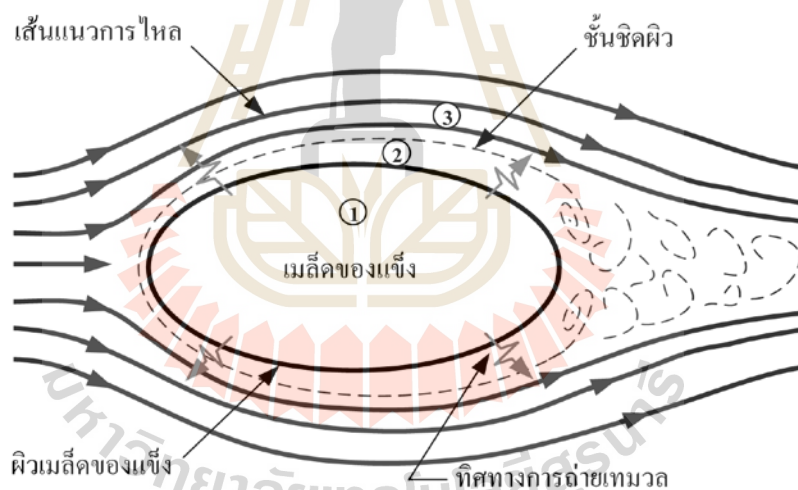
$$Nu = Nu_0 + a Re^m Pr^n \quad (2.9)$$

เมื่อ Nu_0 = ค่าตัวเลขนัสเซลต์จากการถ่ายเทแบบการนำเพียงอย่างเดียว

2.5.2 การถ่ายเทมวล

ทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวของแข็ง และของไหลนั้น ปริมาณการถ่ายเทจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร ที่ใดมีมวล และความเข้มข้นมากกว่าจะแพร่ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า

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



รูปที่ 2.2 การแพร่ของมวลจากเมล็ดของแข็งไปยังของไหล

อัตราการแพร่ของมวลที่ผิวของเมล็ดของแข็งที่เป็นแบบการฟุ้งกระจายของโมเลกุลแสดงได้ดังสมการ Fick's law of diffusion

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

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

การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นซิดผิวของเม็ดของแข็งสู่กระแสของไหล สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์คล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังนี้

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

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

เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลปริมาณมวลสารในสมการ (2.11) เท่ากับปริมาณมวลสารในสมการ (2.10) จะได้

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

เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง D_p และจัดเทอมใหม่จะได้ว่า

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

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

สัดส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการฟุ้งกระจายที่ผิวของแข็งกับการถ่ายเทมวลด้วยการพาใน

กระแสของไหล สำหรับค่าความเข้มข้นของสาร A ในกระแสของไหลในทอมนด้านขวาของสมการ ย่อมขึ้นกับขนาดการไหลและสมบัติทางกายภาพของระบบทั้งหมด ดังนั้นเมื่อกระจายแล้วสามารถ แสดงในทอมนของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) และตัวเลขชมิทต์ (Schmidt number, Sc) จากการศึกษาดูการวิเคราะห์ทอมนไม่มีหน่วย มักได้ความสัมพันธ์ของตัวเลขต่าง ๆ ดังนี้ (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540)

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

เมื่อ Sh_0 = ค่าตัวเลขเชอร์วูดจากการถ่ายเทแบบฟุ้งกระจายของโมเลกุลอย่างเดียว

2.6 หลักการอบแห้ง

การอบแห้งคือการประยุกต์ใช้ความร้อนภายใต้เงื่อนไขที่ถูควบคุมเพื่อเคลื่อนย้ายน้ำใน วัสดุด้วยการระเหย ซึ่งจุดประสงค์หลักของการอบแห้งก็เพื่อยืดอายุและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การเกษตร โดยการลดความชื้นภายในวัสดุให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา อันเป็น การช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาต่างๆที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพ ใน การอบแห้งโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางจะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลขึ้นพร้อมๆกัน โดยเริ่มจากอากาศที่มีอุณหภูมิสูงไหลผ่านวัสดุที่มีความชื้น ความร้อนถูกถ่ายเทไปยังผิว ความร้อน ที่ได้รับถูกใช้เพื่อเป็นความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ ใอน้ำจะแพร่ผ่านชั้นผิวบางของอากาศร้อนและถูก ลำเลียงออกด้วยอากาศร้อนที่เคลื่อนที่ จึงเกิดขอบเขตที่มีความดันไอน้ำต่ำที่บริเวณผิวของวัสดุ และ ทำให้เกิดความชันของความดันไอน้ำจากภายในวัสดุไปยังอากาศอบแห้ง ความชันนี้ทำให้เกิดแรง ขับเพื่อเคลื่อนย้ายน้ำจากภายในวัสดุ ซึ่งหลากหลายทฤษฎีถูกนำเสนอเพื่ออธิบายกลไกการเคลื่อนที่ ของความชื้นในวัสดุระหว่างการอบแห้ง

2.7 กลไกการแพร่ความชื้นภายในเมล็ด

การส่งผ่านความชื้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน แม้ในปัจจุบันก็ยังไม่มีเป็นที่กระจ่างชัดเต็มที่ ทฤษฎีมากมายจึงถูกนำเสนอเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุทางการเกษตร การลำเลียง ความชื้นในวัสดุอาจเกิดด้วยกลไกการถ่ายเทมวลดังต่อไปนี้ (ซึ่งอาจมีได้มากกว่าหนึ่งกลไก)

1. การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากแรงแคปิลารีซึ่งเป็นผลจากแรงตึงผิว
2. การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างความเข้มข้นของความชื้น
3. การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็ก ๆ

4. การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม
5. การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

2.8 อัตราการอบแห้ง

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

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

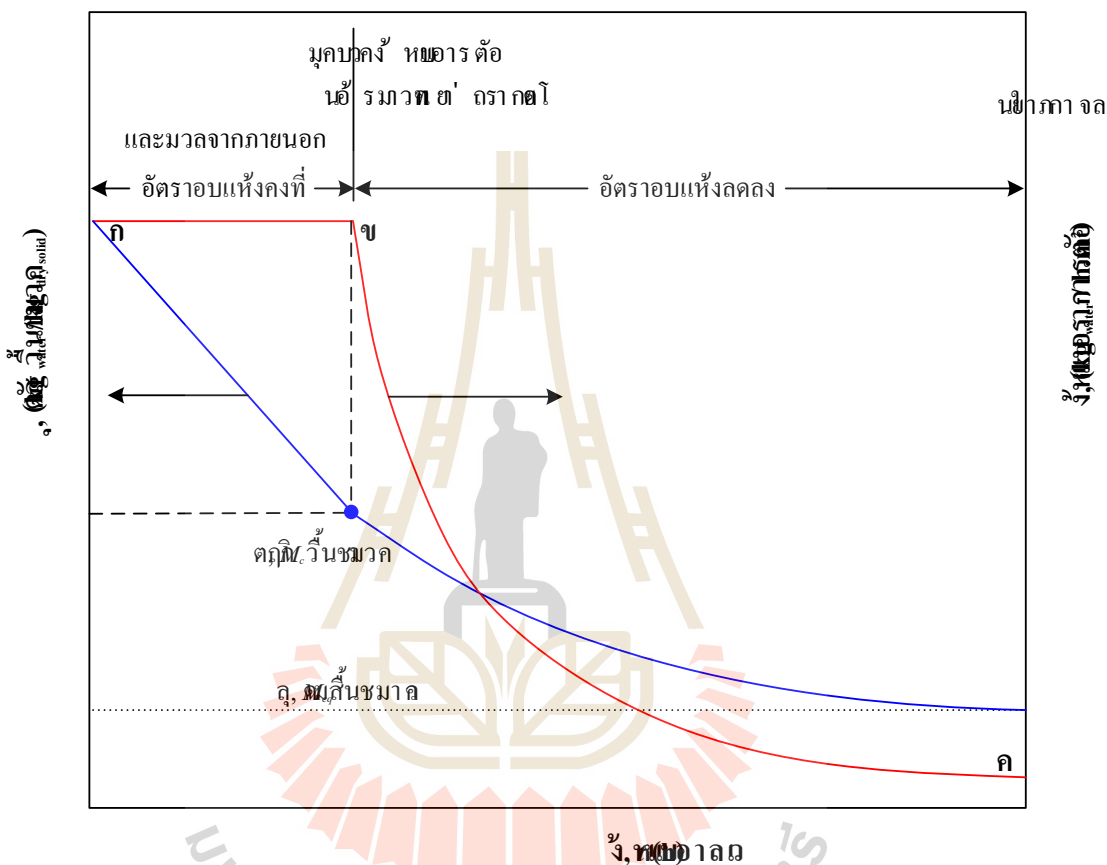
2.9 การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่

ในช่วงอัตราอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบ ๆ ผิววัสดุเท่านั้น สังเกตได้จากผิววัสดุจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ในช่วงนี้ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราอบแห้งคือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วอากาศ โดยที่สมการอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่แสดงดังนี้

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

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

จากสมการพบว่าอัตราการอบแห้งสามารถเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งกระทำได้ด้วย การเพิ่มความเร็วอากาศ อันส่งผลให้ความหนาของชั้นซิดผิวรอบวัสดุลดลง ดังนั้นการพาความร้อนจึงดียิ่งขึ้น หรือการเพิ่มอุณหภูมิอากาศ (T_a) ซึ่งทำให้ผลต่างอุณหภูมิ ($T_a - T_{wb}$) มีค่ามากขึ้น หรือทำให้วัสดุพรมตัวหรือมีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัส (A)



รูปที่ 2.3 การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่และลดลง

2.10 การอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งลดลง

ช่วงอัตราอบแห้งลดลงเป็นช่วงที่กระบวนการระเหยเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในวัสดุที่ถูกอบแห้ง และน้ำต้องแพร่ผ่านชั้นวัสดุแห้งไปยังอากาศอบแห้ง (ซึ่งแสดงถึงข้อจำกัดที่ผิววัสดุไม่สามารถส่งผ่านความชื้นอิสระที่เพียงพอจะทำให้อากาศที่สัมผัสวัสดุมีความชื้นอิ่มตัว) ทำให้อัตราอบแห้งในช่วงนี้ขึ้นกับกลไกการแพร่ความชื้นจากภายในสู่ผิววัสดุ โดยทั่วไปช่วงอัตราอบแห้งลดลงมักเป็นช่วงที่ใช้เวลานานที่สุดในการอบแห้งของวัสดุชีวภาพ ถ้าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต เส้นแนวการอบแห้งที่ได้จะพบเพียงช่วงอัตราอบแห้งลดลงเท่านั้น

2.11 การเกิดรอยร้าวในเมล็ดข้าว

ระหว่างการอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ดข้าวจะเกิดขึ้นพร้อมกันอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ภายหลังการอบแห้ง เมล็ดข้าวจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและความชื้นภายในลดลง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดข้าวส่งผลให้เมล็ดเกิดการขยายตัว ขณะที่การลดลงของความชื้นภายในเมล็ดข้าวส่งผลให้เกิดการหดตัว ดังนั้นระหว่างการอบแห้งเมล็ดข้าวจะถูกกระทำด้วยแรงที่ซับซ้อน เนื่องจากความชื้นและความร้อน (Bala, 1997)

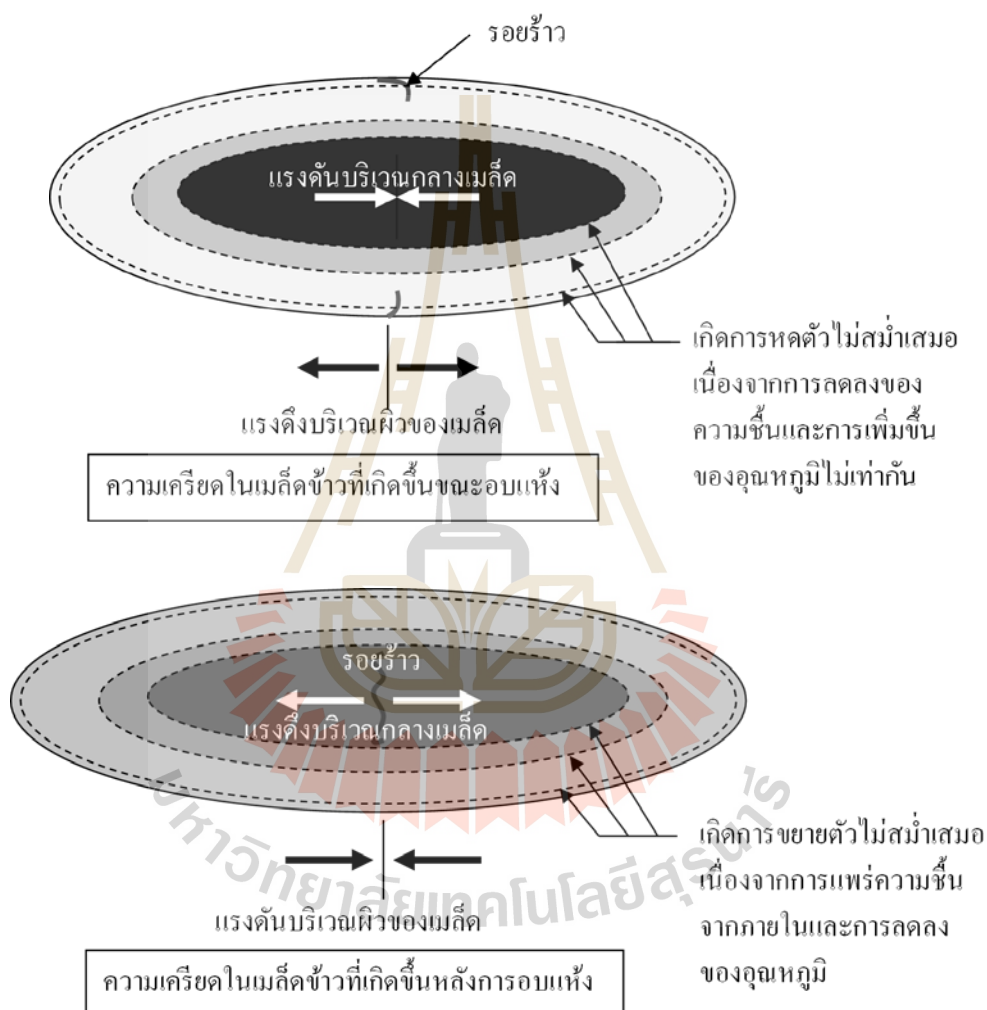
คำว่า “รอยร้าว” ถูกใช้เพื่อกำหนดลักษณะรอยแยกขนาดใหญ่ที่มักจะตั้งฉากกับแกนยาวของเมล็ด รอยแตกมักเกิดจาก 1. ผิวเมล็ดดูดซับความชื้นกลับจากสิ่งแวดล้อม (Banaszek and Siebenmorgen, 1990), 2. ผิวเมล็ดดูดซับความชื้นจากแกนกลางของเมล็ด 3. ผิวเมล็ดดูดซับความชื้นจากแกนกลางของเมล็ดและสิ่งแวดล้อม ภายใต้บางเงื่อนไข ความชันอุณหภูมิอาจมีอิทธิพลต่อการพัฒนาของรอยร้าว

การแห้งของข้าว ทั้งบนต้นข้าวระหว่างการเพาะปลูกและภายหลังการเก็บเกี่ยว เป็นเหตุให้เซลล์ชั้นนอกสุดของเมล็ดเกิดการหดตัวขณะที่เมล็ดสูญเสียความชื้น เพื่อให้ความชื้นไหลจากภายในเมล็ดสู่สิ่งแวดล้อม ความชันความชื้นภายในเมล็ด (moisture content gradient) ต้องปรากฏขึ้นจากแกนกลางถึงผิวของเมล็ด ดังนั้น ส่วนด้านในของเมล็ดจะมีความชื้นสูงกว่าส่วนผิว ผลคือเซลล์ผิวของเมล็ดมีแนวโน้มหดตัวขณะที่เมล็ดสูญเสียความชื้น ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวและแรงกดที่แกนกลางเมล็ด ความเค้นลักษณะนี้อาจเกิดขึ้นเป็นความเค้นตกค้าง (residual stresses) ภายในเมล็ดระหว่างสูญเสียความชื้นและบางช่วงภายหลังการอบแห้ง (Kunze and Choudhury, 1972) ยกตัวอย่างเช่น สมมุติให้โดยตลอดวงรอบนอกของเมล็ดมีอัตราอบแห้งคงที่ ทำให้เกิดแรงดึง (tensile force) ที่ผิวเมล็ดเนื่องจากการหดตัวของผิวเมล็ดและเกิดแรงกด (compressive force) ภายในเมล็ด เมื่อขนาดแรงดึงที่ผิวเมล็ดเกินกว่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) ที่เมล็ดสามารถต้านทานได้ ผิวเมล็ดจะปริออกและขยายไปตามแนวขวางของเมล็ด เหตุที่เมล็ดเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดึง เพราะเมล็ดข้าวมีความสามารถรับแรงดึงได้น้อยกว่าแรงกดหลายเท่า (Kunze et al., 1985) ด้วยเหตุผลเดียวกันสามารถอธิบายขณะที่เมล็ดดูดซับความชื้น ทำให้เกิดแรงกด (compressive force) ที่ผิวเมล็ด และเกิดแรงดึง (tensile force) ที่ส่วนแกนของเมล็ด เมื่อขนาดแรงดึงที่แกนกลางเมล็ดมีค่าเกินกว่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) ที่เมล็ดสามารถต้านทานได้ รอยร้าวจะเกิดขึ้นจากส่วนกลางเมล็ดและขยายไปตามแนวขวางของเมล็ด (ไมตรี แนวพนิช, ม.ป.ป.) แสดงในรูปที่ 2.4

เมล็ดข้าวภายใต้การถ่ายเทความชื้นและความร้อนพร้อมกันอย่างต่อเนื่องระหว่างการอบแห้ง เพราะความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพและเชิงความร้อน ของแต่ละชั้นในเมล็ดทำให้การขยายและหดตัวมีความแตกต่างกัน ผลจากความชันอุณหภูมิ (temperature gradient) และความ

ชั้นความชื้นภายใน (moisture content gradient) ความเค้นจึงถูกสร้างขึ้นภายในเมล็ด ถ้าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่าความแข็งแรงของเมล็ด (kernel's strength) รอยร้าวจะเกิดขึ้นภายในเมล็ด

ความแตกต่างของสมบัติการขยายตัวและหดตัวของชั้นแป้งในเมล็ดข้าว ถูกเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของชั้นแป้งเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว (glass transition temperature) ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.4 รอยร้าวในเมล็ดข้าว ขณะอบแห้งและภายหลังการอบแห้ง (ไมตรี แนวพนิช, ม.ป.ป.)

2.12 การพักในที่อับอากาศ (Tempering)

การทำ tempering หรือที่เรียกว่าการพักในที่อับอากาศ เป็นขั้นตอนหนึ่งที่นิยมในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก เป็นการนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาทำการพักทันทีในที่ปิด

สนิทไม่มีการแลกเปลี่ยนอากาศกับสิ่งแวดล้อม เช่นในถังหรือตู้อบ และควบคุมอุณหภูมิถึงหรือตู้อบให้เท่ากับอุณหภูมิข้าวเปลือกหลังออกจากเครื่องอบแห้งตลอดระยะเวลาพัก

เนื่องจากการอบแห้งทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นภายในกับที่ผิวเมล็ดขึ้น (moisture content gradient : ความชันความชื้นภายในเมล็ด) ด้วยเหตุนี้ในช่วง tempering เมล็ดจะใช้ช่วงเวลาดังกล่าวในการแพร่ความชื้นจากภายในมาสู่ที่ผิวเมล็ด ทำให้เกิดความสม่ำเสมอของความชื้นตลอดทั่วทั้งเมล็ด การกระจายความชื้นจะเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ทำให้การขยายตัวของเนื้อเมล็ด (เนื่องด้วยความชื้น) ในแต่ละชั้นมีขนาดใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ขนาดความเค้นเนื่องจากการขยายตัวลดลง ทำให้ไม่เกิดการแตกร้าวภายในเนื้อเมล็ด ขณะเดียวกันการทำ tempering เป็นการยืดเวลาที่ข้าวอยู่ในสภาพอุณหภูมิสูงซึ่งอุณหภูมิสูงเป็นปัจจัยที่เร่งความเก่าของข้าว และเนื่องจากการพักในที่อับอากาศ จึงสามารถประมาณได้ว่าไม่เกิดการลดลงของความชื้นเมล็ดในช่วง tempering แต่มีข้อดีคือช่วยเพิ่มอัตราอบแห้งภายหลังการทำ tempering ได้

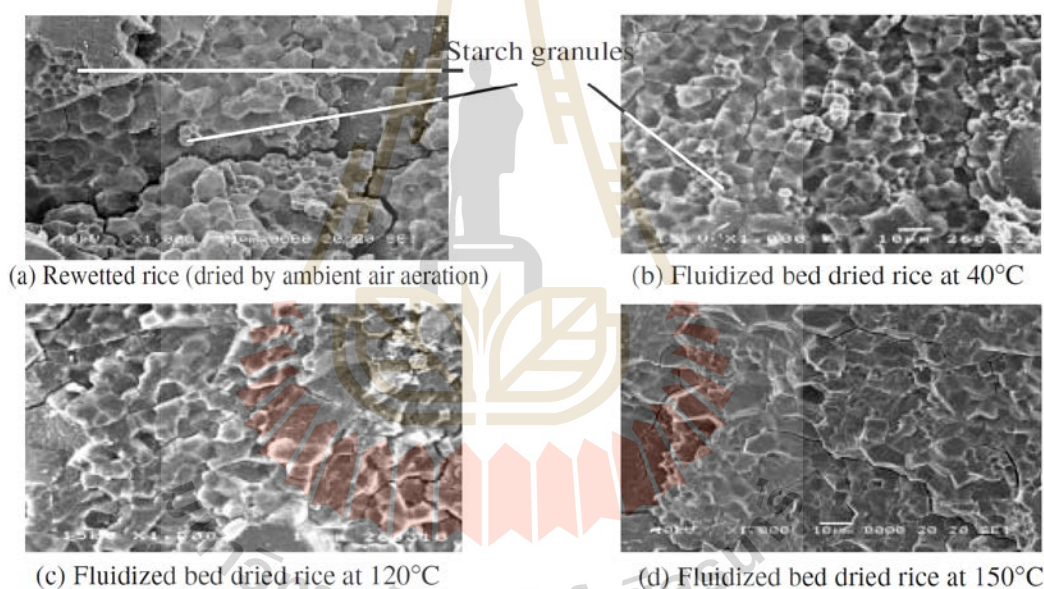
ข้อเสียของการทำ tempering คือ ข้าวที่ผ่านการทำ tempering จะมีความขาวต่ำกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการทำ tempering เนื่องจากการทำ tempering ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาที่นานกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการทำ tempering ข้าวจึงเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองมากขึ้น จึงทำให้ได้ความขาวต่ำกว่า นอกจากนี้ข้าวที่ผ่านการทำ tempering ยังมีกลิ่นเหม็นค่อนข้างสูง เนื่องจากการรักษาระดับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวทำให้อยู่ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในเมล็ดข้าว ซึ่งทำให้เกิดสารประกอบคาร์บอนิล ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นภายในเมล็ดข้าว

2.13 Gelatinization

ปรากฏการณ์ gelatinization คือปรากฏการณ์ของน้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโมเลกุลของเมล็ดสตาร์ช (starch granule) เนื่องจากความร้อนทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของแป้งในเมล็ดแป้ง สายพอลิเมอร์ของอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) ที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดแป้งจะคลายตัวและรวมกับน้ำที่ล้อมรอบส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏ เมล็ดแป้งพองตัว และความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิที่แป้งเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ อยู่ในช่วงประมาณ 60-70°C

ในการอบแห้งข้าวเปลือกปรากฏการณ์ gelatinization เกิดขึ้นเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นสูง (มากกว่า 23% w.b.) และลมร้อนมีอุณหภูมิสูงเพียงพอ ทำให้แป้งภายในเมล็ดข้าวมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์ คือ 68-78°C ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดเจล เม็ดแป้งภายในเมล็ดข้าวจะเกิดการบวม (swelling) (สำหรับข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยว จะเกิดเจลเพียงบางส่วน (partial gelatinization) เพราะปริมาณน้ำภายในเมล็ดไม่เพียงพอต่อการเกิดเจลโดย

สมบูรณ์) การบวมของเม็ดแป้งประกอบกับการละลายออกของโมเลกุลอะไมโลสจากเม็ดแป้ง (เนื่องจากพันธะระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสกับอะไมโลเพคตินในเม็ดแป้งจะถูกคลายออก ในช่วงอุณหภูมิเจลลิตไนซ์ นำไปสู่การเกิดเจลบางส่วน) ขณะที่กลุ่มเม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเครือข่าย ซึ่งสนับสนุนให้เจลที่เกิดขึ้นช่วยให้เม็ดมีความแข็งแรงมากขึ้น โครงสร้างของเม็ดแป้งในที่สุดจะถูกแยกออกจากกันและเม็ดแป้งที่อยู่ติดกันจะถูกเชื่อมติดกันในรูปแบบกลุ่มคอมโพสิต ซึ่งภายในเป็นเนื้อเดียวกันและไม่สามารถระบอบเขตของเม็ดแป้งได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การเชื่อมติดกันเป็นเนื้อเดียวของเม็ดแป้ง ช่วยเชื่อมรอยร้าวที่เกิดขึ้นก่อนและระหว่างการอบแห้งได้ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดแป้งเพิ่มสูงขึ้น เมล็ดข้าวมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น จึงมีแรงต้านทานต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการขัดสีได้มากขึ้น จึงได้ปริมาณข้าวต้นมากขึ้น (Tirawanichakul et al., 2004)



รูปที่ 2.5 SEM ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี1 ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ (Tirawanichakul et al., 2004)

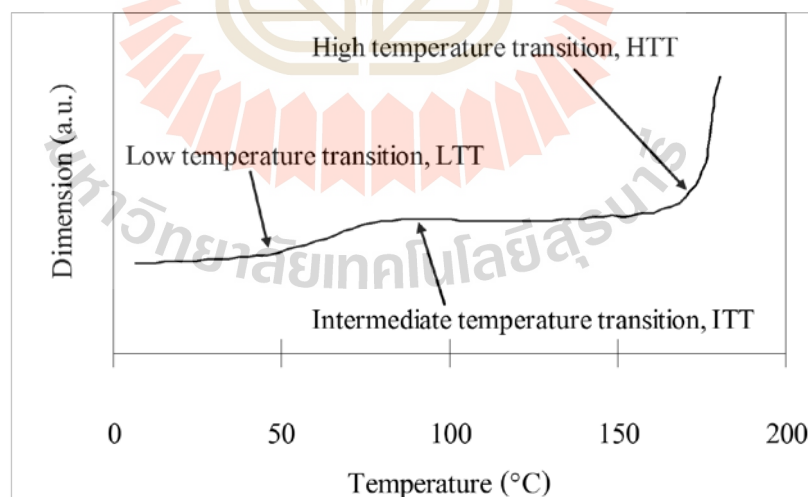
2.14 Glass transition temperature

เมล็ดข้าวเป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากพอลิเมอร์ชีวภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบด้วยแป้ง (starch) ที่เป็นส่วนผสมของอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) กับ โปรตีน และไขมันเล็กน้อย โดยมีความชื้นทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลเนื่องจากความร้อนได้มากมายหลายสถานะเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างและรูปร่างลักษณะของเมล็ดข้าวเป็นอย่างยิ่ง ข้อมูลเหล่านี้จะ

ช่วยเสริมความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของเมล็ดข้าวขณะทำการอบแห้งด้วยเหตุนี้จึงช่วยพัฒนากระบวนการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

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

การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลเนื่องจากความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์สามารถศึกษาได้ด้วยหลากหลายเทคนิคตัวอย่างเช่น Differential Scanning Calorimeter (DSC), High-Resolution Nuclear Magnetic Resonance (NMR), Thermomechanical Analysis (TMA) และอื่น ๆ ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด 3 ช่วงคือ การเปลี่ยนที่อุณหภูมิต่ำ (LTT) เกิดขึ้นที่ประมาณ 45°C, การเปลี่ยนที่อุณหภูมิปานกลาง (ITT) เกิดขึ้นที่ประมาณ 90°C และการเปลี่ยนที่อุณหภูมิสูง (HTT) เกิดขึ้นที่ประมาณ 180°C



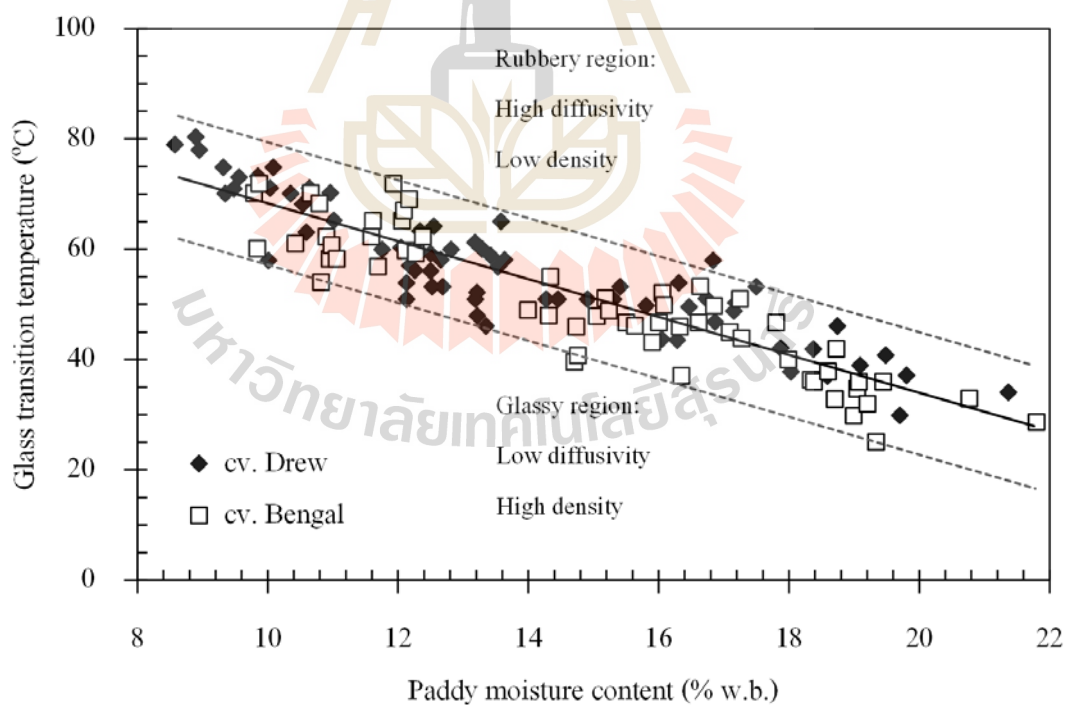
รูปที่ 2.6 ผลทดสอบข้าวกล้อง (พันธุ์ Drew, 14.4% w.b.) ด้วยเทคนิค TMA (Sun et al., 2002)

โดยจุดเปลี่ยนทั้ง 3 เปลี่ยนแปลงตามความชื้นภายในเมล็ด จากการศึกษาพบว่าตำแหน่ง HTT คือจุดสลายตัวของโครงสร้างผลึกในแป้งของข้าว และตำแหน่ง ITT คืออุณหภูมิที่ความชื้น

ระเหยได้รวดเร็วที่สุด ขณะที่ตำแหน่ง LTT คือช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้ว (glass transition temperature, T_g) เนื่องจากผลการทดสอบด้วย TMA พบว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง LTT นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนที่อุณหภูมิต่ำ (LTT) เป็นผลจากอิทธิพลของแป้งในเมล็ดข้าวเป็นหลัก โดยรูปที่ 2.7 แสดงค่า T_g ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMTA (dynamic mechanical thermal analysis) ของข้าวเมล็ดยาว (พันธุ์ Drew) และข้าวเมล็ดยาวปานกลาง (พันธุ์ Bengal) ซึ่งพบว่าเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วมีค่าคล้ายกัน และค่า T_g ที่ได้มีความสอดคล้องกับค่า T_g ที่วัดได้จากแป้งข้าว โดยเฉพาะในช่วงความชื้นภายในต่ำกว่า 15% w.b. Siebenmorgen et al. (2004) นำเสนอความสัมพันธ์ของ T_g กับความชื้นภายในของข้าวพันธุ์ Drew และ Bengal ได้ตามสมการ (2.16)

$$T_g = 101.2 - 333 \times M_w, \quad R^2 = 0.82 \quad (2.16)$$

โดย M_w คือ ความชื้นข้าวในหน่วย % w.b.



รูปที่ 2.7 อุณหภูมิเปลี่ยนแก้วของข้าวพันธุ์ Drew และ Bengal (Siebenmorgen et al., 2004)

ขณะที่เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิต่ำกว่า T_g แป้งภายในจะมีโครงสร้างคล้ายแก้ว (glassy state) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว ค่าปริมาตรจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าต่ำ เมื่อเมล็ดมีอุณหภูมิสูงกว่า T_g แป้งภายในเมล็ดจะเปลี่ยนโครงสร้างจากสภาพคล้ายแก้วเป็นสภาพคล้ายยาง (rubbery state) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว ค่าปริมาตรจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าเดิมมาก Perdon et al. (2000) ได้นำเสนอค่าเฉลี่ยการขยายปริมาตรเชิงความร้อนของข้าวกล้องพันธุ์ Bengal ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) และสถานะคล้ายยาง (rubbery state) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.86×10^{-4} และ $4.99 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ตามลำดับ ขณะที่ข้าวกล้องพันธุ์ Cypress มีค่าเท่ากับ 0.89×10^{-4} และ $4.26 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ตามลำดับ โดยสัดส่วนการขยายปริมาตรเชิงความร้อนระหว่างสถานะคล้ายยางต่อสถานะคล้ายแก้วของข้าวกล้องพันธุ์ Bengal และ Cypress มีค่าเท่ากับ 5.80 และ 4.79 ตามลำดับ พบว่าค่าการขยายตัวเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 5 เท่าเมื่อข้าวเปลี่ยนสถานะจากคล้ายแก้วเป็นคล้ายยาง และเนื่องจากในกระบวนการอบแห้ง เมล็ดข้าวส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิและความชื้นอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ดังนั้นแผนภาพ glass transition temperature จึงมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ทั้งในด้านการวิเคราะห์ผลและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเช่นการขยายปริมาตรและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะของชั้นเมล็ดข้าวระหว่างช่วง glass transition temperature ซึ่งมีผลต่อการเกิดรอยร้าวของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้ง ขณะที่การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่มีผลอย่างยิ่งต่ออัตราการอบแห้งและการ tempering

2.15 ลักษณะทางกายภาพของข้าว

ลักษณะทางกายภาพเป็นสมบัติต่าง ๆ ที่สามารถมองเห็น ชั่ง หรือตวงวัดได้ เช่น น้ำหนักเมล็ด ขนาดรูปร่างเมล็ด ความขาวของข้าวสาร คุณภาพการสี เป็นต้น

2.15.1 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

2.15.2 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

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

2.15.4 คุณภาพการสี (milling quality) สามารถประเมินได้จากข้าวเต็มเมล็ด และข้าวคั้น ข้าวที่มีคุณภาพการสีดีจะมีข้าวเต็มเมล็ด และข้าวคั้นสูง โดยต้องมีข้าวเต็มเมล็ด และข้าวคั้นมากกว่า 50% มีการกำหนดขนาดของข้าวเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาคุณภาพการสีดังนี้คือ ข้าวเต็มเมล็ด (มีขนาด 10 ส่วน), ข้าวคั้น 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) เนื่องจากขณะที่เมล็ดมีความชื้นลดลงจะเกิดการหดตัว แต่เมื่อได้รับความชื้นอีกครั้งจะเกิดการขยายตัว พฤติกรรมเช่นนี้ทำให้เกิดการแตกร้าวได้ เช่น การผสมข้าวที่มีความชื้นสูงกับข้าวที่มีความชื้นต่ำ, ข้าวที่แห้งแล้วเปียกฝนหรือน้ำค้าง, การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ กลางวันร้อนแต่กลางคืนเย็น และการจับตัวหรือกลายเป็นหยดน้ำของไอน้ำในการเก็บรักษา (กิตติยา กิจวรรดี, 2547)

กระบวนการสีข้าวประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 4 ขั้นตอน ได้แก่

- การทำความสะอาด (cleaning) เพื่อกำจัดระแง่ใบข้าว (ระแง่คือ กิ่งก้านที่แยกจากแกนกลางของรวงข้าว), เมล็ดลีบ, เมล็ดวัชพืช และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจากข้าวเปลือก

- การกะเทาะ (shelling หรือ hulling) เป็นการทำให้เปลือกข้าวหลุดออกจากเมล็ด สิ่งที่ได้จากขั้นตอนนี้คือ ข้าวกล้อง และแกลบ โดยมีแกลบประมาณ 20-24% ของข้าวเปลือก
- การขัดขาว (whitening) เพื่อให้รำหลุดจากเมล็ดข้าวกล้อง สิ่งที่ได้จากขั้นตอนนี้จะเป็นรำ ประมาณ 8-10% ของข้าวเปลือก และข้าวสารประมาณ 66-72% ของข้าวเปลือก
- การคัดแยก (grading) เพื่อคัดแยกข้าวเต็มเมล็ด ข้าวตัน และข้าวหักขนาดต่าง ๆ ออกจากกัน (กัญญา เชื้อพันธุ์, 2547)

2.16 ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย

ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นพันธุ์ ชัยนาท และ กข 105

2.16.1 ข้าวเปลือกพันธุ์ ชัยนาท 1 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวเจ้าที่ได้รับการผสม 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 คณะกรรมการวิจัยและพัฒนากรมวิชาการเกษตร มีมติให้เป็นข้าวพันธุ์รับรอง โดยข้าวพันธุ์ ชัยนาท 1 มีลักษณะเด่นประจำสายพันธุ์ ดังนี้

- ต้นข้าวสูงประมาณ 133 cm
- เป็นพันธุ์ข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง
- อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 121-130 วัน (ฤดูแล้ง) และ 119 วัน (ฤดูฝน)
- ทรงกอตั้ง ใบสีเขียว ใบธงค่อนข้างยาว ตั้งตรง คอรวงสั้น รวงยาว และแน่น
ระแง้ค่อนข้างถี่ ฟางแข็ง
- เมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง บางเมล็ดก้นมีจุด
- ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์
- เมล็ดข้าวกล้อง กว้าง×ยาว×หนา ประมาณ = 2.1×7.7×1.7 mm
- ปริมาณ อะไมโลส 26-27%
- คุณภาพข้าวสุก ร่วน และแข็ง
- ปริมาณผลผลิตประมาณ 740 กิโลกรัมต่อไร่ (ศูนย์ข้อมูลการเกษตร, 2550)

2.16.2 ข้าวเปลือกพันธุ์ กข 105 หรือข้าวดอกมะลิ 105 ได้มาโดยนายสุนทร สีหะเนิน เจ้าพนักงานข้าว รวบรวมจากอำเภอบางค้ำจังหวัดฉะเชิงเทรา เมื่อ พ.ศ.2493-2494 จำนวน 199 รวง แล้วนำไปคัดเลือกแบบคัดพันธุ์บริสุทธิ์ (pure line selection) และปลูกเปรียบเทียบพันธุ์ที่สถานีทดลองข้าวโคกสำโรง แล้วปลูกเปรียบเทียบพันธุ์ในท้องถิ่น ภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จนได้สายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 4-2-105 ซึ่งเลข 4 หมายถึง สถานที่เก็บรวงข้าวคืออำเภอบางค้ำ เลข 2 หมายถึงพันธุ์ทดสอบที่ 2 คือ ข้าวดอกมะลิ และเลข 105 หมายถึง แฉวหรือ

รวงที่ 105 จากจำนวน 199 รวง คณะกรรมการพิจารณาพันธุ์ ให้ใช้ขยายพันธุ์เป็นพันธุ์รับรอง เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2502

- ต้นข้าวสูงประมาณ 140 cm
- เป็นพันธุ์ข้าวไวต่อช่วงแสง
- อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 25 พฤศจิกายน
- ลำต้นสีเขียวจาง ใบสีเขียวยาวค่อนข้างแคบ ฟางอ่อน ใบธงทำมุมกับคอรวง เมล็ดข้าวรูปร่างเรียวยาว
- เมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง
- ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์
- เมล็ดข้าวเปลือก กว้าง×ยาว×หนา ประมาณ = $10.6 \times 2.5 \times 1.9$ mm
- เมล็ดข้าวกล้อง กว้าง×ยาว×หนา ประมาณ = $7.5 \times 2.1 \times 1.8$ mm
- ปริมาณ อะไมโลส 12-17%
- คุณภาพข้าวสุก อ่อนนุ่ม มีกลิ่นหอม
- ปริมาณผลผลิตประมาณ 363 กิโลกรัมต่อไร่ (ศูนย์ข้อมูลการเกษตร, 2550)

2.17 การลดความชื้นข้าวเปลือก

หลังจากเก็บเกี่ยวแล้วนวดข้าว จะได้ข้าวเปลือกที่ยังมีความชื้นในเมล็ดสูง เมล็ดพืชเป็น สิ่งมีชีวิตที่มีการหายใจ การลดความชื้นจึงมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา อัตราการเสื่อมคุณภาพ ปริมาณเชื้อรา การเข้าทำลายของแมลงศัตรูใน โรงเก็บ ดังนั้นหลังจากเก็บเกี่ยวจึงต้องรีบตากหรือลด ความชื้นเมล็ดให้แห้งโดยเร็วที่สุด เพื่อลดอัตราการหายใจของเมล็ดพืช

Wimberly (1983) รายงานเกี่ยวกับความชื้นที่เหมาะสมของเมล็ดข้าวเปลือกที่เก็บรักษาไว้ใน สภาพที่ไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมหรืออุณหภูมิพบว่า หากต้องการเก็บข้าวเปลือกไว้นาน 2-3 เดือน เมล็ดควรมีความชื้น 13-14% w.b. หากต้องการเก็บไว้นานกว่านั้นต้องลดความชื้นให้มีค่าประมาณ 12-12.5% w.b. จากเหตุผลข้างต้นจะเห็นว่า การลดความชื้นมีความสำคัญมากในการเก็บรักษาทั้ง ระยะสั้น และระยะยาว

วิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกมี 2 วิธีคือ

2.17.1 วิธีธรรมชาติ (natural drying) ได้แก่ การใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ และลมเป็นตัวช่วยพาความชื้นออกจากเมล็ด เป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศกำลังพัฒนา เพราะ ประหยัด ไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อจำกัดและข้อเสียคือ ในฤดูฝนจะต้องใช้ระยะเวลาตากนาน จึงต้องใช้ พื้นที่ตากและแรงงานมาก รวมทั้งไม่สามารถควบคุมคุณภาพของข้าวได้ โดยเฉพาะเมื่อตากข้าวไว้

ในแปลงนาจะมีการสูญเสียจากการทำลายของ นก หนู และแมลง การลดความชื้นโดยวิธีธรรมชาติที่เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมใช้จะแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

2.17.1.1 ตากข้าวทิ้งไว้ในนาหลังจากเก็บเกี่ยว (ตากทิ้งรวงก่อนนำไปนวด) โดยจะทำการตากข้าวทิ้งไว้ในนาเป็นระยะเวลาหนึ่ง (2-3 วัน) เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนแรงงาน และพื้นที่ตาก แต่วิธีการนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียต่อข้าวอย่างมาก ทั้งเนื่องจากสัตว์ แมลงศัตรูพืชทำลาย และเกิดการร่วงหล่นขณะตาก และขนย้ายไปนวด คุณภาพการสี และคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ต่ำลงมาก เพราะการตากข้าวทิ้งไว้ในนาจะได้รับผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น การเปียกน้ำค้างในตอนกลางคืน การเปียกฝนขณะตากสลับกับการลดความชื้นจากการได้รับความร้อนในตอนกลางวัน ทำให้เกิดการแตกร้าวของข้าวเมื่อนำไปนวดหรือขัดสี จากการวิจัยพบว่าระยะเวลาการตากข้าวทิ้งไว้ในนาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการลดลงของคุณภาพการสีข้าว (กิตติยา กิจวรศิริ, 2547)

2.17.1.2 การตากในลานหลังนวดข้าวเสร็จแล้ว (ตากเป็นเมล็ดหลังจากนวด) เป็นการลดความชื้นของข้าวหลังจากที่ผ่านการนวด เพราะในปัจจุบันนิยมใช้รถเกี่ยวนา จากนั้นจะขายข้าวเปลือกสด (ชื้น) ทันที แต่หากยังไม่ขายจะนำไปตากลดความชื้นบนลาน เพื่อให้ได้ราคาที่สูงขึ้น และช่วยลดการสูญเสียคุณภาพของเมล็ด ดังที่กล่าวข้างต้น การตากข้าวเพื่อให้ได้ผลผลิตที่สุกมีแนวปฏิบัติดังนี้

- ควรมียุสตุที่สะอาด และแห้งรองรับ เช่น ผ้าใบหรือเสื่อที่สานด้วยไม้ไผ่ ไม่ควรตากกับพื้นโดยตรง เพราะเมล็ดอาจได้รับความร้อนจากพื้นสูงเกินไป และมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกรณีพื้นซีเมนต์ หรือได้รับความชื้นสูงในกรณีพื้นลานดินทำให้เมล็ดที่ติดกับผิวดินมีความชื้นสูง
- ความหนาของกองข้าวเปลือกควรมีค่าประมาณ 5-10 cm เพราะหากการตากบางเกินไปอุณหภูมิข้าวที่ตากจะสูง ทำให้เกิดการแตกร้าวเมื่อนำไปสี ส่วนถ้าตากหนาเกินไปการระบายอากาศในกองข้าวจะไม่ดี ข้าวแห้งช้า ระหว่างการตากควรกลับกองข้าวทุก ๆ 2 h หรือวันละ 4 ครั้ง เพื่อช่วยลดความชื้นให้เร็ว และสม่ำเสมอ ซึ่งจะช่วยให้ได้ข้าวคุณภาพดี

- ในเวลากลางคืนควรมียุสตุปกคลุมกองข้าวเพื่อป้องกันน้ำค้างหรือฝน
- ไม่ควรตากข้าวนานเกินไป โดยควรให้ความชื้นข้าวมีค่าประมาณ 12-14% w.b. จึงหยุดตาก สำหรับข้าวที่ต้องการเก็บไว้ทำพันธุ์ควรลดความชื้นให้มียุสตุประมาณ 9-10% w.b. จึงนำไปเก็บรักษา โดยปกติใช้เวลาตากประมาณ 3-4 แดด จะมีค่าความชื้นในระดับที่ต้องการ

2.17.2 การใช้เครื่องอบ (artificial drying) เป็นการใช้เครื่องอบแห้งในการลดความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งในปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งมากมายหลายแบบ เช่น เครื่องอบแบบถาด เครื่องอบแบบฟลูอิดไคซ์เบด เครื่องอบแบบสเปาเต็ดเบด เครื่องอบแบบคอลัมน์ เครื่องอบแบบอุโมงค์ เครื่องอบแบบตู้ เป็นต้น การใช้เครื่องอบมีข้อดีคือ สามารถใช้ได้ทุกสภาวะอากาศไม่ว่าฝนตกหรือแสงแดดน้อย

ไม่เปลืองพื้นที่ และสามารถควบคุมการลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้อย่างเหมาะสม ใช้ระยะเวลาการลดความชื้นน้อยกว่าวิธีธรรมชาติ และป้องกันความเสียหายต่อคุณภาพข้าวได้ดีกว่า แต่มีข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่ายสูง มีข้อปฏิบัติที่ยุ่งยากซับซ้อน

2.18 วิธีการหาค่าความชื้น

การหาค่าความชื้นของเมล็ดสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

2.18.1 การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง (direct measurement) สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกลั่น การใช้สารดูดความชื้นในสุญญากาศ การใช้รังสีอินฟราเรด และการใช้ตู้อบ (oven method) เป็นต้น การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรงมีความเที่ยงตรงสูงแต่ใช้ระยะเวลานาน และเป็นวิธีพื้นฐานเพื่อสอบเทียบเครื่องมือวัดค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง มีวิธีการดังนี้ 1) ทำการชั่งน้ำหนักของข้าวที่ต้องการหาค่าความชื้น (มวลของวัสดุชื้น) 2) นำข้าวไปอบให้น้ำในเมล็ดระเหยออกไปจนหมด 3) นำข้าวที่อบเสร็จแล้ว ทิ้งให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้น 4) นำข้าวไปชั่งอีกครั้ง เพื่อหาน้ำหนักของเมล็ดแห้ง (มวลของวัสดุแห้ง) 5) คำนวณความชื้นตามสมการหาค่าความชื้นวัสดุ (หัวข้อ 2.1) โดยมาตรฐานของแต่ละสถาบันจะกำหนดอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้อบแห้งแตกต่างกันไป งานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานของ American Association of Cereal Chemists ด้วยการอบหาความชื้นแบบเมล็ดเต็ม ไม่บดละเอียดเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นเมล็ดในขั้นตอนบดละเอียด อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 103°C ระยะเวลา 72 h (AACC, 1995)

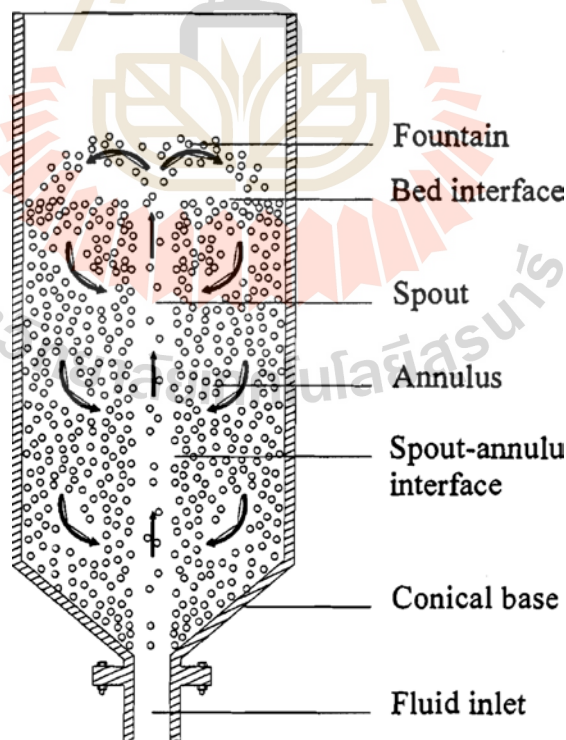
2.18.2 การหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม (indirect measurement) ใช้วิธีการวัดสมบัติบางอย่างของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับความชื้น เช่น ความต้านทานไฟฟ้า (resistance) หรือการเก็บประจุไฟฟ้า (capacitance) การหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อมเป็นวิธีที่ทำได้รวดเร็วไม่ซับซ้อน ใช้ตัวอย่างทดสอบน้อย จึงเป็นที่นิยมใช้ในวงการค้าทั่วไปแต่จะต้องตรวจสอบเครื่องมือ และสอบเทียบกับการหาค่าความชื้นวิธีตรงก่อน เนื่องจากสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนตามชนิดของพันธุ์ พื้นที่ปลูก ความชื้น อุณหภูมิ ความหนาแน่นของการบรรจุ ตลอดจนวิธีการใช้เครื่องมืออย่างถูกต้องเหมาะสม (อารีย์ ทิมินกุล และ นัทสน์ ตั้งพินิจกุล, 2547)

2.19 เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น (Spouted bed dryer)

เทคนิคการเป่าพ่น (spouted bed technic) ถูกค้นพบปี 1954 ในการทดลองเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน (fluidization) กับข้าวสาลีโดย Gishler and Muthur ที่ National Research Council (NRC) of Canada ทำให้ได้ระบบใหม่ที่อนุภาคของแข็งเกิดการไหลเวียนกลับด้วยการขับเคลื่อนของแก๊ส ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนกับการขนถ่ายด้วยพาหะลม (pneumatic conveyer) ซึ่งความหนาแน่นของ

อนุภาคของแข็งในกระแสวนอากาศเบาบาง และแตกต่างจากเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน (fluidization) และชั้นเมล็ดอัดแน่น (packed bed) ซึ่งอนุภาคของแข็งในกระแสวนอากาศมีความหนาแน่นมากกว่า

เครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไป (conventional spouted bed) ประกอบด้วยถังทรงกระบอกหรือถังทรงกระบอกที่กั้นถึงเป็นรูปกรวย ติดตั้งทางเข้าลมที่กึ่งกลางของฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ถ้าลมมีความเร็วเพียงพอ (มากกว่าความเร็วปลาย (terminal velocity) ของอนุภาคของแข็งที่บรรจุอยู่ในถัง) กระแสวนลมความเร็วสูงจะแทรกชั้นของกองอนุภาคของแข็ง ทำให้เกิดส่วนสเปาต์ (spout region) ที่กึ่งกลางของถังซึ่งมีความพรุนสูงและส่วนแอนนูลัส (annulus region) ที่รอบ ๆ ส่วนสเปาต์ซึ่งมีความพรุนต่ำ ในส่วนสเปาต์เมื่ออนุภาคของแข็งที่ไหลขึ้นตามกระแสวนถึงระดับที่สูงกว่าผิวของกองอนุภาคของแข็ง ณ จุดนี้กระแสวนจะเกิดการบานตัว ทำให้ความเร็วอนุภาคลดลงจนต่ำกว่าความเร็วปลาย อนุภาคของแข็งจึงเกิดการแยกตัวออกจากกระแสวน แล้วตกลงสู่ส่วนแอนนูลัสซึ่งลักษณะการตกคล้ายน้ำพุ ด้วยลักษณะดังกล่าวการเคลื่อนที่หมุนวนอย่างเป็นระบบจึงเกิดขึ้น ในส่วนสเปาต์อนุภาคของแข็งจะไหลขึ้นอย่างรวดเร็วและเบาบาง ไปพร้อมกับลมความเร็วสูงคล้ายเทคนิคการขนถ่ายแบบพาหะลม ขณะที่ในส่วนแอนนูลัสอนุภาคของแข็งจะไหลลงอย่างช้า ๆ และหนาแน่นโดยไหลส่วนทางก้นลมที่ไหลแทรกจากส่วนสเปาต์เข้าสู่ส่วนแอนนูลัส



รูปที่ 2.8 ภาพโครงสร้างเครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไป (conventional spouted bed), (Madhiyanon, 2001)

เครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไป (conventional spouted bed) มีลักษณะเฉพาะที่ฟุ้งประสงค์และไม่ฟุ้งประสงค์บางประการ ซึ่งขึ้นกับกลศาสตร์ของไหล อากาศและพลังงานที่ใช้ ข้อจำกัดด้านขนาดและการขยายขนาด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (Mujumdar and Suvachittanont, 2000)

ตารางที่ 2.1 ประโยชน์และข้อจำกัดเครื่องเป่าพ่น โดยทั่วไป (Mujumdar and Suvachittanont, 2000)

ประโยชน์	ข้อจำกัด
-สามารถจัดการอนุภาคหยาบได้ ($D_p > 1 \text{ mm}$)	-อัตราการไหลอากาศถูกควบคุมด้วยข้อจำกัดของการเป่าพ่นมากกว่าเพื่อการถ่ายเทมวลและความร้อน หรือปฏิกิริยาเคมี
-รูปแบบการไหลของลมและอนุภาคสามารถทำนายและทำซ้ำได้	-อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างกองอนุภาคกับผนังต่ำ
-อนุภาคเคลื่อนที่ตลอดเวลาและเป็นวัฏจักร	-ความดันลดสูงในช่วงเริ่มต้นการเป่าพ่น
-การผสมกลับน้อย	-ส่วนแอนนูลัสสัมผัสผสมน้อย
-ความดันลดลงน้อยกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด	-ข้อจำกัดของขนาดถังและความสูงของกองอนุภาคที่สามารถเป่าพ่นได้
-การแยกขนาดของอนุภาคลดลง	-ขยายขนาดยาก
-ลมใช้เวลาไหลในระบบสั้น	-อนุภาคหมุนเวียนซ้ำ
-การสร้างและซ่อมบำรุงง่าย ไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นส่วนทางกล	
-ค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ	
-ใช้พื้นที่น้อย	

เทคนิคการเป่าพ่นถูกประยุกต์ใช้กับกระบวนการทางความร้อน ทางกลและทางเคมี เช่น การอบแห้งอนุภาคของแข็งที่มีขนาดหลากหลาย สารแขวงลอยหรือสารละลาย การเคลือบอนุภาคและเนื้อเยื่อ การผสม ให้ความร้อน ลดความร้อน การขัด การเผาไหม้ กระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส ปฏิกิริยาเนื้อผสม เป็นต้น เพื่อความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้กับงานประเภทต่าง ๆ ที่แตกต่างกันและลดข้อจำกัดดังที่ได้แสดงใน ตารางที่ 2.1 การออกแบบเพื่อปรับปรุงเทคนิคเป่าพ่นจึงเกิดขึ้นมากมายและหลากหลายรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 (Mujumdar and Suvachittanont, 2000) เนื่องจากระยะเวลาสัมผัสความร้อนในส่วนสเปาต์สั้น เทคนิคการเป่าพ่นจึงสามารถใช้อบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อน (heat-sensitive solid) เช่น อาหาร ยา และพลาสติกได้

ตารางที่ 2.2 ลักษณะเฉพาะและการประยุกต์ใช้งานเทคนิคเป่าพ่นที่ได้รับการปรับปรุง

(Mujumdar and Suvachittanont, 2000)

Design	Main characteristic	Application
Conical spouted bed	<ul style="list-style-type: none"> - no limitation of bed height - lower pressure drop - lower annular flow rate - more intensive circulation - high attrition rate 	<ul style="list-style-type: none"> - drying of grain, pastes and slurries - particle coating - drying of animal blood
Draft tube spouted bed	<ul style="list-style-type: none"> - no limitation of bed height - more control of solid circulation - low minimum spouting pressure drop and air flow rate - lower annular air flow rate - reduced mixing and heat/mass transfer 	<ul style="list-style-type: none"> - drying of grain and chemicals - thermal disinfestations - solids blending
Spout-fluid bed	<ul style="list-style-type: none"> - overcome limitations of CSB (height, stability, poor mixing) and fluidized beds (Slugging stratification) - high air flow rates - more complex grid design 	<ul style="list-style-type: none"> - granulation - coal gasification - particle coating - incineration of tarry waste
Top-sealed spouted bed	<ul style="list-style-type: none"> - more uniform gas RTD (residence time distribution, RTD) 	<ul style="list-style-type: none"> - catalytic processes
Rectangular or circular triple spouted bed	<ul style="list-style-type: none"> - larger capacity - more mixing - rapid turnover - high air flow rates - problems in spouting stability 	<ul style="list-style-type: none"> - drying of heat sensitive materials - cooling of fertilizers

ตารางที่ 2.2 ลักษณะเฉพาะและการประยุกต์ใช้งานเทคนิคเป่าพ่นที่ได้รับการปรับปรุง (ต่อ)

(Mujumdar and Suvachittanont, 2000)

Design	Main characteristic	Application
Multistage spouted bed	<ul style="list-style-type: none"> - higher throughput rates - higher heat utilization efficiency - longer gas contact time with solids - narrow solid RTD - higher pressure drop 	<ul style="list-style-type: none"> - heating of solids
Half spouted bed	<ul style="list-style-type: none"> - easier scale-up - more stable spouting - lower pressure drop and higher bed height than full column 	<ul style="list-style-type: none"> - grain drying - coating of particles - granulation - drying of sludge
Screw conveyer spouted bed	<ul style="list-style-type: none"> - air flow rate governed by the process - lower pressure drop controlled particle circulation rate - no starting up problems - more complex design 	<ul style="list-style-type: none"> - drying of agricultural products - drying of pastes and slurries - drying of chemicals & pharmaceuticals
Slot or two dimensional spouted bed	<ul style="list-style-type: none"> - more spouting flexibility - lower pressure drop - improved volumetric capacity - simpler design and construction - lower pressure drop - higher air flow rate 	<ul style="list-style-type: none"> - grain drying - drying of wet or sticky material - grain popping - dehydration of gypsum - granulation of solids

บทที่ 3

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบด เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน และเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคอื่น ๆ และผลของอุณหภูมิเปลี่ยนแก้วที่มีต่อการอบแห้งข้าวเปลือก

3.1 งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น

เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหรือสเปาเต็ดเบดประกอบด้วยส่วนสเปาต์ซึ่งเป็นช่วงที่อากาศและเมล็ดไหลขึ้นพร้อมกันอย่างรวดเร็ว โดยอากาศมีความเร็วและความพรุนสูง และส่วนดาวน์คัมเมอร์ซึ่งเป็นช่วงที่กองเมล็ดไหลลงอย่างช้า ๆ โดยมีมีอากาศไหลสวนขึ้น โดย Nguyen, Driscoll, and Srzednicki (1998) นำเสนอลักษณะการไหลของข้าวเปลือกในส่วนดาวน์คัมเมอร์ของเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดรูปทรงสามเหลี่ยม พบว่าเมื่อติดตั้งตัวปรับลักษณะการไหลข้าวเปลือกที่มีขนาดเหมาะสมในส่วนดาวน์คัมเมอร์จะทำให้ข้าวเปลือกมีลักษณะการไหลแบบตามกัน (plug flow) โดยตลอด ที่ความชื้นข้าวเปลือก 13% และ 26% w.b. ซึ่งทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกพบว่า มีอัตราอบแห้งช้าในช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง ณ. ขณะที่อุณหภูมิเมล็ดกำลังเพิ่มขึ้น ระยะเวลาช่วงนี้จะนานขึ้นตามความสูงของชั้นเมล็ดในถัง หลังจากช่วงแรกนี้ลักษณะการลดลงของความชื้นต่อเวลาจะเป็นเส้นตรง เหตุที่อัตราอบแห้งคงที่เนื่องจากชั้นนอกสุดของเมล็ดจะถูกอบแห้งในช่วงใกล้ทางเข้าท่อลมเป่าและส่วนสเปาต์ หลังจากนั้นเมล็ดจะไหลเข้าสู่ส่วนดาวน์คัมเมอร์ โดยความชื้นภายในเมล็ดจะแพร่สู่ชั้นนอกสุดระหว่างที่เคลื่อนที่ในถัง ทำให้ในรอบถัดมาที่เข้าสู่ส่วนสเปาต์เมล็ดสามารถลดความชื้นได้ใกล้เคียงกับรอบก่อนหน้า อัตราอบแห้งที่ได้จึงค่อนข้างคงที่โดยตลอดการอบแห้ง นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิข้าวเปลือกจะลดลงขณะที่เคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของส่วนดาวน์คัมเมอร์ ในส่วนคุณภาพข้าวเปลือกพบว่า การลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องจากระดับความชื้นมากกว่า 24% w.b. ถึงระดับ 14% w.b. โดยใช้อุณหภูมิอากาศสูง ด้วยเครื่องอบแห้งนี้ ในครั้งเดียว จะพบการลดลงของปริมาณข้าวคืนอย่างชัดเจนเมื่อความชื้นลดต่ำกว่า 18% w.b. ผู้วิจัยจึงทดลองอบแห้ง 2 ช่วง คือ 1. ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูง 160-190°C ตามด้วยช่วงลดอุณหภูมิด้วยการปิดหัวเผา 2. ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งปานกลาง 80-100°C พบการแตกหักของเมล็ด

อย่างชัดเจนเมื่อลดความชื้นต่ำกว่า 16-17% w.b

Madhiyanon, Soponronnarit, and Tia (2001a) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยการสร้างและทดสอบ เครื่องต้นแบบในระดับอุตสาหกรรม ที่ใช้เทคนิคสเปาเต็ดเบดแบบสองมิติ ซึ่งมีกำลังการอบแห้งสูงสุดและขนาดบรรจุสูงสุด 3500 kg/h. และ 310 kg ตามลำดับ โดยเครื่องอบแห้งมีลักษณะการดำเนินการที่ต่อเนื่อง (continuous operation) ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130-160°C, ความยาว draft plate 0.62 และ 0.82 m, ระยะยก draft plate จากทางเข้าลม 0.10, 0.125 และ 0.15 m และใช้อากาศหมุนเวียนในสัดส่วน 60-70% ในการทดสอบพบว่าความสูงของชั้นเมล็ดในส่วนควาน์คัมเมอร์ระหว่างคานซ้ายและขวาไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเนื่องจาก draft plate ไม่ได้ตำแหน่งกึ่งกลางของถังอบแห้ง ลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 20.0-30.3% ถึง 14.0-25.0% d.b. โดยระยะเวลาที่เมล็ดอยู่ในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 1.5-14 min ขึ้นกับอัตราการป้อนข้าวเปลือกและปริมาณข้าวเปลือกที่บรรจุ พบว่าในการทดสอบนี้ เมื่อข้าวเปลือกถูกลดความชื้นถึง 14-25% d.b. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวอย่างมีนัยสำคัญที่สังเกตได้ ทั้งปริมาณข้าวต้นและความขาวของข้าวสาร การใช้พลังงานปฏุมุมิจำเพาะ (ความร้อน) ต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.1-3.8 MJ/kg water evaporated โดยพบว่าการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนข้าวเปลือกอาจเป็นส่วนช่วยลดการใช้พลังงานความร้อนได้

Nguyen, Driscoll, and Srzednicki (2001) ทำการสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้เทคนิคสเปาเต็ดเบดรูปทรงสามเหลี่ยม ซึ่งมีขนาดบรรจุสูงสุด 500 kg และทำการทดสอบด้วยการอบแห้งข้าวเปลือกแบบ 2 ช่วง โดยลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 27-24% w.b. ถึง 15% w.b. ในช่วงแรกใช้อุณหภูมิอากาศ 140-160°C อบจนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้น 18.5-20% w.b. ในช่วงที่สองเพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกไม่เกิน 50°C จึงใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80-100°C พบว่าสามารถรักษาปริมาณข้าวต้นได้ดี เมื่อลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 24.7% w.b. ถึง 15.1% w.b. โดยใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 140°C และ 80°C ในช่วงแรกและช่วงที่สองของการอบแห้ง ตามลำดับ ขณะที่การใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 160°C ในช่วงแรก และตามด้วย 80°C ในช่วงที่สอง ปริมาณข้าวต้นจะเริ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ความชื้นประมาณ 17% w.b. แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงที่สองเป็น 90°C พบว่าปริมาณข้าวต้นเริ่มลดลงที่ความชื้นตั้งแต่ 20% w.b. จึงไม่แนะนำให้ใช้อุณหภูมิที่สูงเกินกว่า 80°C เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำกว่า 20% w.b. นอกจากนี้พบว่าข้าวเปลือกในถังมีความชื้นแตกต่างกันภายหลังการอบแห้งไม่เกิน 0.5% w.b. โดยมีความแตกต่างมากในช่วงแรกของการอบแห้งประมาณ 0.8-2.3% w.b. และมีค่าลดลงโดยตลอดการอบแห้ง เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดทรงสามเหลี่ยม สามารถประกอบเป็นเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดทรงหกเหลี่ยมได้ เสมือนมีห้องอบแห้ง 6 ห้องเรียงตัวกันแบบอนุกรม จึงสามารถทำงานได้ทั้งแบบต่อเนื่อง (continuous) และแบบกลุ่ม (batch) ได้

Madhiyanon, Soponronnarit, and Tia (2001b) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสเปาเต็ดเบดแบบสองมิติ ที่อบแห้งแบบกลุ่ม (batch dryer) ใช้แบบจำลอง

แบบไม่สมดุลทางความร้อนและความชื้น เครื่องอบแห้งแบ่งการคำนวณเป็น 2 ส่วน คือส่วนสเปคต์และ ส่วนดาวน์คัมเมอร์ แต่ละส่วนถูกแบ่งเป็นชั้นบางที่ต่อกันเป็นอนุกรม โดยตลอดความยาวของท่อลมเป่า และความสูงของถังพัก ตามลำดับ ในแต่ละชั้นบางพิจารณา 4 สมการอนุพันธ์ประกอบด้วย 1. สมดุลมวล 2. สมดุลความร้อน 3. การถ่ายเทความร้อน และ 4. อัตราอบแห้ง และหาผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยผลการทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปคต์แบบสองมิติ โดยใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130 140 และ 150°C ความแตกต่างระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ของความชื้นเมล็ด อุณหภูมิอากาศทางออก และอุณหภูมิผสมระหว่างเมล็ดและอากาศในส่วนดาวน์คัมเมอร์ มีน้อยกว่า 1.5% 10% และ 10% ตามลำดับ โดยการเปลี่ยนแปลงความชื้นเมล็ดต่อเวลาสามารถพิจารณาเป็นค่าคงที่ได้ นอกจากนี้ในส่วนดาวน์คัมเมอร์ ไม่เกิดการผ่อนคลายความชื้น (moisture relaxation) แต่พบการอบแห้งอย่างช้า ๆ ระหว่างที่เมล็ดเคลื่อนที่จากด้านบนสู่ด้านล่างของส่วนนี้ และพบว่าในส่วนดาวน์คัมเมอร์ เกิดสมดุลเชิงความร้อน (thermal equilibrium) ระหว่างเมล็ดและอากาศในชั้นบางที่สูงกว่า 0.15 m ขณะที่ในส่วนสเปคต์ อากาศที่ทางออกและเมล็ดไม่เข้าสู่เงื่อนไขสมดุลเชิงความร้อน

Madhiyanon, Soponronnarit, and Tia (2002) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสเปคต์แบบสองมิติ ที่มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่อง เพื่อทำนายความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดและอากาศอบแห้ง รวมถึงการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง โดยใช้สมการควบคุมและวิธีการจำลองผลคล้ายกับที่ Madhiyanon et al. (2001b) ได้นำเสนอ โดยพัฒนาแบบจำลองให้เหมาะสมกับเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้แบบจำลองได้เพิ่มการพิจารณาการใช้อากาศหมุนเวียน การควบคุมความชื้นเนื่องจากอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์อิ่มตัว และความแตกต่างของเวลาที่แต่ละเมล็ดเคลื่อนที่ในส่วนดาวน์คัมเมอร์ (residence time distribution, RTD) โดยทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกของ Madhiyanon et al. (2001a) พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของผลการทำนายความชื้นระหว่างแบบจำลองที่ใช้ RTD และไม่ใช่ RTD โดยความคลาดเคลื่อนของการทำนายมีค่า 12% และ 14% ตามลำดับ ขณะที่ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเมล็ดและพลังงานจำเพาะที่ใช้มีค่าเท่ากับ 8.4% และ 17.0% ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าในกรณีศึกษาที่สัดส่วนการไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่ส่วนดาวน์คัมเมอร์มีค่าน้อย ทำให้การอบแห้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในส่วนสเปคต์ ขณะที่ส่วนดาวน์คัมเมอร์ช่วยให้เมล็ดมีระยะเวลาในการกระจายความชื้นสู่ผิวเมล็ดมากขึ้น คล้ายการอบในที่อับอากาศ (tempering) จึงทำให้เมล็ดสามารถลดความชื้นได้มากขึ้นเมื่อเข้าสู่ส่วนสเปคต์ และพบเงื่อนไขสมดุลเชิงความร้อนระหว่างเมล็ดและอากาศในส่วนดาวน์คัมเมอร์ซึ่งความเข้าใจนี้สามารถใช้ในการพัฒนาแบบจำลองให้ง่ายขึ้นได้ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเมล็ดมีค่าสูงขึ้นตลอดระยะเวลาอบแห้งที่มากขึ้น จึงไม่ควรอบแห้งเมล็ดจากระดับความชื้น

เมล็ดสูงถึงต่ำในครั้งเดียว (single pass) โดยควรแบ่งการอบแห้งเป็นหลาย ๆ รอบ (multistage) เพื่อรักษาคุณภาพข้าวเปลือก

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณฤทธิ (2546) ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งสเปาเต็ดแบบสองมิติที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเข้าดาวนคัมเมอร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 110 130 และ 150°C โดยปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าดาวนคัมเมอร์เป็น 0 10 20 และ 30% ในแต่ละอุณหภูมิอบแห้ง ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีอัตราอบแห้งเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และความสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้นทุกค่าอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าอัตราอบแห้งค่อนข้างคงที่ เนื่องจากผลของการพักตัวในบริเวณดาวนคัมเมอร์ช่วยให้ความชื้นในเมล็ดข้าวมีเวลาเคลื่อนตัวมาที่ผิวมากขึ้นทำให้การระเหยน้ำบริเวณสเปาต์ในแต่ละรอบค่อนข้างคงที่ และเมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าดาวนคัมเมอร์เพิ่มขึ้นอัตราอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพราะอากาศที่เข้าสู่ดาวนคัมเมอร์ให้ความร้อนเบื้องต้นกับข้าวเปลือกก่อนที่จะเข้าสู่ส่วนสเปาต์ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกขณะพักที่บริเวณดาวนคัมเมอร์มีสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงจึงช่วยให้ความชื้นในเมล็ดข้าวเคลื่อนตัวมาที่ผิวมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณสเปาต์จึงเกิดการระเหยน้ำได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังมีการลดความชื้นในส่วนดาวนคัมเมอร์ซึ่งเป็นผลมาจาก evaporative cooling อีกด้วย เมื่อพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะในการอบแห้งพบว่าแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศเข้าดาวนคัมเมอร์ โดยกรณีที่อากาศเวียนกลับ 67% มีค่าอยู่ในช่วง 6.7-9.0 MJ/kg water evaporated ของข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 33-34% d.b. และความชื้นสุดท้าย 12-19% d.b. แต่ในกรณีที่อากาศเวียนกลับ 75% มีแนวโน้มตรงข้าม โดยมีค่าในช่วง 4.5-6.5 MJ/kg water evaporated ของข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 26-27% d.b. และความชื้นสุดท้าย 15-17% d.b. เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดในระดับห้องปฏิบัติการ อัตราการอบแห้งที่พิจารณาต่อหน่วยปริมาตรของเครื่องอบแห้งในการทดสอบมีค่ามากกว่าเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดประมาณ 1.4 เท่า อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะ ด้วยเทคนิค สเปาเต็ดเบดมีค่าต่ำกว่า เมื่อพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งข้าวเปลือกมีระดับความชื้นที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณข้าวต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้งเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งและความชื้นเริ่มต้นสูง เนื่องจากเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันบางส่วนภายในเมล็ดกระบวนการเจลาติไนเซชันของแป้งในข้าวเปลือกจะช่วยเชื่อมรอยร้าวภายในเมล็ดได้ ทำให้เมล็ดแข็งแรงมากขึ้น ปริมาณข้าวต้นที่ได้จึงสูง โดยอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อการเกิดเจลาติไนเซชันสำหรับข้าวเปลือกคือ 73-86°C และ 24-25% w.b. ตามลำดับ (Rordprapat et al., 2005) แต่เมื่อปริมาณความชื้นลดลงเกินกว่า 5-8% d.b. ที่ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 27-35% d.b. ปริมาณข้าวต้นที่ได้จะ

ลดลงเนื่องจากความชื้นความชื้นที่สูง ความเค้นตึงภายในเมล็ดจึงมีค่ามากขึ้น การแตกหักเสียหายจึงเกิดขึ้นตามมา สำหรับความขาวของข้าวสารที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

Madhiyanon and Soponronnarit (2005) ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งสเปาเต็คเบดแบบสองมิติ ที่สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ นำเสนอว่าควรแบ่งการอบแห้งเป็น 2 รอบ โดยมีการอบในที่อับอากาศ (tempering process) ระหว่างรอบการอบแห้ง ซึ่งจะส่งผลดีกับปริมาณข้าวตัน โดยรอบแรกอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง เช่น 30% d.b. ด้วยอุณหภูมิอากาศ 130-150°C โดยไม่ต้องใช้อากาศไหลเข้าดาวนั้คัมเมอร์ จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้น 24% d.b. ในรอบที่อบแห้งที่สอง ใช้อุณหภูมิอากาศ 110°C โดยสามารถใช้อากาศไหลเข้าดาวนั้คัมเมอร์ได้ 0-30% จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้น 17-18% d.b. จากนั้นทำการลดอุณหภูมิด้วยอากาศแวดล้อมจนได้ความชื้น 16-17% d.b. ผลการเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด พบว่าในเชิงคุณภาพการขัดสี ปริมาณข้าวตันที่ได้จากข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็คเบดสูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เมื่อทำการอบแห้งจากความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นสูง 30-35% d.b. ถึงความชื้นระดับต่ำ และสำหรับความชื้นเริ่มต้น 25% d.b. เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็คเบดสามารถลดความชื้นได้ดีกว่าตั้งแต่เริ่มต้นและได้ปริมาณข้าวตันสูงกว่า ในเชิงปริมาตรบรรจุของเครื่องอบแห้ง ใช้อัตราอบแห้งจำเพาะ (specific drying rate) นิยามคืออัตราอบแห้งต่อปริมาตรของห้องอบแห้ง ($\text{kg water evaporated h}^{-1} \text{ m}^{-3}$) เพื่อการเปรียบเทียบ พบว่าในด้านเวลาอบแห้งเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดใช้เวลาอบแห้งสั้นกว่า แต่เมื่อพิจารณาอัตราอบแห้งจำเพาะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันในทุกช่วงอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ในเชิงการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะ พบว่าเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็คเบดสามารถลดความชื้นจาก 30.5-32.5% d.b. ถึง 15.5-17.8% d.b. ด้วยพลังงานความร้อนจำเพาะประมาณ 5.6 MJ/kg water evaporated ขณะที่จากงานวิจัยของ Poomsa-ad et al. (2002) พบว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดต้องแบ่งการอบแห้งเป็น 2 ช่วงเพื่อคงรักษาคุณภาพข้าวเปลือกที่ดี ดังนั้นจึงพบว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะใช้พลังงานความร้อนจำเพาะต่ำกว่าเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็คเบด แต่จะให้ผลในทางตรงข้ามในช่วงที่สองของการอบแห้ง

Ng, Law, and Tasirin (2006) นำเสนอจลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกมาเลเซีย เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็คเบด (แบบทรงกรวย-ทรงกระบอก) ทั้งที่มีการติดตั้งและไม่ติดตั้ง perforated draft tube โดยใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60-90°C, ความสูงชั้นกองเมล็ด 30-45 cm., ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 30% d.b. ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งแบ่งเป็น 2 ช่วงหลักคือช่วงที่หนึ่ง induction period เกิดขึ้นในช่วงแรกเป็นระยะเวลาสั้น ๆ เพื่อรอให้เมล็ดข้าวเข้าสู่สมดุลอุณหภูมิ และพบว่าช่วงนี้จะสิ้นสุด ณ จุดที่อัตราอบแห้งสูงสุด ช่วงที่สองคือ falling rate period เป็นช่วงอัตราอบแห้งลดลงแบ่งได้เป็น 2 ช่วงย่อยคือ rapid falling rate period และต่อด้วย slow falling rate period

ซึ่งในการทดลองนี้ไม่พบช่วง constant rate period ทั้งยังพบว่าอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งให้สูงขึ้น การใช้ท่อลมเป่า นอกจากช่วยลด minimum spouting velocity แล้วยังช่วยปรับปรุงอัตราการอบแห้งในช่วง falling rate period ให้ลดลงอย่างราบเรียบสม่ำเสมอตลอดช่วง และช่วยลดความแตกต่างของอัตราการอบแห้ง ระหว่างการอบแห้งที่ใช้ความสูงชั้นกองเมล็ดแตกต่างกันได้

Go, Das, Srzednicki, and Driscoll (2007) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดรูปทรงสามเหลี่ยม จึงทำการทดลองอบแห้งข้าวสาลีที่มีความชื้นเริ่มต้น 20 23 และ 25% w.b. โดยใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40 60 และ 80°C, ความเร็วอากาศทางเข้า 10-12.1 m/s ผลการอบแห้งแสดงว่าเกิดการอบแห้ง 2 ช่วงคือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยค่าความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมค่าความชื้นวิกฤต และพบว่าอุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้นทำให้ระยะเวลาช่วงอัตราการอบแห้งคงที่สั้นลง การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายความชื้นข้าวสาลีระหว่างการอบแห้งได้ แต่ทำนายอุณหภูมิอากาศทางออกเครื่องอบแห้งสูงกว่าผลการทดลอง ขณะที่ทำนายอุณหภูมิข้าวสาลีต่ำกว่าผลการทดลอง ซึ่งอาจเป็นเนื่องจากการสูญเสียความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อมขณะทำการทดลอง

Bie, Srzednicki, and Driscoll (2007) ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดรูปทรงสามเหลี่ยม เพื่อศึกษาการกระจายความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวในเครื่องอบแห้ง โดยทดสอบกับข้าวพันธุ์ Amaroo และพันธุ์ Langi ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 25 28 และ 30% w.b. ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 120 และ 180°C พบว่าที่ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 25-30% w.b. ความเร็วเป่าพ่นต่ำสุด (minimal spouting velocity) อยู่ในช่วง 10-20 m/s ผลการอบแห้งแสดงว่าข้าวเปลือกมีความชื้นที่ใกล้เคียงกันที่ระดับความสูงในส่วนดาวน์คัมเมอร์เท่ากัน เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศเท่ากับ 100 และ 140°C อุณหภูมิเมล็ดที่ระดับความสูงชั้นเมล็ดต่างกัน (0.975 m และ 0.6 m) มีความแตกต่างกันประมาณ 7°C ทั้งสองกรณี ในส่วนอัตราการอบแห้งพบว่ามีค่าคงที่ในช่วงแรกของการอบแห้ง และพบช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงเมื่อความชื้นข้าวเปลือกอยู่ในช่วง 11-18% w.b. และ 12-15% w.b. สำหรับข้าวเปลือกพันธุ์ Langi และพันธุ์ Amaroo ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดข้าวอย่างก้าวกระโดดถึง 10°C ซึ่งเริ่มเกิดขึ้นจากด้านล่างของส่วนดาวน์คัมเมอร์ไปยังด้านบน อันเนื่องมาจากอัตราการระเหยความชื้นของเมล็ดที่ลดลงทำให้เกิดการสะสมความร้อนจากอากาศร้อนที่ไหลเข้าสู่ส่วนดาวน์คัมเมอร์มากขึ้น ซึ่งแสดงการอบแห้งในส่วนดาวน์คัมเมอร์มีส่วนสำคัญ โดยเฉพาะช่วงที่ข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำ นอกจากนี้ยังได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดรูปทรงสามเหลี่ยม โดยใช้สมการอนุพันธ์ที่ Brooker

et al. (1992) ได้นำเสนอมาประยุกต์ใช้กับการจำลองในส่วนสเปาต์ ส่วนน้ำพุ (fountain) และส่วนควาน์คัมเมอร์ โดยใช้เงื่อนไขขอบการพาความร้อน (convective boundary condition) กับสมการอัตราอบแห้ง ผลการจำลองสามารถทำนายความชื้นข้าวเปลือกสูงกว่าการทดลองในช่วงแรก และทำนายได้ถูกต้องในช่วงกลางถึงท้ายของการอบแห้ง อาจเพราะในช่วงความชื้นเมล็ดมีค่าสูง มีบางบริเวณในถังพักที่เมล็ดไม่เกิดการเคลื่อนตัว (dead zone) ขณะที่ค่าอุณหภูมิเมล็ดและอุณหภูมิอากาศที่ทำนายได้ มีค่าต่ำกว่าและสูงกว่าการทดลองตามลำดับ

Evin, Gul, and Tanyildizi (2008) ศึกษาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เคดเบดซึ่งมีลักษณะฐานรองรับเมล็ดแตกต่างกัน คือรูปทรงกรวย (CBSB) รูปครึ่งทรงกลม (SBSB) และรูปทรงพาราโบลา (PBSB) โดยออกแบบให้มีปริมาตรบรรจุเมล็ดเท่ากัน และศึกษาผลของท่อลมเป่าทั้งกรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง โดยท่อลมเป่ามี 2 ลักษณะ คือแบบผนังท่อทึบและแบบผนังท่อมีรูพรุน โดยทดลองอบแห้งข้าวสาลีน้ำหนัก 5 kg ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 16-18% d.b. ด้วยอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 80°C ใช้อัตราไหลอากาศเชิงปริมาตร 85 m³/h ผลการทดลองแสดงว่าการติดตั้งท่อลมเป่าแบบผนังท่อทึบช่วยลดค่า minimum spouting velocity และค่าความดันลดสูงสุดอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งท่อลมเป่า ขณะที่เครื่องอบแห้งแบบที่อบแห้งได้เร็วที่สุดคือแบบ PBSB CBSB และ SBSB ตามลำดับเนื่องจากรูปทรงพาราโบลามีลักษณะที่สอดคล้องกับแนวการไหลของเมล็ดมากที่สุด จึงทำให้มีพื้นที่ dead zone น้อยที่สุดและการเคลื่อนที่ของเมล็ดเร็วที่สุด โดยระยะเวลาอบแห้งมากที่สุดคือกรณีติดตั้งท่อลมเป่าแบบผนังท่อทึบ, แบบผนังท่อมีรูพรุน และไม่ติดตั้งท่อลมเป่า ตามลำดับ เหตุเพราะผนังท่อทึบจะปิดกั้นอากาศที่ไหลแทรกเข้าไปในชั้นเมล็ดในพื้นที่ส่วนวงแหวน จึงเกิดการอบแห้งน้อยในพื้นที่ดังกล่าวเมื่อเทียบกับกรณีอื่น นอกจากนี้ในกรณีท่อลมเป่าแบบผนังทึบการเพิ่มระยะยกท่อลมเป่า (entrance height) ในช่วง 30-70 mm ยังช่วยลดระยะเวลาอบแห้งได้ ขณะที่ในกรณีท่อลมเป่าแบบผนังท่อมีรูพรุนการลด entrance height ในช่วง 30-70 mm ช่วยลดระยะเวลาอบแห้งได้ โดยการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลมเป่า ในช่วง 20-50 mm ไม่มีผลต่อกราฟการอบแห้ง

Markowski, Bialobrzewski, and Modrzewska, (2010) ศึกษาจลศาสตร์การอบแห้งและผลกระทบของลักษณะรูปร่างที่ใช้ในแบบจำลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนของข้าวบาร์เลย์ เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เคดเบด โดยทดลองอบแห้งด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 33-53°C ความเร็วอากาศทางเข้า 30 m/s ใช้มวลข้าวบาร์เลย์ 3.2 kg ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 17.5% w.b. ผลการทดลองแสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนช่วยลดระยะเวลาการอบแห้ง และอัตราอบแห้งที่พบในช่วงอัตราอบแห้งลดลง แสดงว่ากลไกหลักของการส่งผ่านความร้อนในเมล็ดคือการแพร่นอกจากนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดของข้าวบาร์เลย์ในขอบเขตที่ศึกษานี้ไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ความชื้นในช่วงอุณหภูมิอากาศ 33-53°C มีค่าเท่ากับ 1.99×10^{11} - 5.31×10^{11} m²/s เมื่อใช้รูปทรงกลม ในแบบจำลอง และมีค่าเท่ากับ 1.39×10^{11} - 3.94×10^{11} m²/s เมื่อใช้รูปทรงรีในแบบจำลอง ทั้งนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากรูปทรงรีให้ความถูกต้องในการจำลองการแพร่ความชื้นระหว่างการอบแห้งมากกว่ารูปทรงกลม เนื่องจากรูปทรงรีมีลักษณะคล้ายรูปทรงข้าวบาร์เลย์มากกว่ารูปทรงกลม

3.2 งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบด

Hajidavalloo and Humdullahpur (2000) ได้ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด แล้วเทียบผลการจำลองกับเครื่องอบแห้งจริง พบว่าผลจากแบบจำลองสอดคล้องกับการทดลอง และทราบถึงผลของอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น มีผลทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากการระเหยที่รวดเร็วของความชื้นที่ผิว และพบว่าอัตราอบแห้งลดลงเมื่อความชื้นที่ผิวถูกระเหยหมดไป นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางออกเครื่องอบแห้งมีแนวโน้มสูงมากในตอนเริ่มต้นอบแห้ง จากนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับอัตราการอบแห้งที่ลดลงเช่นเดียวกัน และเนื่องจากการลดลงของความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางออก จึงแนะนำว่าควรนำอากาศที่ทางออกกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากมีเอนทัลปีที่สูง และความชื้นต่ำ ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้งได้

เพื่อหาระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมหลังการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิสูง Poomsa-ad, Soponronnarit, Prachayawarakorn, and Terdyothin (2002) ใช้สมการการแพร่ความชื้นภายในเมล็ดเชิงอนุพันธ์ย่อย จำลองการลดลงของความชื้นเมล็ดข้าวเปลือก 1 เมล็ดที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการอบแห้งเป็น 2 ช่วง และทำการ tempering ระหว่างช่วงการอบแห้ง ใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 110-170°C ความเร็ว 2.2 m/s ขึ้นข้าวเปลือกหนา 1.5 cm ระยะเวลาอบแห้ง 0-10 min โดยข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้น 29.5% w.b. ผลการทดลองที่ได้เป็นข้อมูลสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นกับอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นหลัก การทำนายจึงใช้รูปแบบสมการ Arrhenius ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้เป็นตัวขับเคลื่อนที่สำคัญของสมการอนุพันธ์ย่อย ทำให้สามารถจำลองการกระจายตัวของความชื้นภายในเมล็ดที่ระยะเวลาอบแห้งและระยะเวลา tempering ต่าง ๆ ได้ ผลการจำลองแสดงว่าขณะทำการ tempering ความชื้นภายในเมล็ดที่สูงกว่าจะแพร่มาสู่ที่ผิวเมล็ด ทำให้อัตราอบแห้งในช่วงที่ 2 สูงขึ้น และพบว่าระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมขึ้นกับความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และระยะเวลาอบแห้ง โดยอุณหภูมิที่สูงทำให้ระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมลดลง เนื่องจากการแพร่ความชื้นภายในที่รวดเร็วกว่า งานวิจัยนี้ใช้ tempering index, I_c เป็นตัวชี้วัดระยะเวลา tempering

ที่เหมาะสมซึ่งพบว่าที่ค่า $I_c = 0.95$ มีความเหมาะสมเพียงพอเนื่องจากการอบแห้งในช่วงที่ 2 หลังการ tempering มีอัตราอบแห้งที่สูง โดยระยะเวลา tempering ที่ทำให้ $I_c = 0.95$ คือตั้งแต่ 35 min ขึ้นไป

Poomsa-ad, Terdyothin, Soponronnarit, and Prachayawarakorn (2005) วิเคราะห์กระบวนการอบแห้งบนพื้นฐานการทดลองและการจำลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBD), ความชื้นข้าวเปลือก และระยะเวลา tempering ที่มีต่อปริมาณข้าวคั่วและเวลาทำงานรวม การทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 35 30 และ 25% d.b. อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 110 130 150 และ 170°C ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 1 2 3 และ 4 min ใช้ระยะเวลา tempering 0 15 30 และ 45 min และระบายอากาศในกองข้าวด้วยอากาศแวดล้อม พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณข้าวคั่วคือความชื้นสุดท้ายหลังจากออกจาก FBD และอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ได้ โดยข้าวเปลือกที่ถูกลดความชื้นต่ำกว่า 24% d.b. (หลังจากออกจาก FBD) จะมีปริมาณข้าวคั่วสัมพัทธ์ต่ำลง ซึ่งสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยเทคนิค tempering ที่ระยะเวลา 30 min ดังนั้นเพื่อให้ได้คุณภาพข้าวเปลือกที่ดีไม่ควรลดความชื้นด้วย FBD ต่ำกว่า 21% d.b. และต้องตามด้วยการ tempering ดังนั้นระยะเวลาทำงานรวมจึงขึ้นกับปัจจัยทั้ง 2 เพราะถ้าลดความชื้นข้าวเปลือกในส่วน FBD ได้น้อย จะต้องใช้เวลานานในการระบายความชื้นด้วยการเป่าอากาศแวดล้อม ซึ่งการลดความชื้นด้วยอากาศแวดล้อมจะเป็นไปอย่างเชื่องช้ามาก จึงทำให้ระยะเวลาทำงานรวมมากกว่า จากผลการจำลองพบว่าจุดพอดีระหว่างปริมาณข้าวคั่วและระยะเวลาทำงานรวมคือ อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ใน FBD เท่ากับ 150°C และความชื้นข้าวเปลือกที่ออกจาก FBD ไม่ควรต่ำกว่า 22.5% d.b. โดยใช้ระยะเวลา tempering อย่างน้อย 25 min

การจัดลำดับการอบแห้งที่เหมาะสม ยื่อนำมาซึ่งประสิทธิภาพที่ดีของกระบวนการอบแห้งด้วยเหตุนี้ Prachayawarakorn, Poomsa-ad, and Soponronnarit (2005a) จึงศึกษาผลของลำดับการอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBD), การทำ tempering และ การระบายอากาศในกองข้าวด้วยอากาศแวดล้อม (AAV) โดยทำการทดลอง 3 ระบบ ซึ่งระบบที่ 1 อบแห้งด้วย FBD ตามด้วยการ tempering และเป่าด้วย AAV ขณะที่ระบบที่ 2 ประกอบด้วยการอบแห้งย่อยด้วย FBD 2 ช่วง ซึ่งหลังการอบแห้งย่อยแต่ละช่วงจะตามด้วยการ tempering และเป่าด้วย AAV โดยเพิ่มการ tempering ก่อนการอบแห้งย่อยช่วงที่ 2 การอบแห้งระบบที่ 3 ประกอบด้วยการอบแห้งย่อยด้วย FBD 2 ช่วงเช่นกัน ตามด้วยการ tempering หลังการอบแห้งย่อยแต่ละช่วง และสิ้นสุดกระบวนการด้วย AAV ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการ tempering ก่อนการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม ทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงมากกว่า เมื่อเทียบกับกรณีไม่ tempering เนื่องจากความชื้นความชื้นที่ลดลง น้ำจึงเคลื่อนที่ได้โดยง่ายเมื่อเป่าด้วยอากาศแวดล้อม ซึ่งเป็นประโยชน์ในแง่ประหยัดการใช้พลังงาน นอกจากนี้ผู้ศึกษายังได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินศักยภาพของระบบอบแห้งแบบต่าง ๆ ซึ่งพบว่าระบบที่ 2 สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ถึง 4 เท่าเมื่อเทียบกับระบบที่ 1 เนื่องจากขณะ tempering ความชื้นจะแพร่กระจายสู่ผิวเมล็ดทำให้ช่วงอบแห้งย่อยที่ 2 มีอัตราอบแห้งสูงกว่า จึงอบแห้งได้รวดเร็วและ

ประหยัดพลังงานกว่า โดยสามารถลดการใช้พลังงานของระบบที่ 1 จาก 7.32 MJ/kg water evaporated เหลือเพียง 4.75 MJ/kg water evaporated โดยการอบแห้งด้วยระบบที่ 2 นอกจากนี้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วย FBD ต้องมีการ tempering เพื่อรักษาปริมาณข้าวต้นเพราะความชื้นเนื่องจากความชื้นในเมล็ดลดลง โดยระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมคือ 30 min และควรเป่าด้วยอากาศแวดล้อมหลังการ tempering เพื่อหยุดการสร้างรังควันเชื้อเห็ด เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาสึ้นน้ำตาลแบบไมใช่เอนไซม์ ซึ่งทำให้ข้าวสารที่ได้มีสีเหลือง โดยระบบที่ 2 ให้คุณภาพที่ดีที่สุดใกล้เคียงกับระบบที่ 1

Tirawanichakul, Prachayawarakorn, Varanyanond, Tungtrakul, and SoponRonnarit (2004) ศึกษาผลกระทบของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศ 40-150°C ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 25.0 28.8 และ 32.5% d.b. ด้วยข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 1 และ ปทุมธานี 1 ที่มีต่ออัตราอบแห้งและคุณภาพข้าวเปลือก โดยลดความชื้นข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นถึงประมาณ 22.5% d.b. ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด ต่อด้วยการอบในที่อับอากาศเป็นเวลา 30 min ด้วยอุณหภูมิในเตาเท่ากับอุณหภูมิข้าวเปลือก จากนั้นนำข้าวเปลือกมาอบต่อด้วยอากาศแวดล้อมความเร็ว 0.15 m/s ผลการทดลองพบว่า อัตราอบแห้งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศอบแห้ง แต่ไม่ขึ้นกับความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นเพราะช่วงที่ลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด ความชื้นส่วนใหญ่อยู่บริเวณผิวข้าวเปลือก ปริมาณข้าวต้นของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสสูงถึง 25% มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงกว่า 80°C โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นสูง 32.5% d.b. เนื่องจากเกิดเจลบางส่วน (partial gelatinization) ระหว่างเมล็ดแป้งแต่ในข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสเพียง 14.5% ไม่พบการเพิ่มขึ้นของปริมาณข้าวต้นแม้ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงกว่า 80°C และความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นสูง ซึ่งอาจสรุปได้ว่าปริมาณอะไมโลสนั้นสำคัญในการเพิ่มแรงยึดระหว่างเมล็ดแป้งระหว่างกระบวนการเกิดเจล แรงยึดเหนี่ยวจะต่ำกว่าเมื่อปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า และผลจาก SEM แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนของโครงสร้างเมล็ดแป้งเมื่อใช้อุณหภูมิ 120-150°C (ข้าวมีอุณหภูมิ 83-89°C) พบว่าโครงสร้างเมล็ดแป้งถูกเชื่อมเข้าด้วยกัน โดยเมล็ดข้าวมีลักษณะชั้นแป้งที่หนาแน่นและราบเรียบมากขึ้นตลอดพื้นที่หน้าตัด เนื่องจากการเกิดเจล และผลจาก DSC แสดงให้เห็นว่าระดับการเกิดเจล (degree of gelatinization) ของข้าวทั้งสองพันธุ์มีค่าสูงขึ้น เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้นและระยะเวลาอบแห้งนานกว่า ขณะที่ความขาวของข้าวทั้งสองพันธุ์มีค่าลดลง เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80-150°C และข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นสูง 32.5% d.b. เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องเมื่อใช้อุณหภูมิสูง และระยะเวลาอบแห้งที่นานกว่าเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นสูง เมล็ดข้าวทั้งสองพันธุ์ที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 60°C สามารถงอกได้ปกติ แต่ไม่พบการงอกเมื่ออุณหภูมิ

อบแห้งสูงกว่า 80°C นอกจากนี้คุณภาพของข้าวที่หุงสุกพบว่า ความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นสูงขึ้น แต่คุณภาพของรสสัมผัสอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม

Prachayawarakorn, Tia, Poopaiboon, and Soponronnarit (2005b) ศึกษาเชิงเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกในขนาดอุตสาหกรรมด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBD) กับเครื่องอบแห้งแบบพัลส์ฟลูอิดไคซ์เบด (PFBD) โดยความถี่การเป่าลมในเครื่องอบแห้งแบบพัลส์ฟลูอิดไคซ์เบดเท่ากับ 25 rpm ผลการทดลองอบแห้งพบว่าข้าวเปลือกที่ทางออกจากเครื่องอบแห้งทั้ง 2 ชนิด มีความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดการอบแห้ง การใช้พลังงานความร้อนของเครื่องทั้ง 2 ชนิดใกล้เคียงกันและมีประสิทธิภาพเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่า 24% d.b. โดยมีค่าประมาณ 7.2 และ 3-4 MJ/kg water evaporated เมื่อใช้สัดส่วนอากาศเวียนกลับ 0% และ 70-80% ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องเป่าลมในกรณี PFBD และ FBD มีค่า 0.19 และ 0.27 MJ/kg water evaporated ตามลำดับ ซึ่งพบว่า PFBD ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าเนื่องจากสามารถใช้อัตราการไหลอากาศต่ำกว่าได้ คุณภาพข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งจาก FBD และ PFBD ในด้านปริมาณข้าวคืนและความขาวของข้าวสาร มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าเท่ากับข้าวที่ลดความชื้นด้วยอากาศแวดล้อมเกือบทุกกรณี หรือสูงกว่าเช่นในกรณีใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C และลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 24-30% d.b. ถึง 21-24% d.b. ได้ปริมาณข้าวคืนสัมพัทธ์ 103-110% เนื่องจากการเกิดเจลของเมล็ดแป้งภายในเมล็ดข้าว เมื่อความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ำกว่า 28% d.b. ควรใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิต่ำกว่า 145°C เพื่อคงรักษาความขาวของข้าวสาร ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 145°C เมื่อนำไปหุงจะมีความแข็งกว่าข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยวิธีธรรมชาติ 5.7-8.5% แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างขึ้นจากสมมูลมวลและพลังงาน ผลการทำนายที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ผลการจำลองพบว่า PFBD มีความสามารถในการดึงความชื้นต่ำกว่า FBD เล็กน้อย ซึ่งทำให้ปริมาณการอบแห้ง (drying capacity) ต่ำกว่า แต่ในแง่การใช้พลังงานความร้อนและไฟฟ้า PFBD มีค่าต่ำกว่า โดยกรณีพลังงานไฟฟ้าสามารถลดได้ถึง 30% และมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นต่ำ

3.3 งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ

ทวิช จิตรสมบูรณ์ โสรฎา แจ้งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว (2549) ศึกษาผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ เครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้มีลักษณะเป็นแบบการไหลสวนทาง อากาศอบแห้งเคลื่อนตัวจากด้านล่างของท่ออบแห้งที่วางตัวในแนวตั้งขึ้นสู่ด้านบนสวนทางกับข้าวเปลือกขึ้นที่ไหลตกลงมาอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วง ข้าวเปลือกที่ไหลผ่านท่ออบแห้งมีความพรุนสูง และเนื่องจากเป็นการไหลแบบสวนทางจึงทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างข้าวเปลือก และอากาศอบแห้งมีค่าสูง เกิดการถ่ายเทความร้อน และความชื้นในท่ออบแห้งโดยวิธีการพาแบบบังคับ การทดสอบใช้อุณหภูมิอบแห้ง 80 100 และ 120°C ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ย 6.642 m/s ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 23.75% d.b. ความชื้นสุดท้ายประมาณ 15.5% d.b. ปริมาณข้าวเปลือกขึ้น 600 g ผล

การทดสอบพบว่า ข้าวเปลือกใช้เวลาอยู่ในห้องอบแห้งประมาณ 1 วินาทีต่อรอบการอบแห้ง 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 water evaporated ตามลำดับ เมื่อพิจารณาคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งพบว่ามีความขาว และปริมาณข้าวตันอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้อัตราการอบแห้งยังมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงตลอดการอบแห้งโดยไม่เกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่ความเร็วสัมพัทธ์สูงมากทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพาที่ผิวเมล็ดข้าวสูง และอัตราการแพร่ความร้อนของเมล็ดข้าวสูงเนื่องจากความชันของความชื้นที่ผิวสูง (moisture content gradient) ทั้งนี้การศึกษาระยะทำภายใต้เงื่อนไขการทดลองดังนี้

- เป็นการศึกษาในย่านความชื้นต่ำซึ่งเป็นย่านที่มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าย่านความชื้นสูง
- เครื่องอบแห้งมีการทำงานเป็นขั้ว 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 water evaporated ซึ่งต่ำกว่าการอบแห้งที่ใช้มวล 600 g

ทวิช จิตรสมบูรณ์ โสภฎา แจ่มการ และ เกียรติกร เพ็ชรน้ำเขียว (2549) ศึกษาผลกระทบของลมหมุนวนต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ จากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของลมหมุนวนภายในห้องอบแห้งโดยใช้สภาวะการทดสอบเดียวกันพบว่า เมื่อทำให้อากาศอบแห้งภายในห้องอบแห้งหมุนวนจะทำให้เพิ่มระยะเวลา 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 water evaporated สำหรับกรณีลมหมุนวน และ 2.4 3.14 และ 3.03 MJ/kg water evaporated สำหรับกรณีลมไม่หมุนวน ที่อุณหภูมิอบแห้ง 80 100 และ 120°C ตามลำดับ ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ 17.5 10.5 และ 10.89% ตามลำดับ โดยที่ความขาว และปริมาณข้าวตันอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

เกียรติกร เพ็ชรน้ำเขียว สุพิชญ์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2551) นำเสนอผลของความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่ออัตราอบแห้งข้าวเปลือกและการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง

แบบหล่นอิสระขนาดเล็ก (ความยาวท่อ 115 cm และขนาดท่อ 4.49 cm) งานวิจัยดังกล่าวทดลองอบแห้งข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องด้วยการลำเลียงข้าวเปลือกวนกลับด้วยกะพ้อลำเลียง ใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 90 และ 120°C ที่มีความเร็ว 1 2 3 และ 4 m/s โดยข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้น 26% w.b. ไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งด้วยอัตรา 15.37 kg/min ผลการทดลองแสดงว่าอัตราอบแห้งแปรผันโดยตรงกับความเร็วอากาศอบแห้ง เพราะเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งจาก 1 เป็น 4 m/s ทำให้ระยะเวลาอบแห้งลดลง 68 และ 70 min ในกรณีอุณหภูมิ 90 และ 120°C ตามลำดับ ขณะที่อัตราสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศอบแห้ง คือ 2.92-6.32 MJ/kg water evaporated และ 3.52-6.00 MJ/kg water evaporated ที่อุณหภูมิ 90 และ 120°C ตามลำดับ

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบุญ (2552ก) นำเสนอผลการพักข้าว อุณหภูมิและความเร็วอากาศต่อการใช้พลังงาน ได้ทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ด้วยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40 60 100 130 และ 150°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 2 และ 3 m/s ระยะเวลาพักข้าวเปลือก 1 2 และ 4 min ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเร็วและอุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นสามารถลดการใช้พลังงานได้ ส่วนการพักข้าวที่นานขึ้นนั้นในภาพรวมลดการใช้พลังงานได้บ้างแม้ไม่มากนัก แต่ถ้าพักนานเกินไปจนทำให้อุณหภูมิเมล็ดข้าวลดลงต่ำกว่าระดับที่ทำให้เกิดการปรับสภาพขางมาเป็นสภาพแก้วจะทำให้เพิ่มการใช้พลังงานปฐมภูมิได้ ในงานวิจัยนี้พลังงานรวมจำเพาะที่ใช้อยู่ในช่วง 4.88-24.41 MJ/kg water evaporated และพลังงานทุติยภูมิจำเพาะของเครื่องอบแห้งชนิดนี้มีผลต่อพลังงานรวมจำเพาะมากกว่าระยะเวลาพัก ช่วงการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระควรเป็นช่วงที่อากาศอบแห้งมีอุณหภูมิประมาณ 130°C โดยใช้อากาศความเร็วสูง 3 m/s และระยะพัก 4 min เพราะทำให้สามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ใช้พลังงานรวมน้อย โดยที่อุณหภูมิเมล็ดข้าวไม่สูงจนเกินไป

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบุญ (2552ข) นำเสนอผลของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ที่มีต่อปริมาณข้าวต้นและความขาวข้าวสาร ด้วยเงื่อนไขการทดลองเช่นเดียวกับที่ สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบุญ (2552ก) ได้นำเสนอ พบว่าการพักข้าวเปลือกเป็นเวลา 1-4 min ต่อรอบอบแห้ง มีผลดีเป็นอย่างมากต่อการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ โดยสามารถให้ปริมาณข้าวต้นได้สูงถึงประมาณ 55-60% ทั้งที่อุณหภูมิอากาศต่ำและสูง และความเร็วอากาศต่ำและสูง (ที่ความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย 12-14% w.b.) ผลที่ได้ใกล้เคียงกับกรณีอบแห้งอ้างอิงด้วยอากาศแวดล้อม แต่หากอบแห้งอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการพักจะได้ปริมาณข้าวต้นที่ต่ำมากซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นอันเนื่องมาจากความชื้นความชื้นภายในเมล็ดมีค่าสูง สำหรับความขาวของข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งแบบมีการพัก ไม่แตกต่างจากตัวอย่างอ้างอิง แสดงถึงข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่สามารถอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิและความเร็วสูงโดยยังคงคุณภาพข้าวสารภายหลังการขัดสีได้

3.4 งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน

เครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน (batch re-circulating dryer) มีลักษณะการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง โดยมีการอบแห้งสลับกับการ tempering เป็นช่วง ๆ เพื่อศึกษาเครื่องอบแห้งชนิดนี้ Shei and Chen (1998) ได้นำเสนอสมการอบแห้งเพื่อประยุกต์ใช้กับเครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน (batch re-circulating dryer) โดยใช้สมการอบแห้งชั้นบางของ Newman สัมประสิทธิ์ในสมการดังกล่าว ได้จากข้อมูลการทดลองอบแห้งชั้นผิวบางของข้าวเปลือกจำนวน 108 การทดลอง ซึ่งระยะเวลาอบแห้ง (5-15 min) ระยะเวลา tempering (40-120 min) ความชื้นสัมบูรณ์ (10-26 g/kg) และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง (35-65°C) คือตัวแปรควบคุมในการทดลอง ผลการจำลองสมการแสดงว่า ค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant, k) ตามสมการจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้น, ระยะเวลาอบแห้งต่อรอบสั้นลงหรือระยะเวลา tempering ต่อรอบนานขึ้น ซึ่งสามารถลดระยะเวลาอบแห้งข้าวเปลือกในส่วนอบแห้งได้

ต่อมาในปี 2002 Shei, H. J. and Chen, Y. L. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน (batch re-circulating dryer) ซึ่งประกอบด้วยสมการอบแห้งชั้นผิวบางที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ ภายใต้เงื่อนไขการจำลอง อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 35-65°C, ความชื้นสัมบูรณ์ 10-26 g/kg และความเร็ว 0.25 m/s ด้วยระยะเวลาอบแห้ง 5-15 min ระยะเวลา tempering 40-120 min ผลการจำลองแสดงว่า อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูงขึ้นและหรือความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลง ทำให้อัตราอบแห้งโดยรวมและส่วนอบแห้งเพิ่มขึ้น ขณะที่การลดระยะเวลาอบแห้งในแต่ละรอบและหรือการเพิ่มระยะเวลา tempering ทำให้ระยะเวลาอบแห้งโดยรวมเพิ่มขึ้น แต่ช่วยเพิ่มอัตราอบแห้งในส่วนอบแห้งได้ ซึ่งทำให้การใช้พลังงานต่ำกว่า

Madamba and Yabes (2004) ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเครื่องอบแห้งแบบถัง โดยใช้การอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่องเป็นช่วง ๆ (intermittent drying) เพื่อศึกษาการพักตัวของข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศร้อน การออกแบบการทดลองใช้ three level three-factor fraction factorial design และพุ่งเป้าหมายไปที่การหาค่าอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง ความเร็วลม และเวลาในการพักตัวที่ดีที่สุด เพื่อให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งด้านเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งที่ดี อุณหภูมิที่ใช้อบแห้งอยู่ระหว่าง 35-55°C ความเร็วอากาศอบแห้งอยู่ในช่วง 0.4-0.6 m/s ระยะเวลาการพักตัวอยู่ในช่วง 0-4 h ผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง ในขณะที่ความเร็วอากาศอบแห้งแทบไม่มีผลต่อเวลาและคุณภาพของข้าวเปลือก โดยที่ระยะเวลาการพักข้าวเปลือกมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญ การหาจุดการทำงานที่ดีที่สุดใช้หลักการ Response Surface Methodology

(RSM) วิเคราะห์หาพบว่าเงื่อนไขการอบแห้งที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป็นช่วง ๆ สำหรับเครื่องอบแห้งแบบถัง คือที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C และเวลาการพักข้าวเปลือก 2 h

3.5 งานวิจัยการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคอื่น ๆ

Li, Cao, Yu, and Zhong (1999) ศึกษาการย่อยสลายภายในข้าวเปลือกที่เกิดขึ้นหลังการอบแห้งแบบเป็นไม่ต่อเนื่องเป็นช่วง ๆ (intermittent drying) ด้วยการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขกระจายตัวของความชื้นภายในเมล็ดได้จากแบบจำลองการแพร่ โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความเค้นภายในเมล็ดที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งและการ tempering ใช้เงื่อนไขการอบแห้งอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 35 45 50 และ 60°C ความเร็ว 2.6 และ 3.4 m/s ระยะเวลาอบแห้งแต่ละช่วง 5 10 และ 15 min โดย intermittent ratio เท่ากับ 0 2 และ 8 min/min ใช้ข้าวเปลือกของ Beijing ที่มีความชื้นเริ่มต้น 18.5% w.b. ผลการทดลองและการจำลองแสดงให้เห็นว่าการร้าวของข้าวโดยส่วนมากเกิดขึ้นในช่วงสั้น ๆ ภายหลังจากการอบแห้ง ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 4 h แรกของการอบแห้ง โดยการลดระยะเวลาอบแห้งแต่ละช่วงและหรือเพิ่มระยะเวลา tempering สามารถช่วยลดความเค้นภายในเมล็ดข้าวได้ ทำให้เปอร์เซ็นต์รอยร้าวลดลง ซึ่งระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมประมาณ 8 เท่าของระยะเวลาอบแห้ง

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

Iguaz, Rodriguez, and Virseda (2006) ศึกษาผลกระทบการอบแห้งต่อเนื่อง, การอบแห้งเป็นช่วง ๆ ด้วยการ tempering ที่อุณหภูมิแวดล้อม และการอบแห้งอย่างต่อเนื่องต่อการ tempering ด้วย

อุณหภูมิ 60°C โดยใช้ระยะเวลา tempering เท่ากับ 8 เท่าของระยะเวลาอบแห้ง ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 53 60 และ 80°C ลดความชื้นจากข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 16-18% w.b. ถึงความชื้นสุดท้าย 11-13% w.b. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งเป็นช่วง ๆ มีผลต่อจลศาสตร์การอบแห้งของข้าวเปลือกอย่างเด่นชัด ได้อัตราอบแห้งที่สูงกว่าและระยะเวลาอบแห้งรวมสามารถลดลงได้ ซึ่งผลของการ tempering ระหว่างช่วงการอบแห้งอาจเทียบได้กับการเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ ในกรณีอบแห้งอย่างต่อเนื่อง (ซึ่งเป็นส่วนช่วยลดการใช้พลังงาน) และพบว่าการอบแห้งแบบต่อเนื่องด้วยอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิและความจุความชื้นสูง ทำให้อบแห้งได้อย่างรวดเร็วประหยัดเวลา แต่เป็นผลเสียกับปริมาณข้าวต้นซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการ tempering ที่อุณหภูมิ 60°C หลังการอบแห้ง หรืออีกวิธีหนึ่งคือการอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งสามารถลดความชื้นในเมล็ดข้าว ทำให้เปอร์เซ็นต์รอยร้าวลดลงได้

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

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

ระยะเวลา tempering เดียวกัน โดยที่ข้าวเปลือกเมล็ดยาวต้องการระยะเวลา tempering น้อยกว่าข้าวเปลือกเมล็ดสั้น

Aquerreta, Iguaz, Arroqui, and Virseda (2007) ทำการศึกษาจำนวนรอบการอบแห้งที่สอดคล้องกับอุณหภูมิ tempering ที่แตกต่างกัน โดยทดลองอบแห้งแบบชั้นบางด้วยอากาศอุณหภูมิ 60°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 4% สลับกับการ tempering ที่อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิ 40 หรือ 60°C ด้วยระยะเวลา tempering 8 เท่าของระยะเวลาอบแห้ง ซึ่งพบว่ากรณีลดความชื้นในปริมาณที่เท่ากัน (จาก 18 ถึง 12% w.b.) การ tempering ด้วยอุณหภูมิ 60°C หลังการอบแห้งสามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้ถึง 38% เมื่อเทียบกับการ tempering ด้วยอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิ 40°C เนื่องจากปริมาณความชื้นที่ผิวเมล็ดหลังการ tempering มากกว่าจึงทำให้อัตราอบแห้งในรอบถัดมาสูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งที่แบ่งออกเป็น 2 และ 3 ช่วงสามารถลดจำนวนเมล็ดที่มีรอยร้าวได้ แต่อุณหภูมิ tempering ที่สูงจะมีผลดีต่อปริมาณข้าวต้นและลดจำนวนรอยร้าวของข้าวได้มากกว่า และพบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือการอบแห้งแบบ 2 ช่วงที่มีการ tempering ด้วยอุณหภูมิ 60°C หลังการอบแห้งแต่ละช่วง ซึ่งจะทำให้คุณภาพข้าวที่ได้ดีและประหยัดพลังงาน

Dong, Lu, Liu, Nishiyama, and Cao, (2009) นำเสนอวิธีการหาความชื้นที่ระดับต่าง ๆ ภายในเมล็ด ในขณะอบแห้งและ tempering ด้วยแบบจำลองอบแห้งรูปทรงกลมกับข้าวเปลือกพันธุ์เมล็ดยาว (พันธุ์ L201) และพันธุ์เมล็ดสั้น (พันธุ์ Akitakomachi) โดยใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 30 40 และ 50°C ระยะเวลาอบแห้ง 60 min ใช้อุณหภูมิ tempering 30 40 และ 50°C เป็นเวลา 0-300 min ตามเงื่อนไขการจำลอง ผลการจำลองพบว่าในช่วง tempering ความชื้นจะแพร่จากกึ่งกลางไปยังผิวเมล็ดเนื่องจากผลของความชันความชื้นหลังการอบแห้ง และเมื่อจำลองสภาพการอบแห้งหลังข้าวเปลือกผ่านการ tempering พบว่าความชื้นในแต่ละชั้นของเมล็ดจะลดลงโดยตลอดการอบแห้ง ขณะที่ข้าวที่ไม่ผ่านการ tempering ที่ชั้นด้านนอกของเมล็ดเกิดการลดลงของความชื้นน้อยมาก อัตราอบแห้งจึงต่ำกว่า และผลการจำลองการอบแห้งสลับกับการ tempering เป็นรอบ ๆ พบว่าในความชื้นที่ชั้นด้านในของเมล็ดจะลดลงตลอดเวลา ทั้งช่วงการอบแห้งและการ tempering ดังนั้นการ tempering จึงช่วยประหยัดพลังงานได้เนื่องจากเกิดการลดความชื้น โดยไม่ได้ให้พลังงานในช่วงดังกล่าว นอกจากนี้ที่ผลการจำลองเทียบกับการทดลองในเงื่อนไขอบแห้งเดียวกันพบว่า เมื่อระยะเวลา tempering เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์รอยร้าวที่ได้ลดลงสอดคล้องกับความชันความชื้นที่ลดลงตามผลการจำลอง โดยระยะเวลา tempering ที่ 60 min สามารถลดความชื้นความชื้นได้ 50% และลดได้ทั้งหมดทุกกรณีศึกษาที่ระยะเวลา tempering ที่ 240 min

Nimmol and Devahastin (2010) ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน (impinging stream dryer) ด้วยความเร็วอากาศเข้า 20 m/s โดยใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 110 130 และ 150°C ระยะการชน 5 10 และ 15 cm อัตราการป้อนข้าวเปลือก 130 และ 150 kg dry solid/h โดยใช้ลักษณะการป้อนข้าวเปลือกแบบ 1 จุด และ 2 จุด พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศเข้าและอัตราป้อน

ข้าวเปลือก หรือลดระยะเวลาการชน ทำให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (volumetric water evaporation rate, VWER) เพิ่มขึ้น ในส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heat transfer coefficient, VHTC) มีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือก ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิอากาศเข้าและระยะเวลาการชนทำให้ VHTC ลดลง ผลการทดลองโดยส่วนใหญ่พบว่าลักษณะการป้อนข้าวเปลือกไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า VWER และ VHTC ในส่วนการใช้พลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศหรือลดระยะเวลาการชน พลังงานจำเพาะของเครื่องทำความร้อนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือกหรือลดระยะเวลาการชน โดยค่าพลังงานรวมจำเพาะอยู่ในช่วง 5.1-11.2 MJ/kg water evaporated โดยในการศึกษานี้เงื่อนไขขอบแห้งที่ใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำสุดคือ ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 110°C ระยะเวลาการชน 5 cm อัตราการป้อนข้าวเปลือก 150 kg dry solid/h และใช้ลักษณะการป้อนข้าวเปลือกแบบ 2 จุด จุดที่น่าสนใจของเครื่องอบแห้งกระแสนคือสามารถลดความชื้นข้าวเปลือก 3.4-7.7% d.b. ในระยะเวลาอันสั้นเพียง 1.81-2.42 s ทำให้อัตราอบแห้งสูงกว่าเครื่องอบแห้งโดยทั่วไปอย่างมาก และใช้พลังงานในระดับใกล้เคียงกับเครื่องอบแห้งทั่วไป แต่ยังคงต้องศึกษาถึงคุณภาพข้าวเปลือกภายหลังจากการอบแห้งต่อไป

สุชาติ ธนสุขประเสริฐ ธนิต สวัสดิ์เสวี สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา และสมชาติ โสภณ รณฤทธิ์ (2554) การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน (ISD) โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 130 150 และ 170°C ความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 20 m/s ระยะห่างกระแสนเท่ากับ 5 cm และอัตราการป้อนวัสดุ 90 kg/h ลักษณะการอบแห้งแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ 1.อบแห้งด้วย ISD 1 รอบ และ 2.อบแห้งด้วย ISD 2 รอบ โดยรูปแบบที่ 1. ประกอบด้วย 1.1 อบแห้งด้วย ISD, 1.2 เก็บในที่อับอากาศ 30 min, 1.3 เป่าด้วยอากาศแวดล้อม 45 min, 1.4 ฝั้ที่อุณหภูมิห้อง 2-3 วัน. ขณะที่รูปแบบที่ 2. ประกอบด้วย 2.1 อบแห้งด้วย ISD, 2.2 เก็บในที่อับอากาศ 30 min, 2.3 อบแห้งด้วย ISD, 2.4 เก็บในที่อับอากาศ 30 min, 2.5 เป่าด้วยอากาศแวดล้อม 45 min, 2.6 ฝั้ที่อุณหภูมิห้อง 2-3 วัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ 130-170°C พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรในรอบแรกของการอบแห้งด้วย ISD มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 215 ถึง 377.2 kg water/m³ h ขณะที่ในรอบที่สองของการอบแห้งด้วย ISD มีค่าลดลงเล็กน้อยจาก 105.5-99.2 kg water/m³ h เนื่องจากความชื้นที่ระเหยในรอบแรกเป็นความชื้นบริเวณผิวเป็นหลัก ขณะที่ในรอบที่สองความชื้นที่ผิวมีค่าลดลง จึงทำให้อัตราการระเหยน้ำลดลง ในส่วนปริมาณข้าวต้นพบว่ามีค่าลดลงเมื่อผ่านการอบแห้งด้วย ISD ในรอบแรกและลดลงมากขึ้นเมื่อผ่านการอบแห้งด้วย ISD ในรอบที่สอง ขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นปริมาณข้าวต้นมีค่าลดลง โดยปริมาณข้าวต้นภายหลังจากการอบแห้ง 2 รอบ มีค่าเท่ากับ 29.2 27.3 และ 25.2% ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130 150 และ 170°C ตามลำดับ โดยปริมาณข้าวต้นของตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการอบแห้งเท่ากับ 58.1% การเปลี่ยนแปลงสีของข้าวสารมีค่าค่อนข้างน้อย เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งค่อนข้างสั้น

Jittanit, Saeteaw, and Charoenchaisri (2010) เสนอระดับการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งที่ใช้จริงในโรงสีข้าวขนาดใหญ่ในประเทศไทย และค้นหาทางเลือกเพื่อการอบแห้งที่ใช้พลังงานน้อย แต่ยังคงคุณภาพข้าวสารในระดับเดียวกับวิธีการที่ใช้ในปัจจุบัน โดยเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษาคือเครื่องอบแห้งแบบ LSU (Louisiana State University) ซึ่งใช้จริงในโรงสีข้าวที่เป็นกรณีศึกษานี้ ในโรงสีนี้แบ่งการอบแห้งเป็น 3-4 รอบ โดยใช้อุณหภูมิช่วง 55-60°C และทำ tempering มากกว่า 2 ชั่วโมงระหว่างรอบการอบแห้ง ข้าวเปลือกที่ใช้ในการอบแห้งคือข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 21.0-23.6% w.b. อบจนได้ความชื้นสุดท้าย 10.4-13.6% w.b. จำนวนพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะ, SPEC (พลังงานความร้อน+พลังงานไฟฟ้า) ตลอดกระบวนการอบแห้ง จากการทดลอง 3 ครั้งได้ค่า SPEC เท่ากับ 3.874-4.421 MJ/kg water evaporated เมื่อพิจารณาค่า SPEC ในแต่ละรอบการอบแห้งพบว่ามิต่ำสุดในรอบแรก และเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญในรอบอบแห้งต่อ ๆ มา นอกจากนี้ยังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBD) ร่วมกับเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนจาก solar collector (ซึ่งเทียบได้กับการอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม, AAV) ในระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการ multi-stage drying แล้วนำข้าวเปลือกที่ได้ไปทดสอบหาปริมาณข้าวต้นและสีของข้าวสาร เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบ LSU ก่อนหน้านี้ ผลแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วย FBD ที่ 100°C + AAV และ FBD ที่ 110°C + AAV ให้ข้าวสารที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ LSU ในการวิเคราะห์ทางเลือกการอบแห้งพบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงจาก 20-25% w.b. ไปยังระดับ 18-19% w.b. เครื่องอบแห้งแบบ LSU ใช้ระดับพลังงาน SPEC เท่ากับ 2.043-3.092 MJ/kg water evaporated ซึ่งน้อยกว่า FBD ซึ่งใช้ระดับพลังงาน SPEC เท่ากับ 4.2-5.55 MJ/kg water evaporated แสดงให้เห็นว่าควรใช้ เครื่องอบแห้งแบบ LSU ในช่วงความชื้นข้าวเปลือกนี้ แต่การอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นต่ำจาก 18-19% w.b. ไปยังระดับ 12-14% w.b. ควรใช้เครื่องอบแห้งแบบ In-store dryer มากกว่าเนื่องจากใช้พลังงาน SPEC เพียง 2.88 MJ/kg water evaporated เมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้ง แบบ LSU ซึ่งใช้ระดับพลังงาน SPEC เท่ากับ 4.726-6.285 MJ/kg water evaporated

3.6 ผลของอุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว (Glass transition temperature) ที่มีต่อการอบแห้ง

Siebenmorgen, Yang, and Sun (2004) ทดสอบข้าวกล้องเมล็ดยาวพันธุ์ Drew และข้าวกล้องเมล็ดยาวปานกลางพันธุ์ Bengal ด้วยเทคนิค dynamic mechanical thermal analysis (DTMA) เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงเชิงกลเนื่องจากความร้อน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของข้าวกล้องทั้งสองพันธุ์ เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 70°C ที่ความชื้นข้าวเปลือก 9% w.b. จนถึงอุณหภูมิ 28°C ที่ความชื้นข้าวเปลือก 22% w.b. โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 5.1°C

ขณะที่ Sun, Yang, Stelwagen, Siebenmorgen, and Cnossen (2002) ได้อธิบายถึงความสำคัญ ของ T_g ที่มีต่อการอบแห้งข้าวเปลือกดังนี้ ในขณะที่อบแห้ง ถ้าเมล็ดข้าวมีอุณหภูมิต่ำกว่า T_g แป้งในข้าวจะ อยู่ในสภาพของแข็งคล้ายแก้ว โดยเมล็ดแป้งในข้าวจะเรียงตัวค่อนข้างแน่นจึงทำให้น้ำที่จับตัวกับแป้ง เคลื่อนที่ได้ยาก ดังนั้นการแพร่ของความชื้นภายในเมล็ดข้าวจึงเป็นไปอย่างเชื่องช้า (low diffusivity) ด้วย เหตุนี้จึงใช้ระยะเวลาในการอบแห้งให้ได้ความชื้นภายในที่ต้องการ ถ้าอุณหภูมิที่เมล็ดข้าวสูงกว่า ค่า T_g แป้งในเมล็ดข้าวจะอยู่ในสภาพคล้ายยาง ซึ่งโมเลกุลขนาดใหญ่ของแป้งจะมีปริมาตรอิสระมากขึ้น แป้งสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ความชื้นสามารถแพร่ออกจากเมล็ดข้าวได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (high diffusivity)

Yang, Siebenmorgen, Thielen, and Cnossen (2003a) หาค่าการนำความร้อนข้าวเปลือกในช่วง ความชื้นภายใน 9.2-17.0% w.b. และอุณหภูมิ 3-69°C ด้วยวิธีการแหล่งความร้อนเชิงเส้น (line heat source method) ประกอบกับวิธีความชันสูงสุด (maximum slope method) ผลการทดสอบพบว่าค่าการนำ ความร้อนที่ได้อยู่ในช่วง 0.080-0.138 $Wm^{-1}K^{-1}$ และค่าที่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นของเมล็ดข้าว โดยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีหลังจากอุณหภูมิเมล็ดข้าวสูงกว่า T_g ซึ่งทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง กว่า ขณะที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า T_g ถึงประมาณ 25°C ค่าการนำความร้อนค่อนข้างคงที่ (0.01-0.11 $Wm^{-1}K^{-1}$) และจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 25°C

Cnossen, Siebenmorgen, and Yang (2002) ศึกษาผลของความชื้นความชื้นขณะทำการอบแห้ง ที่ทำให้ระดับความชื้นในแต่ละชั้นของเมล็ดข้าวเปลือกไม่เท่ากัน จึงอาจส่งผลให้โครงสร้างแต่ละ ชั้นภายในเมล็ดมีสภาพโครงสร้างที่แตกต่างกันเมื่อใช้ค่าอุณหภูมิตอบแห้งใกล้เคียง T_g จึงทำการ ทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบชั้นบาง ด้วยข้าวเมล็ดยาว (พันธุ์ Cypress) และข้าวเมล็ดยาวปาน กลาง (พันธุ์ Bengal) ที่มีความชื้นเริ่มต้น 20.5 และ 17.2% w.b. ตามลำดับ อากาศอบแห้งมีอุณหภูมิ 40 45 50 55 และ 60°C ปรับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่สอดคล้องกับค่าความชื้นสมดุลเท่ากับ 5.8 6.7 7.6 8.5 และ 9.4% w.b. โดยพิจารณาอัตราอบแห้งจากค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant, k) และปริมาณความชื้นที่ลดลง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ด้วย อุณหภูมิสูงกว่า T_g ของข้าว มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มอัตราอบแห้ง เมื่อเทียบกับกรณีอุณหภูมิต่ำกว่า T_g และกรณีอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50 55 และ 60°C พบว่าเมื่อใช้อากาศความชื้นน้อย ซึ่งทำให้ค่า ความชื้นสมดุลมีค่าต่ำ ผิวของเมล็ดจะเปลี่ยนกลับจากสภาพยางเป็นสภาพแก้ว ส่งผลให้ที่ผิวเมล็ด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง ดังนั้นอัตราการอบแห้งจึงช้ากว่ากรณีอากาศอบแห้งอุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงกว่าแต่ที่ผิวเมล็ดยังคงสภาพคล้ายยาง อย่างไรก็ตามเมื่อขยาย ช่วงเวลาอบแห้งออกไปผลของสภาพโครงสร้างที่ผิวจะน้อยลง โดยปัจจัยสำคัญที่จำกัดอัตราอบแห้ง คือการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเมล็ด

ในเชิงทฤษฎีกล่าวว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าค่า T_g ทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้ความชันความชื้นภายในเมล็ดมีค่าสูงมาก เพราะผิวเมล็ดแห้งเร็วกว่าส่วนด้านในเมล็ด ความแตกต่างความชื้นจึงทำให้เกิดความเค้นภายในเมล็ด เมื่อความเค้นดังกล่าวสูงกว่าค่าความต้านทานแรงดึงของเมล็ด หากไม่มีการทำ tempering หลังการอบแห้ง จะเกิดรอยร้าวขึ้นในเมล็ดข้าว

Yang, Jia, Siebenmorgen, Pan, and Cnossen (2003b) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง T_g และความชันความชื้นที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง ที่มีต่อปริมาณข้าวต้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การถ่ายเทความร้อนและความชื้นภายในเมล็ด ด้วยวิธีทาง finite element ผลการจำลองพบว่าความชันความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้งและค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งทำให้ทราบระยะเวลาอบแห้งที่ความชันความชื้นมีค่าสูงสุดของแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง ประกอบกับผลการทดลองอบแห้งข้าวพันธุ์ Cypress ที่มีความชื้นเริ่มต้น 16.4 และ 21.4% w.b. ด้วยอากาศอุณหภูมิ 29-58°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 16.8-47% ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 0-180 min โดยเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งเพื่อทดสอบปริมาณข้าวต้นที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้ง ผลทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งข้าวเปลือกในสภาพคล้ายแก้ว (ต่ำกว่า T_g) ปริมาณข้าวต้นที่ได้จะลดลงเพียงเล็กน้อยหลังการอบแห้ง แต่เมื่ออบในสภาพคล้ายยาง (สูงกว่า T_g) และข้าวเปลือกเย็นตัวทันทีหลังการอบแห้ง ปริมาณข้าวต้นที่ได้จะลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงเวลาอบแห้งที่ปริมาณข้าวต้นเริ่มลดลงสอดคล้องกับระยะเวลาที่ความชันความชื้นมีค่าสูงสุดตามผลการจำลอง

Yang, Jia, and Howell (2003c) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง ที่อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 60°C ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ Bengal ที่มีความชื้นเริ่มต้น 16.5% w.b. เก็บตัวอย่างและอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ตำแหน่งห่างจากช่องทางเข้าอากาศร้อนที่ 2.5 7.6 15.2 22.9 และ 30.5 cm ตามระยะเวลาอบแห้ง ตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บได้ส่วนหนึ่งนำไปหาความชื้นและอีกส่วนหนึ่งทำการ tempering เป็นเวลา 4-4.5 h แล้วจึงนำไปหาปริมาณข้าวต้น ผลการทดลองแสดงว่าข้าวเปลือกภายในชั้นต่าง ๆ ตามแนวการไหลของอากาศมีอุณหภูมิลดลง ซึ่งมีผลต่อสภาพโครงสร้างที่แตกต่างกัน (สภาพคล้ายแก้วหรือคล้ายยาง) ข้าวที่ตำแหน่งต่างกันจึงจึงถูกอบแห้งในบริเวณ glass transition ที่แตกต่างกัน หากข้าวมีอุณหภูมิต่ำกว่า T_g ซึ่งโครงสร้างข้าวมีสภาพคล้ายแก้ว ระยะเวลาอบแห้งที่นานจะไม่มีผลต่อปริมาณข้าวต้น แต่หากเมล็ดข้าวมีสภาพโครงสร้างคล้ายยาง และอบแห้งนานกว่าระยะเวลาที่ความชันความชื้นมีค่าสูงสุด จะทำให้ปริมาณข้าวต้นลดลงอย่างถาวรแม้จะทำการ tempering ด้วยอุณหภูมิเมล็ดข้าวเป็นระยะเวลานาน

Cnossen, Jimenez, and Siebenmorgen (2003) ศึกษาผลของการอบแห้งและ tempering ที่อุณหภูมิสูงและต่ำกว่า T_g ที่มีต่อรอยร้าวในเมล็ดข้าวและปริมาณข้าวต้นหลังการอบแห้ง อบแห้ง

ด้วยเงื่อนไขขอบแห้ง 3 แบบคือ (60°C , RH = 17%) (60° , RH = 50%) และ(40°C , RH = 12%) โดยลดความชื้นครั้งละ 3.0 4.5 และ 6.0% w.b. (percentage points of moisture removed in one pass of drying, PPMR) ตามด้วยการ tempering ด้วยอุณหภูมิเช่นเดียวกับขอบแห้ง ด้วยเวลา 0 80 160 และ 240 min. ต่อด้วยการลดความชื้นในถังที่อุณหภูมิ 2°C 15% เพื่อลดอุณหภูมิและลดจนได้ความชื้น 12.5% w.b. การศึกษานี้ใช้ข้าวเปลือก 2 พันธุ์คือ Bengal และ Cypress ที่มีความชื้นเริ่มต้น 17-21% w.b. ผลการทดลองแสดงว่าการ tempering ที่ 60°C หลังการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 60°C (สูงกว่า T_g) สามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นและลดจำนวนเมล็ดที่เกิทรอยร้าวได้ ขณะที่การอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 40°C (ต่ำกว่า T_g) การ tempering ที่ 40°C ไม่มีความจำเป็นเนื่องจากปริมาณข้าวต้นที่ได้เปลี่ยนแปลงน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลา tempering ที่ต้องการเพื่อป้องกันการเกิทรอยร้าวยาวนานกว่าเพื่อรักษาปริมาณข้าวต้น

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

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

บทที่ 4

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

ในบทนี้อธิบายถึงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงที่ใช้ในงานวิจัย โดยจะอธิบายถึง : องค์ประกอบและหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

4.1 องค์ประกอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

รายละเอียดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

4.1.1 เครื่องเป่าลม (blower) ของ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ขนาด 2.2 kW ความเร็วรอบมอเตอร์สูงสุด 2850 rpm ทำความดันสถิตสูงสุด 20 kPa ติดตั้งควบคู่กับระบบควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อควบคุมความเร็วอากาศอบแห้งให้คงที่ ด้วยการวัดอัตราการไหลอากาศอบแห้งผ่านความดันอากาศตกคร่อม orifice plate ด้วย pressure transmitter ของ Kimo รุ่น CP103-PO ช่วงการวัด 0-50 kPa และส่งสัญญาณแรงดันแบบ 0-10V ป้อนกลับไปยัง inverter ของ Frecon รุ่น F003b-4 ขนาด 2.2 kW เพื่อให้ inverter เปรียบเทียบค่าสัญญาณป้อนกลับกับค่า set point และทำการปรับแรงดันและความถี่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องเป่าลมด้วยชุดควบคุมแบบ PID ระบบดังกล่าวสามารถทำความเร็วอากาศ ณ ตำแหน่งท่อลมเข้าได้สูงสุดประมาณ 25 m/s รูปอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 4.3-4.5

4.1.2 ตำแหน่งทางเข้าอากาศอบแห้งมีชุด orifice plate ซึ่งได้สร้างขึ้นโดยผู้วิจัย ออกแบบตามมาตรฐาน ISO 5167 เป็นแบบ concentric orifice plate (square edge) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice plate 2 cm จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างแบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps) เป็นระยะ 4.4 และ 2.2 cm ตามลำดับ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข) แสดงดังรูปที่ 4.6

4.1.3 เครื่องทำความร้อน (heater) ใช้ชุดลดความร้อนขนาด 4.0 kW แสดงดังรูปที่ 4.7 ติดตั้งควบคู่กับ PID Temperature controller ของ Linking รุ่น LT400 เพื่อควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดลดความร้อน และวัดค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งในท่อลมเข้าด้วย Thermocouple type K ที่ตำแหน่งก่อนเข้าสู่ถังพัก 1.0 cm แสดงดังรูปที่ 4.8 รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข

4.1.4 ท่อลมเป่า (draft tube) เป็นท่อเหล็กหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.65 cm ยาว 4.0 m วางตัวในแนวตั้ง ปลายด้านล่างยกสูงจากปากกรวยของถังพักเป็นระยะ 4-6 cm เรียกความ

สูงนี้ว่าระยะยกท่อลมเป่า (entrance height) ปลายด้านบนท่อลมเป่ามีแผ่นสะท้อนแบบโค้งคว่ำติดตั้งอยู่สูงขึ้นไปประมาณ 20 cm เพื่อสะท้อนให้อากาศและข้าวเปลือกเปลี่ยนทิศทางการไหลลงสู่ช่องว่างระหว่างท่อครอบและท่อลมเป่า

4.1.5 ท่อครอบ (cover tube) เป็นท่อแก้วทนความร้อนหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12.4 cm ยาว 3.0 m วางตัวในแนวตั้งโดยใช้จุดศูนย์กลางร่วมกับท่อลมเป่าและยึดติดกับแผ่นสะท้อนที่ปลายท่อลมเป่า และติดตั้งฉนวนใยแก้วความหนา 3 นิ้ว ตลอดความยาวท่อครอบ

4.1.6 ตะแกรงหน่วงข้าว (wire mesh) เป็นตะแกรงลักษณะกลมที่สร้างจากลวดสแตนเลสกลมนำมาดัดเป็นวงกลม 3 ชั้นแต่ละชั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6.5 9.4 และ 12.4 cm โดยมีเส้นลวดสแตนเลสกลมแบ่งระยะตามแนวเส้นรอบวงเป็น 16 ส่วนเท่า ๆ กัน ทำให้เกิดช่องว่างที่มีความสมมาตรและส่วนที่แคบที่สุดมีขนาดมากกว่า 1.0 cm เพื่อป้องกันการกองตัวเป็นชั้นหนาของข้าวเปลือกในท่อครอบ แสดงดังรูปที่ 4.9-4.10

4.1.7 ถังพักข้าวเปลือก ประกอบด้วยส่วนที่เป็นถังเหล็กหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 32.0 cm ยาว 0.77 m ที่ปลายด้านล่างต่อกับส่วนที่เป็นรูปกรวยหงายปลายเปิด กรวยทำมุมเอียง 60 องศากับแนวตั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฐานกรวย 32.0 cm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายกรวย 4.33 cm ความสูงตรงของกรวยเท่ากับ 23.0 cm มีช่องเปิดปิดสำหรับนำข้าวเปลือกออกที่ผนังกรวยด้านข้าง แสดงดังรูปที่ 4.11 และติดตั้งฉนวนใยแก้วความหนา 2 นิ้ว รอบถังพักข้าวส่วนท่อกลม

4.1.8 ชุดวัดอัตราการไหลข้าวเปลือก ติดตั้งที่ปลายทางออกท่อครอบ ประกอบด้วยกล่องเหล็กสี่เหลี่ยมขนาด 20x20x15 cm โดยขอบด้านล่างกล่องถูกตัดเป็นบานพับเพื่อกั้นข้าวเปลือกขณะวัดอัตราการไหลและเปิดออกเพื่อระบายข้าวเปลือก โดยใช้ลูกสูบนิวเมติกส์ของ SMC รุ่น CM2 เป็นตัวขับเคลื่อนบานพับให้ปิดและเปิด ถังวัดอัตราการไหลแขวนอยู่บน load cell ของ Jihense รุ่น S-5 เพื่อวัดน้ำหนักข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นขณะวัดอัตราการไหลและส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์รับส่งสัญญาณแอนะล็อกและดิจิทัลของ National Instrument รุ่น NI USB 6008 เพื่อเก็บข้อมูลส่งไปยังโปรแกรม LabVIEW เพื่อคำนวณและแสดงผลอัตราการไหล และส่งสัญญาณควบคุมการปิดและเปิดของบานพับถึง ด้วยการจ่ายสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-5V ให้กับรีเลย์ขยายสัญญาณและส่งสัญญาณต่อให้กับโซลินอยด์วาล์วเพื่อสั่งให้ลูกสูบนิวเมติกส์ทำงาน แสดงดังรูปที่ 4.12-4.17

4.1.9 เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger) ของ Hioki รุ่น 8420-01 แสดงดังรูปที่ 4.18 ใช้สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งที่ปลายท่อลมเป่าและทางออกลมร้อน อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังพักที่ระยะความสูง 25 35 และ 45 cm จากก้นถังพัก ตลอดกระบวนการอบแห้งทุก ๆ 5 s

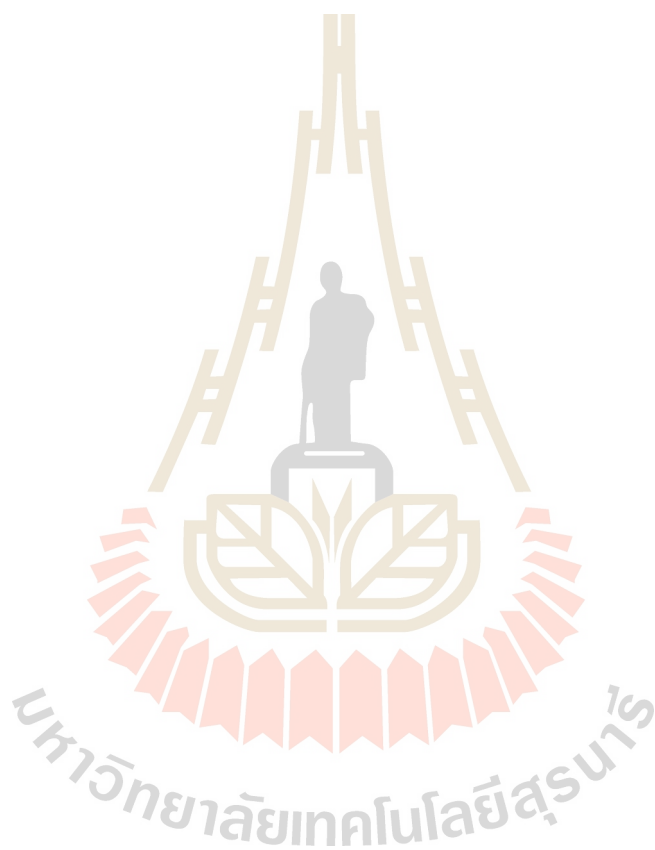
4.1.10 อุปกรณ์วัดอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์สูง ของ Vaisala รุ่น HMT335 ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-180°C ช่วงการวัดความชื้นสัมพัทธ์ 0-100%RH สำหรับการวัดอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ปลายท่อลมเป่าและท่อครอบ แสดงดังรูปที่ 4.19

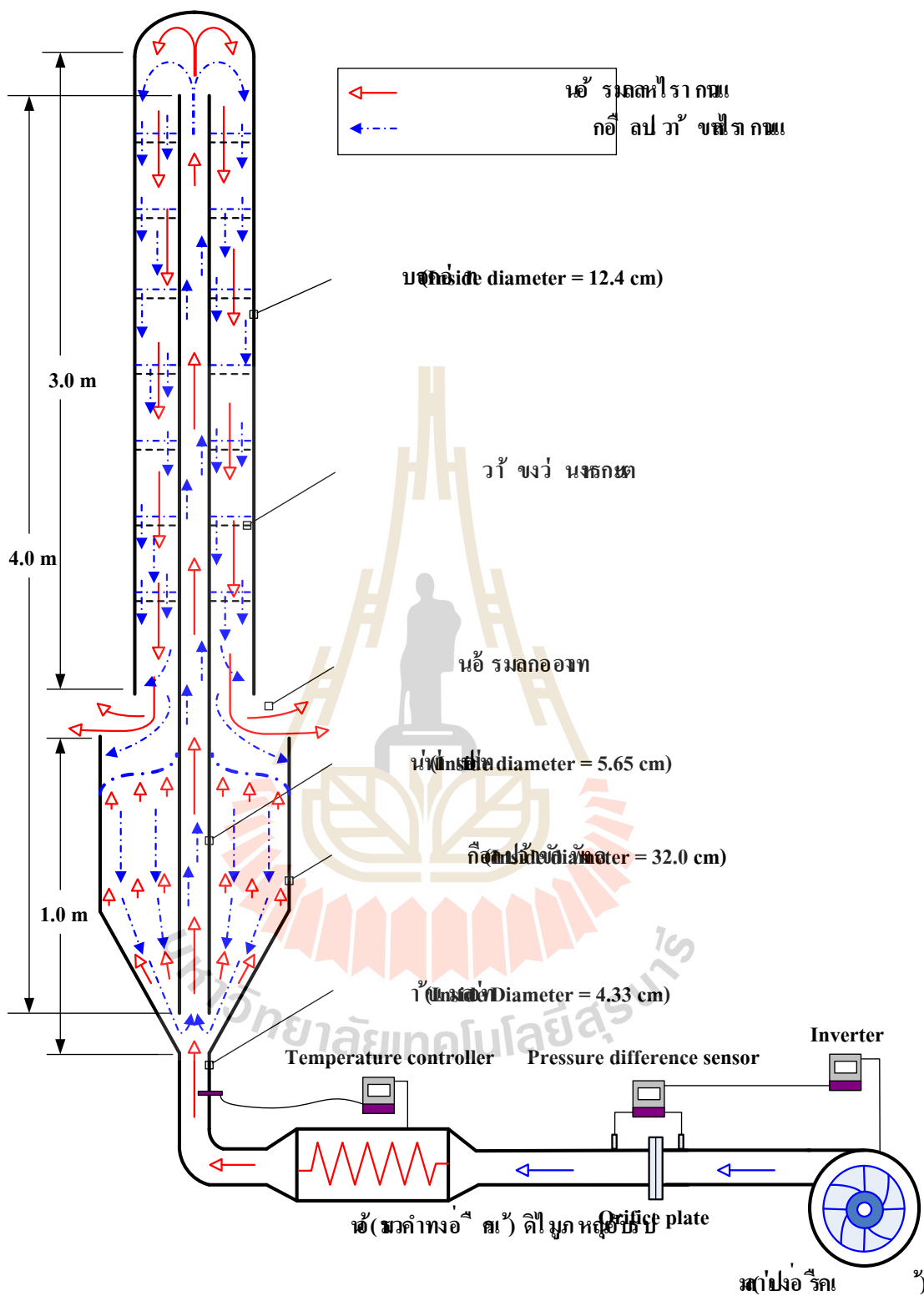
4.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

กองข้าวเปลือกขึ้นถูกลำเลียงเข้าสู่ถังพัก จากนั้นเครื่องเป่าลมที่ควบคุมความเร็วด้วยการปรับแรงดันและความถี่ของกระแสไฟฟ้าด้วย inverter ดูดอากาศจากสิ่งแวดล้อมผ่านชุด orifice plate แล้วเข้าสู่เครื่องทำความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนของ PID temperature controller จากนั้นอากาศอบแห้งซึ่งมีความเร็วสูงเคลื่อนตัวเข้าสู่ปลายนวด้านล่างถังพัก แล้วผลักข้าวเปลือกในถังพักเข้าสู่ปลายนวด้านล่างของท่อลมเป่าที่วางตัวในแนวตั้ง ในท่อลมเป่าอากาศอบแห้งความเร็วสูงและข้าวเปลือกขึ้นเคลื่อนที่ขึ้นในทิศทางเดียวกัน (concurrent flow) เข้าสู่ปลายนวด้านล่างอย่างรวดเร็ว ที่ปลายท่อลมเป่าข้าวเปลือกขึ้นและอากาศอบแห้งถูกบังคับให้เคลื่อนที่ตกลงมาในทิศทางเดียวกัน (concurrent flow) ในท่อครอบ (ช่องว่างระหว่างท่อครอบกับท่อลมเป่า) ด้วยแผ่นสะท้อนแบบโค้งคว่ำที่ติดตั้งเหนือปลายนวด้านล่าง ในท่อครอบอากาศอบแห้งมีความเร็วลดลงเพราะพื้นที่หน้าตัดท่อครอบมากกว่าท่อลมเป่า และข้าวเปลือกขึ้นตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงผลักของอากาศอบแห้งที่มีความเร็วต่ำลง นอกจากนี้ข้าวเปลือกขึ้นถูกชะลอการตกด้วยตะแกรงหน่วงข้าวที่ติดตั้งเป็นชั้น ๆ ภายในท่อครอบ เพื่อลดความเร็วการตกของข้าวเปลือกขึ้น โดยไม่ทำให้ข้าวเปลือกขึ้นกองตัวเป็นชั้นหนา ที่ปลายนวด้านล่างท่อครอบข้าวเปลือกขึ้นจะตกลงสู่ถังพัก ขณะที่อากาศอบแห้งไหลแยกออกสู่สิ่งแวดล้อม ในถังพักข้าวเปลือกขึ้นเคลื่อนที่สู่ด้านล่างถังพักอย่างช้า ๆ ส่วนทางกับอากาศอบแห้งความเร็วต่ำที่ไหลรั่วออกจากปลายนวด้านล่าง ทำให้เกิดควรรไหลแบบสวนทางในถังพัก (counter flow) ระหว่างข้าวเปลือกขึ้นและอากาศอบแห้ง เมื่อข้าวเปลือกขึ้นเคลื่อนที่สู่ด้านล่างถังพักจะถูกผลักให้เคลื่อนที่เข้าสู่ท่อลมเป่าอีกครั้งที่ได้อธิบายข้างต้น ทำให้เกิดการอบแห้งแบบเป็นวัฏจักร จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นตามที่ต้องการ

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง ออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นโดยทั่วไป ด้วยการ 1. ใช้ท่อลมเป่าที่มีความยาวมากกว่าเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นโดยทั่วไป 2. การบังคับให้อากาศอบแห้งและข้าวเปลือกขึ้นไหลตกลงมาพร้อมกันในส่วนท่อครอบ และ 3. การติดตั้งตะแกรงหน่วงข้าวในท่อครอบเพื่อชะลอความเร็วการตกของข้าวเปลือกเป็นชั้น ๆ เทคนิคดังกล่าวช่วยเพิ่มระยะเวลาแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลระหว่างข้าวเปลือกขึ้นและอากาศอบแห้ง และเป็นการใช้ศักยภาพอากาศอบแห้งอย่างเต็มที่ ทำให้ลดความชื้นข้าวเปลือกได้รวดเร็วขึ้น (ลดจำนวนรอบอบแห้ง) และประหยัดพลังงาน ลักษณะเฉพาะ

ของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นที่การอบแห้งมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ในส่วนท่อลมเป่าและท่อครอบ เป็นการอบแห้งอย่างรวดเร็วและใช้ระยะเวลาสั้น (เกิดความเค้นสะสมน้อย) ในถึงพักเป็นการอบแห้งอย่างช้า ๆ และใช้ระยะเวลานาน (เกิดการคลายความเค้นสะสม) ซึ่งช่วยให้คุณภาพข้าวเปลือกทั้งความขาว และปริมาณข้าวตันมีค่าสูง

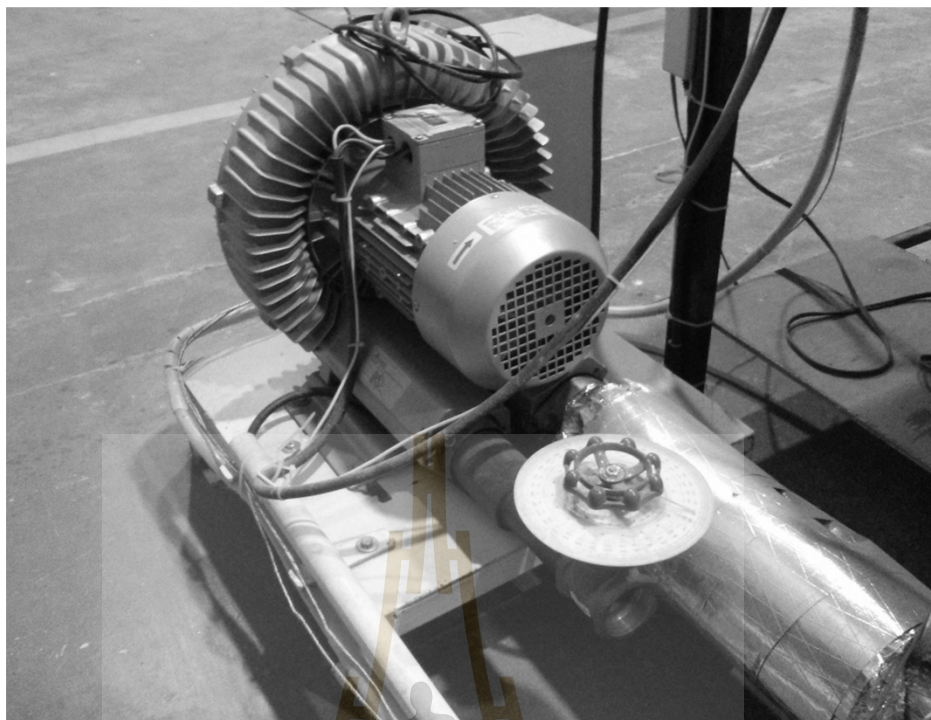




รูปที่ 4.1 แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกแบบเป่าพัน-หล่นหน่วงที่ใช้ในงานวิจัย



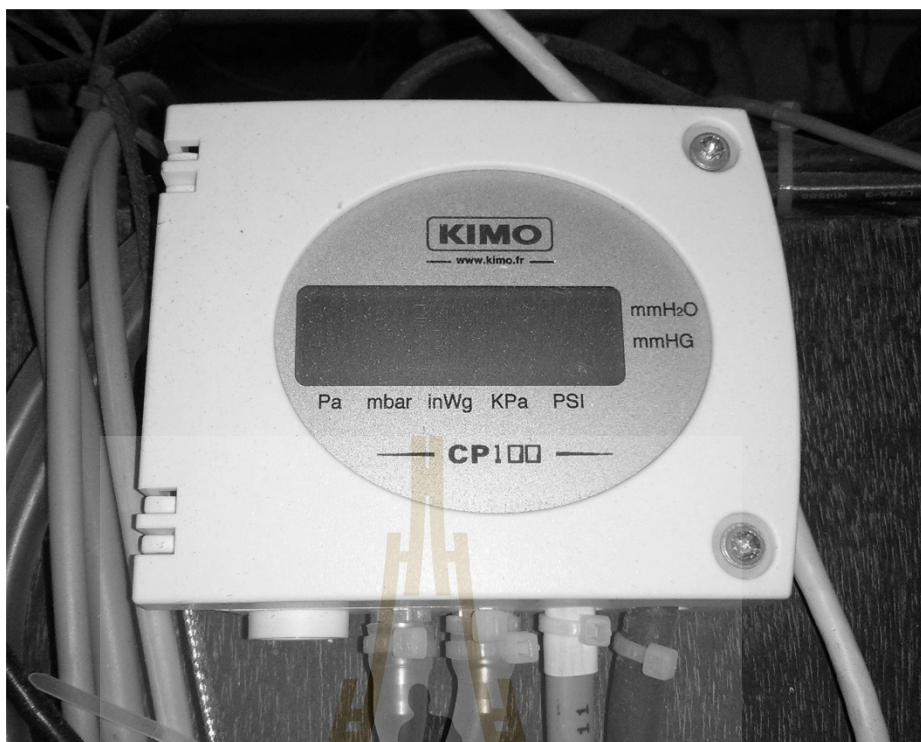
รูปที่ 4.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.3 เครื่องเป่าลม (blower) ของ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ขนาด 2.2 kW



รูปที่ 4.4 Inverter ของ Frecon รุ่น F003b-4 ขนาด 2.2 kW



รูปที่ 4.5 Pressure transmitter ของ Kimo รุ่น CP103-PO ช่วงการวัด 0-50 kPa



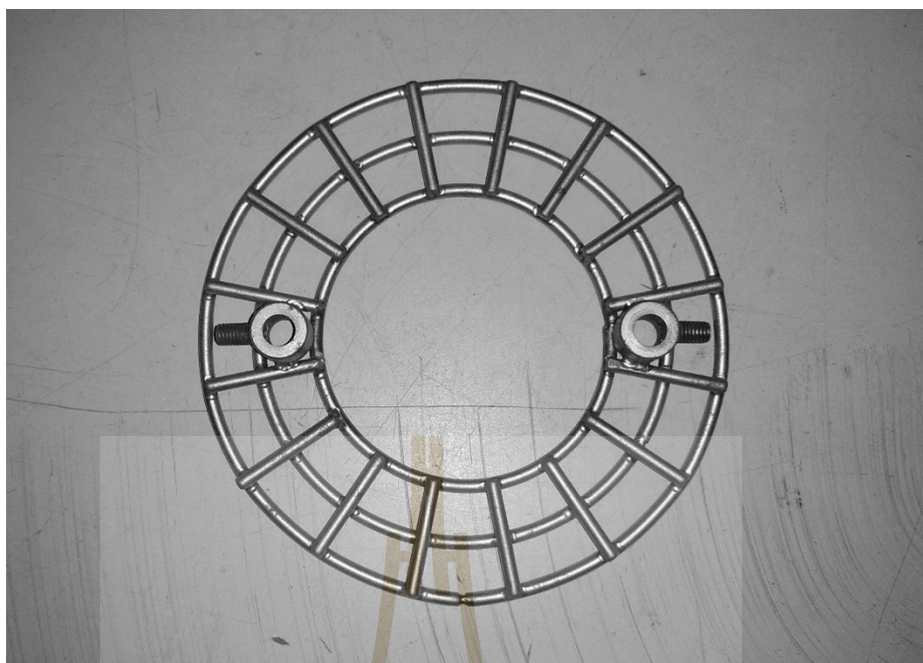
รูปที่ 4.6 Orifice plate ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.7 ขดลวดความร้อน ขนาด 4.0 kW ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.8 PID Temperature controller ของ Linking รุ่น LT400



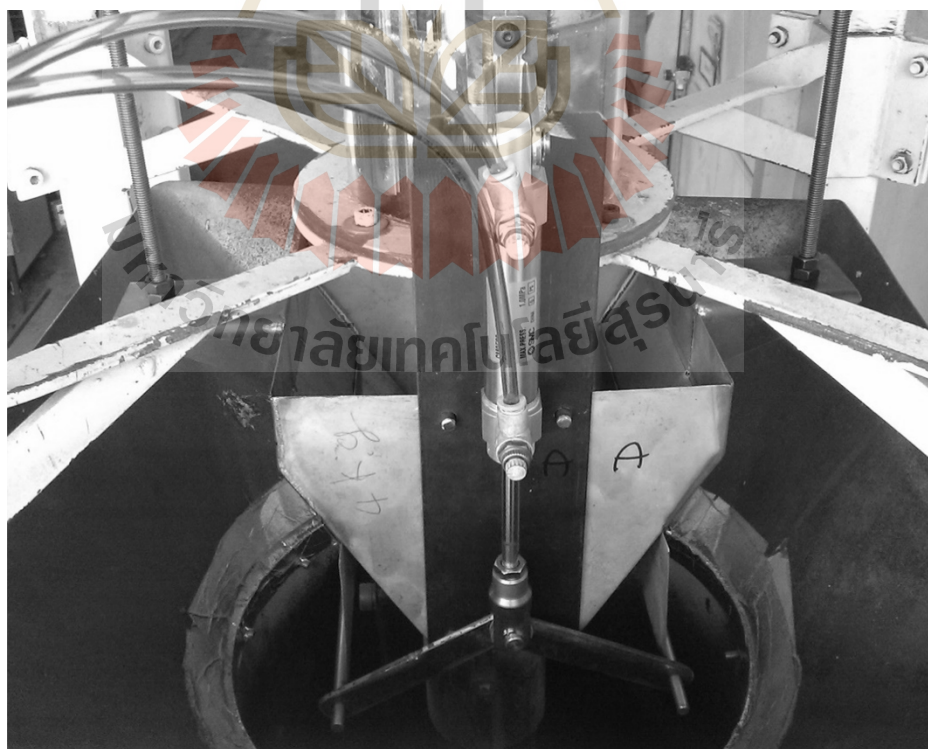
รูปที่ 4.9 ตะแกรงหน่วงข้าว (wire mesh) ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.10 การติดตั้งตะแกรงหน่วงข้าว



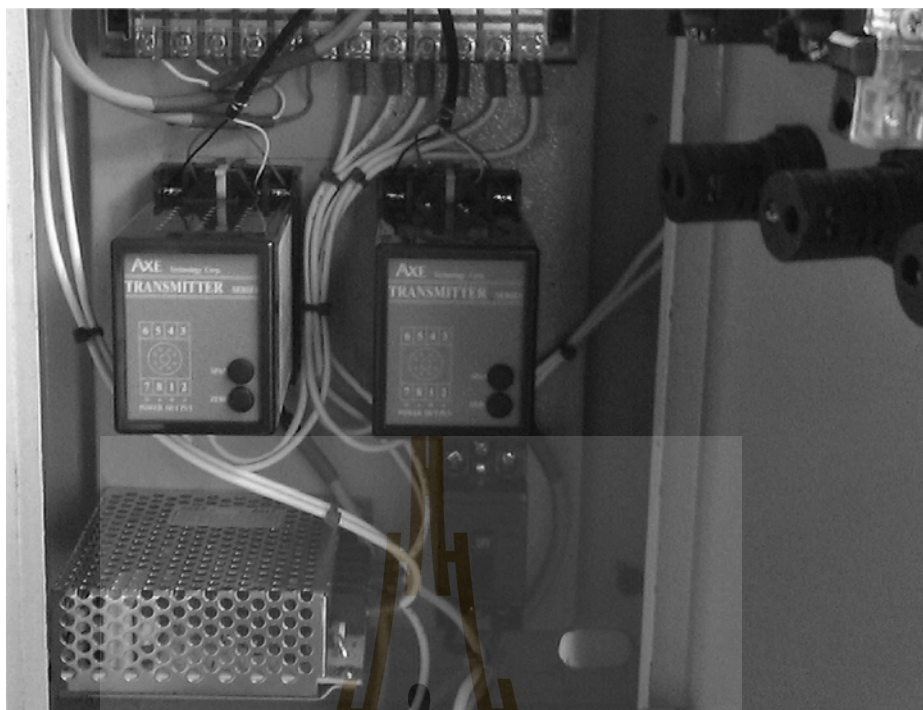
รูปที่ 4.11 ถังพักข้าวเปลือก ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.12 ถังวัดอัตราการไหลข้าว



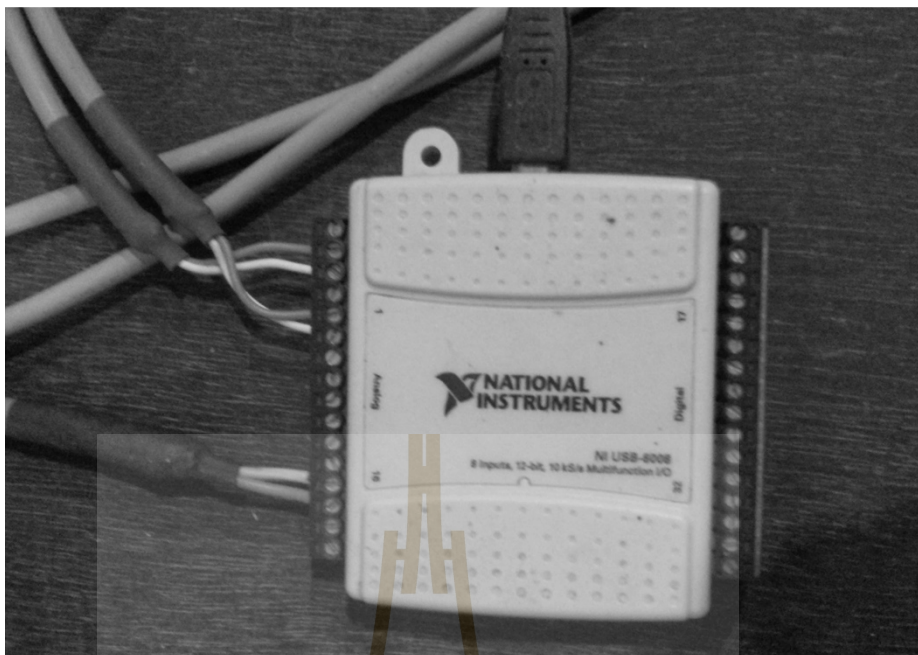
รูปที่ 4.13 การติดตั้งถังวัดอัตราการไหล และ load cell



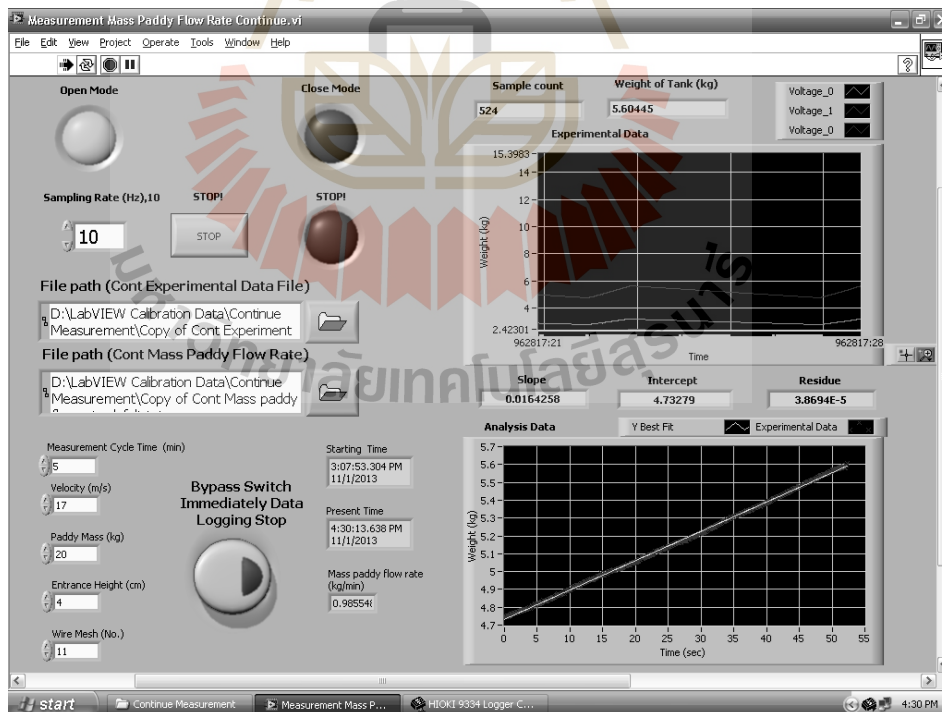
รูปที่ 4.14 ชุดควบคุม load cell



รูปที่ 4.15 โซลินอยด์วาล์วควบคุมการเปิดปิดถังวัดอัตราการไหลข้าว



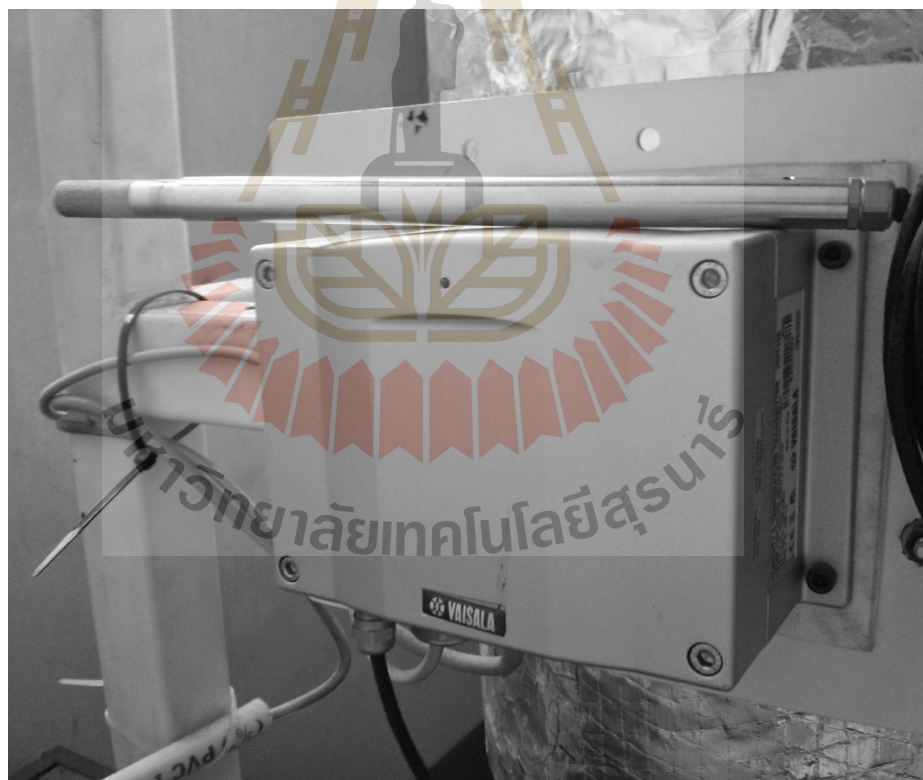
รูปที่ 4.16 เครื่องรับและส่งสัญญาณแอนะล็อกและดิจิทัลของ NI รุ่น USB 6008



รูปที่ 4.17 โปรแกรม LabVIEW เพื่อวัดอัตราการไหลข้าวและความคุมถึงวัดอัตราการไหลข้าว



รูปที่ 4.18 เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger) ของ Hioki รุ่น 8420-01



รูปที่ 4.19 อุปกรณ์วัดอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์สูง ของ Vaisala รุ่น HMT335

บทที่ 5

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้อธิบายวิธีดำเนินการวิจัย โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือการศึกษาด้วยการทดลองอบแห้ง และการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในส่วนการศึกษาด้วยการทดลองอบแห้ง แบ่งวิธีดำเนินการวิจัยเป็นหัวข้อดังนี้ ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น การออกแบบการทดลองอบแห้ง ข้าวเปลือก ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก ขั้นตอนการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว ขั้นตอนการหาอัตราอบแห้ง ขั้นตอนการหาอัตราสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฏุมภูมิจำเพาะและพลังงานรวมจำเพาะ ในส่วนการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบ่งวิธีดำเนินการเป็นหัวข้อได้แก่ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนศึกษาลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และขั้นตอนการพัฒนากระบวนการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

5.1 ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น

งานวิจัยนี้ใช้ข้าวพันธุ์ ชัยนาท1 และข้าวพันธุ์ กข105 (ข้าวขาวดอกมะลิ) ที่เพาะปลูกในบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ทำการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวหวด ในเดือนพฤษภาคม 2555 และเดือนธันวาคม 2555 ตามลำดับ โดยนำข้าวเปลือกขึ้นที่ได้ไปคัดแยกเมล็ดเต็มออกจากเศษฟางและเมล็ดลีบด้วยเครื่องคัดแยก บรรจุข้าวเปลือกเมล็ดเต็มที่ได้ในถุงพลาสติกปิดสนิท ถุงละ 20 kg และจัดเก็บในห้องแช่เย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 5°C (ชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อราและรักษาคุณภาพข้าวเปลือก) ก่อนการทดลอง นำถุงข้าวเปลือกออกจากห้องแช่เย็นและพักในสภาพอากาศแวดล้อมประมาณ 12 h เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อมอย่างช้า ๆ โดยข้าวเปลือกที่เตรียมได้มีน้ำหนัก 20 kg และมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b.

5.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก

งานวิจัยนี้แบ่งปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งเป็น 2 กลุ่ม คือปัจจัยหลักได้แก่ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความเร็วอากาศที่อลมเข้า ระยะยกที่อลมเป่า และปัจจัยรอง ได้แก่ มวลข้าวเปลือก จำนวนตะแกรง พันธุ์ข้าวเปลือก จากผลการทดสอบช่วงการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

ดั่งเสนอในภาคผนวก ข. ทำให้ได้ช่วงทดสอบดังนี้ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C ความเร็วอากาศในท่อลมเข้า 17(17.00) 20(19.96) และ 23(23.01) m/s ระยะยกท่อลมเป่า 4 5 และ 6 cm มวลข้าวเปลือก 10 20 และ 30 kg จำนวนตะแกรง 0 6 และ 11 ชั้น พันธุ์ข้าวเปลือก ชัยนาท1 และ กข105

การทดสอบปัจจัยหลักที่มีผลต่อการอบแห้ง กำหนดให้ปรับเปลี่ยน อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C ความเร็วอากาศในท่อลมเข้า 17 20 และ 23 m/s ระยะยกท่อลมเป่า 4 5 และ 6 cm และกำหนดให้ปัจจัยรองมีค่าคงที่คือ มวลข้าวเปลือก 20 kg จำนวนตะแกรง 11 ชั้น และพันธุ์ข้าวเปลือกชัยนาท1

การทดสอบปัจจัยรองที่มีผลต่อการอบแห้ง ใช้ชุดเงื่อนไขการอบแห้งจากผลการทดสอบปัจจัยหลัก ใน 3 กรณีคือ 1. ชุดเงื่อนไขที่ให้อัตราการอบแห้งสูง 2. ชุดเงื่อนไขที่ใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำ และ 3. ชุดเงื่อนไขที่มีปริมาณข้าวต้นสูง เป็นชุดเงื่อนไขตั้งต้น ทำการทดสอบผลของปัจจัยรองที่มีต่อการอบแห้งของชุดเงื่อนไขทั้ง 3 กรณี โดยทดสอบแยกแต่ละปัจจัยดังนี้

1. การทดสอบผลของมวลข้าวเปลือก กำหนดให้ปรับเปลี่ยนมวลข้าวเปลือก 10 20 และ 30 kg โดยกำหนดจำนวนตะแกรง 11 ชั้น และใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1
2. การทดสอบผลของจำนวนตะแกรง กำหนดให้ปรับเปลี่ยนจำนวนตะแกรง 0 6 และ 11 ชั้น โดยกำหนดมวลข้าวเปลือก 20 kg และใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1
3. การทดสอบผลของพันธุ์ข้าว กำหนดให้ปรับเปลี่ยนพันธุ์ข้าวชัยนาท1 และ กข105 โดยกำหนดมวลข้าวเปลือก 20 kg และจำนวนชั้นตะแกรง 11 ชั้น

ระยะติดตั้งตะแกรงหน้าข้าว สำหรับกรณีตะแกรงหน้าข้าว 11 ชั้น ติดตั้งที่ระยะ 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.7 1.9 2.1 2.3 2.5 และ 2.7 m สำหรับกรณีตะแกรงหน้าข้าว 6 ชั้น ติดตั้งที่ระยะ 0.4 0.8 1.2 1.9 2.3 และ 2.7 m วัดจากปลายท่อครอบด้านบนถึงปลายด้านล่าง

5.3 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน้าวง ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก ประกอบด้วย

- 5.3.1 ติดตั้งตะแกรงหน้าข้าวในท่อครอบ ตามจำนวนชั้นที่กำหนด
- 5.3.2 ตั้งระยะท่อลมเป่าตามระยะที่กำหนด
- 5.3.3 ตั้งค่า inverter set point เพื่อให้มีค่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อลมเข้า ตามค่าที่กำหนด

แล้วเปิดเครื่องเป่าลม

- 5.3.4 เปิดเครื่องทำความร้อน แล้วปรับเครื่องควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าตามที่กำหนด
- 5.3.5 เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ โปรแกรม LabVIEW และเครื่องเก็บบันทึกข้อมูล

- 5.3.6 เปิดระบบควบคุมและชั่งน้ำหนักถังวัดอัตราการไหลข้าวเปลือก
- 5.3.7 จับเวลาทำการอบอุ่นเครื่องอบแห้ง 1 h เพื่อลดการสูญเสียความร้อนให้กับผนังเครื่องอบแห้ง ขณะเริ่มทำการอบแห้งข้าวเปลือก
- 5.3.8 เปิดเตาอบและตั้งค่าอุณหภูมิในเตาอบ 35°C
- 5.3.9 เก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อการวัดค่าความชื้น 15 g ลงในถุงพลาสติกปิดสนิท
- 5.3.10 เก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อการวัดคุณภาพข้าว 100 g ลงในถาด แล้วนำไปอบในเตาอบ
- 5.3.11 เมื่อครบระยะเวลาอบอุ่นเครื่องอบแห้ง จึงทำการปิดเครื่องทำความร้อนและเครื่องเป่าลม
- 5.3.12 ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในถังพักข้าวเปลือกที่ตำแหน่งสูงกว่าพื้นถังพักเท่ากับ 25 35 และ 45 cm เพื่อวัดอุณหภูมิข้าวเปลือกในถังพัก
- 5.3.13 เทข้าวเปลือกขึ้นจากถุงพลาสติกตามมวลที่กำหนด ในถังพักข้าวเปลือก
- 5.3.14 เปิดเครื่องเป่าลมและเครื่องทำความร้อนพร้อมกับเริ่มจับเวลาการอบแห้ง
- 5.3.15 ทำการอบแห้งจนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้น 14% w.b. จึงหยุดการทดลอง
- 5.3.16 ในขณะที่อบแห้งจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกทุก ๆ 10 min จำนวนตัวอย่างละ 15 g ในถุงพลาสติกปิดสนิท เพื่อการวัดค่าความชื้น
- 5.3.17 ในขณะที่อบแห้งจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก ที่มีความชื้นประมาณ 22 20 18 16 และ 14% w.b. จำนวนตัวอย่างละ 100 g ลงในถาดแล้วนำไปอบต่อในเตาอบ เพื่อการวัดคุณภาพข้าว
- 5.3.18 หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อนำไปทดสอบคุณภาพข้าวจำนวน 1 kg ในถุงพลาสติกปิดสนิท
- 5.3.19 เมื่อตัวอย่างข้าวเปลือกในเตาอบมีความชื้นต่ำกว่า 14% w.b. จึงเก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกปิดสนิท
- 5.3.20 นำตัวอย่างที่เก็บได้พักในอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 48 h เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกลดลง คลายความเครียดที่ผิวและเกิดการกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอตลอดเมล็ดข้าว
- 5.3.21 นำข้าวเปลือกไปวัดความชื้น และทดสอบคุณภาพข้าว รวมทั้งหาอัตราอบแห้ง อัตราสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะและพลังงานรวมจำเพาะต่อไป

5.4 ขั้นตอนการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก

ในการหาค่าความชื้นข้าวเปลือกสามารถทำได้หลากหลายวิธีทั้งวิธีตรงและวิธีอ้อม สำหรับข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าผ่าน-หล่นหน่วงจากการทดลองนี้จะใช้วิธีการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก 2 วิธีด้วยกันคือ เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความดันทาน

Grain moisture tester riceter m401 เป็นการวัดค่าความชื้นวิธีอ้อม โดยเป็นเครื่องที่สะดวก ใช้เวลาน้อย และเหมาะสำหรับการหาความชื้นของตัวอย่างที่มีจำนวนน้อย ในกรณีที่ตัวอย่างมีจำนวนมากจะใช้การหาค่าความชื้นโดยวิธีการใช้ตู้อบซึ่งเป็นการวัดค่าความชื้นวิธีตรง ซึ่งมีความถูกต้อง และสามารถใช้อ้างอิงได้ ในการทดลองนี้ใช้ตู้อบของ MCP HEK GmbH โดยนำข้าวเปลือกตัวอย่างเต็มเมล็ดไปไว้ในตู้อบอุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 h (AACC, 1995) ซึ่งแต่ละวิธีมีขั้นตอนดังนี้

5.4.1 เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน Grain moisture tester riceter m401 มีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

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

5.4.2 การหาค่าความชื้นโดยวิธีการใช้ตู้อบ มีขั้นตอนดังนี้

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

5.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว

ในการวิเคราะห์คุณภาพข้าวจะต้องนำข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการอบแห้งไปขัดสี สำหรับการทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกตัวอย่างที่จะทำการขัดสีปริมาณ 100 g โดยมีขั้นตอนคือ การทำความสะอาด การกะเทาะเปลือก การขัดขาว และการคัดแยก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.5.1 การทำความสะอาด

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

5.5.2 การกะเทาะเปลือก

เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก (rice huller) ที่ใช้เป็นของบริษัท มินเซนแมชชีนเนอร์ จำกัด รุ่น MS33BM มีความจุประมาณ 20 kg/h โดยประกอบด้วยลูกกลิ้งโลหะหุ้มด้วยยาง 2 ลูกหมุนเข้าหากันด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันเพื่อให้เกิดแรงดึงแยกส่วนเปลือกออกจากเมล็ดด้านใน ซึ่งเมื่อผ่านการกะเทาะเปลือกจะได้ข้าวกล้อง และแกลบ ข้อควรระวังสำหรับการใช้เครื่องกะเทาะเปลือกคือ การตั้งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง ถ้าตั้งระยะชิดเกินไปจะทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกหักจำนวนมาก เนื่องจากการบดทับของลูกกลิ้ง หากตั้งระยะห่างเกินไปจะทำให้ปริมาณข้าวกล้องที่ได้น้อยเนื่องจากเปลือกหลุดออกจากเมล็ดน้อย สำหรับการทดลองนี้ตั้งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งไว้ที่ประมาณ 1 mm โดยทำการทดสอบก่อนที่จะทดลองจริง และให้ปริมาณข้าวกล้องสูง

5.5.3 การขัดขาว

เครื่องขัดขาว (rice miller) ที่ใช้เป็นของห้างหุ้นส่วนจำกัด เจริญช่าง มีความจุประมาณ 100 g ข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะเปลือกจะนำมาขัดขาวซึ่งจะทำการขัดสีเอารำออก และได้ข้าวขาวกับรำออกมา หลักการทำงานของเครื่องขัดขาวจะประกอบด้วยแกนเหล็กขัดขาวที่มีใบมีดติดอยู่ และวางตัวในแนวระดับ ด้านล่างของแกนมีตะแกรงขัดขาวที่มีรูลักษณะเป็นรูปวงรี เพื่อให้เมล็ดข้าวอยู่ในรู และใบมีดที่ติดกับแกนเหล็กทำการขัดเอารำออก โดยใช้เวลาขัดขาว 30 วินาทีต่อรอบ

5.5.4 การคัดแยกปลายข้าว

เครื่องคัดแยกปลายข้าว (cylinder separator) ที่ใช้เป็นของ Westrup รุ่น LA-H มีความจุประมาณ 200 kg/h เครื่องคัดแยกปลายข้าวจะเป็นลักษณะทรงกระบอกกลวง โดยที่ผิวด้านในของทรงกระบอกจะเป็นหลุมรูปทรงกระบอกกระจายเต็มพื้นผิว เมื่อทำการหมุน และใส่ข้าวที่ผ่านการขัดขาวลงไป ข้าวเต็มเมล็ดที่มีน้ำหนักมากกว่าจะเคลื่อนตัวไปอยู่ภายในหลุมบริเวณด้านข้างของ

ทรงกระบอก ส่วนปลายข้าวที่มีน้ำหนักเบากว่าจะเคลื่อนตัวออกมาทางช่องทางออก จะทำให้สามารถแยกข้าวคั้น และปลายข้าวจากกันได้

5.5.5 การวิเคราะห์คุณภาพข้าว

เมื่อผ่านกระบวนการคัดแยกปลายข้าวเรียบร้อยแล้วจะนำข้าวขาวมาพิจารณาคุณภาพข้าวใน 2 กรณีคือ

- ปริมาณข้าวคั้น สามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักข้าวคั้น และปลายข้าวที่ได้จากการขัดสีของทุกกรณีแล้วหาเป็นค่าร้อยละเพื่อนำไปวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ตามภาคผนวก ก.4
- ความขาวของข้าว จะนำข้าวคั้นประมาณ 20 g มาทำการวัดสีด้วยเครื่องวัดสีของ Hunter Lab รุ่น Color Quest XE โดยในกรณีศึกษาที่ใช้มาตรฐานสี $L^*a^*b^*$ ซึ่งความขาวแทนด้วยค่า $+L^*$ และความดำแสดงด้วยค่า $-L^*$ ค่าสูงสุดจะมีค่า 100 ทั้งด้านบวก และด้านลบ ค่า $+a^*$ แทนค่าสีแดง ส่วน $-a^*$ แทนค่าสีเขียว และ $+b^*$ แทนค่าสีเหลือง ส่วน $-b^*$ แทนค่าสีน้ำเงิน ซึ่งค่า a^* และ b^* มีค่าสูงสุด 60 ทั้งด้านบวก และด้านลบ โดยวิเคราะห์ความขาวของข้าวสารด้วยค่าดัชนีความขาว (whiteness index, WI) และความเหลืองของข้าวสารด้วยค่าดัชนีความเหลือง (yellowness index, YI) ตามมาตรฐานของ ASTM E313-96 ซึ่งได้แสดงสมการการคำนวณตามภาคผนวก ก.4

5.6 ขั้นตอนการหาอัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งเฉลี่ยคือ มวลความชื้นทั้งหมดที่ระเหยจากกองข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งต่อด้วยระยะเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในเครื่องอบแห้ง เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความรวดเร็วของกระบวนการอบแห้ง ดังสมการด้านล่าง ซึ่งสามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก.1

$$\bar{R}_v = \left(\frac{w_i}{\Delta t_T} \right) \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \quad (5.1)$$

5.7 ขั้นตอนการหาพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ

พลังงานปฐมภูมิจำเพาะหมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้งตลอดระยะเวลาการอบแห้งกับปริมาณน้ำที่ระเหยจากกองข้าวเปลือกในการอบแห้ง เป็นค่าที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากสามารถใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังสมการด้านล่าง ซึ่งสามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก.2

$$E_p = \frac{\rho_a AV \overline{[(1 - W_a)C_a + C_v W_a]}(T_{out} - T_{in})\Delta t_T}{\left(w_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \right)} \quad (5.2)$$

5.8 ขั้นตอนการหาค่าพลังงานรวมจำเพาะ

ค่าพลังงานรวมจำเพาะเป็นผลรวมระหว่างพลังงานปฐมภูมิจำเพาะกับพลังงานทุดิยภูมิจำเพาะ โดยค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะหาได้จากพลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องทำความร้อนของเครื่องอบแห้งตามสมการ (5.2) ขณะที่ค่าพลังงานทุดิยภูมิจำเพาะคือพลังงานขับเคลื่อนเป่าลม ซึ่งในงานวิจัยนี้วิเคราะห์หาค่าพลังงานทุดิยภูมิจำเพาะในรูปกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ขับเคลื่อน สามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก.3

5.9 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

5.10 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ประกอบด้วย

- เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าผ่าน-หล่นหน่วง
- Inverter ของ Frecon รุ่น F003b-4
- เครื่องวัดความเร็ว
- ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของ Vaisala รุ่น HMT335
- Orifice plate และ pressure transmitter ของ Kimo รุ่น CP103-PO
- เครื่องวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ Metrix รุ่น PX 110
- Load cell และ Load cell transmitter ของ Jihsense รุ่น S-5
- เครื่องคอมพิวเตอร์
- เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger) ของ Hioki รุ่น 8420
- อุปกรณ์รับส่งสัญญาณแอนะล็อกและดิจิทัลของ National Instrument รุ่น NIUSB 6008
- นาฬิกาจับเวลา
- เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน Grain moisture tester riceter m401

- ตู้อบความร้อน MCP HEK GmbH
- เครื่องทำความสะอาดด้วยตะแกรง และแรงลม
- เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก (rice huller)
- เครื่องขัดขาว (rice miller)
- เครื่องคัดแยกปลายข้าว (cylinder separator)
- เครื่องวัดสีของ Hunter Lab รุ่น Color Quest XE

5.11 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวพันธุ์ชัยนาท1 และข้าวพันธุ์ กข105 (ข้าวขาวดอกมะลิ105) ที่เพาะปลูกในบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ทำการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวนา ในเดือนพฤษภาคม 2555 และเดือนธันวาคม 2555 ตามลำดับ

5.12 การเก็บรวบรวมข้อมูลการทดลอง

นำเสนอในรูปแบบตารางและรูปภาพ ประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

- แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง อุณหภูมิเฉลี่ยและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอากาศแวดล้อม
- อุณหภูมิและความเร็วของอากาศภายในท่อลมเข้า
- ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลข้าวเปลือกกับระยะยกท่อลมเป่าและความเร็วอากาศ
- สัดส่วนการรั่วไหลของอากาศอบแห้งสู่ถังพัก
- สัดส่วนช่องว่างในท่อครอบ
- ระยะเวลาในการอบแห้ง และอัตราอบแห้งเฉลี่ย
- พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ และพลังงานรวมจำเพาะ
- อุณหภูมิข้าวเปลือก ปริมาณข้าวต้น และดัชนีความขาวและความเหลืองของข้าวสาร

5.13 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองจะถูกรวบรวม และวิเคราะห์ แล้วนำเสนอในรูปของตารางและรูปภาพ ที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอุณหภูมิ ความเร็วอากาศท่อลมเข้า ระยะยกท่อลมเป่า มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น จำนวนชั้นตะแกรงหน่วงข้าว และพันธุ์ข้าวเปลือก ที่มีต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ พลังงานรวมจำเพาะ ปริมาณข้าวต้น ความขาวและความเหลืองของข้าวที่ขัดสี

5.14 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการอุณหภูมิและความชื้นของเมล็ดข้าวและอากาศระหว่างการอบแห้ง โดยใช้แบบจำลองแบบไม่สมดุล (theoretical non-equilibrium model) ซึ่งประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์จากสมดุลมวลและพลังงานในชั้นบางระหว่างเมล็ดและอากาศ จำนวน 3 สมการ สมการการแพร่ความชื้นภายในเมล็ด 1 สมการ และสมการการนำความร้อนภายในเมล็ด 1 สมการ รวมเป็นสมการควบคุมหลักของระบบอบแห้งจำนวน 5 สมการ และใช้สมการอนุพันธ์ที่ได้จากสมดุลแรงของอนุภาคในการทำนายความเร็วเมล็ดในท่อลมเป่าและท่อครอบที่ตกอย่างอิสระและตกกระทบตะแกรงหมุนงข้าว ใช้โปรแกรม MATLAB R2013b ในการจำลองผล ด้วยการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ผลที่ได้จากการจำลอง คือ ความชื้นภายในข้าวเปลือก ความชื้นข้าวเปลือกเฉลี่ย อุณหภูมิภายในข้าวเปลือก อุณหภูมิเฉลี่ยข้าวเปลือก ความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความเร็วข้าวเปลือก

5.15 ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ใช้เงื่อนไขการอบแห้งที่ได้จากการทดลองจริง จำนวน 4 การทดลอง โดยเลือกจากเงื่อนไขอบแห้งที่ครอบคลุมภาพรวมการทดลองที่ได้กระทำ เพื่อใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยพิจารณาความสอดคล้องของ การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง อุณหภูมิข้าวเปลือกเฉลี่ยในถังพัก อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งที่ทางออกท่อลมเป่าและท่อครอบ ระหว่างผลการจำลองและการทดลอง

5.16 ขั้นตอนการศึกษาลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งด้วยแบบจำลอง

เนื่องจากข้อจำกัดในการทดลอง ทำให้ไม่สามารถศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้ครบถ้วนจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทดสอบความถูกต้องแล้ว เป็นเครื่องมือในการจำลองผล จำลองผลด้วยเงื่อนไขการทดลองอบแห้งจำนวน 1 การทดลอง เพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษา โดยปัจจัยที่พิจารณาประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง ความเร็วข้าวเปลือกและลักษณะการเคลื่อนที่ในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งในถังพัก ผลของการใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิสูง และผลของความยาวท่อลมเป่า ที่มีต่ออัตราอบแห้งและการใช้พลังงาน

5.17 ขั้นตอนการพัฒนากระบวนการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ด้วยความมุ่งหวังที่จะหาแนวทางอบแห้งที่สามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และได้ข้าวเปลือกที่มีปริมาณข้าวตังสูง จึงประยุกต์แบบจำลองที่ได้พัฒนา นำมาพิจารณาปัจจัยที่ทำให้เกิดการร้าวภายในเมล็ดระหว่างการอบแห้ง เมื่ออบแห้งด้วยเงื่อนไขอบแห้งที่ให้อัตราอบแห้งสูงหรือใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำ ด้วยการจำลองผลการอบแห้ง โดยปัจจัยที่พิจารณาคือความชันความชื้นภายในเมล็ด (moisture content gradient) และการเปลี่ยนสถานะเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว (glass transition temperature) โดยนำผลการจำลองที่ได้วิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลองอบแห้งจริงที่ได้กระทำ เพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เชื่อได้ว่าสามารถลดการเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยยังคงสามารถใช้เงื่อนไขการอบแห้งที่ให้การอบแห้งที่รวดเร็วและประหยัดพลังงานได้



บทที่ 6

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่น หน่วง โดยแบ่งปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งเป็น 2 กลุ่มการทดลองคือ กลุ่มปัจจัยหลักได้แก่ อุณหภูมิ อากาศอบแห้ง ความเร็วอากาศที่อลมเข้า ระยะยกที่อลมเป่า และกลุ่มปัจจัยรองได้แก่ มวลข้าวเปลือก จำนวนตะแกรง พันธุ์ข้าวเปลือก ผลการทดลองแสดงอัตราอบแห้งข้าวเปลือก อัตราสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้ง และคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง และวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกชนิดอื่น

6.1 การทดลองกลุ่มปัจจัยหลัก

การทดลองกลุ่มปัจจัยหลักใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 3 ค่า คือ 80 100 และ 120°C และปรับ ความเร็วอากาศที่อลมเข้า 3 ค่าคือ 17 20 และ 23 m/s ขณะที่ใช้ระยะยกที่อลมเป่า 4 5 และ 6 cm โดยใช้จำนวนตะแกรง 11 ชั้นและใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 จำนวน 20 kg

6.1.1 อัตราอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

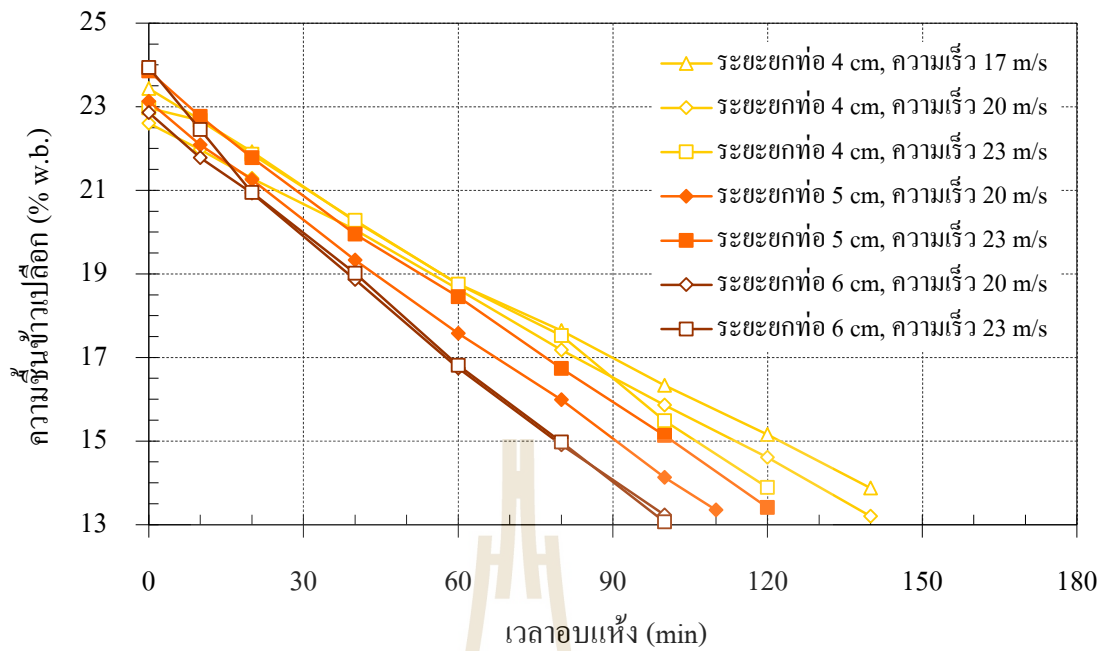
6.1.1.1 ลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก

การทดลองจะปรับค่าอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่อลมเข้าให้คงที่ จากนั้น ปรับระยะยกที่อลมเป่าเป็น 4 5 และ 6 cm แล้วจึงเปลี่ยนความเร็วอากาศที่อลมเข้าเป็น 17 20 และ 23 m/s ตามลำดับ จากนั้นจึงปรับอุณหภูมิอากาศอบแห้งให้ครบทั้ง 3 ค่า โดยในกรณีระยะยกที่อลมเป่า 5 และ 6 cm ไม่สามารถทำการทดลองด้วยความเร็วอากาศที่อลมเข้า 17 m/s เนื่องจากข้าวเปลือกจะขาด เสถียรภาพการไหลหมุนเวียนในเครื่องอบแห้ง ดังแสดงการทดสอบในภาคผนวก ข.4 ผลการทดลอง อบแห้งแสดงดังรูปที่ 6.1-6.3 โดยแกนนอนเป็นเวลาอบแห้งและแกนตั้งเป็นความชื้นข้าวเปลือกใน หน่วยมาตรฐานเปียก (% w.b.)

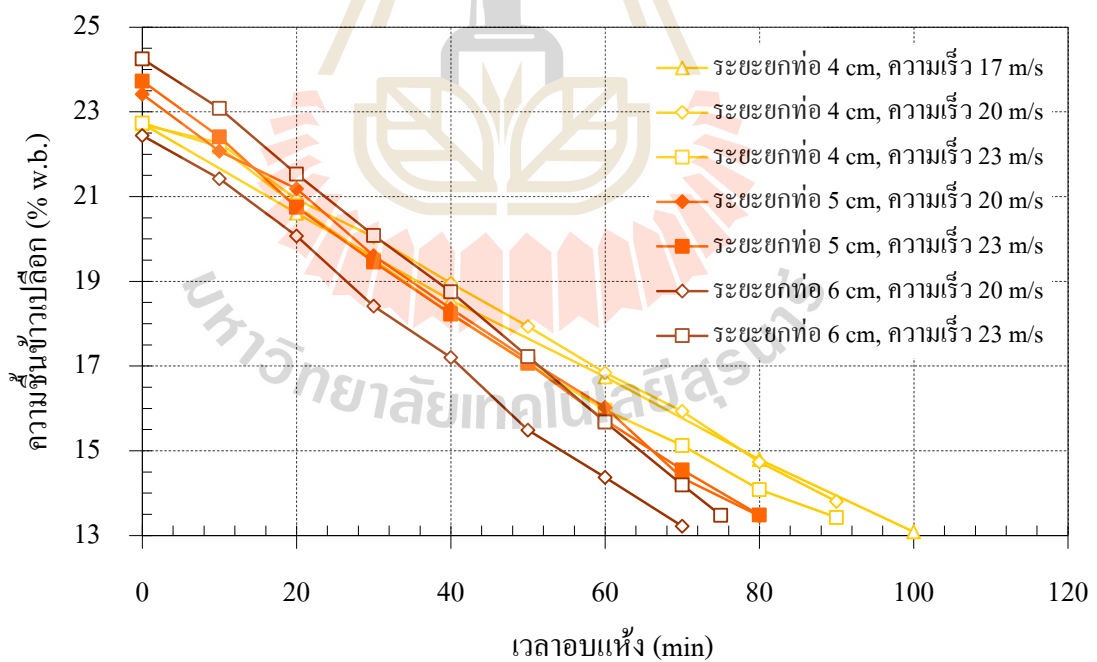
จากรูปที่ 6.2-6.3 พบลักษณะการลดลงของความชื้นเป็นเส้นตรงในทุก เงื่อนไขการอบแห้ง แสดงถึงอัตราอบแห้งที่คงที่ตลอดช่วงการศึกษา ในที่อลมเป่าและที่อลมรอบ ข้าวเปลือกจะสัมผัสกับอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิและความเร็วสูง (ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ) เป็น ระยะเวลาสั้น ๆ ทำให้เกิดระเหยความชื้นที่ผิวอย่างรวดเร็ว และเมื่อข้าวเปลือกเข้าสู่ถังพักข้าว ความชื้นภายในเมล็ดจะเกิดการแพร่กระจายสู่ผิวเมล็ด ด้วยความชื้นความชื้นภายในเมล็ด (moisture

content gradient) ที่เกิดขึ้นจากการอบแห้งในท่อลมเป่าและท่อครอบ ประกอบกับระยะเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่ในถังพักมีสัดส่วนมากกว่าระยะเวลาอบแห้งในท่อลมเป่าและท่อครอบ ทำให้ความชื้นสามารถแพร่กระจายได้อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อข้าวเปลือกเข้าสู่ท่อลมเป่าและท่อครอบในรอบถัดมา จึงสามารถลดความชื้นได้ใกล้เคียงกับการอบแห้งรอบก่อนหน้านี้ ทำให้ลักษณะการลดลงของความชื้นเป็นเส้นตรง สอดคล้องกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบคสองมิติ (Madhiyanon and Soponronnarit, 2005), เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบครูปทรงสามเหลี่ยม (Nguyen et al., 1998) และเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2552 ก) ที่ข้าวเปลือกมีช่วงเวลาแพร่กระจายความชื้นภายในเมล็ดก่อนเข้าสู่ท่ออบแห้งในรอบถัดไป ทำให้ลักษณะการลดลงของความชื้นคงที่เช่นเดียวกัน ซึ่งแตกต่างอย่างเด่นชัดกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบค (Poomsa-ad et al., 2002) ที่อบแห้งอย่างต่อเนื่อง จึงมีลักษณะการลดลงของความชื้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบและจะค่อย ๆ ชะลอตัวลงในช่วงกลางและท้ายของการอบแห้ง การลดลงของความชื้นเป็นลักษณะเอ็กซ์โพเนนเชียล

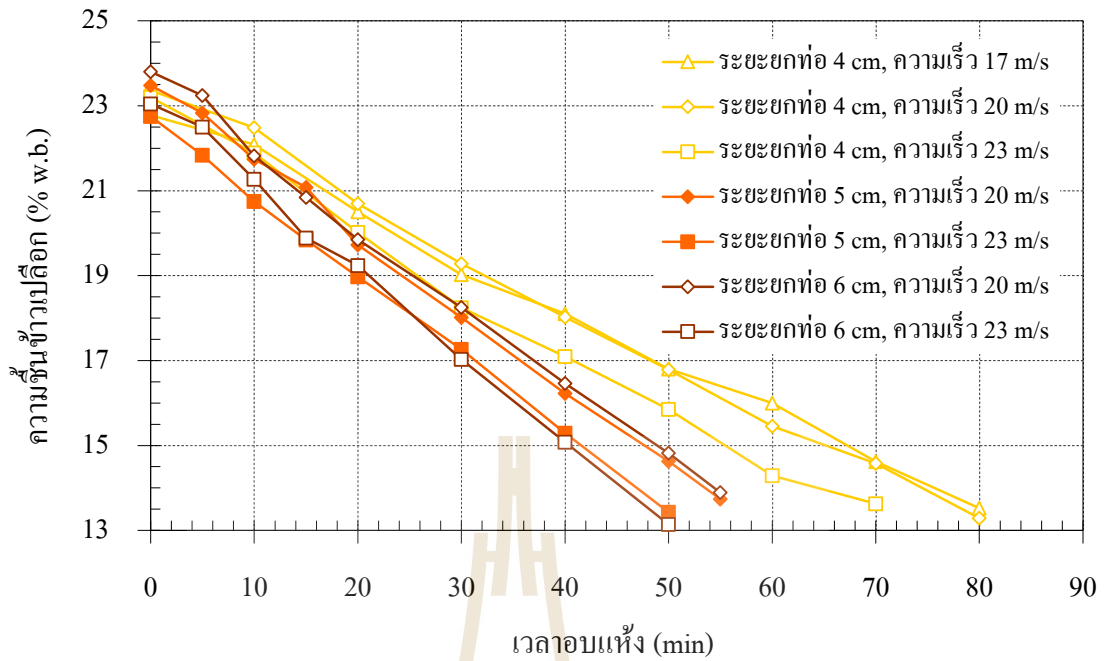
แต่ในรูปที่ 6.1 ซึ่งใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 80°C พบลักษณะเส้นการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเป็นเส้นโค้งที่ส่วนกลางและท้ายของการอบแห้ง โดยเฉพาะกรณีระยะยกท่อลมเป่า 4 cm เพื่อสามารถวิเคราะห์ได้ดียิ่งขึ้น จึงนำเสนอผลในหน่วยมาตรฐานแห้ง (% d.b.) ดังแสดงในรูป 6.4 ซึ่งจะสังเกตเห็นลักษณะการลดลงของความชื้นที่ไม่คงที่ชัดเจนยิ่งขึ้น แสดงถึงปริมาณความชื้นที่ระเหยได้ในแต่ละรอบการอบแห้งมีค่าลดลงในช่วงกลางและท้ายของการอบแห้ง เนื่องจากในเงื่อนไขอบแห้งชุดนี้ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งเพียง 80°C ทำให้อุณหภูมิข้าวเปลือกขณะอบแห้งมีค่าต่ำกว่าเงื่อนไขอบแห้งชุดอื่น ๆ ส่งผลให้ความสามารถในการแพร่ความชื้นจากภายในสู่ผิวเมล็ดน้อยกว่า ประกอบกับระยะเวลาการแพร่ความชื้นของเมล็ดจากภายในสู่ผิวเมล็ดที่ไม่เพียงพอ (ระยะเวลาเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกในถังพัก) ปริมาณความชื้นที่ผิวเมล็ดจึงน้อยกว่าความสามารถในการพาความชื้นจากผิววัสดุไปกับอากาศอบแห้ง (โดยเฉพาะในท่อลมเป่าและท่อครอบ) จึงส่งผลเกิดการลดลงของความชื้นแบบถดถอย แต่เมื่อใช้ระยะยกท่อลมเป่า 5-6 cm พบว่าลักษณะการลดลงของความชื้นเป็นเส้นตรงมากขึ้น ดังแสดงในรูป 6.4 เนื่องจากการเพิ่มระยะยกท่อลมเป่า ส่งผลให้อัตราม้วนเวียนเมล็ดในระบบเพิ่มมากขึ้น เมล็ดมีความถี่ในการสัมผัสอากาศร้อนมากขึ้น เมล็ดจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นเร็วกว่า การแพร่ความชื้นมาสู่ผิวเมล็ดจึงรวดเร็วกว่า และมีปริมาณความชื้นที่ผิวเมล็ดเหมาะสมกับความสามารถในระเหยความชื้นของอากาศอบแห้งมากขึ้น ความชื้นเมล็ดจึงลดลงอย่างสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 6.5-6.6 ที่ลักษณะการลดลงของความชื้นค่อนข้างคงที่โดยตลอดช่วงการอบแห้ง



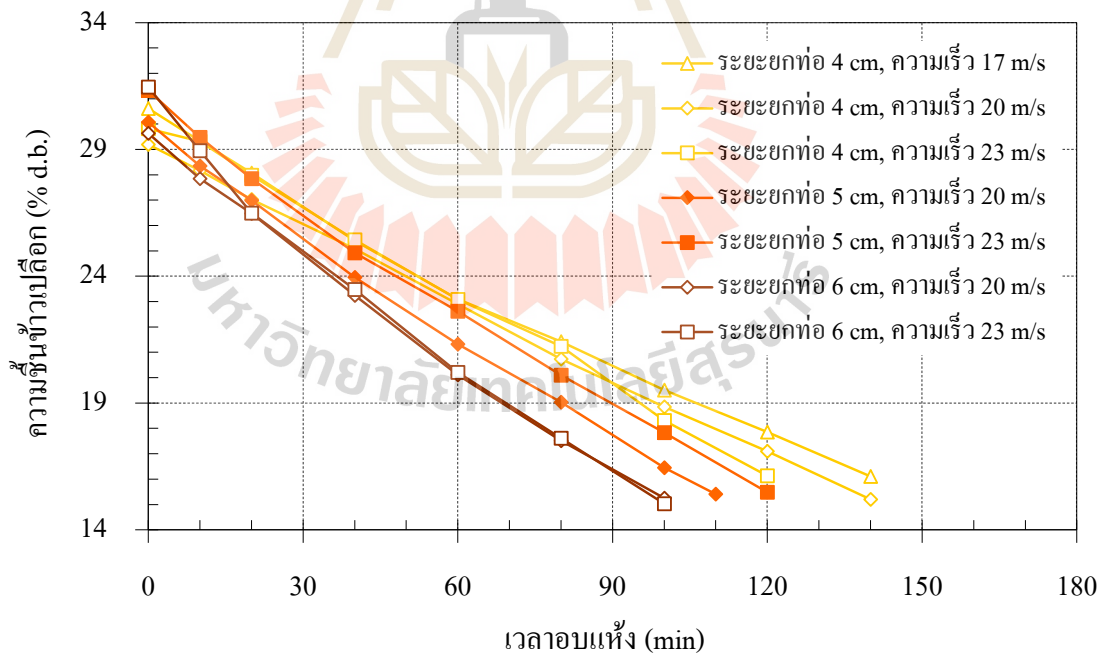
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้งกับความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C



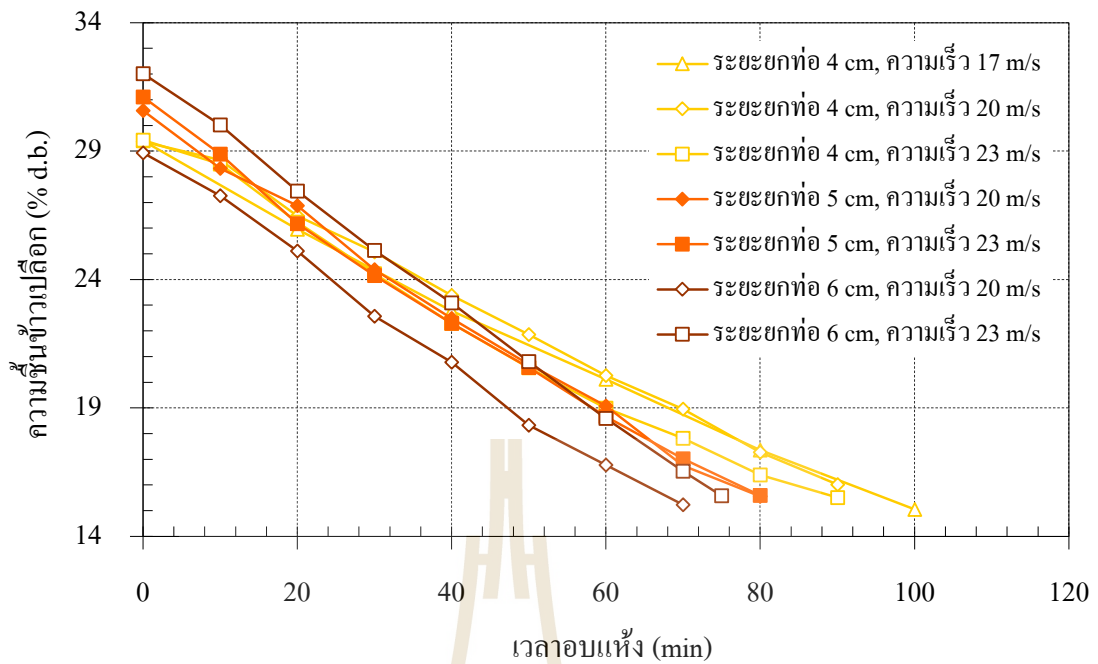
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้งกับความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C



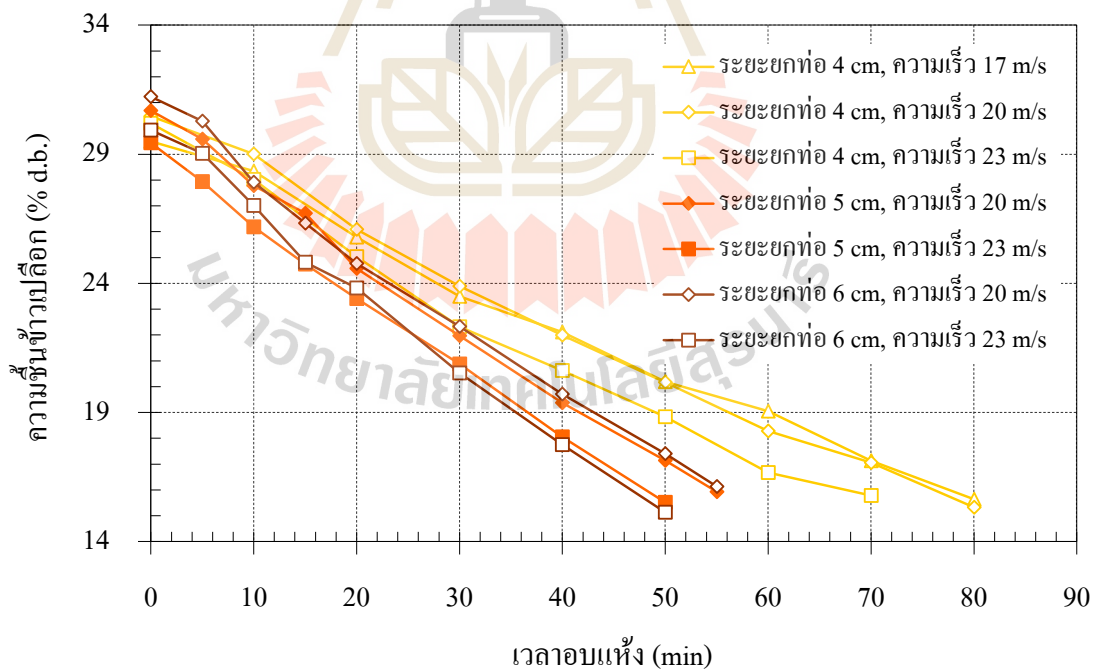
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้งกับความชื้นข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C



รูปที่ 6.4 ความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C



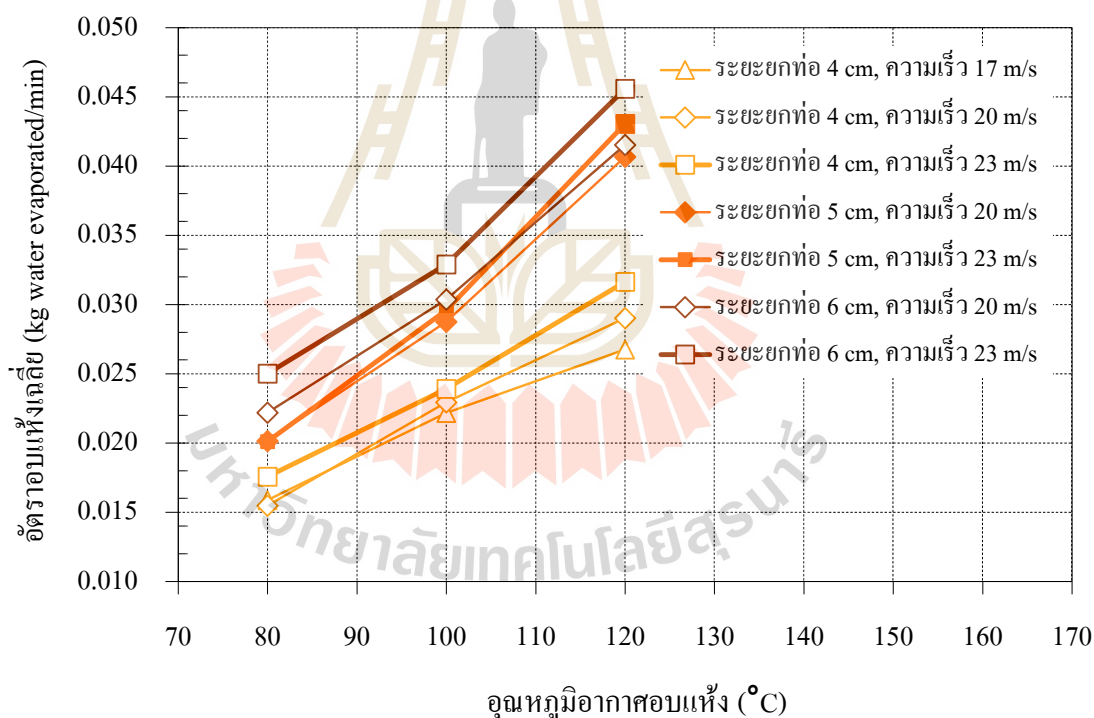
รูปที่ 6.5 ความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C



รูปที่ 6.6 ความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C

6.1.1.2 ผลกระทบอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราการแห้งเฉลี่ยของข้าวเปลือก

เนื่องจากเครื่องอบแห้งที่ศึกษามีลักษณะอัตราการแห้งที่รวดเร็วแบบคงที่ตลอดช่วงความชื้นที่พิจารณา ดังที่นำเสนอในหัวข้อ 6.1.1.1 ดังนั้นเพื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการแห้งเทียบกับปัจจัยอื่น ๆ จึงนำข้อมูลผลการทดลองในหัวข้อ 6.1.1.1 มาวิเคราะห์ในรูปแบบอัตราการแห้งเฉลี่ย (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก.1) ดังแสดงในรูปที่ 6.7 ซึ่งแสดงว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มอัตราการแห้งเฉลี่ยอย่างชัดเจน โดยเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นอัตราการแห้งเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไขการอบแห้งที่พิจารณา เช่นกรณีเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80-120°C ที่ความเร็วอากาศที่ลมเข้า 23 m/s อัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มจาก 0.0176-0.0316 0.0201-0.0430 และ 0.0250-0.0456 kg water evaporated/min ที่ระยะยกท่อลมเป้า 4 5 และ 6 cm ตามลำดับ ทำให้อัตราการแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 80.01 114.14 และ 82.23% ตามลำดับ



รูปที่ 6.7 ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราการแห้งเฉลี่ย

อัตราการแห้งที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากอัตราการแพร่ความชื้นจากในเมล็ดสู่ผิวข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นตามสมการ Fick's law of diffusion ดังที่ได้แสดงในสมการ (2.10) ของบทที่ 2 โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามสมการดังกล่าวเป็นฟังก์ชันที่

ขึ้นกับอุณหภูมิเมล็ดเป็นหลัก ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิเมล็ดขณะอบแห้งสูงมากขึ้นตามไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จึงมีค่าสูงขึ้น (ลดความต้านทานการถ่ายเทมวลในเมล็ด) ส่งผลให้ความชื้นภายในเมล็ดสามารถแพร่มาสู่ผิวได้ง่ายและมีปริมาณมากกว่า ทำให้ข้าวเปลือกสามารถคายความชื้นในแต่ละรอบการอบแห้งได้มากยิ่งขึ้น อัตราอบแห้งเฉลี่ยจึงสูงขึ้น

อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศโดยรอบข้าวเปลือกมีค่าลดลง (ลดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิวเมล็ด) อากาศที่อุณหภูมิสูงจึงมีศักยภาพในการดึงความชื้นจากผิวเมล็ดได้มากกว่าอากาศที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบกับข้าวเปลือกที่ไหลในท่อลมเป่าและท่อครอบมีความพรุนสูง ทำให้มีพื้นที่สัมผัสอากาศมาก การถ่ายเทความชื้นที่ผิวข้าวเปลือกจึงเกิดขึ้นได้ง่าย เมื่อความชื้นที่ผิวข้าวเปลือกลดลงทำให้เกิดความชันความชื้นภายในเมล็ด (moisture content gradient) ความชื้นภายในเมล็ดจึงเคลื่อนมาแทนที่ ตามกระบวนการที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้

6.1.1.3 ผลกระทบความเร็วอากาศที่ลมเข้าต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ยของข้าวเปลือก

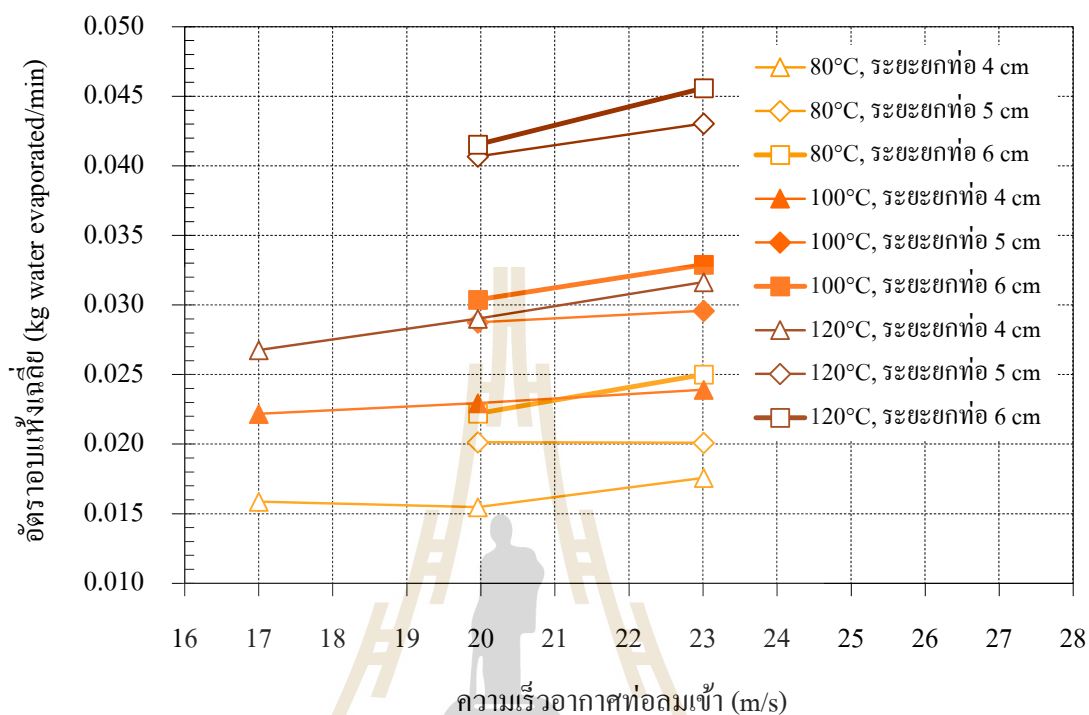
เมื่อพิจารณาผลกระทบของความเร็วอากาศที่ลมเข้าตามรูปที่ 6.8 พบว่าเมื่อความเร็วสูงขึ้นสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งเฉลี่ยได้ทุกกรณีศึกษา โดยความเร็วอากาศที่ลมเข้าที่ใช้ในช่วง 17-23 m/s เมื่อคำนวณเป็นความเร็วอากาศที่ลมเป่า 8.11-11.18 m/s ความเร็วอากาศที่ครอบ 2.11-2.91 m/s และความเร็วอากาศในถังพักข้าว 0.058-0.107 m/s (ข้อมูลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ข.5) เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหมุนจำเป็นต้องใช้ความเร็วอากาศสูงเพื่อทำให้เกิดการหมุนเวียนของวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ค่าความเร็วอากาศที่ลมเป่าต่ำสุดที่เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้สูงถึง 8.11 m/s การแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นที่เกิดขึ้นจึงเป็นลักษณะการพาแบบบังคับ (forced convection) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนท่อลมเป่าและท่อครอบ ซึ่งข้าวเปลือกและอากาศจะไหลตามกันแต่ยังคงมีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งสูง เนื่องจากความเร็วอากาศที่ใช้มีค่าสูงกว่าความเร็วปลาย (terminal velocity) ของข้าวเปลือกมาก (4.88-5.7 m/s) (Rajabipour et al., 2004; Ghamri et al., 2010) ความเร็วสัมพัทธ์ที่สูงส่งผลให้ความหนาของชั้นซิดผิวเชิงความร้อน (thermal boundary layer) และชั้นซิดผิวเชิงความเร็ว (velocity boundary layer) บนผิวข้าวเปลือกมีค่าลดลง ทำให้ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนและมวลลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และความชื้นจึงมีค่าสูง

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

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

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงได้รวดเร็วเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากระดับความเร็วอากาศที่ใช้ค่อนข้างสูงจึงทำให้ เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งจึงสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น เช่นกรณีเพิ่มความเร็วอากาศที่ลมเข้า 17-23 m/s ที่ระยะยกท่อลมเป่า 4 cm อัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มจาก 0.0159-0.0176 0.0222-0.0239 และ 0.0268-0.0316 kg water

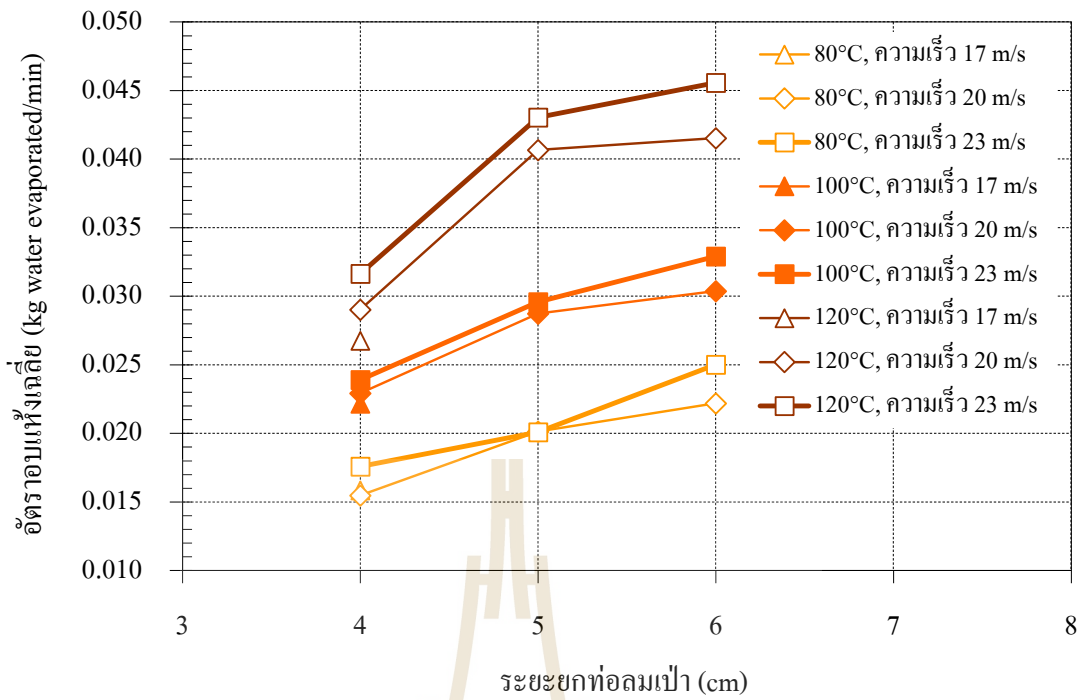
evaporated/min ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C ตามลำดับ ทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 10.78 7.80 และ 18.25% ตามลำดับ



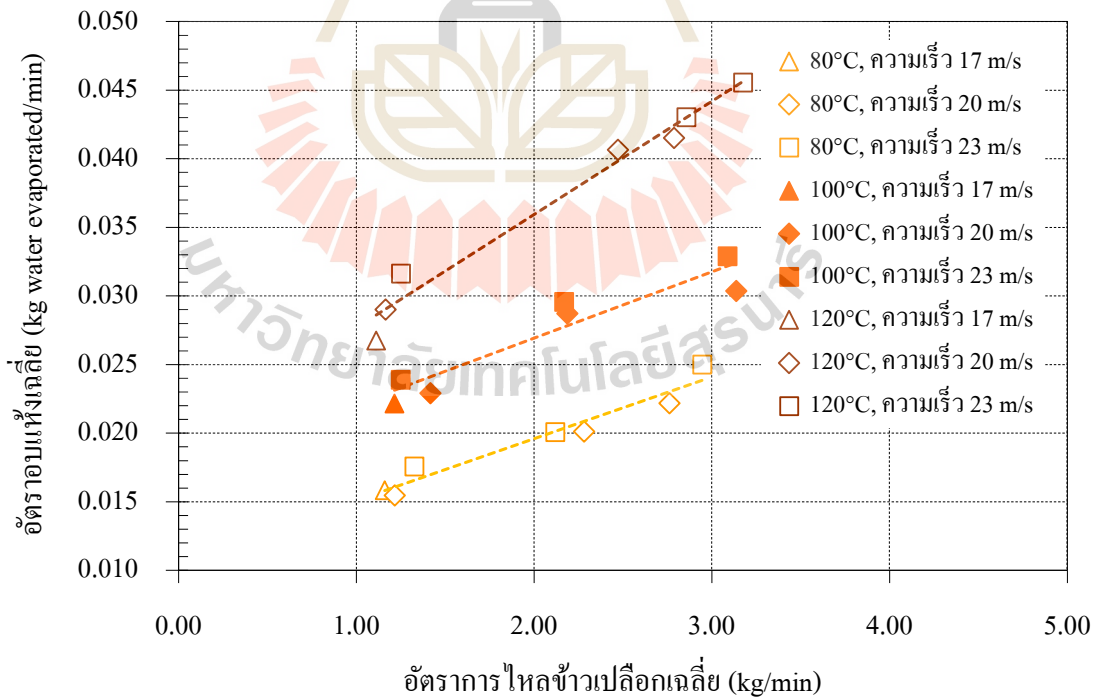
รูปที่ 6.8 ผลของความเร็วอากาศที่ลมเป่าต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย

6.1.1.4 ผลกระทบระยะยกที่ลมเป่าต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ยของข้าวเปลือก

ผลของระยะยกที่ลมเป่าที่ระยะ 4 5 และ 6 cm แสดงในรูปที่ 6.9 พบว่าระยะยกที่ลมเป่าที่สูงขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นในทุกกรณีศึกษา เนื่องจากระยะยกที่ลมเป่ามีผลต่ออัตราการไหลข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้ง (แสดงในภาคผนวก ข.4) เช่นกรณีระยะยกที่ลมเป่าเพิ่มขึ้น 4-6 cm อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยเพิ่มจาก 1.27-2.90 และ 1.28-3.07 kg/min ที่ความเร็วอากาศที่ลมเป่า 20 และ 23 m/s ตามลำดับ ทำให้อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 128.35 และ 139.84% ตามลำดับ ในกรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C การเพิ่มระยะยกที่ลมเป่าจาก 4-6 cm อัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 0.0290-0.0415 และ 0.0316-0.0456 kg water evaporated/min ที่ความเร็วอากาศที่ลมเป่า 20 และ 23 m/s ตามลำดับ ทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 43.09 และ 44.02% ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มระยะยกที่ลมเป่าที่มีต่อการเพิ่มอัตราการอบแห้งเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 6.10



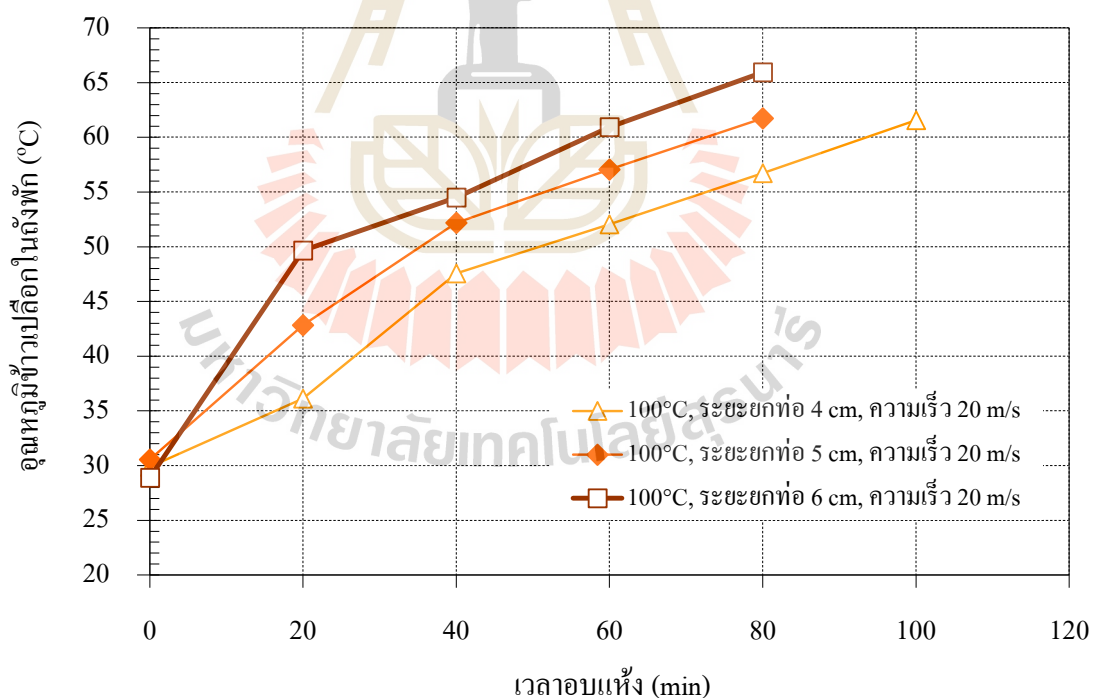
รูปที่ 6.9 ผลของระยะยกท่อลมเป่าต่ออัตราการแห้งเฉลี่ย



รูปที่ 6.10 ผลของอัตราการไหลขั้วเป่าต่ออัตราการแห้งเฉลี่ย

การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลข้าวเปลือกทำให้ความหนาแน่นของเมล็ดในท่อลมเป่าและท่อครอบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้อัตราอบแห้งเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ แต่เนื่องจากในกรณีนี้ระดับความเร็วอากาศท่อลมเป่าที่ใช้มีค่าสูง ดังที่กล่าวในหัวข้อ 6.1.1.3 จึงเชื่อได้ว่าอัตราการไหลข้าวเปลือกที่มากขึ้นจะช่วยดึงศักยภาพอากาศอบแห้งที่คงเหลือได้มากขึ้นโดยไม่เกิดการถดถอยของอัตราอบแห้งเฉลี่ย

นอกจากนี้เครื่องอบแห้งแบบเป่าผ่าน-หล่นหน่วงที่ใช้ในงานวิจัยมีรูปแบบการทำงานเป็นเครื่องอบแห้งแบบกลุ่ม (batch dryer) อัตราการไหลข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ข้าวเปลือกมีการหมุนเวียนในเครื่องอบแห้งที่รวดเร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกไหลเข้าสู่ท่อลมเป่าและท่อครอบจึงมากกว่าในระยะเวลาอบแห้งเท่ากัน ทำให้ข้าวเปลือกมีความถี่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นในท่อลมเป่าและท่อครอบมากกว่า ส่งผลให้อุณหภูมิของอุณหภูมิและความเร็วอากาศท่อลมเป่าและท่อครอบ ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 6.1.1.2 และ 6.1.1.3 เพิ่มสูงขึ้น ข้าวเปลือกจึงมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 6.11 ทำให้อัตราการแพร่ความชื้นจากภายในสู่ผิวข้าวเปลือกรวดเร็วยิ่งขึ้น อัตราอบแห้งเฉลี่ยจึงสูงขึ้น

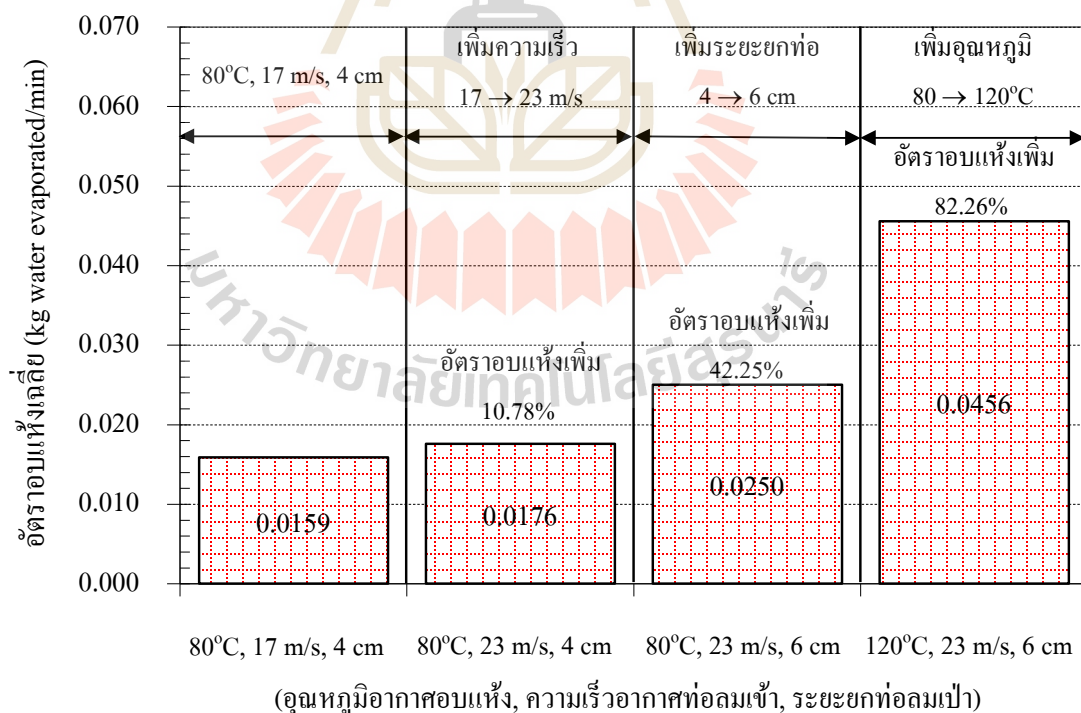


รูปที่ 6.11 อุณหภูมิข้าวเปลือกขณะอบแห้งที่ระยะความสูง 45 cm จากพื้นถังพัก

อัตราการไหลข้าวเปลือกที่สูงขึ้น ทำให้ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนตัวในถังพักลดลง ระยะเวลาในการแพร่กระจายความชื้นภายในเมล็ดก่อนเข้าสู่ท่อลมเป่าจึงลดลง การกระจายความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิวข้าวเปลือกอาจไม่สม่ำเสมอ และอาจทำให้อัตรอบแห้งเฉลี่ยลดลงได้ แต่เนื่องจากข้าวเปลือกมีอัตราการแพร่ความชื้นที่สูงขึ้น ดังที่อธิบายก่อนหน้านี้ จึงสามารถชดเชยกับระยะเวลาที่ลดลงได้ในระดับหนึ่ง

6.1.1.5 ผลกระทบปัจจัยหลักต่อการเพิ่มขึ้นของอัตรอบแห้งเฉลี่ยของข้าวเปลือก

ผลการทดลองกลุ่มปัจจัยหลักแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขขอบแห้งที่ให้อัตรอบแห้งเฉลี่ยสูงสุดคือใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C , ความเร็วอากาศที่อลมเข้า 23 m/s และระยะยกท่อลมเป่า 6 cm เมื่อใช้ตะแกรงหว่งข้าว 11 ชั้นและข้าวเปลือกพันธุ์ชยันต 1 น้ำหนัก 20 kg เพื่อแสดงผลของปัจจัยหลักที่มีต่ออัตรอบแห้งได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงนำเสนอการเพิ่มขึ้นของอัตรอบแห้งเฉลี่ยด้วยการปรับปัจจัยหลัก ดังแสดงในรูปที่ 6.12 โดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นคืออุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C , ความเร็วอากาศที่อลมเข้า 17 m/s , ระยะยกท่อลมเป่า 4 m/s พบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นปัจจัยที่เพิ่มอัตรอบแห้งเฉลี่ยได้สูงสุดถึง 82.26% ปัจจัยรองมาคือระยะยกท่อลมเป่าที่เพิ่มอัตรอบแห้งเฉลี่ยได้ 42.25% และลำดับสุดท้ายคือความเร็วอากาศที่อลมเข้าที่เพิ่มได้ 10.78%

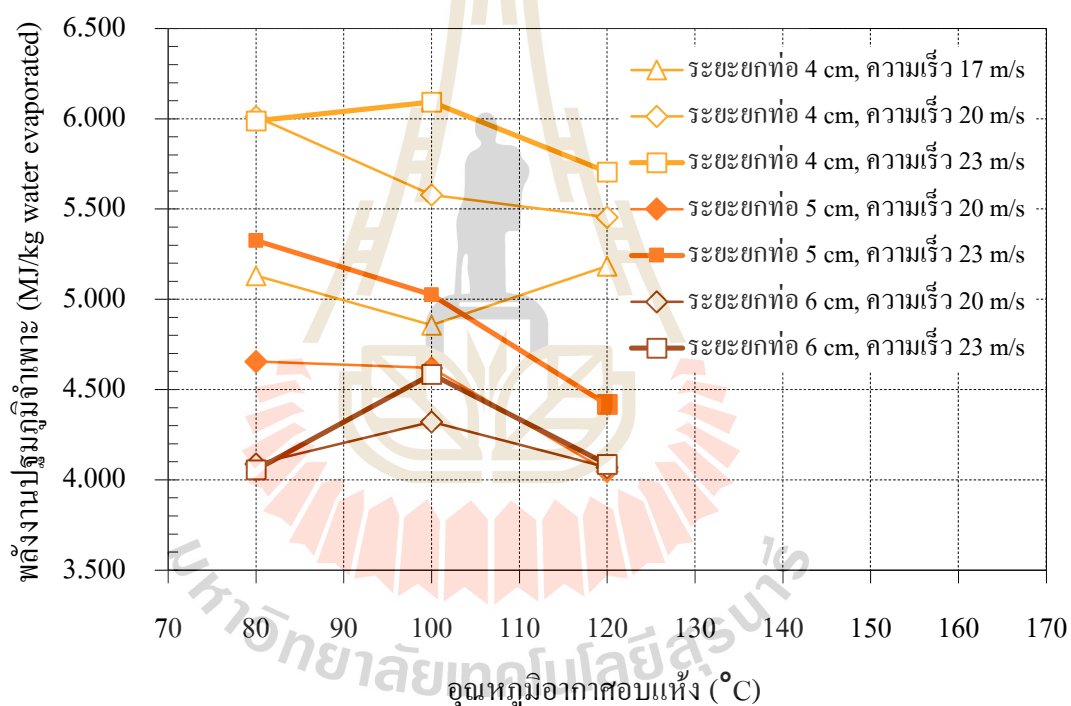


รูปที่ 6.12 ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความเร็วอากาศที่อลมเข้า และระยะยกท่อลมเป่า ที่มีต่อการเพิ่มอัตรอบแห้งเฉลี่ย

6.1.2 อัตราสิ้นเปลืองพลังงานในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

6.1.2.1 ผลกระทบอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ

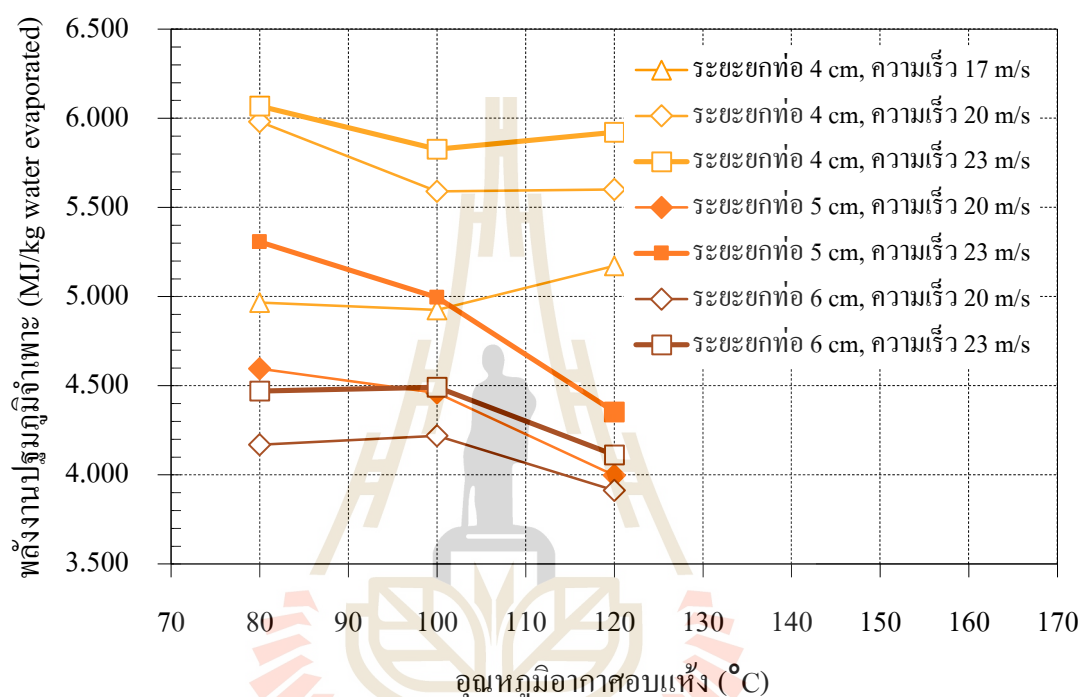
จากผลการทดลองดังในหัวข้อ 6.1.1.1 นำไปสู่พลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง ด้วยการคำนวณพลังงานความร้อนที่เครื่องทำความร้อนป้อนให้กับอากาศอบแห้งตามภาคผนวก ก.2 โดยพิจารณาช่วงเวลาที่ข้าวเปลือกถูกลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นถึงประมาณ 14% w.b. ซึ่งรูปที่ 6.13 นำเสนอผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจาก 80-120°C สามารถลดการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะได้ในบางกรณี โดยระดับพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้ มีค่าอยู่ในช่วง 4.05-6.09 MJ/kg water evaporated ซึ่งใกล้เคียงกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยทั่วไปที่พบในวรรณกรรม



รูปที่ 6.13 ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่มีต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพลังงานปฐมภูมิจำเพาะตามการเพิ่มของอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีแนวโน้มไม่ชัดเจน เนื่องจากค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลอง ดังแสดงในภาคผนวก ข.8 ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นเงื่อนไขอากาศทางเข้าเครื่องทำความร้อนเพื่อการคำนวณพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ ทำให้เงื่อนไขอากาศทางเข้าเครื่องทำความร้อนของแต่ละการทดลองไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลง

พลังงานปฐมภูมิจำเพาะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จึงทำการคำนวณพลังงานปฐมภูมิจำเพาะด้วยเงื่อนไขอากาศแวดล้อมเดียวกัน โดยใช้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมเท่ากับ 32.25°C และ 50.60% ตามลำดับ ค่าดังกล่าวได้จากการเฉลี่ยค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมจากการทดลองทั้งหมด ค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่คำนวณได้ใหม่แสดงในรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 32.25°C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม 50.60%

พบว่า การเปลี่ยนแปลงพลังงานปฐมภูมิจำเพาะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง มีแนวโน้มที่ชัดเจนยิ่งขึ้น แบ่งได้ 3 กรณี 1. ระยะชกท้อลมเป่า 4 cm พบจุดต่ำสุดของพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C โดยค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 120°C เหตุเพราะอัตราการไหลข้าวเปลือกต่ำ ประมาณ 1 kg/min ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ทำให้สัดส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่เพิ่มให้กับอากาศอบแห้งต่อพลังงานที่ข้าวเปลือกสามารถรับได้ในท่อลมเป่าและท่อครอบเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะเพิ่มขึ้น 2. ระยะชกท้อลมเป่า 5 cm พบค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะลดลงอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง เพราะอัตราการไหลข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 2 kg/min ข้าวเปลือกใน

ท่อลมเป่าและท่อครอบจึงมีปริมาณมากพอที่จะรับพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ทำให้้อตราอบแห้งสูง ดังแสดงในหัวข้อ 6.1.1.2 เวลาอบแห้งจึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญกับพลังงานความร้อนที่ใช้เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะลดลง 3. ระยะยกท่อลมเป่า 6 cm พบค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจาก 80-100°C และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจาก 100-120°C อัตราการไหลข้าวเปลือกในกรณีนี้มีค่าประมาณ 3 kg/min ทำให้ปริมาณข้าวเปลือกในท่อลมเป่าและท่อครอบหนาแน่นมากที่สุด แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นการเริ่มต้นของการลดลงของพลังงานปฐมภูมิจำเพาะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งของเงื่อนไขระยะยกท่อลมเป่า 6 cm

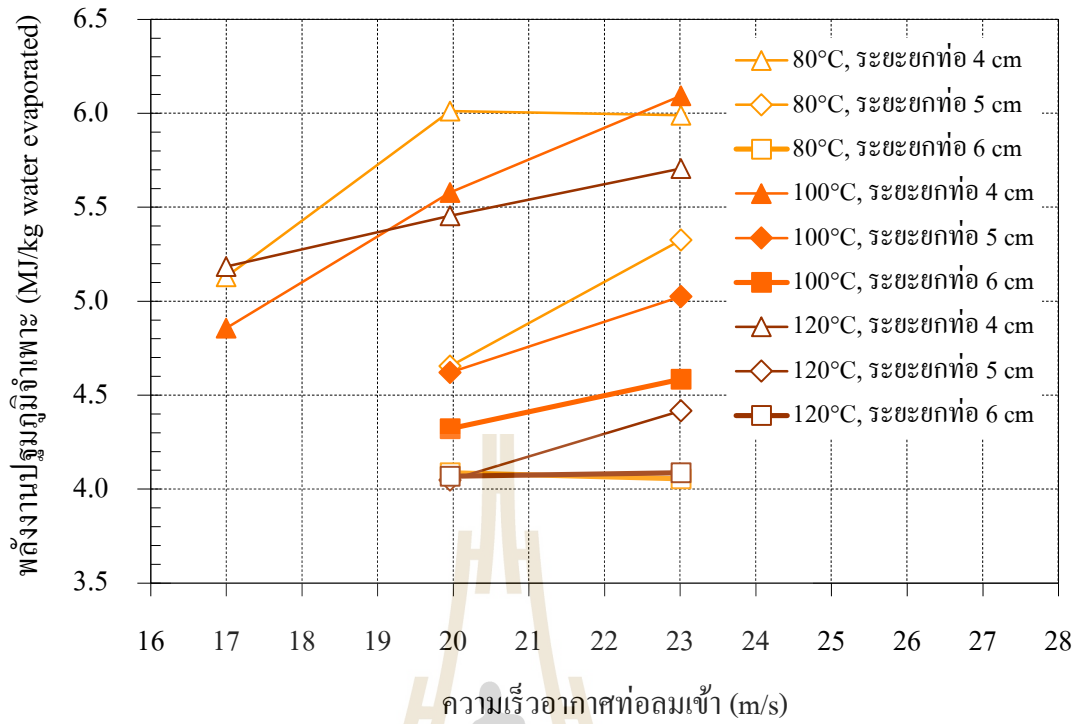
นอกจากนี้กรณีระยะยกท่อลมเป่า 5 และ 6 cm ได้แสดงแนวโน้มจุดต่ำสุดของพลังงานปฐมภูมิจำเพาะเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งมากกว่า 120°C โดยกรณีระยะยกท่อลมเป่า 6 cm ค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะต่ำสุดมีแนวโน้มสูงกว่ากรณีระยะยกท่อลมเป่า 5 cm

6.1.2.2 ผลกระทบความเร็วอากาศท่อลมเข้าสู่พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ

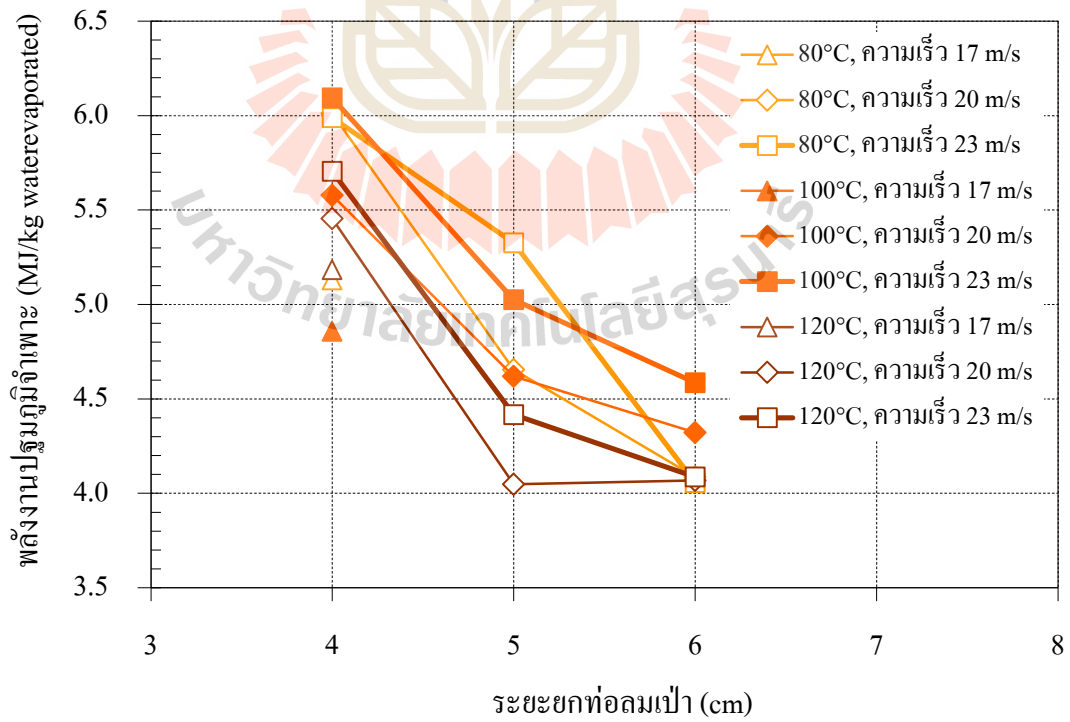
ความเร็วอากาศท่อลมเข้าที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้การใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะในกรณีศึกษาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.15 เนื่องจากเพื่อให้การไหลข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นมีเสถียรภาพ จำต้องใช้ความเร็วอากาศท่อลมเข้าสูงถึง 17-23 m/s เพื่อให้ในกรณีศึกษาความเร็วอากาศท่อลมเข้าอยู่ในช่วง 8.11-11.18 m/s จึงทำให้ปริมาณอากาศอบแห้งที่ไหลสู่ท่อลมเป่าและท่อครอบ มีปริมาณมากเกินความสามารถที่ข้าวเปลือกจะใช้ศักยภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการเพิ่มความเร็วอากาศท่อลมเข้า จึงทำให้เกิดการสูญเสียอากาศร้อนสู่สิ่งแวดล้อมที่ปลายท่อครอบมากขึ้น แม้การเพิ่มความเร็วอากาศท่อลมเข้าจะสามารถเพิ่ม้อตราอบแห้งได้ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 6.1.1.3 แต่ก็ช่วยลดระยะเวลาอบแห้งได้เพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับพลังงานที่ต้องเพิ่มให้กับเครื่องทำความร้อน เพื่อสร้างอากาศร้อนที่มีปริมาณมากขึ้น

6.1.2.3 ผลกระทบของระยะยกท่อลมเป่าต่อพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ

ระยะยกท่อลมเป่าที่สูงขึ้น ทำให้้อตราการไหลข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น จึงสามารถดึงศักยภาพอากาศอบแห้งได้มากขึ้น ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ้อตราอบแห้งจึงสูงขึ้น ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 6.1.1.4 และการเพิ่มระยะยกท่อลมเป่าไม่ต้องเพิ่มการใช้พลังงานเชิงความร้อนสอดคล้องกับงานวิจัยของ Madhiyanon et al. (2001a) จึงทำให้สามารถลดการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะได้มาก ดังแสดงในรูปที่ 6.16



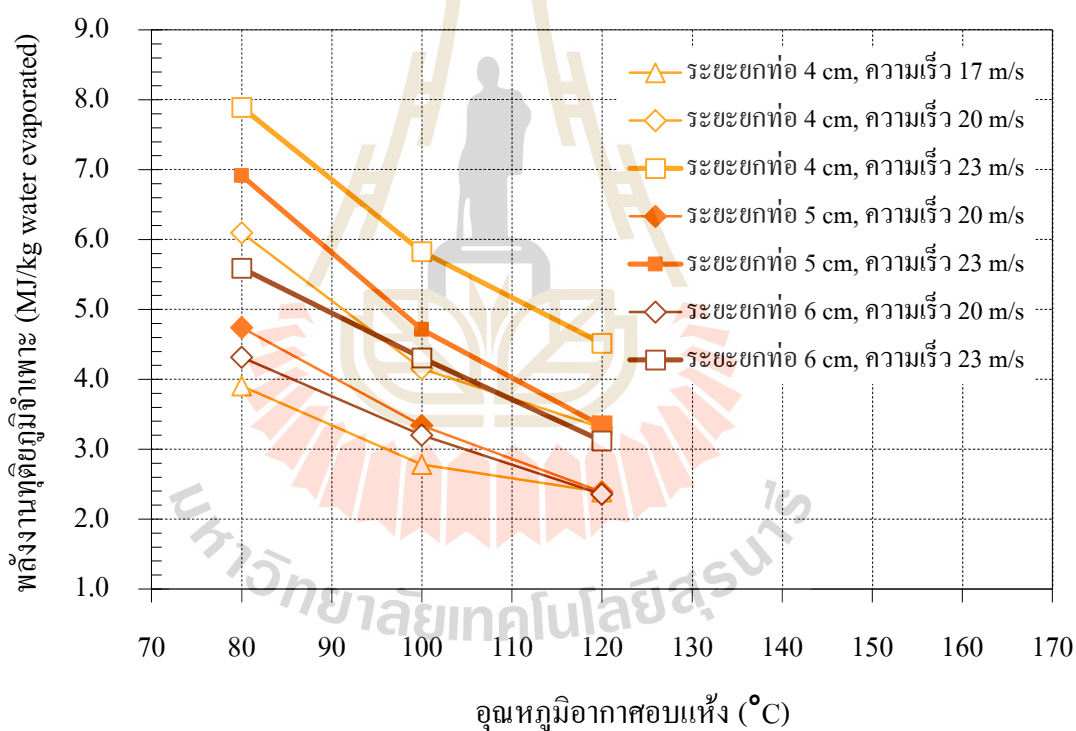
รูปที่ 6.15 ผลของความเร็วกาศที่อลมเข้าต่อพลังงานปฐุมภูมิจำเพาะ



รูปที่ 6.16 ผลของระยะยกท่อลมเป่าต่อพลังงานปฐุมภูมิจำเพาะ

6.1.2.4 ผลกระทบอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ

ในกรณีเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง พลังงานทุติยภูมิจำเพาะหมายถึงพลังงานส่วนที่ขับเครื่องเป่าลมเพื่อป้อนลมเข้าสู่เครื่องอบแห้ง วิธีคำนวณพลังงานทุติยภูมิจำเพาะแสดงในภาคผนวก ก.3 โดยวัดค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของแต่ละกรณีศึกษาเพื่อคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องเป่าลมใช้ระหว่างการอบแห้ง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.33-1.92 kW ดังแสดงค่าในภาคผนวก ข.7 การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งทำให้อัตราอบแห้งสูงขึ้น จึงทำให้ระยะเวลาอบแห้งลดลง ระยะเวลาในการขับเครื่องลมเป่าจึงลดลงตามไปด้วย ประกอบกับการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ไม่ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องลมเป่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะจึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ดังแสดงในรูป 6.17 ในกรณีศึกษานี้ค่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะอยู่ในช่วง 2.36-7.89 MJ/kg water evaporated

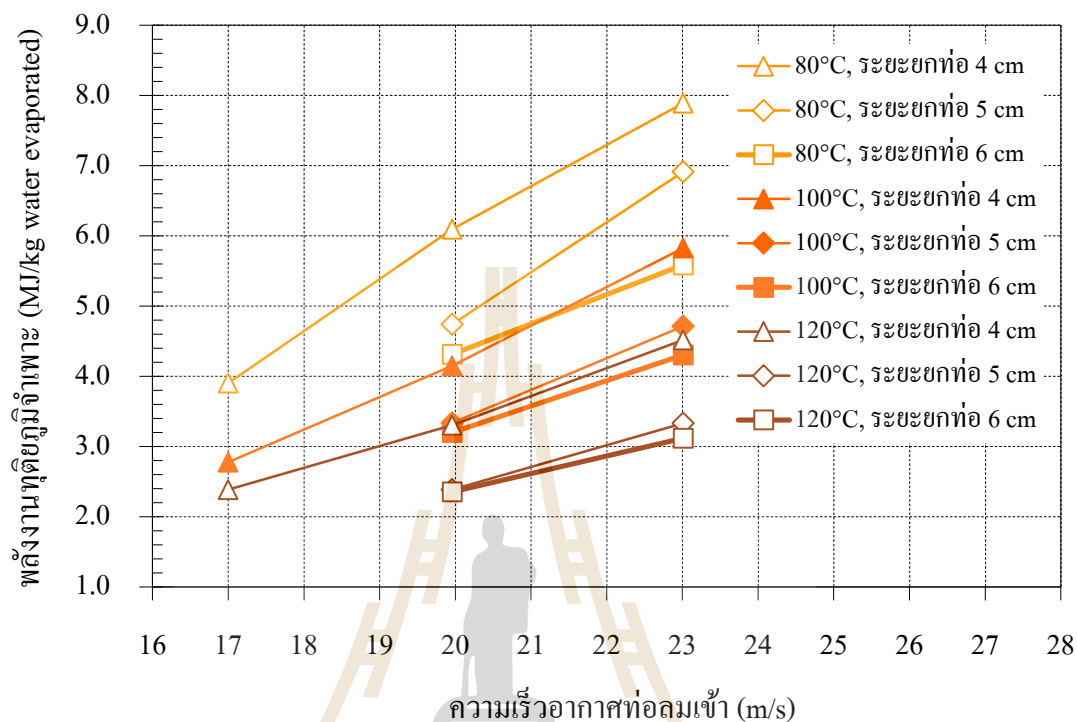


รูปที่ 6.17 ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ

6.1.2.5 ผลกระทบความเร็วอากาศที่อลมเข้าสู่ต่อพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ

การเพิ่มความเร็วอากาศในท่อลมเข้าทำให้เครื่องลมเป่าต้องใช้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงค่าในภาคผนวก ข.7 ประกอบกับการเพิ่มความเร็วอากาศที่อลมเข้าทำให้อัตราอบแห้งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ระยะเวลาอบแห้งจึงลดลงเล็กน้อย ดังอธิบายในหัวข้อ 6.1.1.3 จึงทำให้

โดยภาพรวมแล้วการใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศที่อลมเข้า ดังแสดงในรูปที่ 6.18



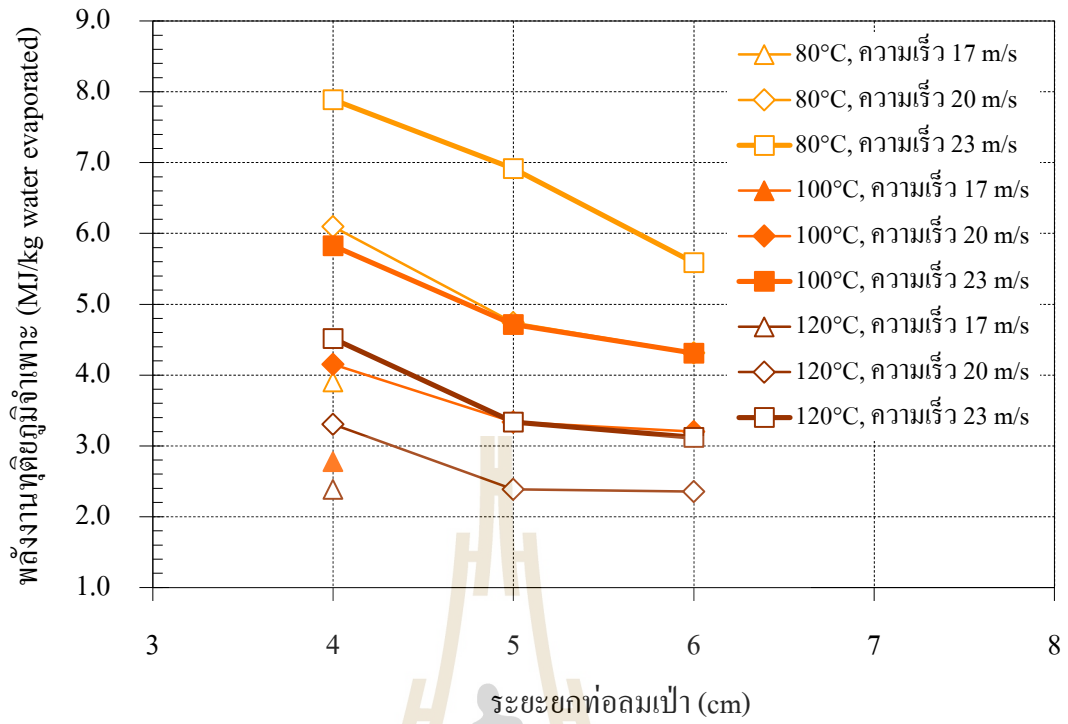
รูปที่ 6.18 ผลของความเร็วอากาศที่อลมเข้าต่อพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ

6.1.2.6 ผลกระทบระยะขยทออลมเป่าต่อพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ

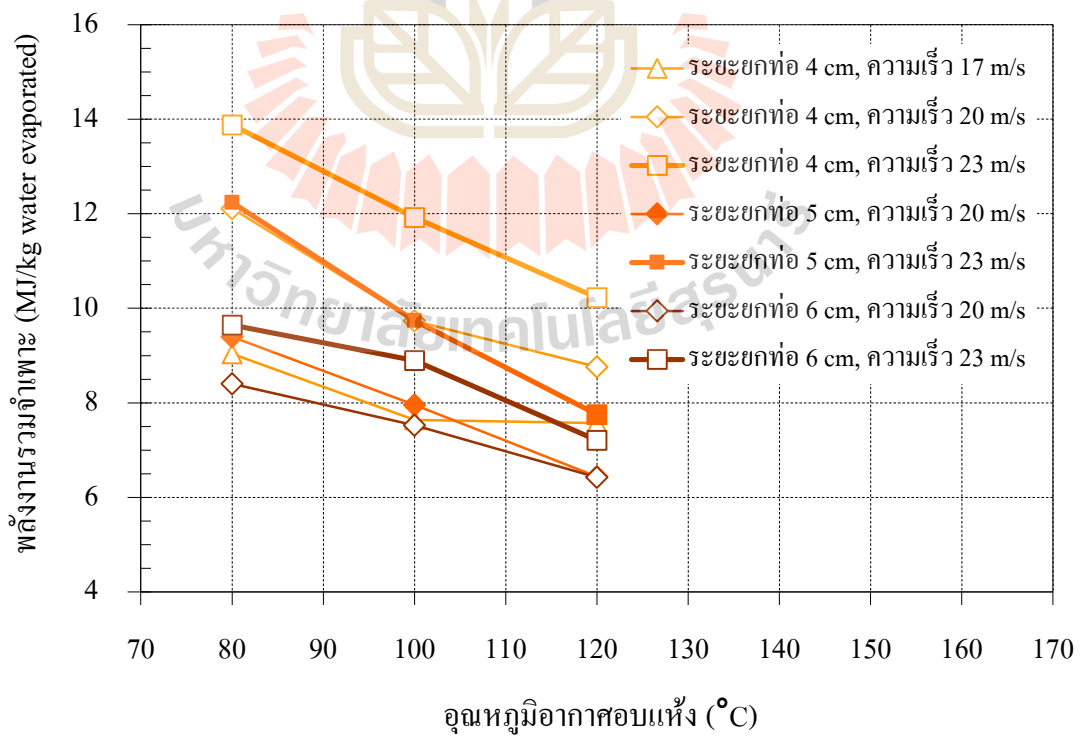
ระยะขยทออลมเป่าที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการไหลช้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทำให้อัตราอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ดังอธิบายในหัวข้อ 6.1.1.4 นอกจากนี้การเพิ่มระยะขยทออลมเป่าไม่ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องลมเป่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถลดการใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.19

6.1.2.7 ผลกระทบปัจจัยหลักต่อพลังงานรวมจำเพาะ

พลังงานรวมจำเพาะคือผลรวมระหว่างพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (พลังงานความร้อน) กับพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (พลังงานจลน์) ซึ่งแสดงถึงศักยภาพโดยรวมของเครื่องอบแห้งในการใช้พลังงานเพื่อลดความชื้นภายในเมล็ด ดังแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก.3 ในกรณีศึกษาที่พลังงานรวมจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงมีค่าอยู่ในช่วง 6.42-13.88 MJ/kg water evaporated โดยพลังงานรวมจำเพาะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.19 ผลของระยะชกที่อลมเป้าต่อพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ



รูปที่ 6.20 ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อพลังงานรวมจำเพาะ

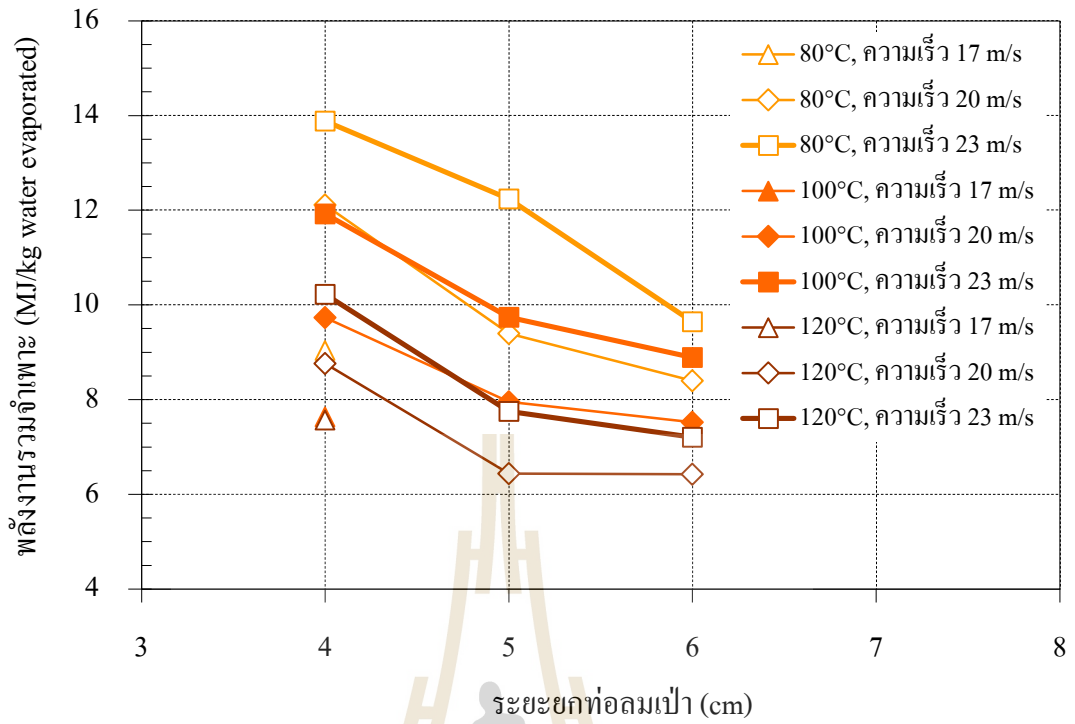
ในกรณีความเร็วอากาศที่อลมเข้า 23 m/s และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80-120°C พลังงานรวมจำเพาะมีค่าลดลงจาก 13.88-10.22 และ 9.64-7.20 MJ/kg water evaporated ที่ระยะยกที่อลมเป่า 4 และ 6 cm ตามลำดับ ทำให้พลังงานรวมจำเพาะลดลง 26.37 และ 25.31% ตามลำดับ นอกจากนี้การเพิ่มระยะยกที่อลมเป่าทำให้การใช้พลังงานรวมจำเพาะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6.21 เช่นในกรณีความเร็วอากาศที่อลมเข้า 23 m/s และระยะยกที่อลมเป่า 4-6 cm พลังงานรวมจำเพาะมีค่าลดลงจาก 13.88-9.64 และ 10.22-7.20 MJ/kg water evaporated ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 และ 120°C ตามลำดับ ทำให้พลังงานรวมจำเพาะลดลง 30.52 และ 29.53% ตามลำดับ

ขณะที่การเพิ่มความเร็วอากาศที่อลมเข้าทำให้พลังงานรวมจำเพาะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 6.22 เช่นในกรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C และความเร็วอากาศที่อลมเข้า 20-23 m/s พลังงานรวมจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8.76-10.22 และ 6.42-7.20 MJ/kg water evaporated ที่ระยะยกที่อลมเป่า 4 และ 6 cm ตามลำดับ ทำให้พลังงานรวมจำเพาะเพิ่มขึ้น 12.14 และ 16.71% ตามลำดับ

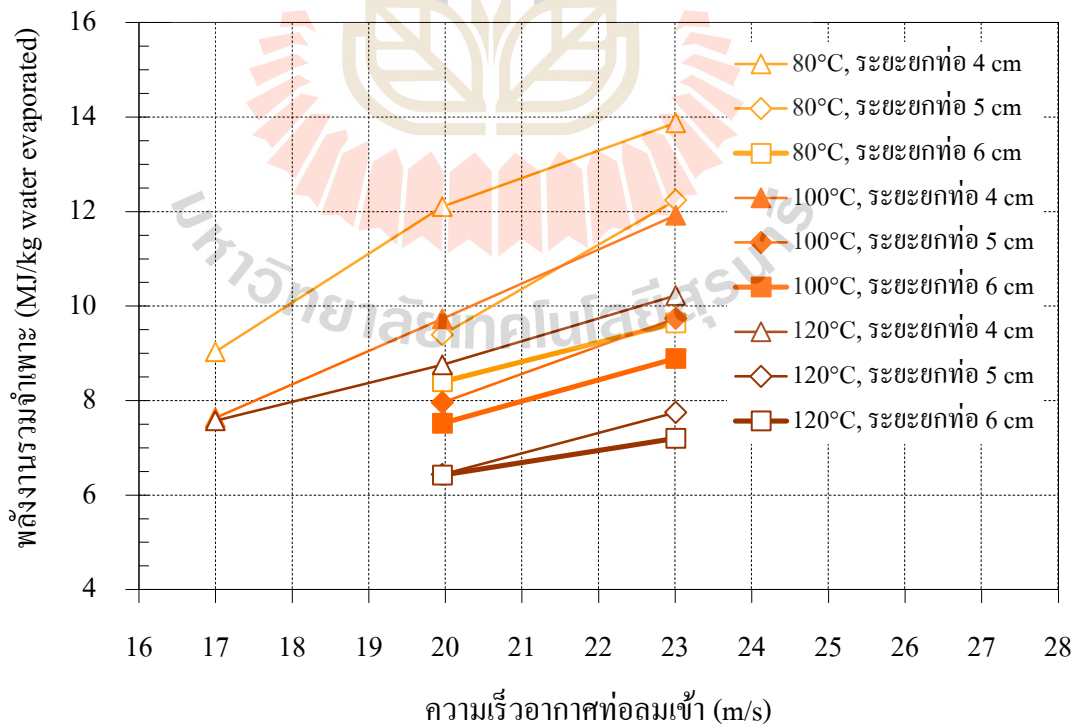
ผลการทดลองกลุ่มปัจจัยหลักแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขขอบแห้งที่มีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะต่ำที่สุดคือใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C, ความเร็วอากาศที่อลมเข้า 20 m/s และระยะยกที่อลมเป่า 6 cm เมื่อใช้ตะแกรงหว่งข้าว 11 ชั้นและข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 น้ำหนัก 20 kg เพื่อแสดงผลของปัจจัยหลักที่มีต่อพลังงานรวมจำเพาะได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงนำเสนอการเปลี่ยนแปลงของพลังงานรวมจำเพาะเนื่องจากการปรับปัจจัยหลัก ดังแสดงในรูปที่ 6.23 โดยใช้เงื่อนไขขอบแห้งเริ่มต้นคืออุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C, ความเร็วอากาศที่อลมเข้า 17 m/s, ระยะยกที่อลมเป่า 4 m/s พบว่าการเพิ่มความเร็วอากาศที่อลมเข้าจาก 17-20 m/s ทำให้พลังงานรวมจำเพาะเพิ่มสูงขึ้นถึง 34.02% ขณะที่การเพิ่มระยะยกที่อลมเป่าจาก 4-6 cm และอุณหภูมิอากาศอบแห้งจาก 80-120°C สามารถลดพลังงานรวมจำเพาะได้ถึง 30.62% และ 23.53% ตามลำดับ

6.1.2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสิ้นเปลืองพลังงานกับอัตราอบแห้ง

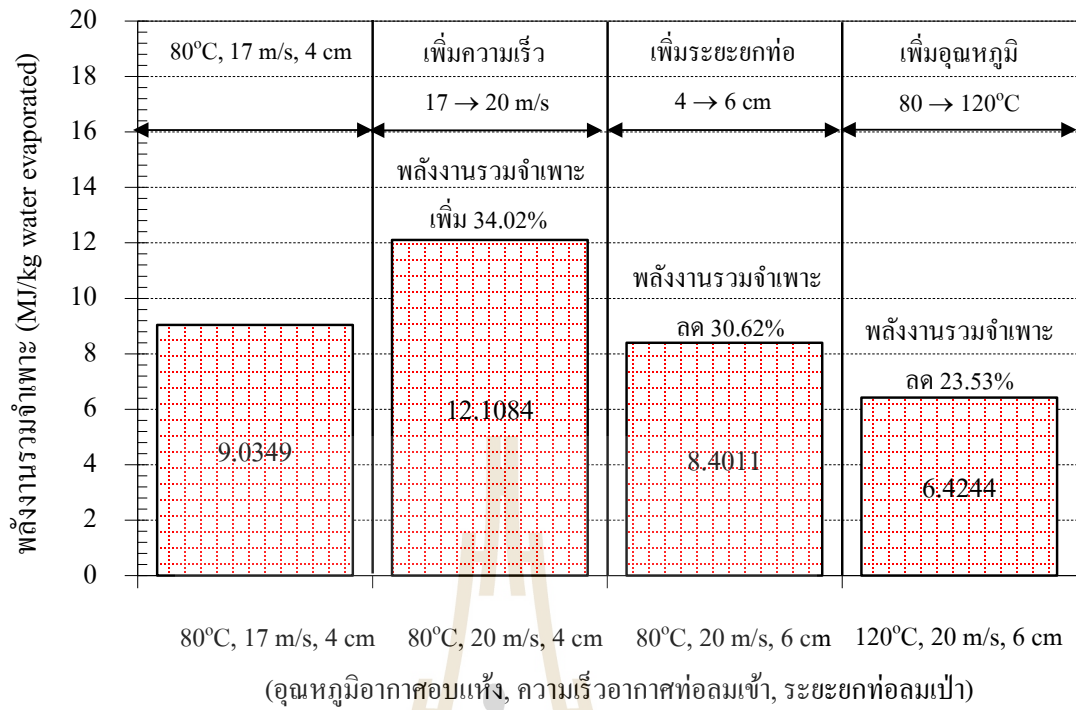
เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในอุดมคติคือเครื่องอบแห้งที่มีอัตราอบแห้งสูง ใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำ และข้าวเปลือกมีคุณภาพภายหลังการขัดสีสูง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานป้อนรวมจำเพาะ พลังงานสูญเสียรวมจำเพาะ และพลังงานรวมจำเพาะที่มีต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ยจึงทำการพล็อตข้อมูลดังกล่าวในรูปที่ 6.24-6.26 ตามลำดับ (เส้นทึบและเส้นประแสดงความเร็วอากาศที่อลมเข้า 20 และ 23 m/s ตามลำดับ) พบว่าพลังงานป้อนรวมจำเพาะ พลังงานสูญเสียรวมจำเพาะ และพลังงานรวมจำเพาะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิอากาศอบแห้งและระยะยกที่อลมเป่าที่สูงขึ้นทำให้อัตราอบแห้งสูงขึ้นและการใช้พลังงานลดลง ขณะที่ความเร็วอากาศที่อลมเข้าที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราอบแห้งสูงขึ้นแต่การใช้พลังงานกลับเพิ่มสูงขึ้น



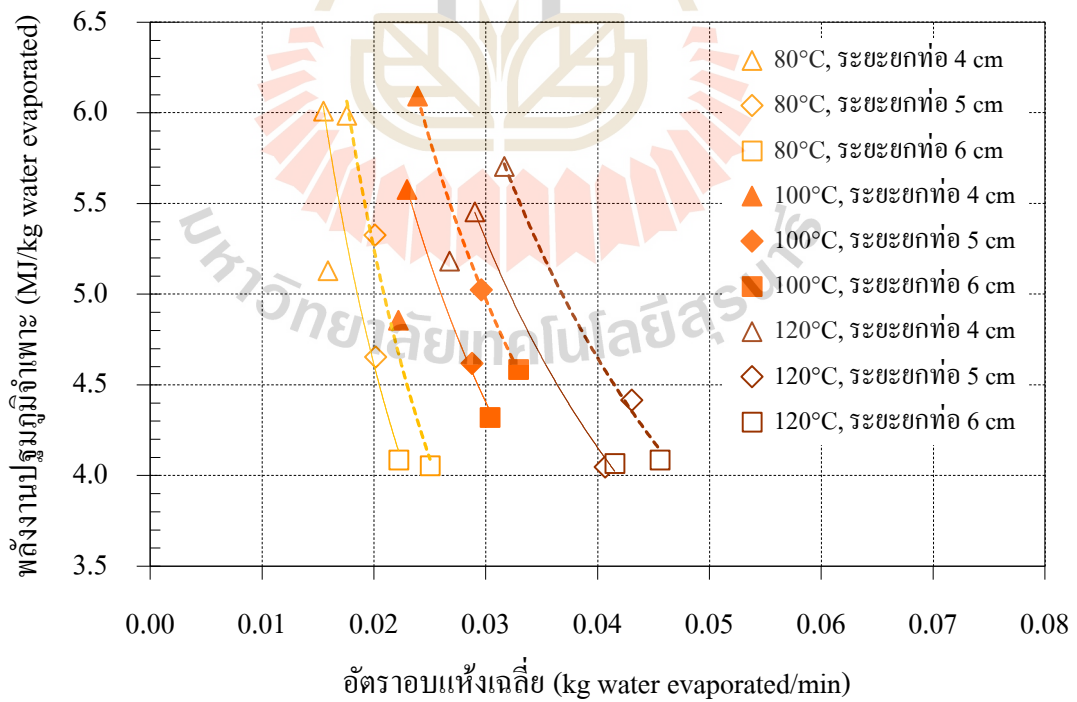
รูปที่ 6.21 ผลของระยะชกที่อลมเป่าต่อพลังงานรวมจำเพาะ



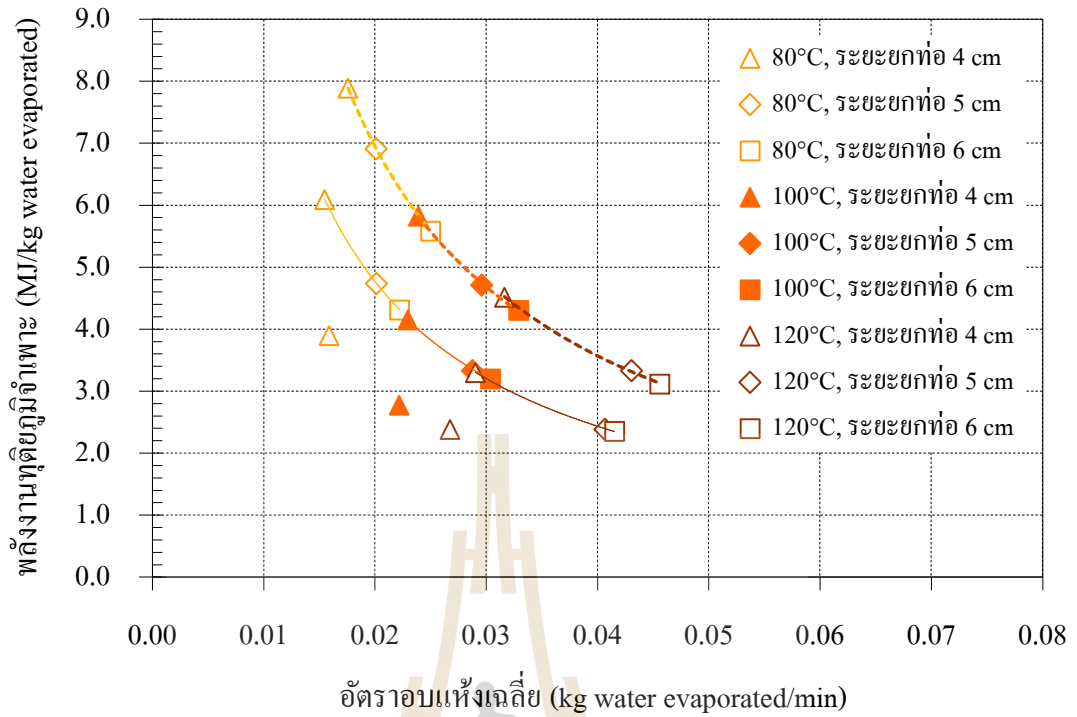
รูปที่ 6.22 ผลของความเร็วอากาศที่อลมเข้าต่อพลังงานรวมจำเพาะ



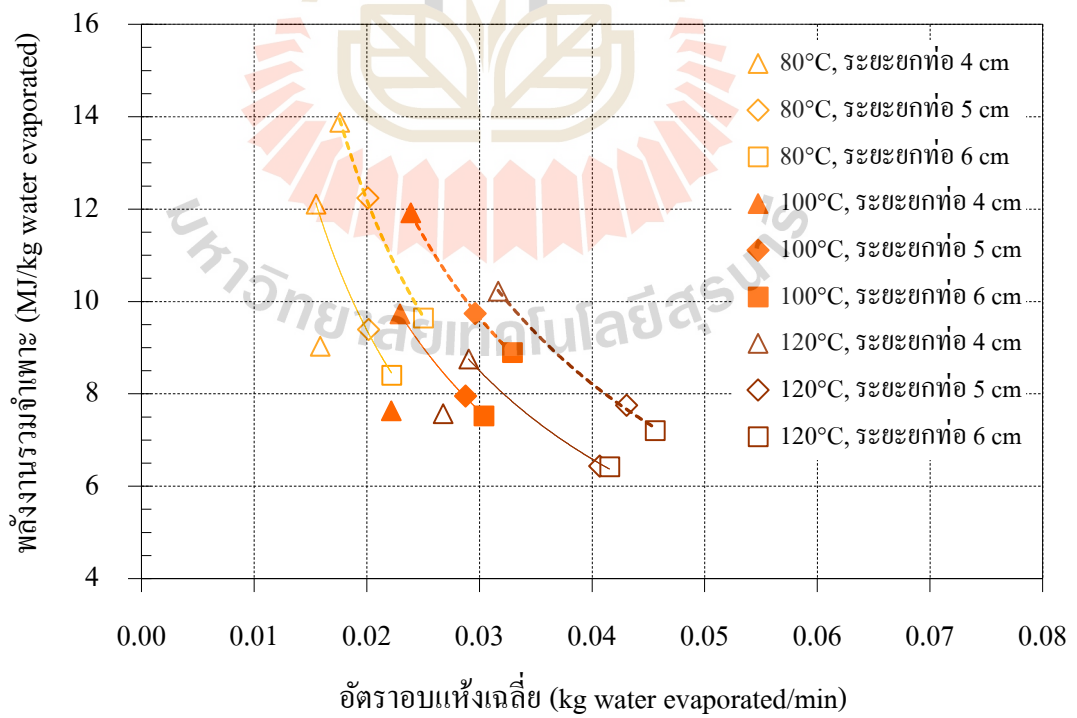
รูปที่ 6.23 ผลของอุณหภูมิ ความเร็วอากาศที่ลมเข้า และระยะยกที่ลมเป่าต่อพลังงานรวมจำเพาะ



รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราอบแห้งเฉลี่ยกับพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ



รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งเฉลี่ยกับพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ



รูปที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งเฉลี่ยกับพลังงานรวมจำเพาะ

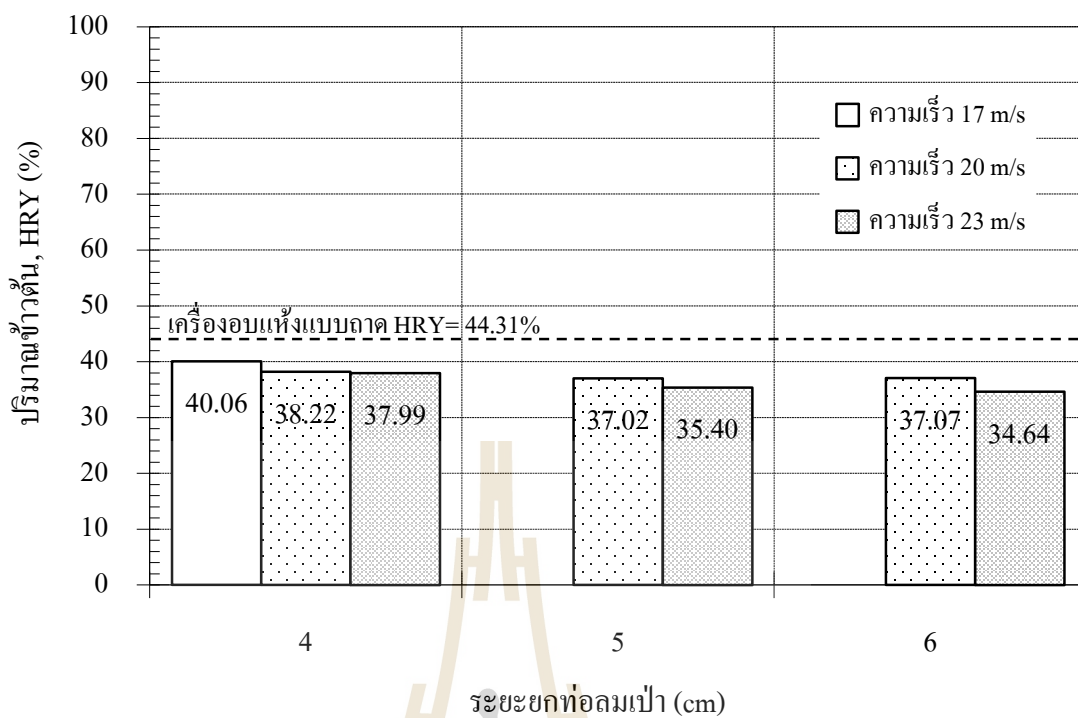
นอกจากนี้จากรูปที่ 6.24 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งแม้จะเพิ่มอัตราอบแห้งได้อย่างชัดเจน แต่การเลือกใช้ค่าความเร็วอากาศที่ต่ำที่สุด ที่ข้าวเปลือกยังสามารถเคลื่อนที่ในเครื่องอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพได้ ณ.ระยะยกที่อลมเป่าที่กำหนด คือเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาเพื่อให้การใช้พลังงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น พลังงานรวมจำเพาะจึงลดลงอย่างชัดเจน และมีอัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงขึ้น ขณะที่รูปที่ 6.25 แสดงให้เห็นว่าอัตราอบแห้งและพลังงานทุติยภูมิจำเพาะมีความสัมพันธ์กับความเร็วอากาศที่อลมเป่าอย่างชัดเจน เมื่อวิเคราะห์รูปที่ 6.26 พบแนวโน้มการเพิ่มอัตราอบแห้งและลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งมากกว่า 120°C โดยใช้ระยะยกที่อลมเป่า 6 cm และความเร็วที่อลมเป่า 20 m/s

6.1.3 คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหวง

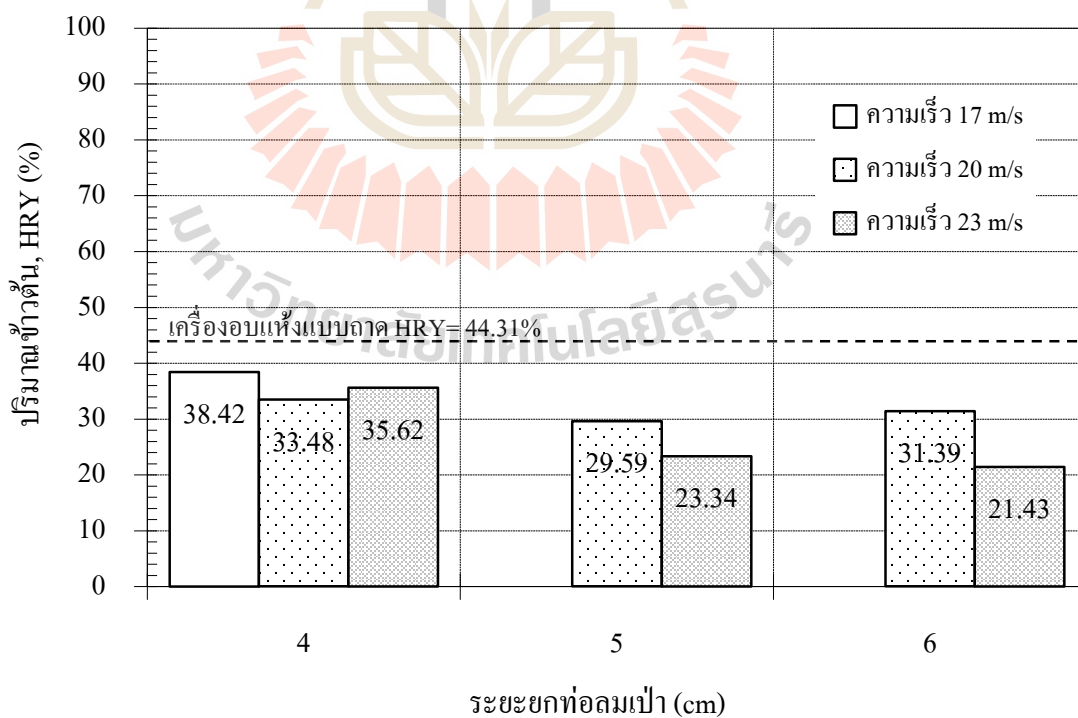
ในการศึกษานี้จะพิจารณาลักษณะทางกายภาพเพื่อบ่งบอกถึงคุณภาพข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้ง ซึ่งลักษณะทางกายภาพที่พิจารณาคือ ปริมาณข้าวต้น, ค่าความขาวและความเหลืองของข้าวสารที่ได้หลังการขัดสี ดังที่นิยามและแสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ก.4 โดยวิเคราะห์ปริมาณข้าวต้นในรูปร้อยละข้าวต้น (head rice yield, %HR Y) และร้อยละข้าวต้นสัมพัทธ์ (relative head rice yield, %RHR Y) โดยวิเคราะห์ค่าความขาวและค่าความเหลืองในรูปดัชนีความขาว (whiteness index, WI), และดัชนีความเหลือง (yellowness index, YI) ตามลำดับ

6.1.3.1 ผลกระทบปัจจัยหลักต่อปริมาณข้าวต้นหลังการอบแห้ง

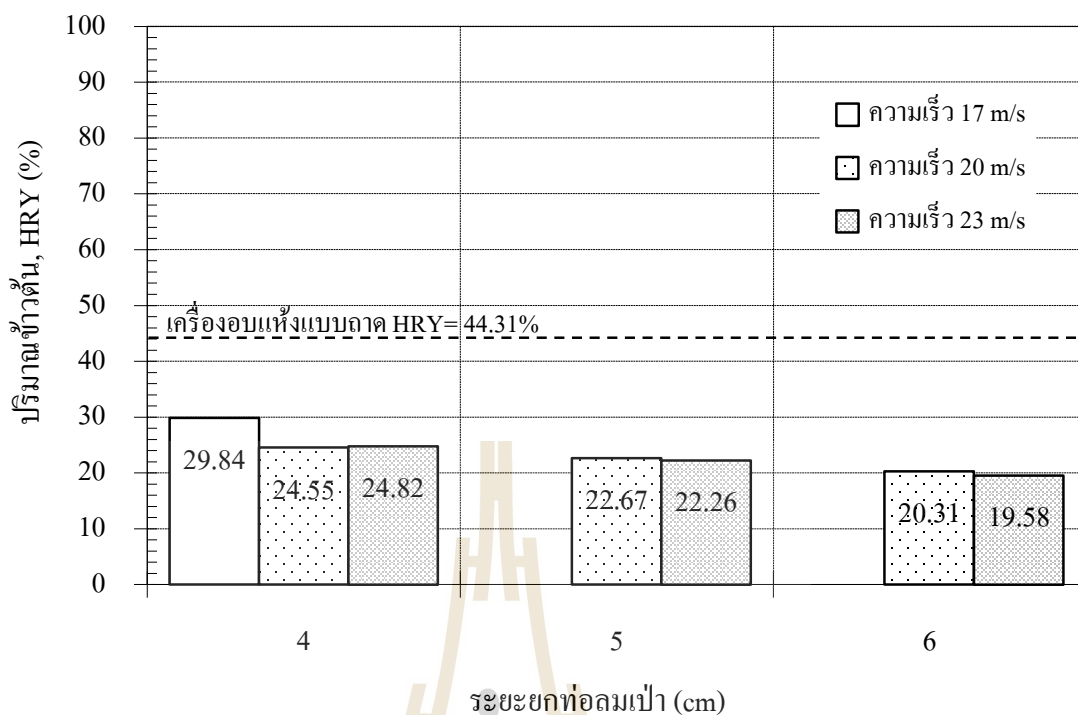
ปริมาณข้าวต้นที่ความชื้นข้าวเปลือกประมาณ 14% w.b. เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง $80\text{-}120^{\circ}\text{C}$ แสดงในรูปที่ 6.27-6.29 จากรูปแสดงให้เห็นว่า ปริมาณข้าวต้นมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วอากาศที่อลมเป่าและระยะยกที่อลมเป่าก็ส่งผลให้ปริมาณข้าวต้นลดลงเช่นกัน เหตุเพราะการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความเร็วอากาศที่อลมเป่า และระยะยกที่อลมเป่า ทำให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ดังอธิบายในหัวข้อ 6.1.1.2-6.1.1.4 ดังนั้นขณะอบแห้ง ความชันความชื้นภายในเมล็ด (moisture content gradient) จึงมีค่าสูง ส่งผลค่าความเค้นกด (compressive stress) ที่แกนกลางเมล็ดและค่าความเค้นดึง (tensile stress) ที่ผิวเมล็ดมากขึ้น นำไปสู่การเกิดรอยร้าวและการแตกหักของข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้ง และขณะขัดสี นอกจากนี้ภายหลังการอบแห้ง ความชื้นภายในเมล็ดจะเกิดการแพร่กระจายอย่างรวดเร็วเนื่องจากความชันความชื้นที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง ซึ่งส่งผลให้เมล็ดเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดความเค้นดึงที่แกนกลางเมล็ดและความเค้นกดที่ผิวเมล็ด อันนำไปสู่รอยร้าวและการแตกหักของข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งและขณะขัดสีได้เช่นเดียวกัน (Li et al., 1999), (Poomsasad et al., 2002), (Aquerreta et al., 2006), (Dong et al., 2009)



รูปที่ 6.27 ปริมาณข้าวต้นที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b. เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C



รูปที่ 6.28 ปริมาณข้าวต้นที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b. เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C

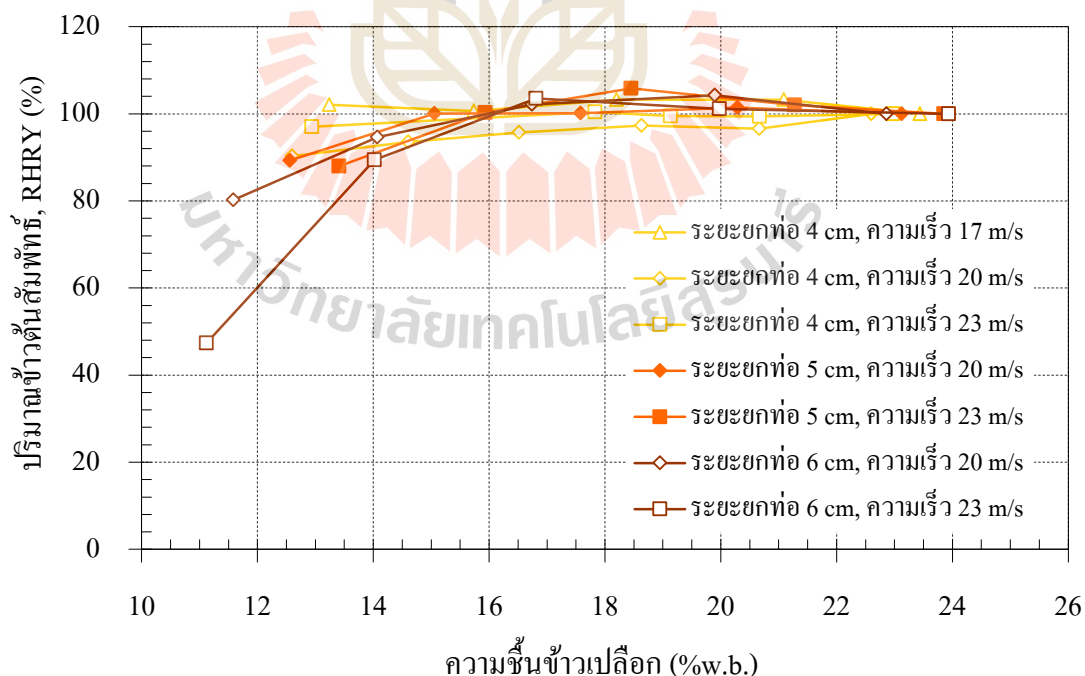


รูปที่ 6.29 ปริมาณข้าวต้นที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b. เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C

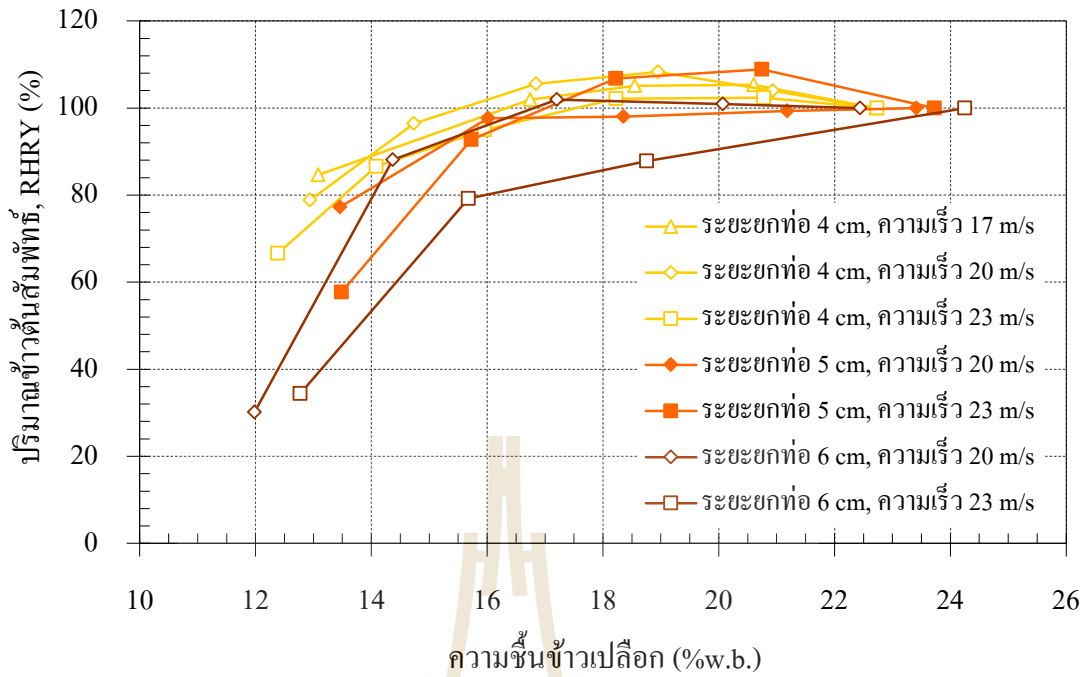
ได้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศแวดล้อม ให้เกิดการลดลงของความชื้นภายในข้าวเปลือกอย่างค่อยเป็นค่อยไป เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดเนื่องจากการอบแห้ง อันจะทำให้ได้ปริมาณข้าวต้นสูงสุด เพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิงในการพิจารณาปริมาณข้าวต้นที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการใช้เครื่องอบแห้งแบบเป่าพัด-หล่นหว่ง โดยใช้เครื่องแห้งแบบถาดที่ใช้อากาศแวดล้อมอุณหภูมิประมาณ 30°C ความเร็วอากาศประมาณ 1 m/s ใช้เวลาลดความชื้นจาก 23.05 ถึง 13.50% w.b. เท่ากับ 48 h ได้ปริมาณข้าวต้น 44.31% ดังแสดงในรูปที่ 6.27-6.29 ขณะที่ปริมาณข้าวต้นที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบเป่าพัด-หล่นหว่งมีค่าอยู่ในช่วง 19.58-40.06% จะเห็นว่าปริมาณข้าวต้นที่ได้มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างอ้างอิงเนื่องจากผลของการอบแห้ง

กรณีที่ได้ปริมาณข้าวต้นสูงสุดคือใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C, ความเร็วอากาศท่อลมเข้า 17 m/s และระยะยกท่อลมเป่า 4 cm เมื่อใช้ตะแกรงหว่งข้าว 11 ชั้นและข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 น้ำหนัก 20 kg ซึ่งก็คือกรณีที่มีอัตราอบแห้งเฉลี่ยต่ำที่สุด โดยได้ปริมาณข้าวต้น 40.06% ลดลงจากตัวอย่างอ้างอิง 9.59% ขณะที่กรณีที่ได้ปริมาณข้าวต้นต่ำสุดคือใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C, ความเร็วอากาศท่อลมเข้า 23 m/s และระยะยกท่อลมเป่า 6 cm เมื่อใช้ตะแกรงหว่งข้าว 11 ชั้นและข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 น้ำหนัก 20 kg ซึ่งก็คือกรณีที่มีอัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงที่สุด โดยได้ปริมาณข้าวต้น 19.58% ลดลงจากตัวอย่างอ้างอิง 55.81%

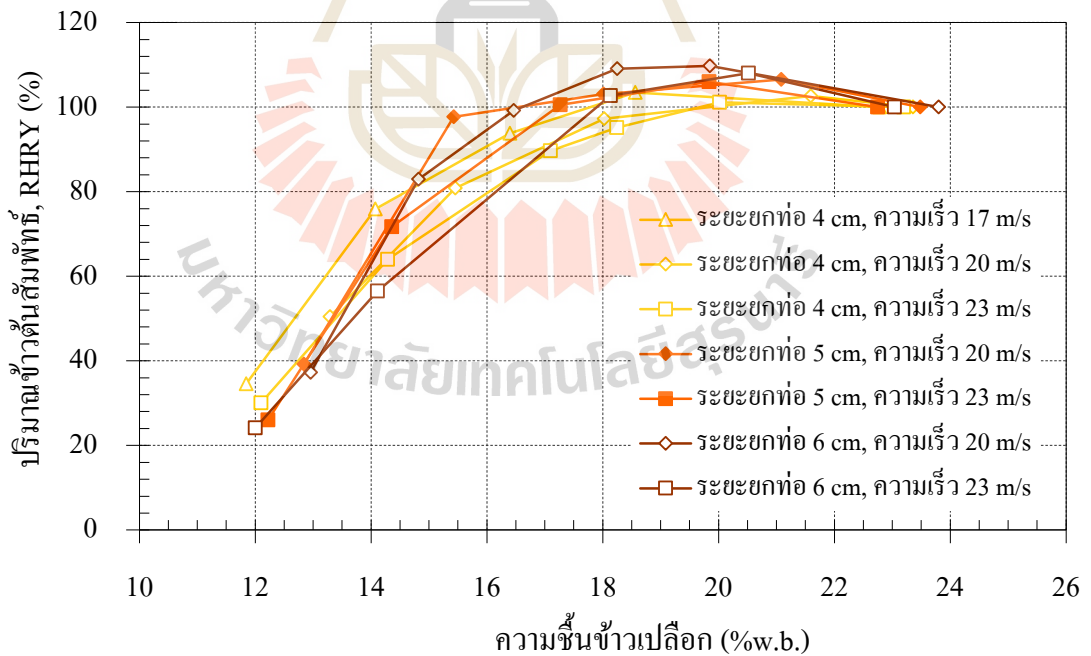
เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบปริมาณข้าวคั่วของแต่ละการทดลองได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น จึงนำเสนอปริมาณข้าวคั่วในรูปแบบปริมาณข้าวคั่วสัมพัทธ์เทียบกับความชื้นของข้าวเปลือกขณะที่เก็บตัวอย่างจากเครื่องอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 6.30-6.32 พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง (ช่วงความชื้นข้าวเปลือกประมาณ 20-24% w.b.) ปริมาณข้าวคั่วสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 100% แสดงถึงปริมาณข้าวคั่วของตัวอย่างที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงที่มากกว่าตัวอย่างข้าวเปลือกที่อบแห้งในเตาอบด้วยอุณหภูมิ 35°C นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณข้าวคั่วสัมพัทธ์มากกว่า ปริมาณข้าวคั่วเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมล็ดแป้งบางส่วนภายในข้าวเปลือกเปลี่ยนสภาพเป็นเจล กระบวนการเกิดเจลบางส่วน (partial gelatinization) ช่วยเชื่อมรอยร้าวภายในเมล็ดที่เกิดขึ้นก่อนการอบแห้งและระหว่างการอบแห้ง ทำให้เมล็ดแข็งแรงมากขึ้น ปริมาณข้าวคั่วที่ได้จึงสูงขึ้น โดยอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อการเกิดเจลสำหรับข้าวเปลือกคือ 73-86°C และ 24-25% w.b. ตามลำดับ (Rordprapat et al., 2005) ดังนั้นในช่วงแรกของการอบแห้งที่ความชื้นข้าวเปลือกบริเวณชั้นวงรอบนอกยังมีค่าสูง ประกอบกับการอบแห้งด้วยอากาศอบแห้งอุณหภูมิและความเร็วสูงในท่อลมเป่าและท่อครอบ ทำให้ชั้นวงรอบนอกของเมล็ดมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงมีสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดเจลบางส่วน ปริมาณข้าวคั่วสัมพัทธ์จะเริ่มลดลงภายหลังจากความชื้นข้าวเปลือกต่ำกว่า 16 18 และ 20% w.b. ที่



รูปที่ 6.30 ปริมาณข้าวคั่วสัมพัทธ์ เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C



รูปที่ 6.31 ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C

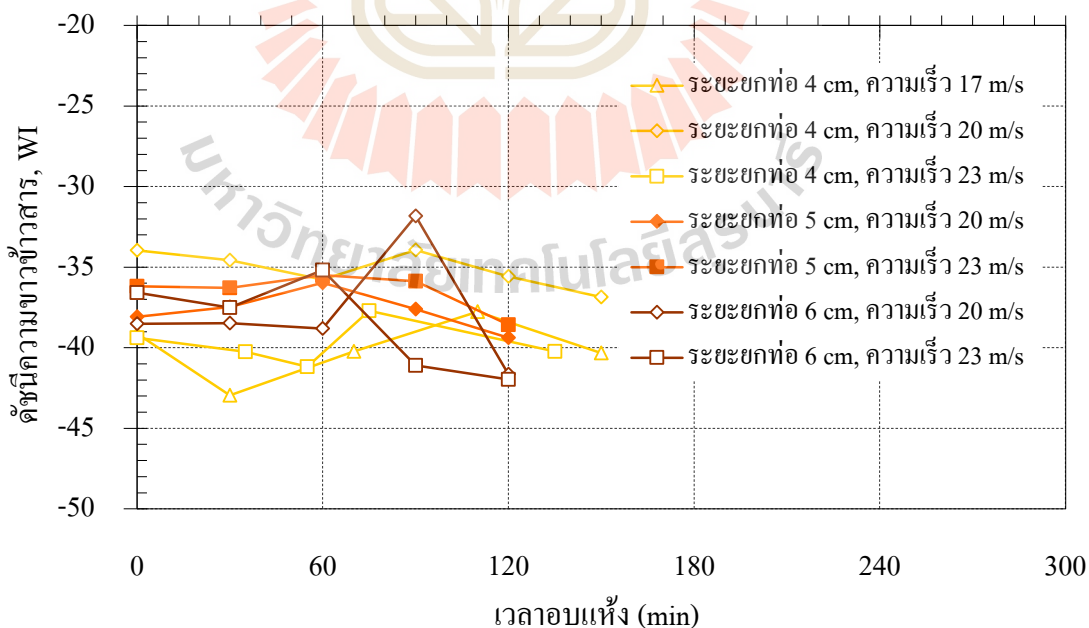


รูปที่ 6.32 ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C

อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C ตามลำดับ โดยปริมาณข้าวต้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ระยะยกท่อลมเป่าและความเร็วอากาศที่ลมเข้าที่สูงขึ้น เนื่องจากอัตราอบแห้งที่สูงขึ้น ดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้

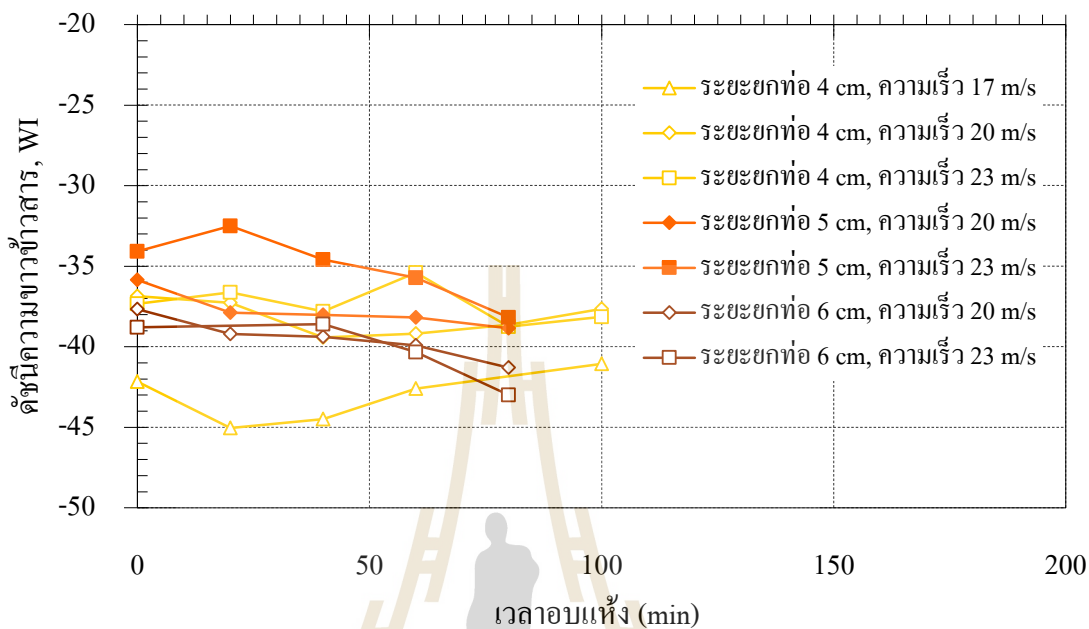
6.1.3.2 ผลกระทบปัจจัยหลักต่อดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองของข้าวสาร

ความขาว (whiteness) เกี่ยวกับตำแหน่งในปริภูมิสี (color space) ที่ซึ่งสีของวัตถุนิยามว่าเป็นสีขาว โดยระดับความขาว (degree of whiteness) วัดจากระยะห่างระหว่างสีวัตถุกับความขาวสมบูรณ์ (perfect white) โดยการศึกษาที่ใช้ดัชนีความขาวตามมาตรฐานของ ASTM E313 รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.4 ค่าดัชนีความขาวของข้าวสารตลอดการอบแห้งเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C แสดงในรูปที่ 6.33-6.35 พบว่าค่าดัชนีความขาวที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง -28.97 ถึง -45.83 ค่าดัชนีความขาวคิดลบในกรณีนี้หมายถึงตำแหน่งสีข้าวสารบนปริภูมิสีอยู่บริเวณโทนสีเหลือง โดยสามารถอธิบายได้ด้วยการวิเคราะห์สมการ (ก.22) ประกอบกับรูปที่ ก.1 ค่าดัชนีความขาวที่มีค่าลบมากกว่าแสดงถึงตำแหน่งสีข้าวสารบนปริภูมิสีมีระยะห่างจากความขาวสมบูรณ์มากกว่า ค่าดัชนีความขาวมีการเปลี่ยนแปลงตลอดการทดลอง มีความแปรปรวนสูง และไม่แสดงแนวโน้มที่ชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาโดยภาพรวม ดังแสดงในรูปที่ 6.36 ซึ่งแสดงเส้นแนวโน้มของค่าดัชนีความขาวแบ่งตามอุณหภูมิอากาศอบแห้ง พบว่าค่าดัชนีความขาวมีแนวโน้มลดลงเมื่อความชื้นข้าวเปลือกลดลงและอุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น

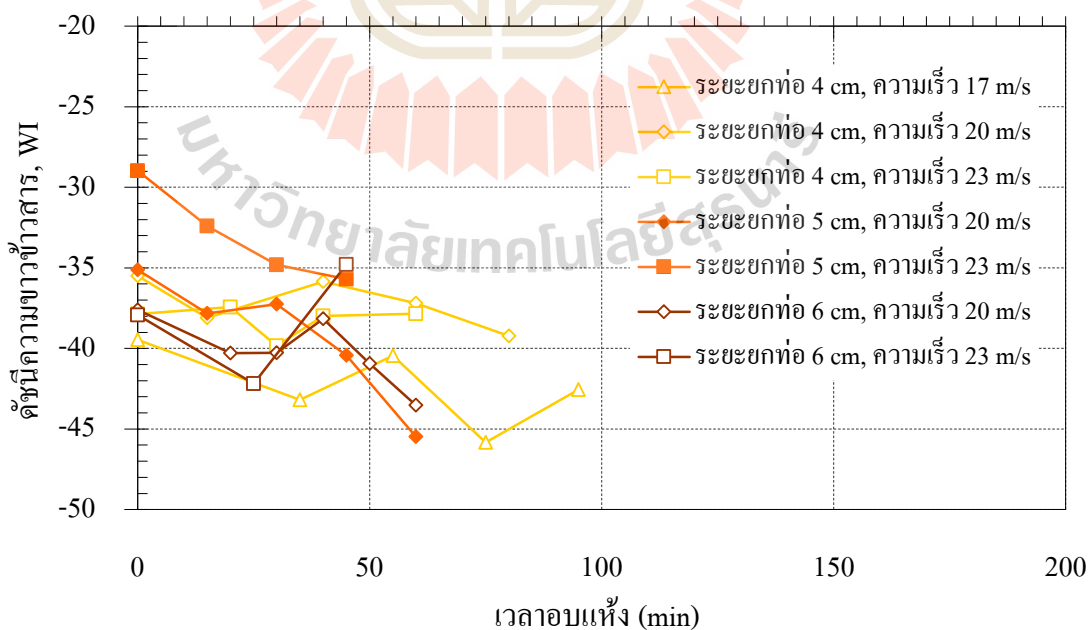


รูปที่ 6.33 ดัชนีความขาวข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C

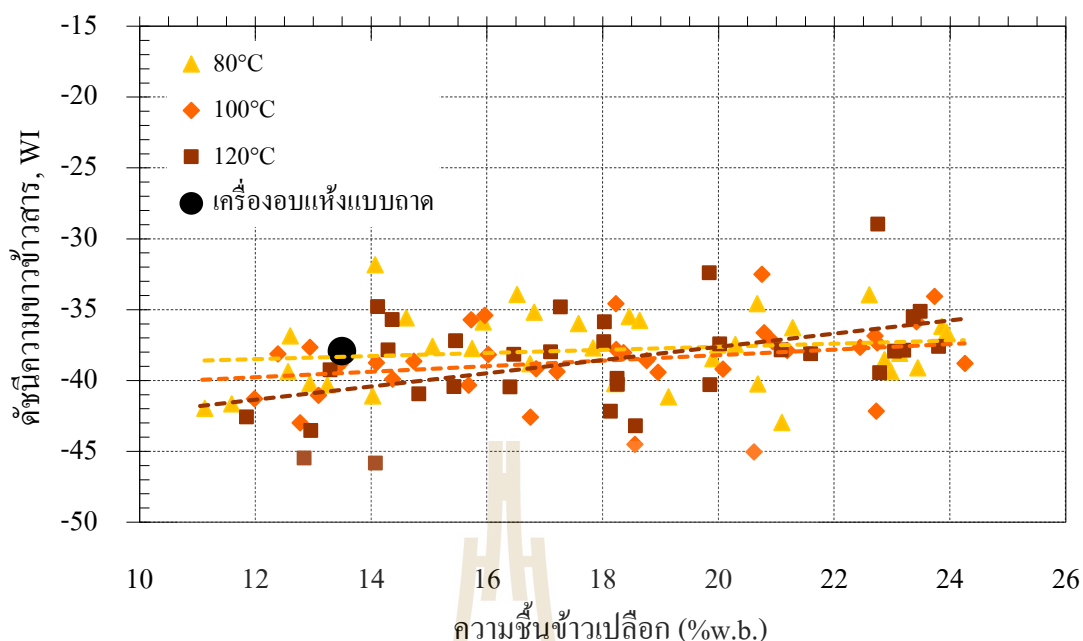
และพบว่าค่าดัชนีความขาวของข้าวตัวอย่างอ้างอิงเท่ากับ -37.94 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ประมาณจากเส้นแนวโน้มของการทดลองที่อุณหภูมิอากาศสอบแห้ง 80°C



รูปที่ 6.34 ดัชนีความขาวข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศสอบแห้ง 100°C



รูปที่ 6.35 ดัชนีความขาวข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศสอบแห้ง 120°C

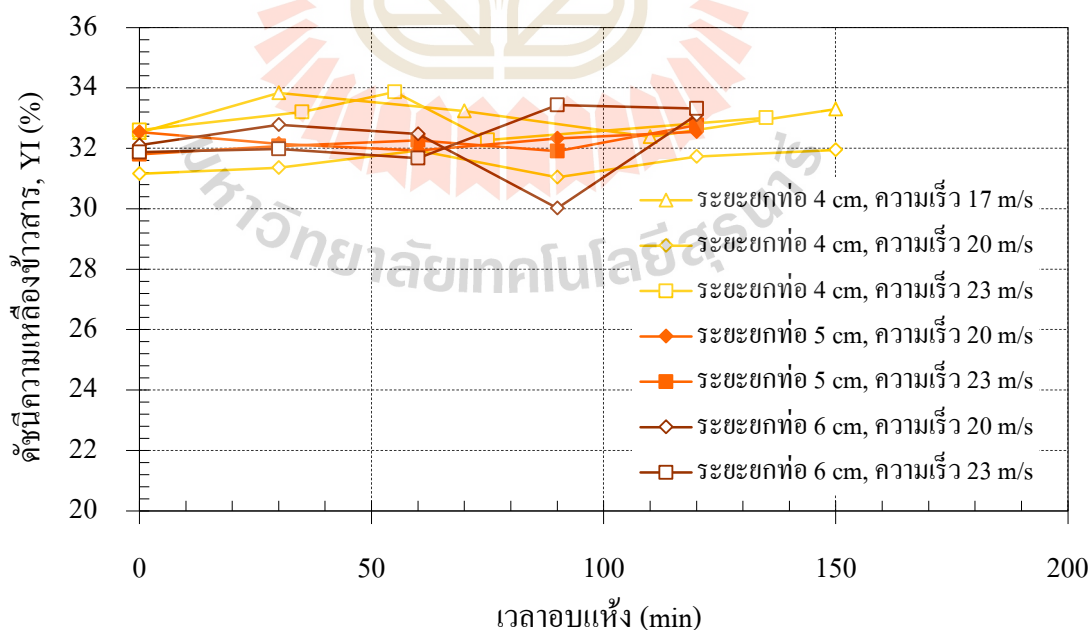


รูปที่ 6.36 ดัชนีความขาวข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C

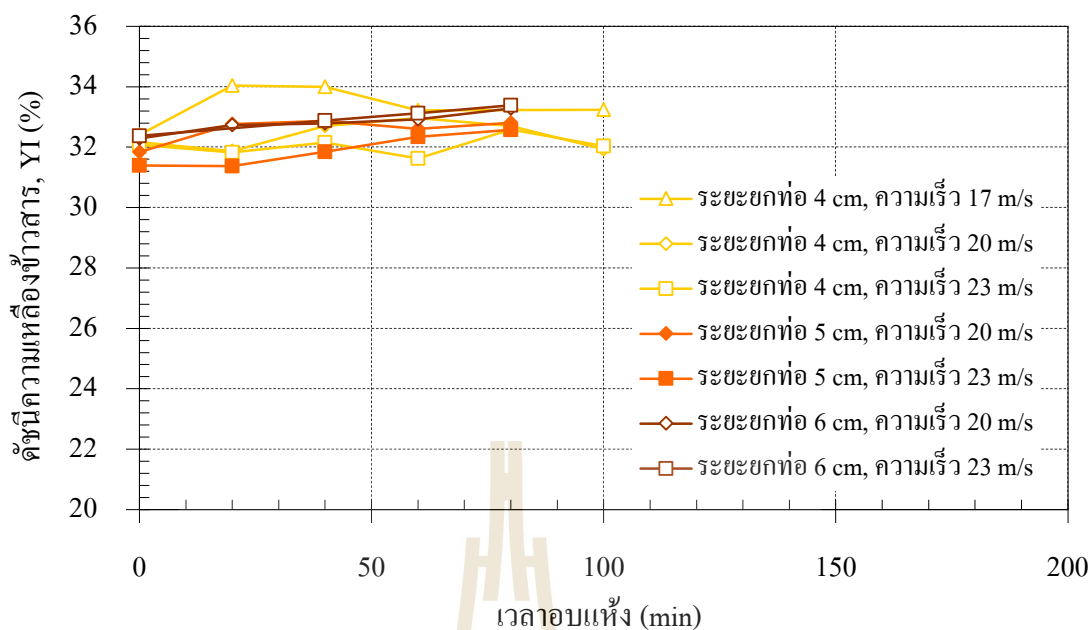
เนื่องจากค่าดัชนีความขาวแสดงถึงความขาวของข้าวสารที่มีสีเหลืองเป็นองค์ประกอบ และความเหลืองมักใช้ในการบ่งชี้เกี่ยวกับการเสื่อมคุณภาพของวัตถุที่สังเกตได้จากสีที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการสัมผัสแสง สารเคมีหรือปฏิกิริยาทางเคมี จึงคำนวณดัชนีความเหลืองของข้าวสารตามมาตรฐานของ ASTM E313 รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.4 ค่าดัชนีความเหลืองของข้าวสารตลอดการอบแห้ง เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C แสดงในรูปที่ 6.37-6.39 พบว่าค่าดัชนีความเหลืองที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 29.80 ถึง 34.56% ค่าดัชนีความเหลืองมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดการทดลอง มีความแปรปรวน และไม่แสดงแนวโน้มที่ชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาโดยภาพรวม ดังแสดงในรูปที่ 6.40 ซึ่งแสดงเส้นแนวโน้มของค่าดัชนีความเหลืองแบ่งตามอุณหภูมิอากาศอบแห้ง พบว่าค่าดัชนีความเหลืองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นข้าวเปลือกลดลงและอุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น และพบว่าค่าดัชนีความเหลืองของข้าวตัวอย่างอ้างอิงเท่ากับ -31.73 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่ประมาณจากเส้นแนวโน้มของการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C อย่างชัดเจน เนื่องจากข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นแห้งจะได้รับการสัมผัสอากาศร้อนอุณหภูมิสูงในท่อลมเป่าและท่อครอบ อีกทั้งในถังพักก็ยังมีอากาศร้อนที่ไหลรั่วจากท่อลมเป่าไหลผ่านตลอดเวลา จึงทำให้เมล็ดมีอุณหภูมิสูงกว่าการอบแห้งของตัวอย่างอ้างอิงที่ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งในเตาอบเพียง 30°C ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (nonenzymic browning reaction) จึงเกิดขึ้น เพราะปฏิกิริยาดังกล่าวต้องการ

ความร้อนเพื่อทำให้พันธะ hydroxyl group ระหว่างโมเลกุลภายในน้ำตาลหลุดออกจากกันกลายเป็น น้ำตาลโมเลกุลต่ำ และความร้อนจะทำให้พันธะ hydroxyl group ภายในน้ำตาลโมเลกุลต่ำหลุดจาก กันเกิดเป็นสารประกอบคีโตน (ketone) ซึ่งจะทำให้ข้าวสารมีสีเหลือง (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540) ดังนั้นข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งด้วยความร้อนสูงเป็นระยะเวลานานจึงมักมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น ค่าความขาวที่วัดได้จึงต่ำลง และค่าความเหลืองที่วัดได้สูงขึ้น เช่นงานวิจัยอบแห้งข้าวเปลือกด้วย เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Tirawanichakul et al., 2004) และเครื่องอบแห้งแบบสเปาตีคเบด (จินดา พาณิชงอร, 2541) ซึ่งพบว่าการใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงเป็นระยะเวลานานจะทำให้ค่าความ ขาวของข้าวที่ผ่านเครื่องอบแห้งดังกล่าว ลดลงจากตัวอย่างอ้างอิงอย่างชัดเจน

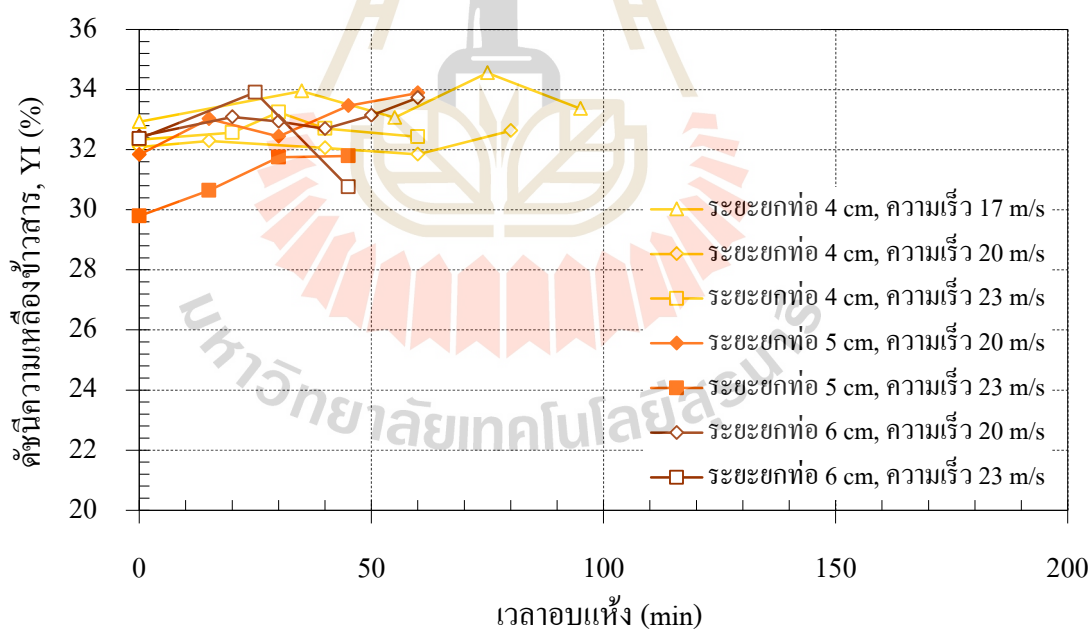
รูปที่ 6.41-6.42 แสดงผลของอุณหภูมิข้าวเปลือกที่มีต่อค่าดัชนีความขาว และความเหลืองของข้าวสารที่เปลี่ยนไป พบว่าอุณหภูมิข้าวเปลือกสูงสุดที่สามารถวัดได้ขณะ อบแห้งแสดงแนวโน้มการลดลงของค่าดัชนีความขาวและการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความเหลืองอย่าง ชัดเจน เมื่อข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้น และมีความสอดคล้องกับค่าดัชนีความขาวและความเหลือง ของตัวอย่างอ้างอิงที่อุณหภูมิข้าวเปลือกเท่ากัน แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวสารที่ สอดคล้องกับทฤษฎีที่อธิบายก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าเครื่องวัดสีจะสามารถระบุความ เปลี่ยนแปลงของสีข้าวสารในระดับที่พบได้ แต่ความเปลี่ยนแปลงในระดับที่พบยังไม่สามารถระบุ ด้วยการวิเคราะห์สเปกตรัมทางตาในการมองและสังเกตได้



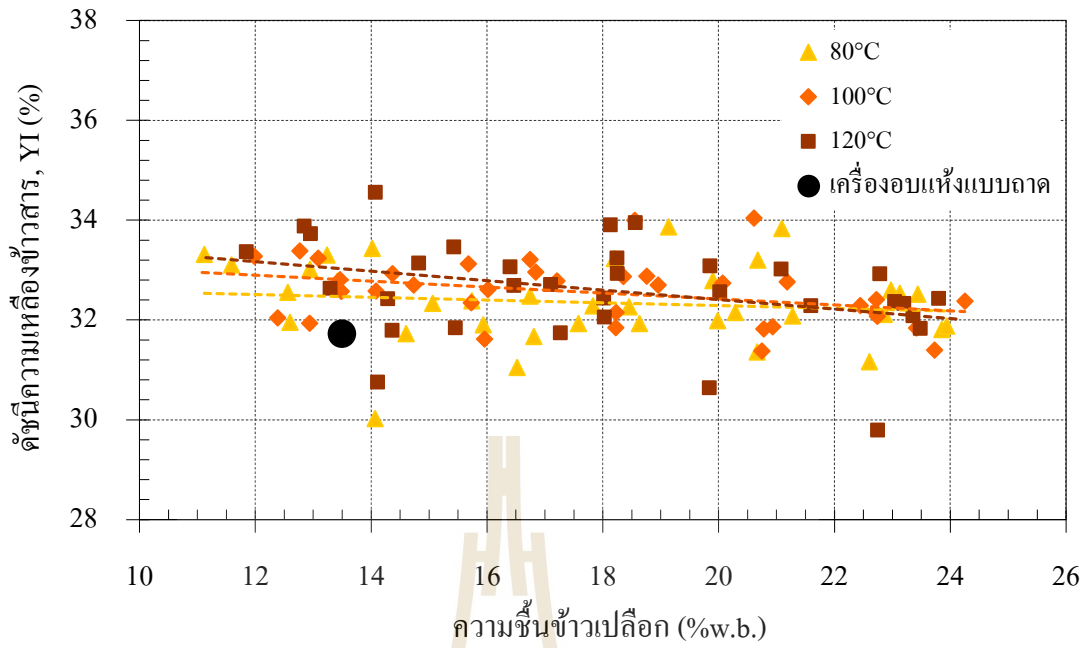
รูปที่ 6.37 ดัชนีความเหลืองข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C



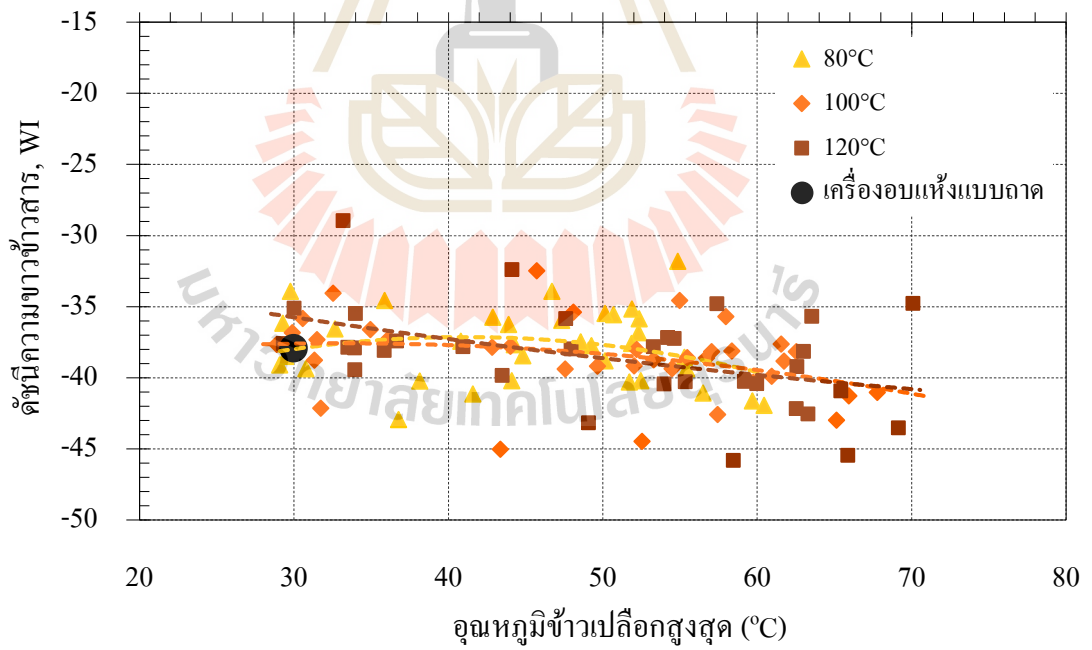
รูปที่ 6.38 คัชนีความเหลืองข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C



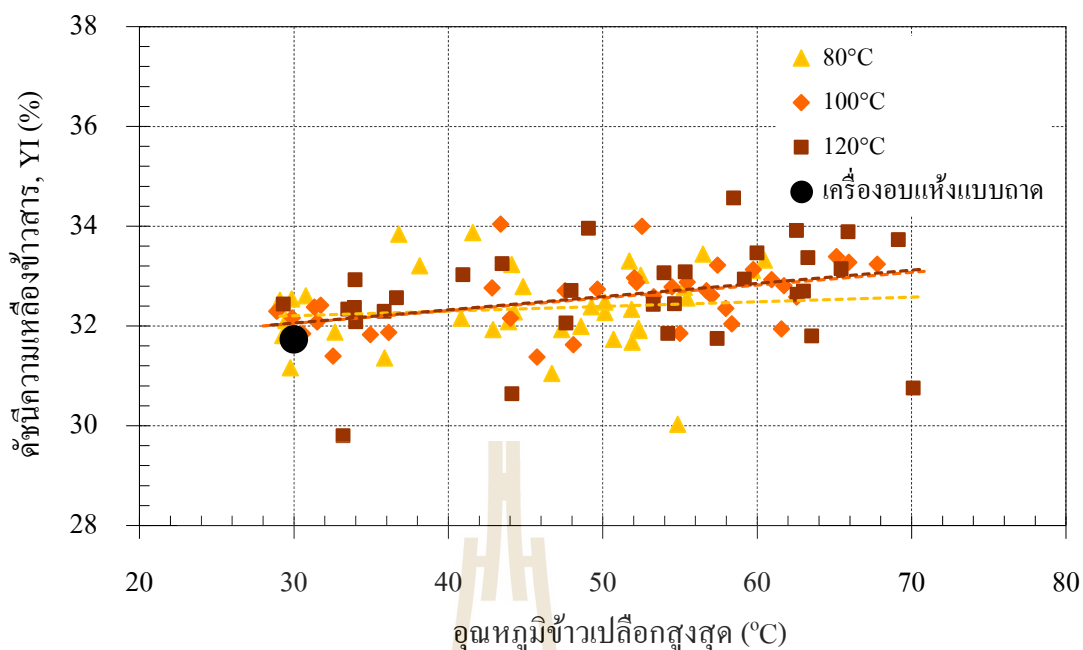
รูปที่ 6.39 คัชนีความเหลืองข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C



รูปที่ 6.40 ดัชนีความเหลืองข้าวสาร เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C



รูปที่ 6.41 ผลของอุณหภูมิข้าวเปลือกต่อดัชนีความขาวข้าวสาร



รูปที่ 6.42 ผลของอุณหภูมิข้าวเปลือกต่อดัชนีความเหลืองข้าวสาร

โดยสรุปแล้วเงื่อนไขอบแห้งที่ให้คุณภาพข้าวเปลือกทั้งด้านปริมาณข้าว ตัน ค่าดัชนีความขาวและความเหลืองที่ดี คือใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C, ความเร็วอากาศที่ลมเข้า 17 m/s และระยะยกที่ลมเป่า 4 cm เมื่อใช้ตะแกรงหว่งข้าว 11 ชั้น และข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 น้ำหนัก 20 kg

6.2 การทดสอบกลุ่มปัจจัยรอง

ทำการทดสอบปัจจัยรองดังต่อไปนี้ 1. มวลข้าวเปลือก (10 20 และ 30 kg) 2. จำนวน ตะแกรงหว่งข้าว (0 6 และ 11 ชั้น) และ 3. ชนิดพันธุ์ข้าว (ชัยนาท1 และ กข105) โดยใช้ชุดเงื่อนไข การอบแห้งจากผลการทดสอบปัจจัยหลัก (ตามหัวข้อ 6.1) ใน 3 กรณีคือ

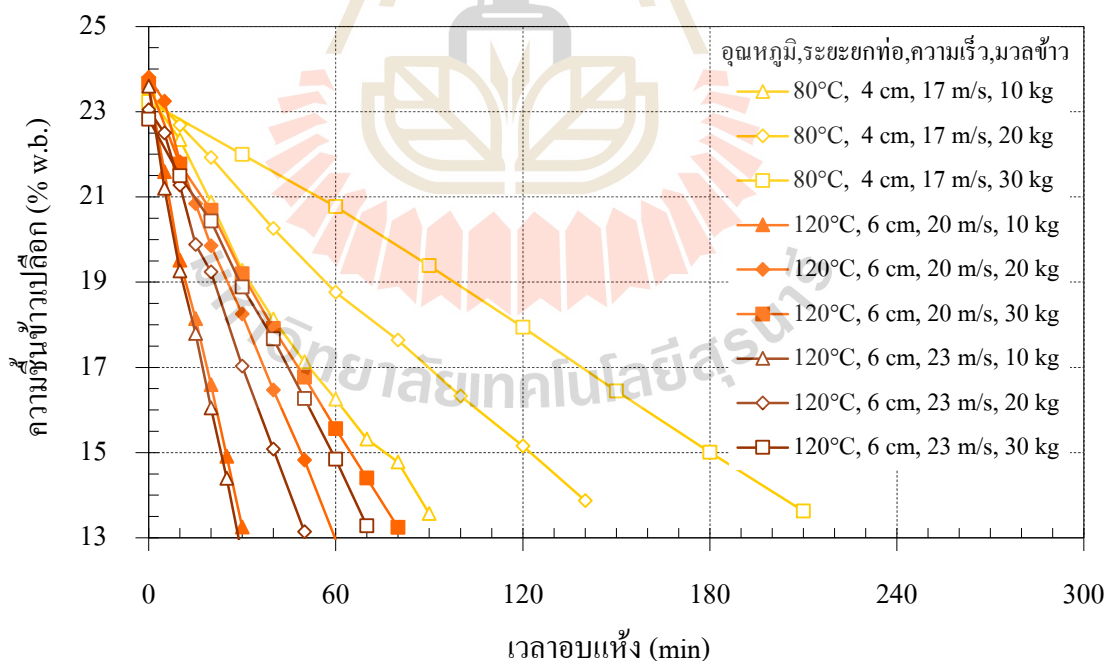
1. ชุดเงื่อนไขที่ให้อัตราการอบแห้งสูง เรียกว่า เงื่อนไข ก. (อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศที่ลมเข้า 23 m/s และระยะยกที่ลมเป่า 6 cm)
2. ชุดเงื่อนไขที่ใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำ เรียกว่า เงื่อนไข ข. (อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศที่ลมเข้า 20 m/s และระยะยกที่ลมเป่า 6 cm)
3. ชุดเงื่อนไขที่มีปริมาณข้าวต้นสูง เรียกว่า เงื่อนไข ค. (อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C ความเร็วอากาศที่ลมเข้า 17 m/s และระยะยกที่ลมเป่า 4 cm)

ทั้ง 3 กรณีเป็นชุดเงื่อนไขตั้งต้น แล้วทำการปรับปัจจัยรองกับชุดเงื่อนไขตั้งต้น โดยแยกศึกษาปัจจัยรองทีละปัจจัย รายละเอียดเงื่อนไขการทดสอบแสดงในหัวข้อ 5.2

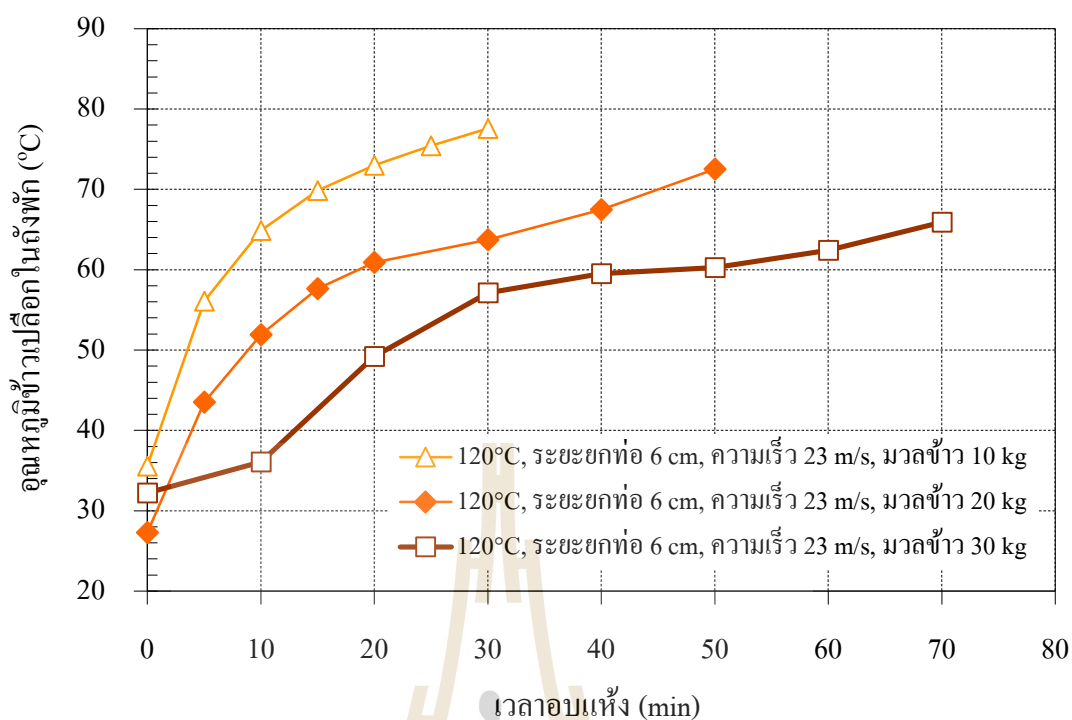
6.2.1 ผลของมวลข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าผ่าน-หล่นหน่วง

6.2.1.1 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก

ทดลองชุดเงื่อนไขอบแห้งตั้งต้นทั้ง 3 กรณี ด้วยการปรับมวลข้าวเปลือก 10, 20 และ 30 kg โดยติดตั้งตะแกรงหน่วงข้าว 11 ชั้น และใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 ผลการทดลองอบแห้งแสดงดังรูปที่ 6.43 โดยแกนนอนเป็นเวลาอบแห้งและแกนตั้งเป็นความชื้นข้าวเปลือก พบว่าลักษณะการลดความชื้นของข้าวเปลือกเป็นเส้นตรงในทุกกรณีศึกษา โดยมวลข้าวเปลือกที่ลดลงทำให้ข้าวเปลือกลดความชื้นได้รวดเร็วยิ่งขึ้น เนื่องจากระยะเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนตัวในถังพักลดลง ทำให้ความถี่ในการหมุนเวียนข้าวเปลือกเข้าสู่ท่อลมเป่าและท่อครอบมากขึ้น ในระยะเวลาอบแห้งเท่ากัน ดังนั้นข้าวเปลือกจึงได้สัมผัสอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงในท่อครอบและท่อลมเป่ามากขึ้น จึงสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้รวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้อุณหภูมิข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 6.44 ส่งผลให้อัตราการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิวข้าวเปลือกขณะที่ข้าวเปลือกเคลื่อนตัวในถังพักสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 6.43 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก



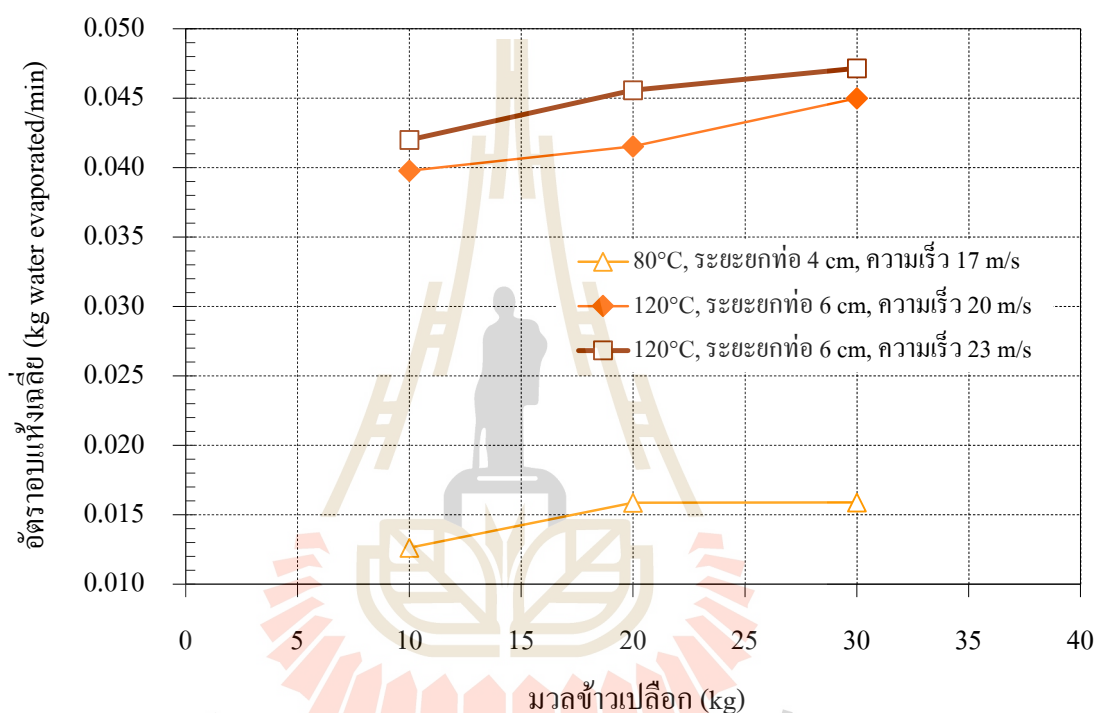
รูปที่ 6.44 ผลของมวลข้าวเปลือกต่ออุณหภูมิข้าวเปลือก ที่ระยะความสูง 45 cm จากพื้นถังพัก

6.2.1.2 ผลของมวลข้าวเปลือกต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย

เพื่อวิเคราะห์อัตราอบแห้งเฉลี่ย เมื่อมวลข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น จึงคำนวณอัตราอบแห้งเฉลี่ยด้วยสัดส่วนระหว่างมวลความชื้นภายในกองข้าวเปลือกที่ลดลงต่อระยะเวลาอบแห้ง ดังนำเสนอค่าในรูปที่ 6.45 พบว่าอัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อมวลข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มมวลข้าวเปลือก 10-30 kg อัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.0420-0.0472 0.0398-0.0450 และ 0.0126-0.0159 kg water evaporated/min ที่เงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และ เงื่อนไข ค. ตามลำดับ ทำให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 12.26 13.11 และ 25.82% ตามลำดับ

ในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหมุน การอบแห้งจะเกิดขึ้นในท่อลมเป่า, ท่อครอบและถังพักข้าว โดยในท่อลมเป่าและท่อครอบซึ่งอากาศอบแห้งมีอุณหภูมิ, ความเร็วและความพรุนในชั้นเมล็ดสูง ในส่วนนี้จึงมีอัตราอบแห้งสูง ทำให้อุณหภูมิเมล็ดสูงขึ้นและเกิดความชื้นความชื้นภายในเมล็ด แต่เนื่องจากในส่วนนี้ข้าวเปลือกเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจึงมีระยะเวลาอบแห้งสั้น ปริมาณความชื้นที่ระเหยสู่อากาศอบแห้งในส่วนนี้จึงไม่มาก ขณะที่ในถังพักข้าว มีอากาศอบแห้งจากท่อลมเข้าส่วนหนึ่งไหลเข้าสู่ถังพัก (air leakage) โดยไหลส่วนทางการเคลื่อนที่ลงของเมล็ดขึ้นสู่ผิวของกองเมล็ด อากาศอบแห้งส่วนนี้มีอุณหภูมิสูง แต่มีปริมาตรน้อย และชั้นเมล็ดในถังพักมีความหนาแน่นสูง ด้วยเหตุนี้บริเวณส่วนใหญ่ในถังพัก ข้าวเปลือกจะระเหยความชื้นด้วย

พลังงานความร้อนภายในเมล็ด โดยใช้อากาศอบแห้งที่ไหลผ่านเป็นตัวกลางในการขนถ่ายความชื้นออกจากกองเมล็ดในถังพัก ในส่วนถังพักจึงมีอัตราอบแห้งต่ำ ทำให้ความชื้นความชื้นภายในเมล็ดลดลงและเมล็ดมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากการระเหยความชื้น (evaporative cooling) แม้ว่าในถังพักมีอัตราอบแห้งต่ำแต่เนื่องจากระยะเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนตัวในถังพักนานกว่าในส่วนท่อลมเป่าและท่อครอบมาก จึงทำให้ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากกองข้าวเปลือกมีสัดส่วนมากเมื่อเทียบกับในส่วนท่อลมเป่าและท่อครอบ ซึ่งได้นำเสนออย่างละเอียดในหัวข้อ 7.6



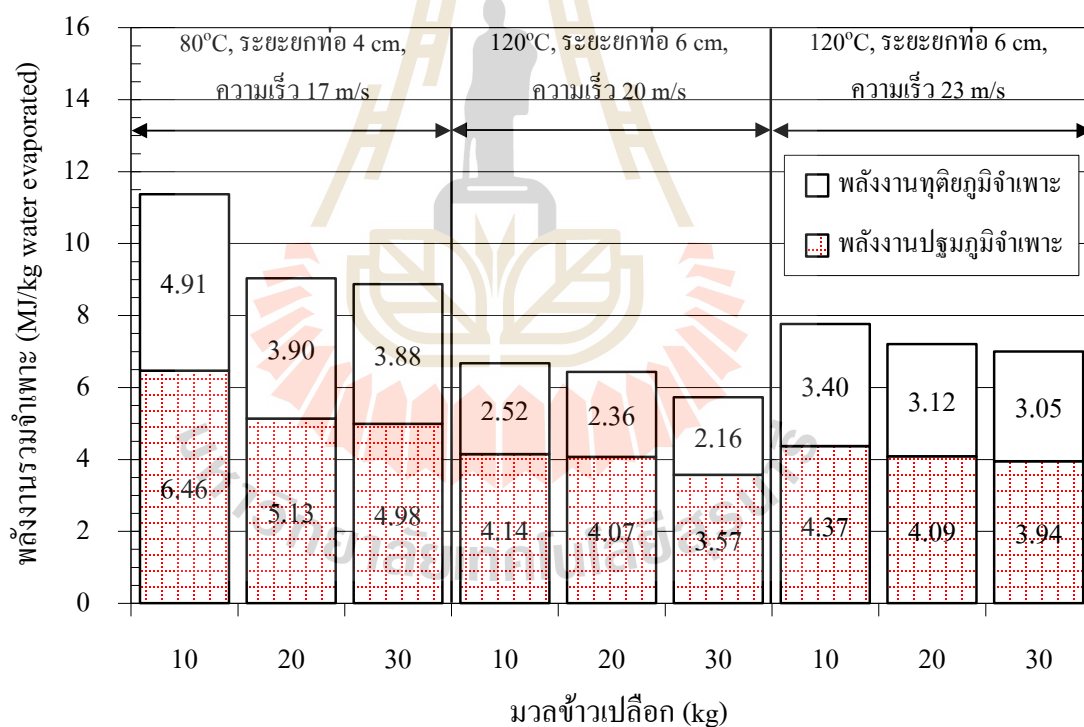
รูปที่ 6.45 ผลของมวลข้าวเปลือกต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย

การเพิ่มมวลข้าวเปลือกทำให้ความสูงของชั้นเมล็ดในถังพักข้าวสูงขึ้น ระยะทางการไหลของอากาศอบแห้งในถังพักจึงมากขึ้น ทำให้สามารถดึงศักยภาพอากาศอบแห้งที่ไหลในถังพักเพื่อการอบแห้งได้มากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มมวลข้าวเปลือกยังทำให้ระยะเวลาในการเคลื่อนตัวของข้าวเปลือกในถังพักนานยิ่งขึ้น ส่งผลให้ข้าวเปลือกมีระยะเวลาในการแพร่กระจายความชื้นจากภายในสู่ผิวเมล็ดมากขึ้น ความชื้นความชื้นภายในเมล็ดจึงลดลงมากขึ้น ทำให้ในท่อลมเป่าและท่อครอบสามารถระเหยความชื้นที่บริเวณผิวข้าวเปลือกได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ข้าวเปลือกยังมีระยะเวลาอบแห้งในส่วนถังพักเพิ่มขึ้นอีกด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มมวลข้าวเปลือก แม้ว่าการเพิ่มมวลข้าวเปลือกจะทำให้อุณหภูมิเมล็ดเพิ่มขึ้นช้ากว่า ทำ

ให้อัตราการแพร่ความชื้นภายในเมล็ดต่ำลง ซึ่งน่าจะส่งผลให้อัตราอบแห้งลดลงได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงควรทดสอบหาปริมาณมวลข้าวเปลือกที่เหมาะสมกับแต่ละชุดเงื่อนไขการอบแห้ง

6.2.1.3 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อพลังงานรวมจำเพาะ

การเพิ่มมวลข้าวเปลือก ทำให้ระยะเวลาอบแห้งนานยิ่งขึ้น ส่งผลให้ช่วงเวลาทำงานของเครื่องทำความร้อนและเครื่องเป่าลมมากขึ้น ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ต้องป้อนให้เครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากอัตราอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น ดังอธิบายในหัวข้อ 6.2.1.2 จึงทำให้อัตราสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะและพลังงานทุติยภูมิจำเพาะลดลง การใช้พลังงานรวมจำเพาะจึงลดลงอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 6.46 โดยเมื่อเพิ่มมวลข้าวเปลือก 10-30 kg พลังงานรวมจำเพาะลดลง 7.76-6.99 6.67-5.73 และ 11.37-8.87 MJ/kg water evaporated ที่เงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และ เงื่อนไข ค. ตามลำดับ ทำให้พลังงานรวมจำเพาะลดลง 9.93 14.10 และ 22.04% ตามลำดับ

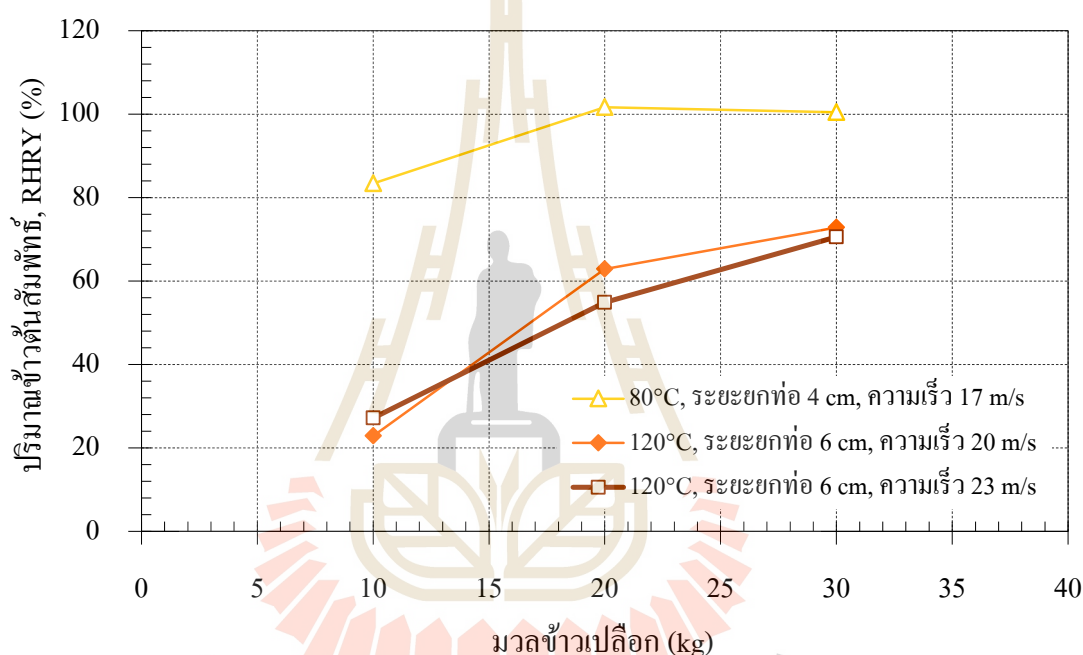


รูปที่ 6.46 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อพลังงานรวมจำเพาะ

6.2.1.4 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อปริมาณข้าวต้นหลังการอบแห้ง

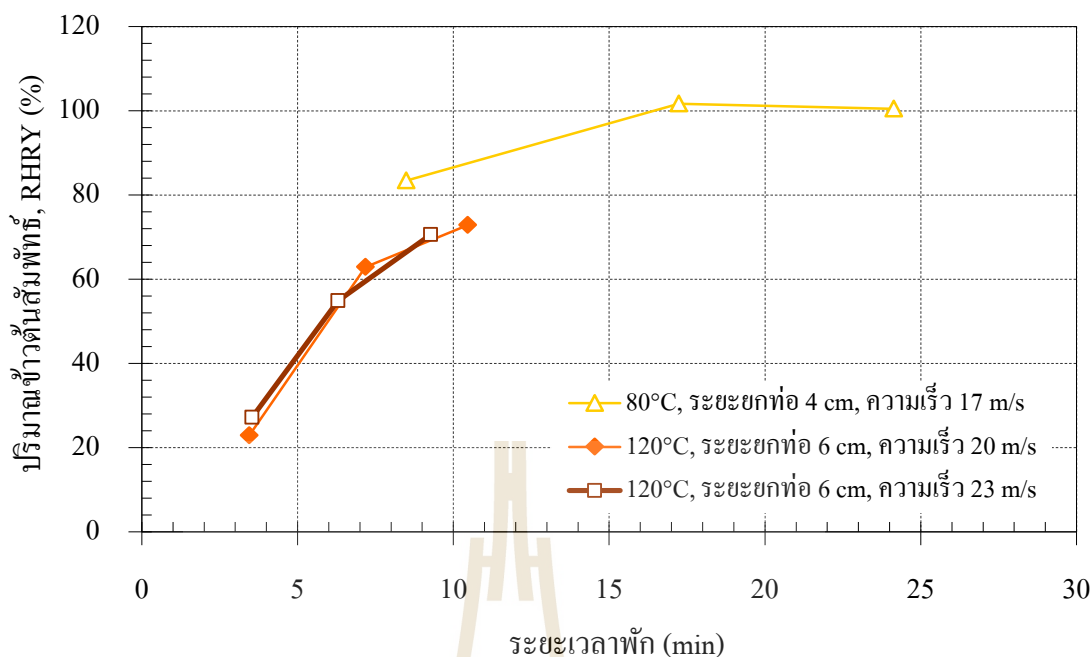
ผลของมวลข้าวเปลือกที่มีต่อปริมาณข้าวต้นระหว่างการอบแห้ง แสดงในรูปที่ 6.47 พบว่าปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมวลข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น และ

ปริมาณข้าวต้นในกรณีเงื่อนไข ก. และเงื่อนไข ข. มีแนวโน้มที่สามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกมากกว่า 30 kg เหตุที่การเพิ่มมวลข้าวเปลือกช่วยเพิ่มปริมาณข้าวต้นหลังการอบแห้งได้เนื่องจากทำให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยลดลง ดังที่อธิบายในหัวข้อ 6.2.1.2 นอกจากนี้เปลือกระยะเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนตัวในถังพักข้าวที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ข้าวเปลือกมีระยะเวลาในการแพร่กระจายความชื้นมาสู่ที่ผิวเมล็ดมากขึ้น ทำให้สามารถลดความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากความชื้นความชื้นภายในเมล็ดได้มาก ก่อนเข้าสู่การอบแห้งในท่อลมเป่าและท่อครอบในรูปปิดไป ซึ่งช่วยลดการเกิดรอยร้าวและการแตกหักของข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งและขณะขัดสีได้



รูปที่ 6.47 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b.

รูปที่ 6.48 แสดงผลของระยะเวลาพักที่มีต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาพักในที่นี้หมายถึงระยะเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่ในถังพักข้าวต่อรอบการอบแห้ง พบว่าระยะเวลาพักที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณข้าวต้นที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และพบว่าลักษณะแนวโน้มของปริมาณข้าวต้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้เงื่อนไข ก. และเงื่อนไข ข. มีลักษณะที่สอดคล้องกับแนวโน้มของปริมาณข้าวต้นเมื่อใช้เงื่อนไข ค. ซึ่งใช้ระยะเวลาพักที่มากกว่า แสดงให้เห็นความน่าจะเป็นที่ปริมาณข้าวต้นในกรณีเงื่อนไข ก. และเงื่อนไข ข. สามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อเพิ่มระยะเวลาพัก อย่างไรก็ตาม การหาระยะเวลาพักที่เหมาะสมยังคงขึ้นกับเงื่อนไขการอบแห้งอื่น ๆ ที่มีผลต่ออัตราอบแห้ง



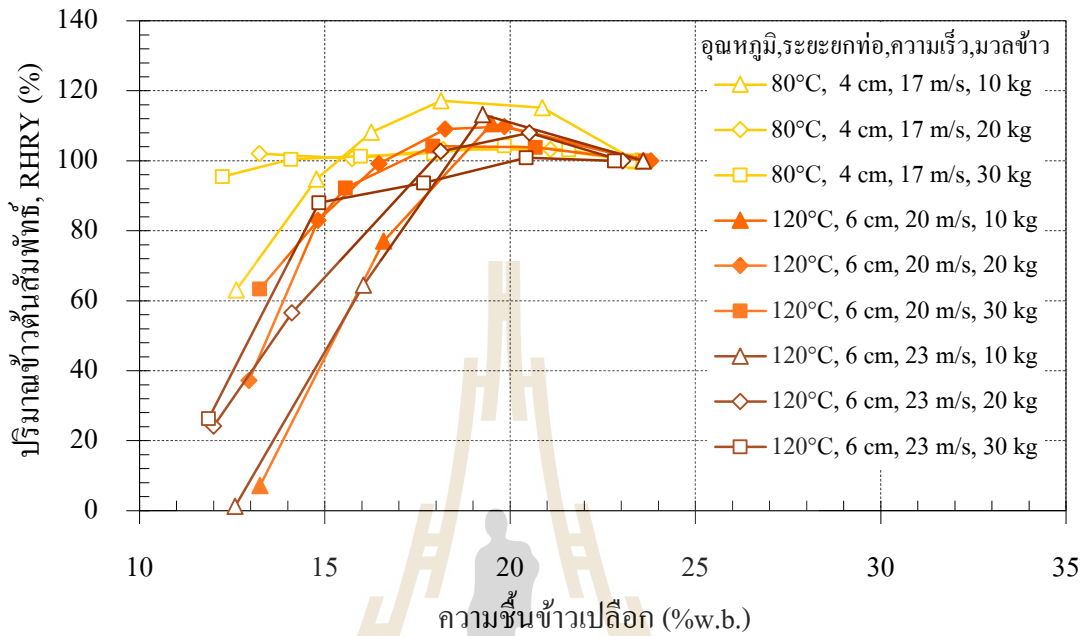
รูปที่ 6.48 ผลของระยะเวลาพักต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b.

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของปริมาณข้าวต้นระหว่างการอบแห้งแสดงในรูปที่ 6.49 พบว่าในช่วงแรกปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์จะเพิ่มสูงขึ้น ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 6.2.1.1 และการอบแห้งที่ใช้มวลข้าวเปลือกน้อยกว่าจะมีปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าอย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อลดมวลข้าวเปลือก อุณหภูมิข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูป 6.44 ทำให้กระบวนการเกิดเจลบางส่วน (partial gelatinization) เกิดขึ้น ได้รวดเร็วและสมบูรณ์มากกว่า รอยร้าวภายในเมล็ดที่เกิดขึ้นก่อนการอบแห้งและระหว่างการอบแห้งจึงลดลง ทำให้เมล็ดแข็งแรงมากขึ้น ปริมาณข้าวต้นที่ได้จึงสูงขึ้น แต่เนื่องจากการลดมวลข้าวเปลือกทำให้ข้าวเปลือกลดความชื้นอย่างรวดเร็ว ประกอบกับระยะเวลาพักที่สั้นลง ทำให้เกิดการลดลงของปริมาณข้าวต้นอย่างรุนแรงมากกว่าในช่วงกลางและท้ายของการอบแห้ง

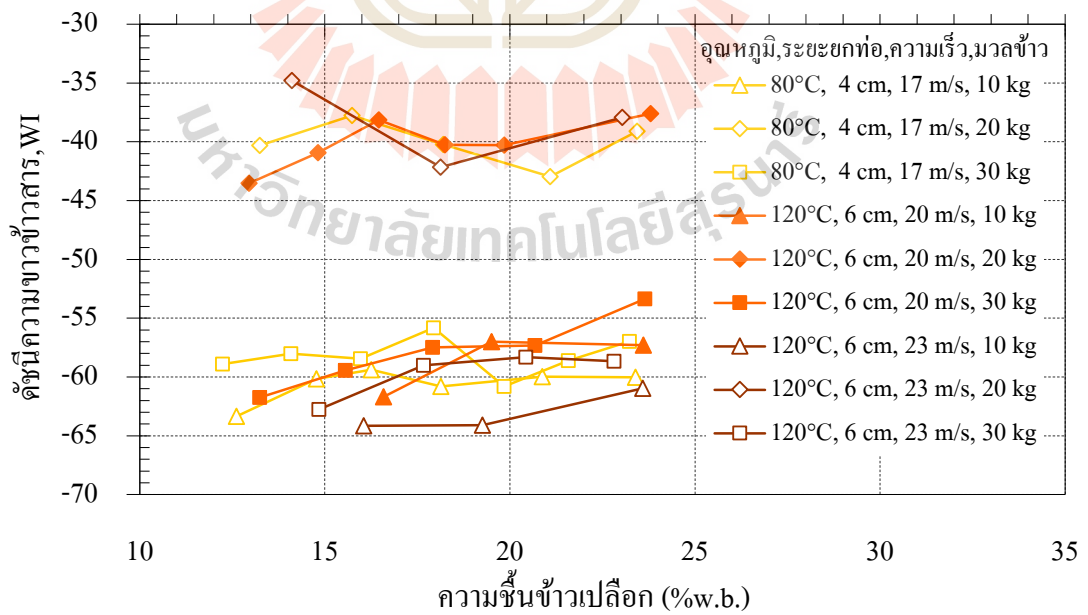
6.2.1.5 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองข้าวสาร

รูปที่ 6.50 และ 6.51 แสดงค่าดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองของข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไข ก เงื่อนไข ข. และเงื่อนไข ค. เพื่อศึกษาผลของมวลข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองที่ได้จากการทดสอบ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ใช้มวลข้าวเปลือก 20 kg และกลุ่มที่ใช้มวลข้าวเปลือก 10 และ 30 kg โดยกลุ่มแรกมีค่าดัชนีความขาวสูงกว่ากลุ่มหลัง และมีค่าดัชนีความเหลืองต่ำกว่ากลุ่มหลัง เหตุเพราะข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองของกลุ่มหลัง ถูกเก็บรักษาในห้องแช่เย็นก่อนเริ่มการทดลองนานกว่ากลุ่มแรก

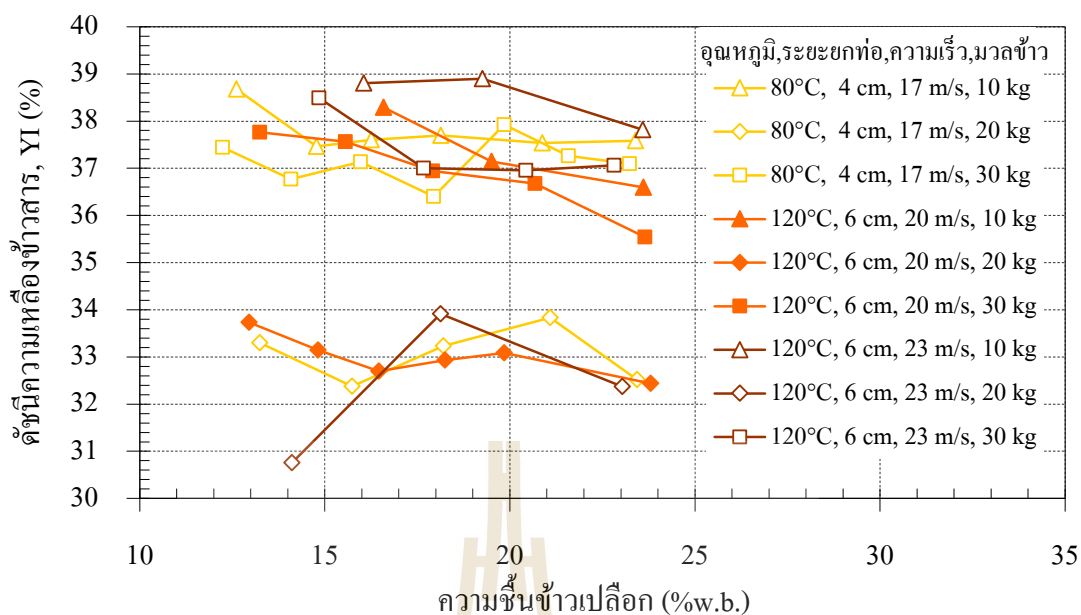
ประมาณ 2 เดือน จึงทำให้เกิดการเสื่อมถอยของคุณภาพข้าวในด้านสีอย่างชัดเจน แต่ผลของมวลข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นยังคงแสดงแนวโน้มได้ค่อนข้างชัดเจน



รูปที่ 6.49 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ระหว่างการอบแห้ง



รูปที่ 6.50 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อดัชนีความขาวข้าวสาร



รูปที่ 6.51 ผลของมวลข้าวเปลือกต่อดัชนีความเหลืองข้าวสาร

โดยภาพรวมแล้วค่าดัชนีความขาวมีค่าลดลงและค่าดัชนีความเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น ดังอธิบายในหัวข้อ 6.2.2.2 ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่ใช้มวลข้าวเปลือก 10 kg กับ 30 kg พบว่ามวลข้าวเปลือกที่มากกว่า ส่งผลให้ค่าดัชนีความขาวมีค่าสูงกว่าและค่าดัชนีความเหลืองมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ต่ำกว่า จึงทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (nonenzymic browning reaction) ไม่สมบูรณ์ ข้าวสารที่ได้จึงมีความขาวมากกว่า และความเหลืองน้อยกว่า

6.2.2 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

6.2.2.1 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก

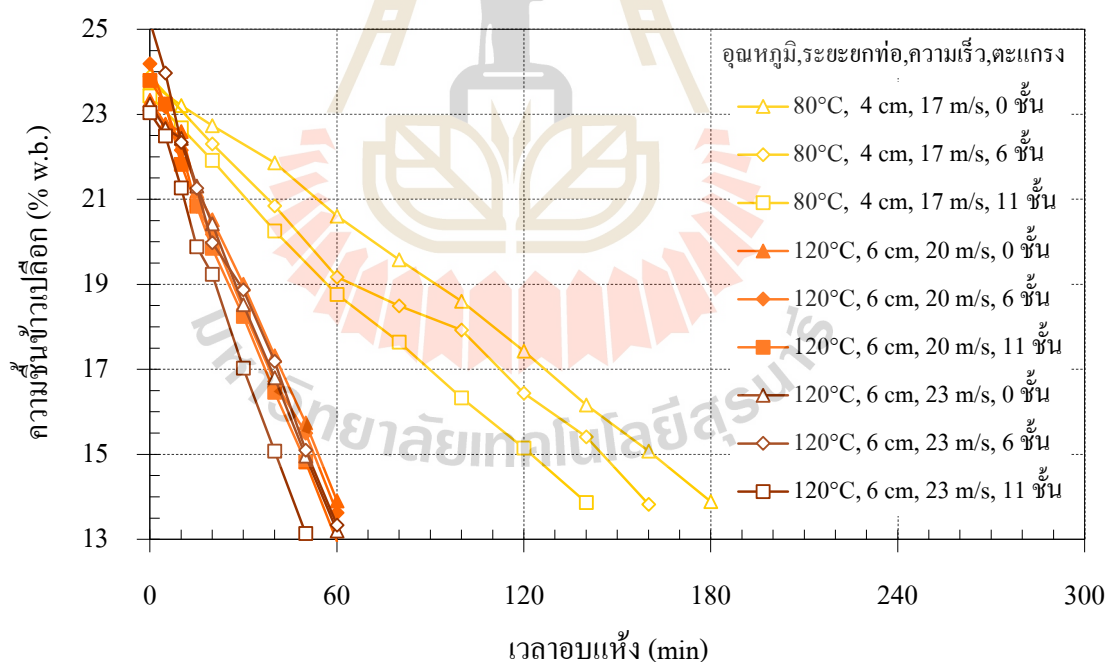
ทดลองชุดเงื่อนไขอบแห้งตั้งต้นทั้ง 3 กรณี ด้วยการเปลี่ยนจำนวนตะแกรงหน่วงข้าวในท่อครอบเป็น 0 6 และ 11 ชั้น โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 น้ำหนัก 20 kg ผลการทดลองอบแห้งแสดงดังรูปที่ 6.52 โดยแกนนอนเป็นเวลาอบแห้งและแกนตั้งเป็นความชื้นข้าวเปลือกพบว่าลักษณะการลดความชื้นของข้าวเปลือกเป็นเส้นตรงในทุกกรณีศึกษา โดยจำนวนชั้นตะแกรงหน่วงข้าวที่เพิ่มขึ้นทำให้ข้าวเปลือกลดความชื้นได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

6.2.2.2 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ย

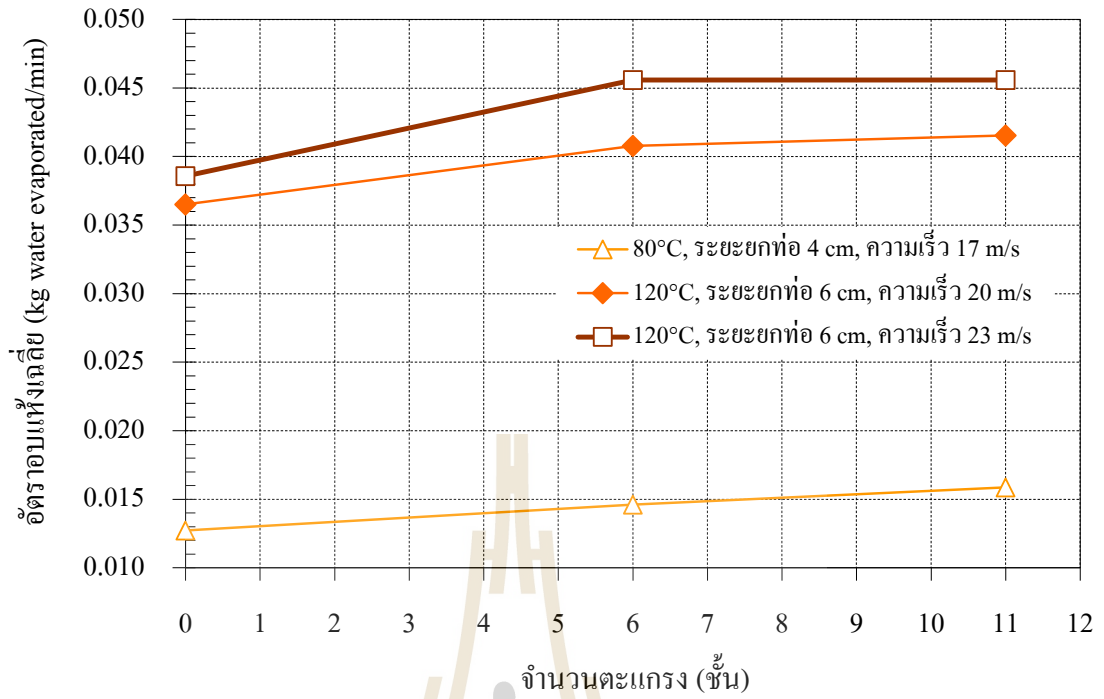
เพื่อวิเคราะห์อัตราอบแห้งเฉลี่ย เมื่อติดตั้งจำนวนชั้นตะแกรงหน่วงข้าว จึงคำนวณอัตราอบแห้งเฉลี่ย ดังนำเสนอในรูปที่ 6.53 พบว่าอัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นตะแกรงหน่วงข้าวเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มจำนวนตะแกรงหน่วงข้าวจาก 0-11 ชั้น อัตราอบแห้งเฉลี่ย

เพิ่มขึ้น 0.0386-0.0456 0.0365-0.0415 และ 0.0127-0.0159 kg water evaporated/min ที่เงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และ เงื่อนไข ค. ตามลำดับ ทำให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 15.35 12.12 และ 19.86% ตามลำดับ

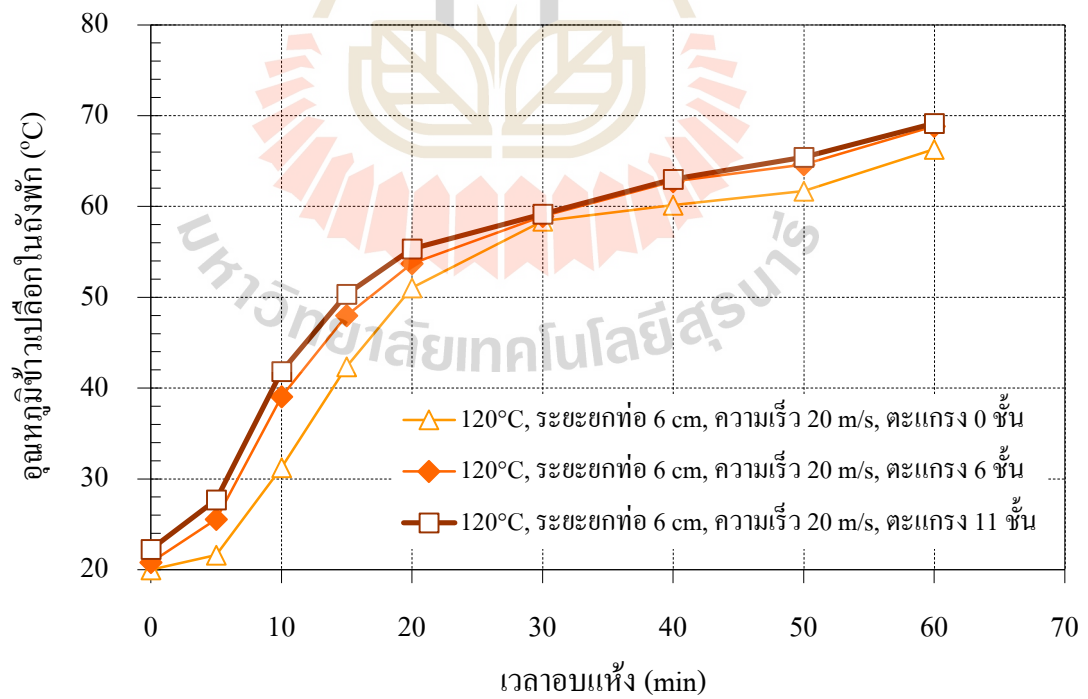
การอบแห้งในท่อครอบ ข้าวเปลือกเคลื่อนที่ตกลงสู่ทางออกท่อครอบอย่างรวดเร็วด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงผลักรวมของอากาศอบแห้ง จึงทำให้มีระยะเวลาอบแห้งในท่อครอบแต่ละรอบน้อย การลดความชื้นข้าวเปลือกและการใช้ศักยภาพของอากาศอบแห้งจึงทำได้ไม่เต็มที่ การติดตั้งตะแกรงหน่วงข้าวเป็นชั้น ๆ ตามแนวยาวของท่อครอบ ทำให้การตกของข้าวเปลือกถูกระงับ ความเร็วลดลง ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่ในท่อครอบจึงนานมากขึ้น ช่วยเพิ่มระยะเวลาอบแห้งในท่อครอบแต่ละรอบได้ นอกจากนี้เมื่อข้าวเปลือกกระทบชั้นตะแกรงจะทำความเร็วข้าวเปลือกลดลง ความหนาแน่นของชั้นข้าวเปลือกขณะกระทบชั้นตะแกรงสูงขึ้น ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งจึงสูงขึ้นโดยทันที ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวลสูงขึ้น จึงเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลความชื้นระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งมากขึ้น ทำให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยและอุณหภูมิข้าวเปลือกมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูป 6.53-6.54



รูปที่ 6.52 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก



รูปที่ 6.53 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่ออัตราการแห้งเฉลี่ย



รูปที่ 6.54 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่ออุณหภูมิข้าวเปลือก ที่ระยะความสูง 45 cm จากพื้นถึงพัก

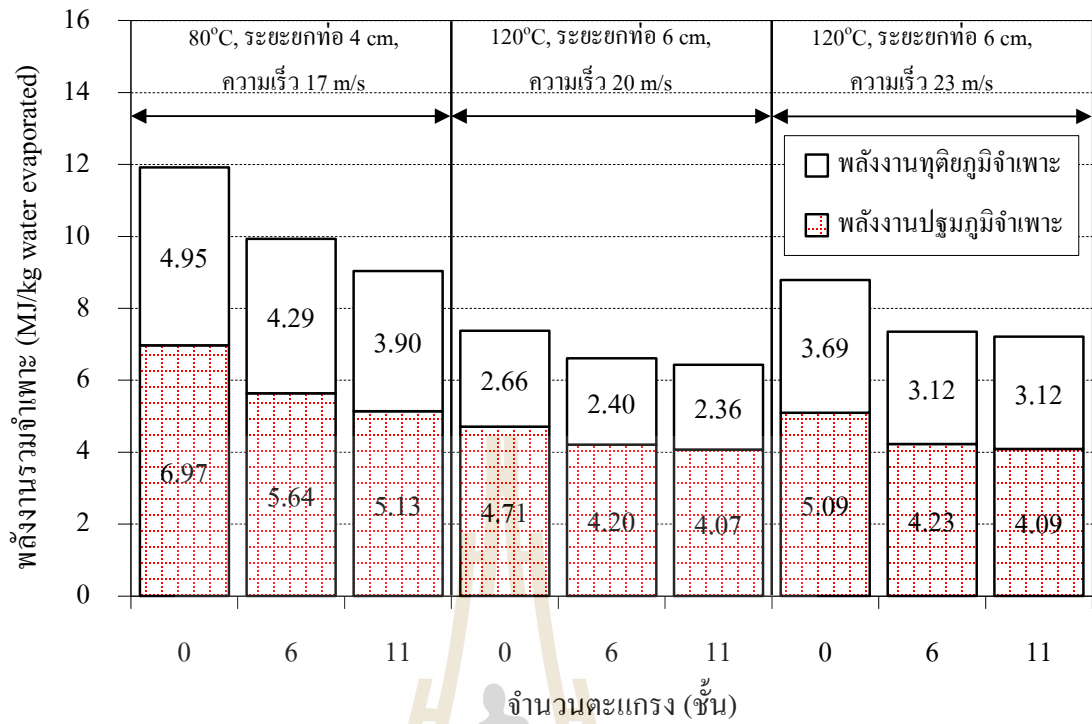
โดยภาพรวมแล้วการติดตั้งชั้นตะแกรงหน่วงข้าวทำให้ความหนาแน่นของข้าวเปลือกในท่อกรอบเพิ่มขึ้น นั่นคือช่องว่างอากาศในท่อกรอบลดลง ดังแสดงในภาคผนวก ข.6 ซึ่งอาจส่งผลให้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนและมวลความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกลดลง แต่เนื่องจากในกรณีศึกษาจำนวนชั้นตะแกรงที่เพิ่มขึ้นจาก 0-11 ชั้น สามารถลดช่องว่างอากาศในท่อกรอบได้สูงสุดเพียง 0.06% เท่านั้น จึงเชื่อได้ว่าจะไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสของเมล็ดข้าวเปลือก ในทางกลับกันการที่มีปริมาณมวลข้าวเปลือกอยู่ในท่อกรอบมากขึ้น ส่งผลให้สามารถดึงศักยภาพอากาศอบแห้งที่ไหลผ่านท่อกรอบให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลความชื้นกับข้าวเปลือกได้มากยิ่งขึ้น โดยสังเกตได้จากในกรณีเงื่อนไข ก. ซึ่งใช้ความเร็วอากาศที่อลมเข้า 23 m/s จะมีร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 15.35% ขณะที่กรณีเงื่อนไข ข. ซึ่งใช้ความเร็วอากาศที่อลมเข้า 20 m/s จะมีร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 12.12% แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของชั้นตะแกรงหน่วงข้าวที่สามารถดึงศักยภาพของอากาศอบแห้งที่มีความเร็วสูงให้เป็นประโยชน์ต่อการอบแห้งได้มากยิ่งขึ้นและช่วยลดการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อมไปในเวลาเดียวกัน

6.2.2.3 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อพลังงานรวมจำเพาะ

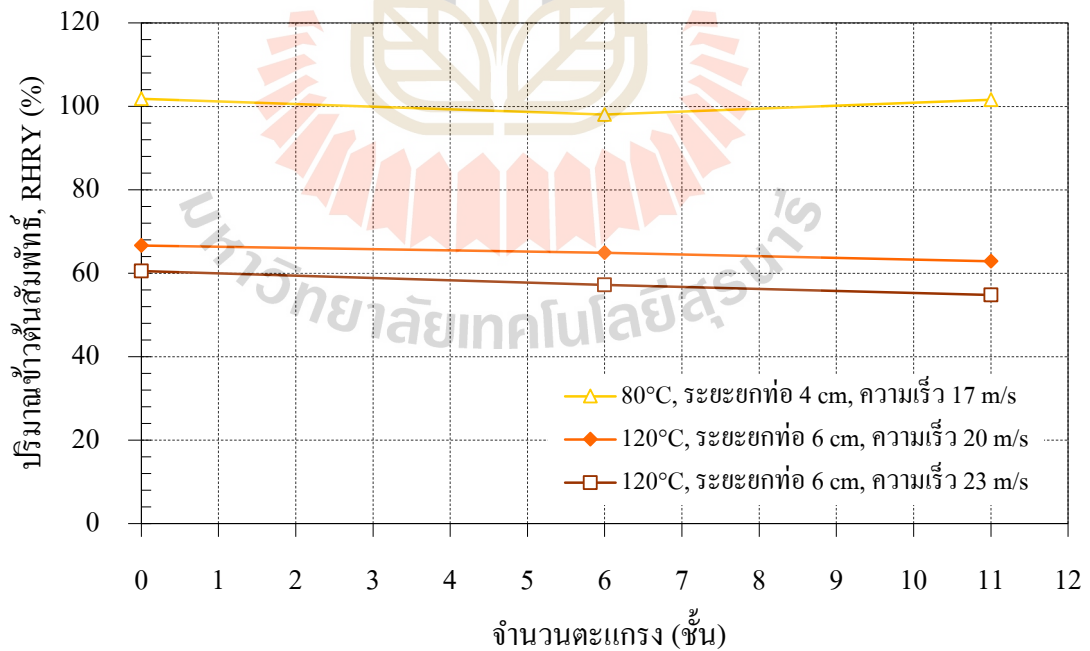
จำนวนชั้นตะแกรงที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาอบแห้งลดลง ดังแสดงในหัวข้อ 6.2.2.1 อัตราสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะและพลังงานทุติยภูมิจำเพาะจึงลดลง ทำให้การใช้พลังงานรวมจำเพาะจึงลดลงอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 6.55 โดยเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นตะแกรงหน่วงข้าวจาก 0-11 ชั้น พลังงานรวมจำเพาะลดลงจาก 8.78-7.20 7.37-6.42 และ 11.92-9.03 MJ/kg water evaporated ที่เงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และ เงื่อนไข ค. ตามลำดับ ทำให้พลังงานรวมจำเพาะลดลง 17.97 12.82 และ 24.18% ตามลำดับ

6.2.2.4 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อปริมาณข้าวต้นหลังการอบแห้ง

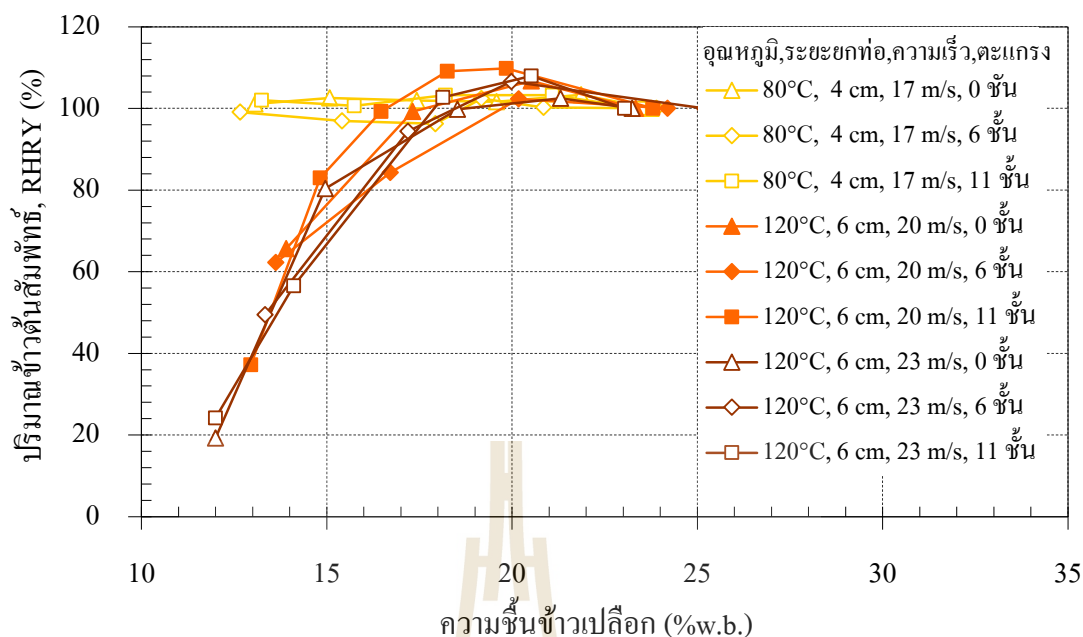
การเพิ่มจำนวนชั้นตะแกรงหน่วงข้าว ทำให้ข้าวเปลือกที่ผ่านท่อกรอบมีความชื้นลดลงมากขึ้น ความชื้นความชื้นภายในเมล็ดจึงมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความเค้นที่กระทำกับเมล็ดข้าวเพิ่มสูงขึ้น แต่เนื่องจากกรณีศึกษาที่ใช้มวลข้าว 20 kg ทำให้ข้าวเปลือกมีระยะเวลาเคลื่อนที่ในถังพักข้าวทั้งกรณีเงื่อนไข ก. และเงื่อนไข ข. ประมาณ 6-7 นาที ประกอบกับอุณหภูมิเมล็ดที่ออกจากท่อกรอบมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 6.54 ส่งผลให้การแพร่กระจายความชื้นภายในเมล็ดข้าวขณะเคลื่อนที่ในถังพักสูงขึ้น ความชื้นภายในเมล็ดจึงมีความสม่ำเสมอ ความเค้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการติดตั้งชั้นตะแกรงหน่วงข้าวในท่อกรอบจึงลดลง ส่งผลให้การลดลงของปริมาณข้าวต้นเนื่องจากการติดตั้งชั้นตะแกรงหน่วงข้าวจึงมีค่าน้อย ดังแสดงในรูปที่ 6.56 และมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของปริมาณข้าวต้นในช่วงแรกของการอบแห้งเนื่องจากกระบวนการเกิดเจลบางส่วน (partial gelatinization) และมีการลดลงของปริมาณข้าวต้นในช่วงกลางและช่วงท้ายของการอบแห้ง ในกรณีเงื่อนไข ก. และเงื่อนไข ข. ดังแสดงในรูปที่ 6.57



รูปที่ 6.55 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อพลังงานรวมจำเพาะ



รูปที่ 6.56 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อปริมาณไอน้ำที่ความชื้นเข้าเปลือก 14% w.b.

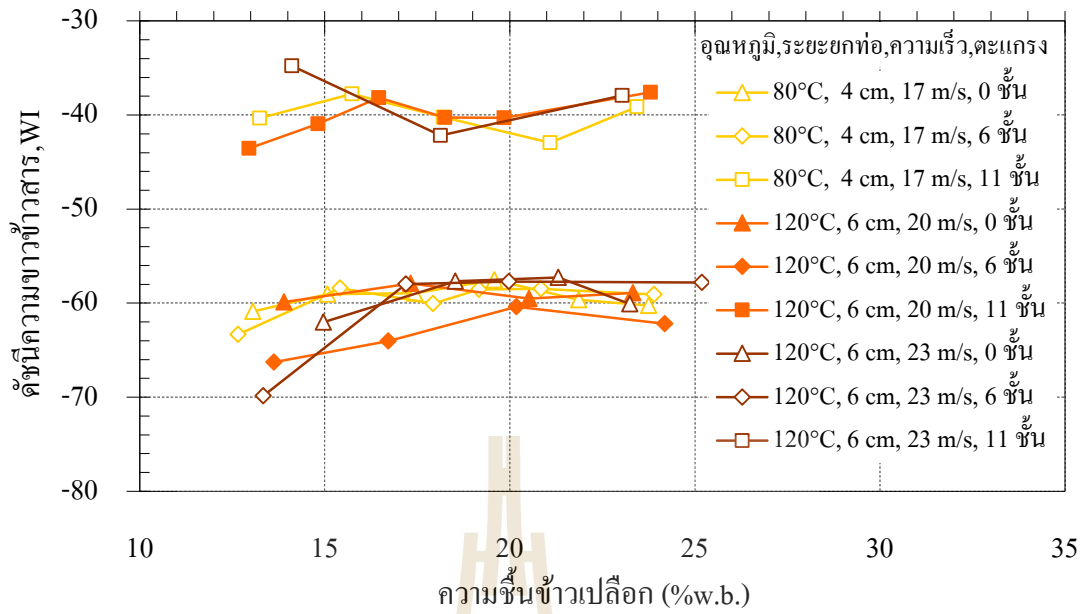


รูปที่ 6.57 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ระหว่างการอบแห้ง

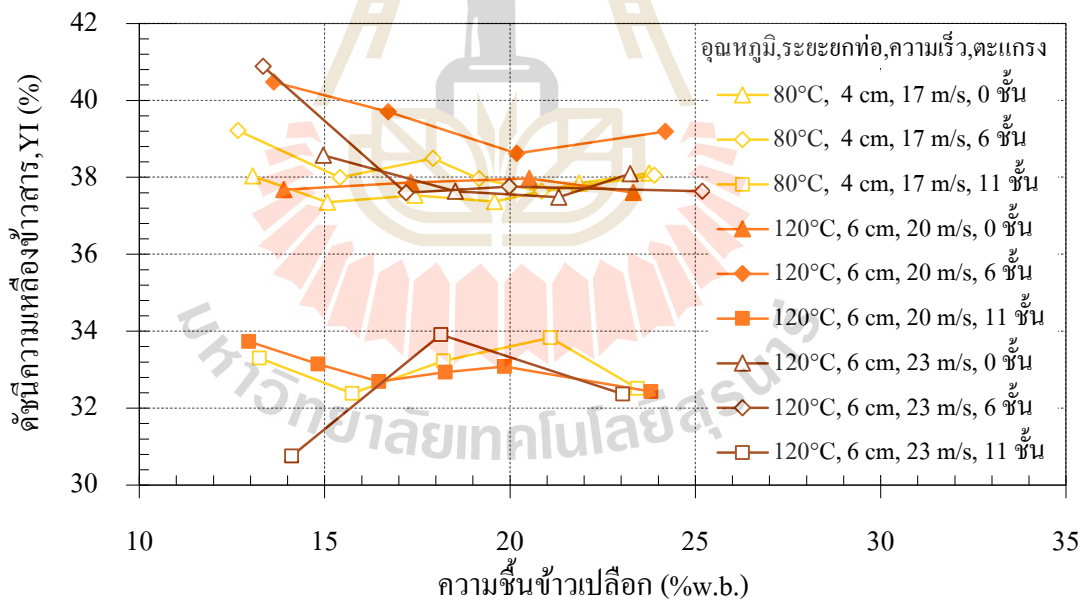
6.2.2.5 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองข้าวสาร

รูปที่ 6.58 และ 6.59 แสดงค่าดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองของข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และเงื่อนไข ค. เพื่อศึกษาผลของจำนวนชั้นตะแกรงที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองที่ได้จากการทดสอบ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ติดตั้งตะแกรงจำนวน 11 ชั้น และกลุ่มที่ติดตั้งตะแกรงจำนวน 0 และ 6 ชั้น โดยกลุ่มแรกมีค่าดัชนีความขาวสูงกว่ากลุ่มหลัง และมีค่าดัชนีความเหลืองต่ำกว่ากลุ่มหลัง เหตุเพราะข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองของกลุ่มหลัง ถูกเก็บรักษาในห้องแช่เย็นก่อนเริ่มการทดลองนานกว่ากลุ่มแรกประมาณ 3 เดือน จึงทำให้เกิดการเสื่อมถอยของคุณภาพข้าวในด้านสีอย่างชัดเจน

โดยภาพรวมแล้วค่าดัชนีความขาวมีค่าลดลงและค่าดัชนีความเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น ดังอธิบายในหัวข้อ 6.2.2.2 ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่ติดตั้งตะแกรงจำนวน 0 และ 6 ชั้น พบว่ากลุ่มที่ไม่ติดตั้งตะแกรง มีค่าดัชนีความขาวสูงกว่าและค่าดัชนีความเหลืองมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ต่ำกว่า จึงทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (nonenzymic browning reaction) ไม่สมบูรณ์ ข้าวสารที่ได้จึงมีความขาวมากกว่า และความเหลืองน้อยกว่า



รูปที่ 6.58 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อดัชนีความขาวข้าวสาร

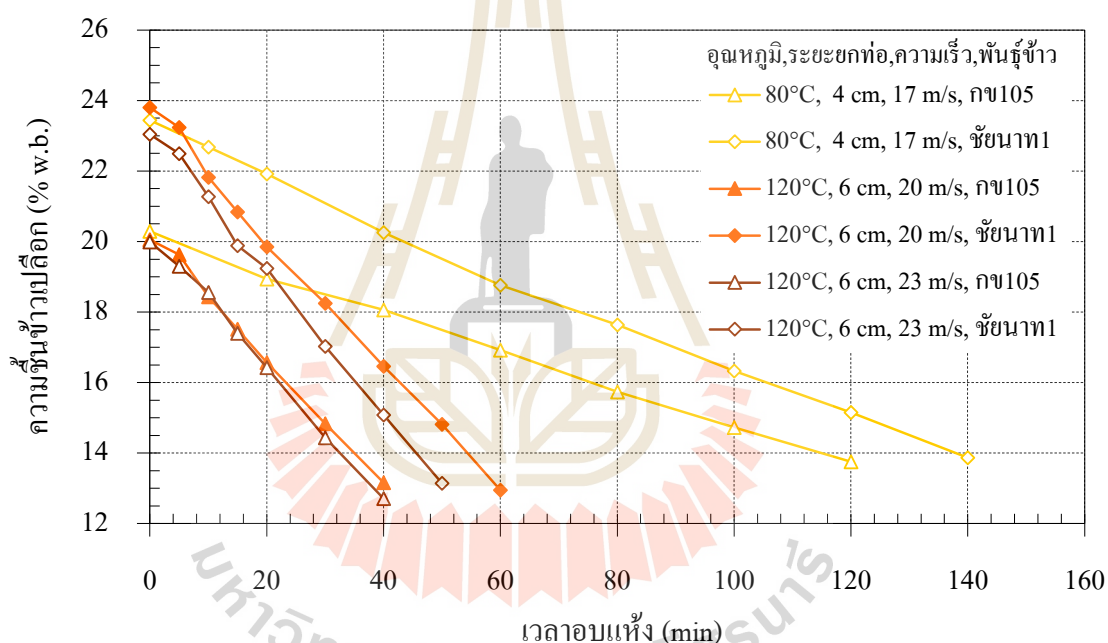


รูปที่ 6.59 ผลของจำนวนชั้นตะแกรงต่อดัชนีความเหลืองข้าวสาร

6.2.3 ผลของพันธุ์ข้าวในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

6.2.3.1 ผลของพันธุ์ข้าวต่อลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก

ทดลองชุดเงื่อนไขอบแห้งตั้งต้นทั้ง 3 กรณี ด้วยข้าวเปลือกพันธุ์ กข105 และข้าวเปลือกพันธุ์ ชัยนาท1 น้ำหนัก 20 kg โดยใช้จำนวนตะแกรง 11 ชั้น ผลการทดลองอบแห้งแสดงดังรูปที่ 6.60 โดยแกนนอนเป็นเวลาอบแห้งและแกนตั้งเป็นความชื้นข้าวเปลือก พบว่าลักษณะการลดความชื้นของข้าวเปลือกเป็นเส้นตรงในทุกกรณีศึกษา โดยข้าวเปลือกพันธุ์ กข105 มีความชื้นเริ่มต้น 19.99-20.29% w.b. ขณะที่ข้าวเปลือกพันธุ์ ชัยนาท1 มีความชื้นเริ่มต้น 23.04-23.80% w.b. เนื่องจากข้าวเปลือกทั้ง 2 พันธุ์มีความชื้นเริ่มต้นแตกต่างกัน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบระยะเวลาอบแห้งระหว่างข้าวเปลือกทั้ง 2 พันธุ์ได้

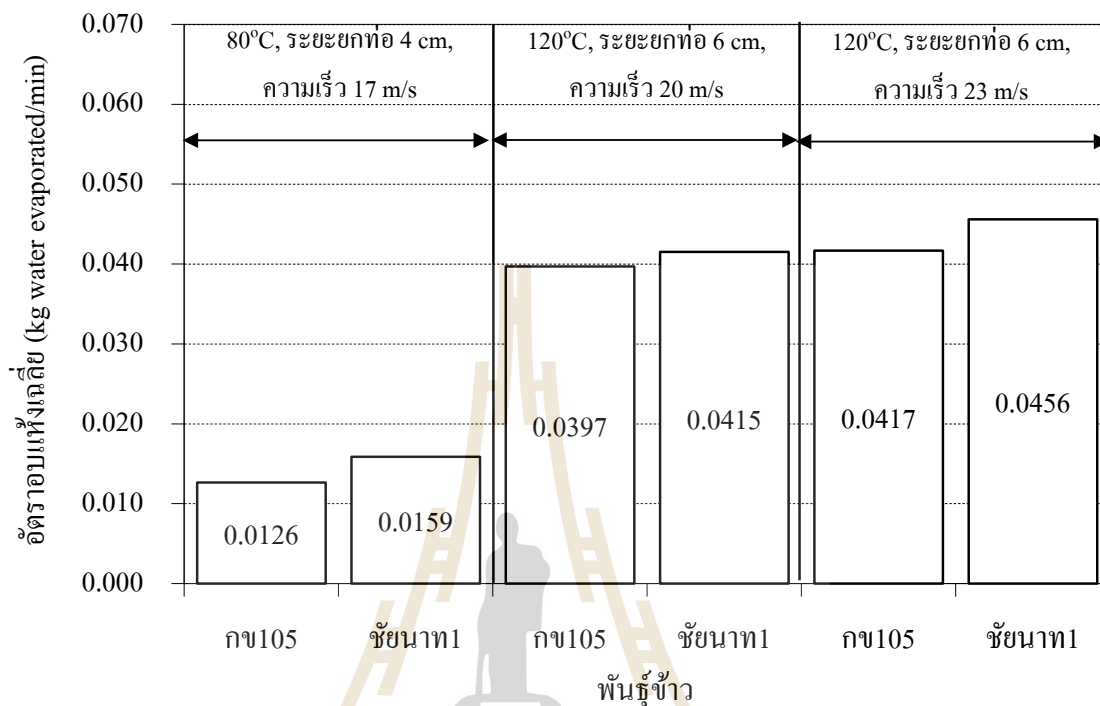


รูปที่ 6.60 ผลของพันธุ์ข้าวต่อลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก

6.2.3.2 ผลของพันธุ์ข้าวต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย

อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของข้าวพันธุ์ กข105 และข้าวเปลือกพันธุ์ ชัยนาท1 นำเสนอในรูปที่ 6.61 พบว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยของข้าวพันธุ์ ชัยนาท1 สูงกว่าข้าวพันธุ์ กข105 เล็กน้อย โดยอัตราการอบแห้งเฉลี่ยของข้าวพันธุ์ ชัยนาท1 มีค่าเท่ากับ 0.0456 0.0415 และ 0.0159 kg water evaporated/min ที่เงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และ เงื่อนไข ค. ตามลำดับ ขณะที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของ

ข้าวพันธุ์ กข105 มีค่าเท่ากับ 0.0417 0.0397 และ 0.0126 kg water evaporated/min ที่เงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และ เงื่อนไข ค. ตามลำดับ

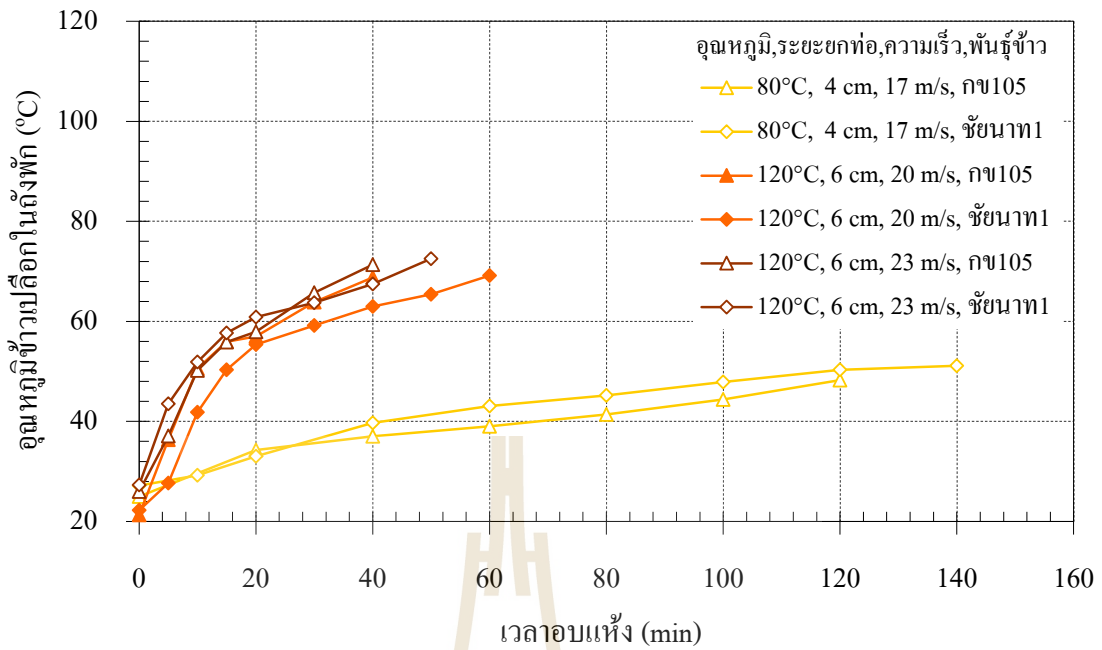


รูปที่ 6.61 ผลของพันธุ์ข้าวต่ออัตราการแห้งเฉลี่ย

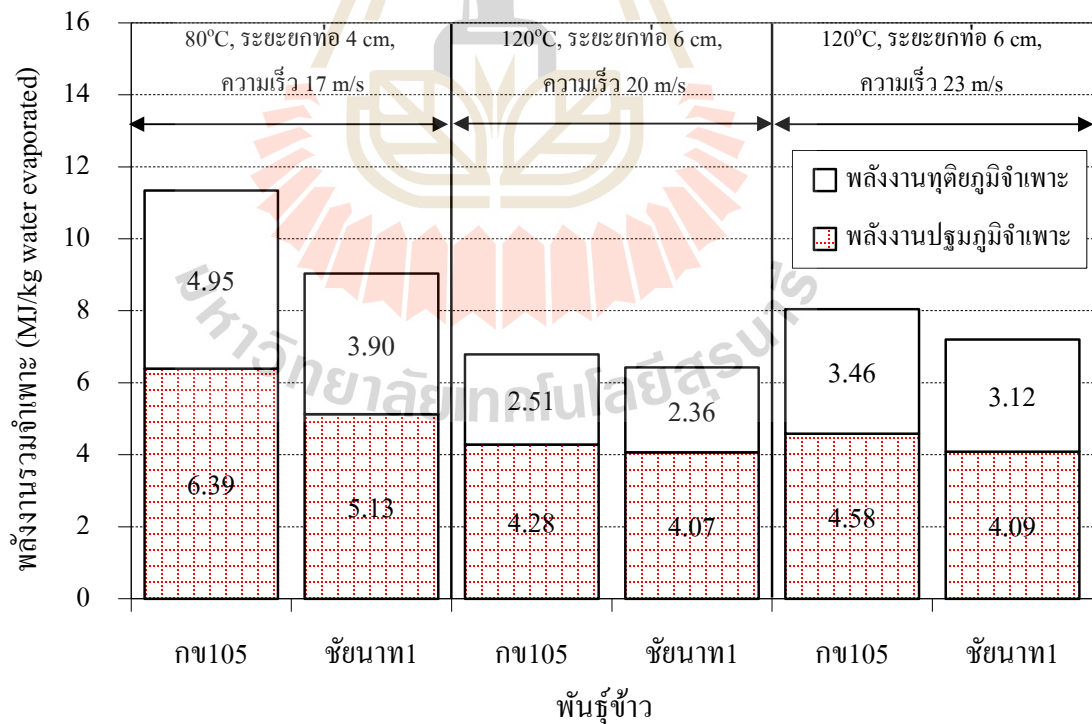
ในกรณีศึกษาข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าข้าวเปลือกพันธุ์ กข105 ส่งผลให้ระดับความชื้นที่ผิวข้าวเปลือกมีค่าสูงกว่า จึงสามารถระเหยได้ง่ายและรวดเร็วกว่า ทำให้เมื่อใช้เงื่อนไขอบแห้งเดียวกัน กรณีศึกษาที่ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 มีอัตราการแห้งเฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อย โดยอุณหภูมิข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งแสดงในรูปที่ 6.62

6.2.3.3 ผลของพันธุ์ข้าวต่อพลังงานรวมจำเพาะ

ในกรณีศึกษาข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 มีอัตราการแห้งเฉลี่ยสูงกว่าข้าวเปลือกพันธุ์ กข105 ดังแสดงในหัวข้อ 6.2.3.2 ทำให้อัตราสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะและพลังงานทุติยภูมิจำเพาะน้อยกว่า พลังงานรวมจำเพาะจึงต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 6.63 โดยพลังงานรวมจำเพาะของข้าวพันธุ์ชัยนาท1 มีค่าเท่ากับ 7.20 6.42 และ 9.03 MJ/kg water evaporated ที่เงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และ เงื่อนไข ค. ตามลำดับ ขณะที่พลังงานรวมจำเพาะของข้าวพันธุ์ กข105 มีค่าเท่ากับ 8.05 6.79 และ 11.34 MJ/kg water evaporated ที่เงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และ เงื่อนไข ค. ตามลำดับ



รูปที่ 6.62 อุณหภูมิข้าวเปลือกพันธุ์กข105 และพันธุ์ชัยนาท1 ที่ระยะความสูง 45 cm จากพื้นถึงพัก



รูปที่ 6.63 ผลของพันธุ์ข้าวต่อพลังงานรวมจำเพาะ

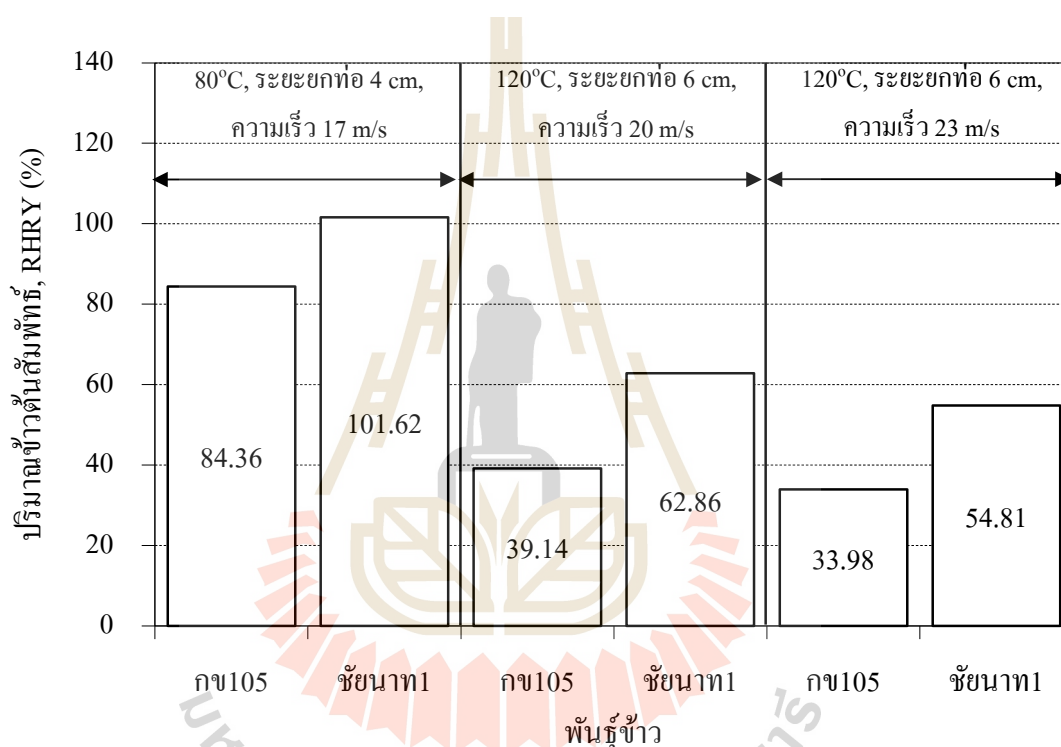
6.2.3.4 ผลของพันธุ์ข้าวต่อปริมาณข้าวต้นหลังการอบแห้ง

เมล็ดข้าวเป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากพอลิเมอร์ชีวภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบด้วยแป้ง (starch) ที่เป็นส่วนผสมของอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) กับโปรตีนและไขมันเล็กน้อย โดยมีความชื้นภายในเมล็ดเป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ข้าวพันธุ์กข105 และพันธุ์ชัยนาท1 มีสัดส่วนอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินเท่ากับ 16:84 และ 30:70 ตามลำดับ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2546) ความแตกต่างของสัดส่วนอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินและความชื้นภายในเมล็ด ทำให้คุณสมบัติเชิงกลและการเปลี่ยนคุณสมบัติเชิงกลเนื่องจากความร้อนของข้าวต่างสายพันธุ์แตกต่างกัน

ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 6.2.3.1 ในช่วงแรกของการอบแห้งที่ข้าวเปลือกมีความชื้นภายในเมล็ดสูงและเมล็ดมีอุณหภูมิเหมาะสมต่อการเกิดเจล กระบวนการเกิดเจลบางส่วน (partial gelatinization) จะเกิดขึ้นขณะอบแห้ง ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเมล็ดข้าวและส่งผลให้ปริมาณข้าวต้นเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้ง โดยอุณหภูมิเกิดเจล (gelatinization temperature) ขึ้นกับปริมาณอะไมโลสในเมล็ด ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (25-33% amylose) และข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (10-20% amylose) มีอุณหภูมิเกิดเจลที่ 75-79°C และ 60-65°C ตามลำดับ ดังนั้นในขณะอบแห้ง ที่ระดับความชื้นภายในเมล็ดเท่ากัน ข้าวพันธุ์กข105 จะสามารถเกิดเจลได้ก่อนและมีแนวโน้มสมบูรณ์กว่าข้าวพันธุ์ชัยนาท1 นอกจากนี้ เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ชัยนาท1 (23.04-23.80% w.b.) สูงกว่าข้าวพันธุ์กข105 (19.99-20.29% w.b.) ดังนั้นที่เงื่อนไขอบแห้งเดียวกัน ความชันความชื้นภายในเมล็ด (moisture content gradient) ขณะอบแห้งของข้าวพันธุ์ชัยนาท1 จึงมีค่าสูงกว่าข้าวพันธุ์กข105 ด้วยเหตุผลทั้งสองประการจึงน่าจะเชื่อได้ว่าในกรณีศึกษาที่ข้าวพันธุ์กข105 น่าจะมีปริมาณข้าวต้นสูงกว่าข้าวพันธุ์ชัยนาท1 แต่จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ความชื้น 14% w.b. ของข้าวพันธุ์ชัยนาท1 มากกว่าข้าวพันธุ์กข105 ทั้ง 3 เงื่อนไขอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 6.64

กระบวนการเกิดเจลจำเป็นต้องมีอุณหภูมิและความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นที่เหมาะสม แต่เนื่องจากการทดสอบความชื้นข้าวเปลือกพันธุ์กข105 มีค่าประมาณ 20% w.b. แม้ว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิเกิดเจล ดังนั้นจึงอาจไม่เกิดกระบวนการเกิดเจลบางส่วน (partial gelatinization) แต่จากผลงานวิจัยของ Tirawanichakul et al. (2004) พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีปริมาณอะไมโลสระดับต่ำและปานกลาง ปริมาณข้าวต้นจะไม่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าข้าวเปลือกจะมีความชื้นเริ่มต้นสูงและอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิสูง และมีกระบวนการเกิดเจลภายในเมล็ดขึ้น เนื่องจากอะไมโลเพคตินในข้าวที่มีระดับอะไมโลสระดับต่ำและปานกลาง จะจำกัดความสามารถในการเคลื่อนที่ของแป้งระหว่างกระบวนการเกิดเจล ทำให้ยากต่อการที่แป้งจะสร้างโครงข่ายที่แข็งแรงขึ้นมา ทำให้แรงต้านทานต่อการแตกหักระหว่างการขัดสีต่ำ จึงไม่พบการเพิ่มขึ้น

ของปริมาณข้าวต้น จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากรณีข้าว กข105 ซึ่งมีระดับอะไมโลสต่ำ ถึงแม้จะมีกระบวนการเกิดเจลภายในเมล็ดก็ไม่สามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นได้ ดังพบได้ในรูปที่ 6.65 ในกรณีเงื่อนไข ก. และเงื่อนไข ข. ที่ช่วงแรกของการอบแห้งปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ของข้าวพันธุ์ ชัยนาท1 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ขณะที่ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ของข้าวพันธุ์ กข105 มีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเกิดเจลบางส่วนสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับข้าวที่มีระดับอะไมโลสสูงเท่านั้น จึงทำในกรณีศึกษานี้ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ความชื้น 14% w.b. ของข้าวพันธุ์ ชัยนาท1 มีค่ามากกว่าข้าวพันธุ์ กข105

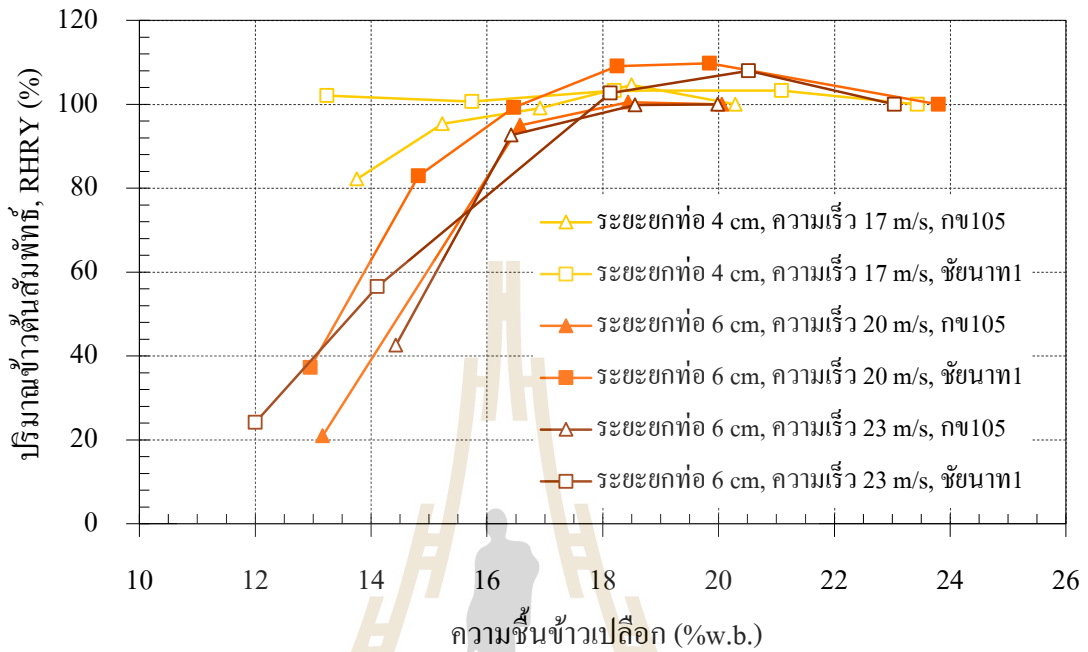


รูปที่ 6.64 ผลของพันธุ์ข้าวต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b.

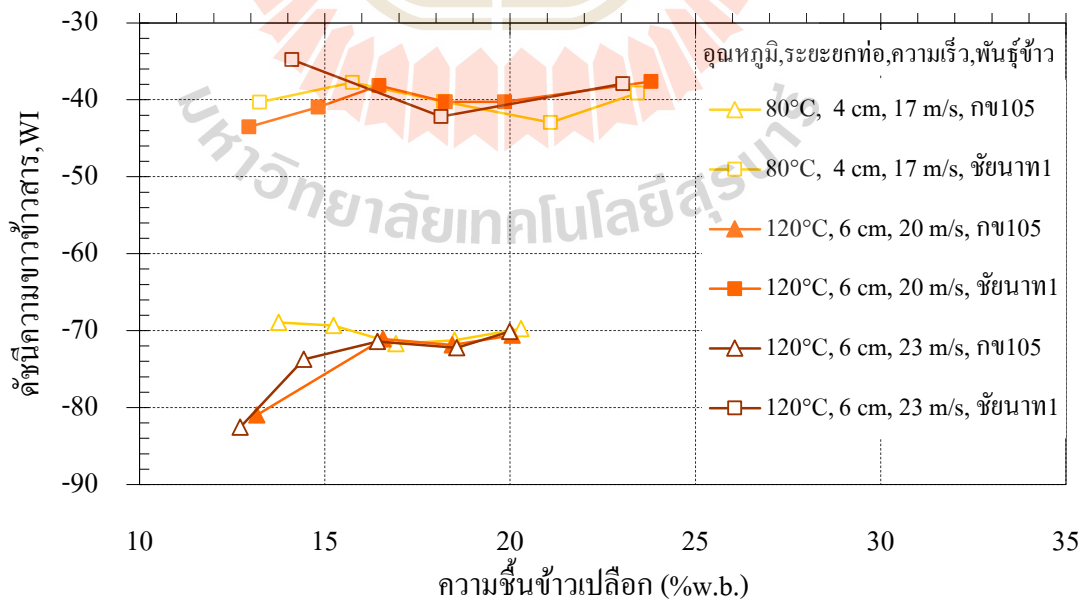
6.2.3.5 ผลของพันธุ์ข้าวต่อดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองข้าวสาร

รูปที่ 6.66 และ 6.67 แสดงค่าดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองของข้าวพันธุ์ กข105 และพันธุ์ ชัยนาท1 ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และเงื่อนไข ค. พบว่าค่าดัชนีความขาวของข้าวพันธุ์ ชัยนาท1 สูงกว่าพันธุ์ กข105 และดัชนีความเหลืองข้าวพันธุ์ ชัยนาท1 ต่ำกว่าพันธุ์ กข105 จากผลงานวิจัยของ ใจทิพย์ วาณิชชัง และคณะ (2556) พบว่าข้าวพันธุ์ กข105 มีค่าดัชนีความขาวสูงกว่าข้าวพันธุ์ ชัยนาท1 ที่ระดับการขัดสีเท่ากัน ดังนั้นค่าที่แตกต่างกันจึงน่าจะ

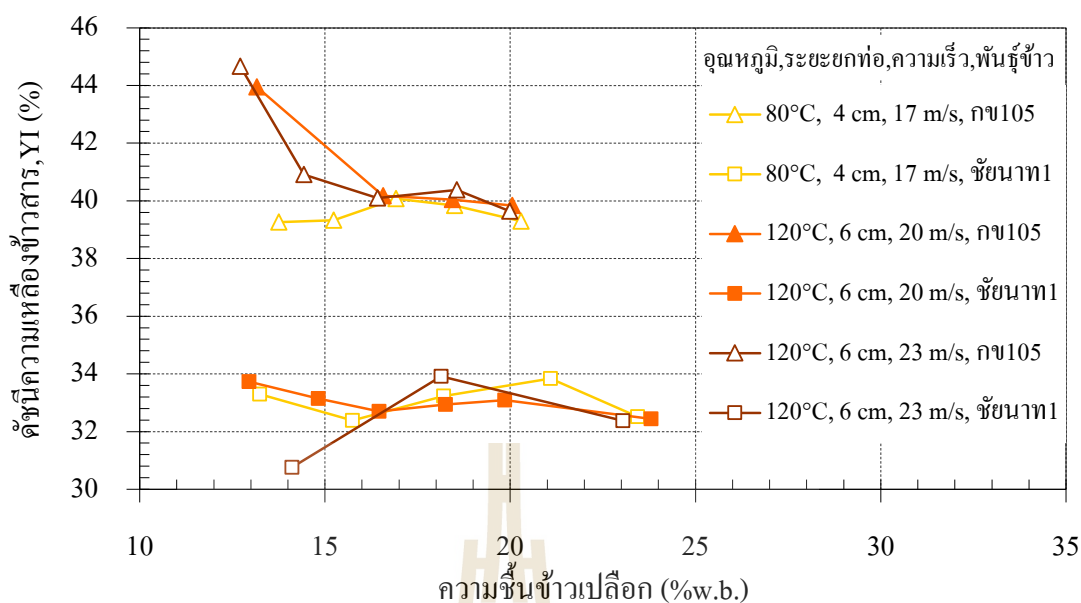
เนื่องจากข้าวพันธุ์ กข105 ที่ใช้ในการทดลอง ถูกเก็บรักษาในห้องแช่เย็นก่อนเริ่มการทดลองนานกว่าข้าวพันธุ์ ชัยนาท1 ประมาณ 3 เดือน จึงทำให้เกิดการเสื่อมถอยของคุณภาพข้าวในด้านสีอย่างชัดเจน



รูปที่ 6.65 ผลของพันธุ์ข้าวต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ระหว่างการอบแห้ง



รูปที่ 6.66 ผลของพันธุ์ข้าวต่อดัชนีความขาวข้าวสาร



รูปที่ 6.67 ผลของพันธุ์ข้าวต่อดัชนีความเหลืองข้าวสาร

นอกจากนี้พบว่าในกรณีเงื่อนไข ก. และเงื่อนไข ข. ที่ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ค่าดัชนีความขาวของข้าวพันธุ์ กข105 มีค่าลดลงเมื่อความชื้นภายในลดลง (ระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น) โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงท้ายของการอบแห้ง ขณะที่ค่าดัชนีความเหลืองก็มีค่าเพิ่มขึ้นสูงในช่วงท้ายของการอบแห้งเช่นกัน ทำให้เชื่อได้ว่าข้าวพันธุ์ กข105 มีความไวต่อการปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (nonenzymic browning reaction) มากกว่าพันธุ์ชัยนาท1

ผลการทดสอบปัจจัยรองแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขที่ให้อัตราอบแห้งสูงสุด ใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำสุด และได้คุณภาพข้าวสารดี คือเงื่อนไข ก. เงื่อนไข ข. และ เงื่อนไข ค. ตามลำดับ โดยยังคงได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในแต่ละด้านเช่นเดียวกับการทดลองปัจจัยหลัก

6.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกชนิดอื่น ๆ

เงื่อนไขอบแห้ง ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และคุณภาพข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้ง ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบกลุ่มและแบบต่อเนื่อง ได้นำเสนอในตารางที่ 6.1 และ 6.2 ตามลำดับ จัดลำดับเครื่องอบแห้งที่ใช้ระยะเวลาในห้องอบแห้งจากน้อยไปมากคือ ISD VFBD FBD 2D-SBD SSFD FFD LSU และ In-store dryer ตามลำดับ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ 1. กลุ่มที่อัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงคือ ISD VFBD และ FBD 2.กลุ่มที่อัตราอบแห้งเฉลี่ยปานกลางคือ 2D-SBD SSFD และ FFD 3.กลุ่มที่อัตราอบแห้งเฉลี่ยต่ำคือ LSU และ In-store dryer

กลุ่มที่ 1 มีอัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงเนื่องจากรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิและความเร็วสูง ซึ่งคลุกเคล้ากับข้าวเปลือกขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และอบแห้งอย่างต่อเนื่อง จึงสามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะความชื้นที่ผิวเมล็ดข้าว เนื่องจากอัตราการระเหยความชื้นที่ผิวเมล็ด ไม่สมดุลกับอัตราการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ด จึงทำให้ความชื้นที่ผิวลดลงจนถึงจุดวิกฤต (critical moisture content) อัตราการระเหยความชื้นที่ผิวเมล็ดจึงลดลง ด้วยเหตุนี้เมื่ออบแห้งอย่างต่อเนื่อง จึงสามารถพบการอบแห้งในช่วงอัตราคงที่และช่วงอัตราลดลงได้ และเนื่องจากการอบแห้งที่รวดเร็วจึงทำให้เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องจากระดับความชื้นสูงถึงต่ำ จึงเกิดความชันความชื้นภายในเมล็ดสูงมาก ส่งผลให้ปริมาณข้าวต้นลดลงอย่างรวดเร็ว ในทางปฏิบัติจึงเหมาะกับการอบแห้งข้าวเปลือกขณะที่มีระดับความชื้นที่ผิวสูง เนื่องจากได้อัตราอบแห้งที่รวดเร็วและประหยัดพลังงาน โดยยังคงรักษาคุณภาพข้าวเปลือกที่ดีได้ (Soponronnarit et al., 2001) (Nimmol and Devahastin, 2010) ดังนั้นเมื่อจำต้องอบข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงให้ลดลงถึงระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา จึงต้องแบ่งการอบเป็นหลายขั้นตอน สลับกับการอบในที่อับอากาศและอบด้วยอากาศแวดล้อม (Prachayawarakorn et al., 2005) (สุชาติ ธนสุขประเสริฐ และคณะ, 2554) ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ขณะที่กลุ่มที่ 2 อัตราอบแห้งปานกลาง เครื่องอบแห้งกลุ่มนี้ใช้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิและความเร็วสูงซึ่งไหลคลุกเคล้ากับข้าวเปลือกขึ้นเป็นระยะเวลาสั้น ๆ สลับกับการพักหรือการอบแห้งแบบเชิงซ้ำในถังพัก ทำให้ความชื้นที่ผิวเมล็ดข้าวลดลงอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น และมีระยะเวลาในการแพร่ความชื้นจากภายในมาสู่ผิวเมล็ดข้าว จึงเกิดการระเหยความชื้นที่ผิวอย่างรวดเร็วในรอบถัดไป อัตราอบแห้งเฉลี่ยของเครื่องอบแห้งกลุ่มนี้จึงค่อนข้างคงที่ (เป็นเส้นตรง) โดยตลอดช่วงอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยลักษณะดังกล่าวอัตราการใช้พลังงานจึงค่อนข้างคงที่โดยตลอดช่วงอบแห้งเช่นกัน (Madhiyanon et al., 2001a) (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์, 2552ก) ด้วยช่วงระยะเวลาพักที่เหมาะสมกับลักษณะการอบแห้ง เครื่องอบแห้งกลุ่มนี้จึงมีแนวโน้มสามารถอบแห้งข้าวเปลือกจากระดับความชื้นสูงสู่ระดับความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาได้โดยยังคงรักษาคุณภาพข้าวเปลือกที่ดีได้ (Madhiyanon and Soponronnarit, 2005) (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญและ ทวีช จิตรสมบูรณ์, 2552ข) ดังแสดงในตารางที่ 6.1 และ 6.2

กลุ่มที่ 3 อัตราอบแห้งเฉลี่ยต่ำเนื่องจากใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งค่อนข้างต่ำ คือช่วงอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ถึงประมาณ 60°C ประกอบกับลักษณะชั้นเมล็ดข้าวค่อนข้างหนาแน่น การอบแห้งจึงเป็นไปอย่างเชิงซ้ำ ใช้เวลานาน ขณะที่การใช้พลังงานค่อนข้างต่ำเนื่องจากชั้นกองเมล็ดที่หนาแน่นและสูงจึงสามารถดักศักย์ภาพอากาศอบแห้งได้อย่างเต็มที่ และคุณภาพข้าวเปลือกที่ดีค่อนข้างดีเนื่องจากใช้อุณหภูมิอบแห้งไม่สูง อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเครื่องอบแห้งแบบ LSU ยังคงต้องอบแห้งเป็นรอบ ๆ สลับกับการอบในที่อับอากาศมากกว่า 2 h ต่อรอบอบแห้ง เพื่อคงรักษา

คุณภาพข้าวเปลือกและลดการใช้พลังงาน (Jittanit et al., 2010) ขณะที่การอบแบบ In-store เหมาะสมกับการลดความชื้นข้าวเปลือกที่ระดับปานกลางถึงต่ำมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 6.1

เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพของเครื่องอบแห้งแบบเป่าแฟน-หล่นหน่วง (SSFD) กับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 6.1 และ 6.2 พบว่า SSFD มีอัตราอบแห้งอยู่ในระดับปานกลางและคงที่โดยตลอดการอบแห้ง เช่นเดียวกับกลุ่มที่ 2 คือ 2D-SBD และ FFD ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในเครื่องอบแห้งนานกว่ามากเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ 1 คือ ISD FBD และ VFBD แต่เมื่อพิจารณาระยะเวลาโดยรวมของกระบวนการอบแห้งจะพบว่าเครื่องอบแห้งในกลุ่มที่ 1 จำเป็นต้องแบ่งการอบแห้งเป็นช่วง ๆ สลับกับการอบในที่อับอากาศ ทำให้ระยะเวลาโดยรวมมากขึ้น ขณะที่เครื่องอบแห้งในกลุ่มที่ 2 และ SSFD มีแนวโน้มสามารถอบแห้งได้ในขั้นตอนเดียว ซึ่งสามารถลดความซับซ้อนและสามารถเปรียบเทียบกับเวลาโดยภาพรวมของกลุ่มที่ 1

ในด้านการสิ้นเปลืองพลังงานพบว่า SSFD มีค่าพลังงานรวมจำเพาะเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้ง 120°C อยู่ในช่วง 5.73-7.76 MJ/kg water evaporated ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ FFD (5.7-7.7 MJ/kg water evaporated) ขณะที่ 2D-SBD (3.6-7.6 MJ/kg water evaporated) มีค่าต่ำกว่า เพราะในกรณีศึกษาของ 2D-SBD ข้าวเปลือกถูกลดความชื้นลงเพียง 2-3% w.b. จากค่าเริ่มต้นเท่านั้นและยังใช้การหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับ 60-70% จึงทำให้การใช้พลังงานรวมจำเพาะลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของ SSFD กับเครื่องอบแห้งกลุ่มที่ 1 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ ISD (5.1-6.8 MJ/kg water evaporated) แต่ในกรณีศึกษานี้ ISD ลดความชื้นจากเพียง 22% w.b. ถึงประมาณ 17% w.b. เท่านั้น จึงน่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่านี้เมื่อต้องลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องให้ถึงระดับต่ำกว่า 14% w.b. ค่าการใช้พลังงานรวมจำเพาะของ FBD (4.6-6.1 MJ/kg water evaporated) และ VFBD (4.3-6.2 MJ/kg water evaporated) มีค่าต่ำกว่า SSFD เนื่องจากการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนและมีการใช้อากาศเวียนกลับในการอบแห้งถึง 85%

ในส่วนปริมาณข้าวต้น พบว่า FFD ได้ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์สูงเกิน 100% แม้ใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิสูง และเป็นการลดความชื้นข้าวเปลือกจากระดับความชื้นสูงถึงระดับความชื้นต่ำในขั้นตอนเดียวของการอบแห้ง ขณะที่กรณีศึกษานี้ 2D-SBD และ VFBD ได้ปริมาณข้าวต้นสูงเนื่องจากลดความชื้นข้าวเปลือกเพียง 3-4% w.b. ในกรณีของ FBD และ LSU ได้ปริมาณข้าวต้นสูงเช่นกันเนื่องจากการแบ่งการอบแห้งเป็นหลายขั้นตอน ที่มีการอบในที่อับอากาศระหว่างรอบการอบแห้งจึงทำให้เกิดการกระจายความชื้นภายในเมล็ดอย่างสม่ำเสมอ ความชื้นที่ตกค้างภายในเมล็ดจึงลดลง จึงสามารถรักษาปริมาณข้าวต้นได้ ในกรณีของ SSFD ได้ปริมาณข้าวต้นสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C (RHRY>100%) หรือเพิ่มระยะเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่ในถังพัก ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ด้วยการเพิ่มปริมาณข้าวเปลือกเริ่มต้นจาก 10 เป็น 30 kg ทำให้ RHRY เพิ่มขึ้นจาก 22.8 เป็น 72.8% แสดงถึงแนวโน้ม SSFD ที่สามารถอบแห้งด้วยเงื่อนไข

อบแห้งที่เข้มข้น เพื่อให้ได้อัตราอบแห้งสูงและการใช้พลังงานรวมจำเพาะที่ลดลง ขณะที่สามารถรักษาปริมาณข้าวคืนที่สูงได้ ด้วยการเพิ่มระยะเวลาเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกในส่วนคาน์คัมเมอร์ที่เหมาะสมกับเงื่อนไขอบแห้ง

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบกลุ่ม (batch paddy dryer)

Dryer	Mi	Mf	Tin	ARR	DS	DT	SHC	SEC	STEC	HRY _c	HRY	WI	Cap.	Note
LSU** ^[1]	23.6	12	55-60	-	4	-	3.21	0.29	3.97	-	42.76	accept	955ton	(a)
	21.0	10.4	58-61	-	3	-	3.63	0.30	4.42	-	42.76	accept	164ton	(a)
	21.4	13.6	50-55	-	3	-	3.12	0.29	3.87	-	42.76	accept	284ton	(a)
2D-SBD* ^[2]	25.4	19.9	110	75-80	1	18min	4.9	-	-	-	-	accept	6 kg	(b)
	24.7	16.8	130	75-80	1	16min	5.7	-	-	RHRY ≈ 25	accept	6 kg	(c)	
	24.5	13.4	150	75-80	1	18min	5.6	-	-	RHRY ≈ 5	accept	6 kg	(d)	
	21.9	13.8	110	75-80	1	-	-	-	-	RHRY ≈ 47	accept	6 kg	(b)	
	17.4	13.4	110	75-80	1	-	-	-	-	RHRY ≈ 100	accept	6 kg	(b)	
	15.1	11.5	130	75-80	1	-	-	-	-	RHRY ≈ 100	accept	6 kg	(b)	
	19.4	16.3	150	75-80	1	-	-	-	-	RHRY ≈ 100	accept	6 kg	(b)	
FFD* ^[3,4]	21	14	100	0	1	170min	3.8	3.9	7.7	52.82	54.43	accept	13 kg	(e)
	21	14	130	0	1	110min	3.2	2.5	5.7	52.82	55.54	accept	13 kg	(e)
	21	14	150	0	1	100min	3.7	2.4	6.1	52.82	56.57	accept	13 kg	(e)
In-store** ^[1]	18.7	14.2	Ambient.	0	1	-	0	2.9	2.9	-	-	accept	-	-
SSFD*	23.4	13.6	80	0	1	90min	6.46	4.91	11.37	RHRY=83.4	accept	10 kg	เงื่อนไข ก.	
	23.2	13.6	80	0	1	210min	4.98	3.88	8.87	RHRY=100.4	accept	30 kg	เงื่อนไข ก.	
	23.6	13.3	120	0	1	30min	4.14	2.52	6.67	RHRY=22.8	accept	10 kg	เงื่อนไข ข.	
	23.7	13.2	120	0	1	80min	3.57	2.16	5.73	RHRY=72.8	accept	30 kg	เงื่อนไข ข.	
	236.	126.	120	0	1	30min	437.	340.	776.	RHRY=272.	accept	10 kg	เงื่อนไข ก.	
	22.8	13.3	120	0	1	70min	3.94	3.05	6.99	RHRY=70.6	accept	30 kg	เงื่อนไข ก.	

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่อง (continuous paddy dryer)

Dryer	Mi	Mf	Tin	ARR	DS	DT	SHC	SEC	STEC	HRYc	HRY	WI	FR	Note
FBD** ^[5]	20.0	14.3	150	85	6	-	3.6	0.9	4.6	47.6	≈47.6	accept	7.9ton/h	(f)
	23.1	14.5	150	85	6	1.5/1min	4.0	1.1	5.1	47.6	≈47.6	accept	5.0ton/h	(f)
	25.9	14.5	150	85	6	1.5/2min	4.8	1.4	6.1	47.6	≈47.6	accept	2.3ton/h	(f)
VFBD** ^[6]	21.1	19.2	125	85	1	≈1min	5.5	0.8	6.2	33	32.5	accept	4.8ton/h	-
	19.4	17.2	133	85	1	≈1min	4.7	0.7	5.4	35.2	37.5	accept	4.8ton/h	-
	21.9	18.7	140	85	1	≈1min	3.8	0.5	4.3	32	37	accept	4.8ton/h	-
2D-SBD** ^[7]	17.8	14.9	149	60-70	1	8.9min	7.0	0.6	7.6	45.9	45.7	accept	2.4ton/h	-
	22.7	20.0	154	60-70	1	6.4min	3.5	0.5	4.0	50.1	52.4	accept	3.2ton/h	-
	18.6	16.0	160	60-70	1	5.2min	3.1	0.5	3.6	41.2	40.8	accept	3.6ton/h	-
ISD* ^[8,9]	21.9	17.8	110	0	1	1.95sec	2.0	3.1	5.1	-	-	-	150kg/h	(g)
	21.9	17.6	130	0	1	1.90sec	3.3	3.0	6.3	-	-	-	150kg/h	(g)
	21.9	17.2	150	0	1	1.98sec	4.1	2.7	6.8	-	-	-	150kg/h	(g)
	22.8	14.9	130	0	6	≈2/2min	-	-	-	58.1	32.5/29.2	accept	90kg/h	(h)
	22.8	14.9	150	0	6	≈2/2min	-	-	-	58.1	32.1/27.3	accept	90kg/h	(h)
	22.8	14.9	170	0	6	≈2/2min	-	-	-	58.1	31.6/25.2	accept	90kg/h	(h)

หมายเหตุตารางที่ 6.1 และ 6.2

LSU : Louisiana State University Dryer, 2D-SBD : Two Dimensional Spouted Bed Dryer, FFD : Free Fall Dryer, SSFD : Spouted Sustain-Fall Dryer, FBD : Fluidized Bed Dryer, VFBD : Vibro-Fludized Bed Dryer, ISD : Impinging Stream Dryer, * : Lab Scale, ** : Commercial Scale, Mi : ความชื้นเริ่มต้น (% w.b.), Mf : ความชื้นสุดท้าย (% w.b.), Tin : อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (°C), ARR : สัดส่วนอากาศหมุนเวียน (%), DS : ขั้นตอนการอบแห้ง (ชั้น), DT : ระยะเวลาในห้องอบแห้ง, SHC : ค่าพลังงานความร้อนจำเพาะ (MJ/kg water evaporated), SEC : ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (MJ/kg water evaporated), STEC : ค่าพลังงานรวมจำเพาะ (MJ/kg water evaporated), HRYc : ปริมาณข้าวต้นตัวอย่างควบคุม (%), HRY : ปริมาณข้าวต้น (%), RHR : ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์, WI : ค่าดัชนีความขาว, Cap. : ปริมาตรบรรจุ (kg), Ambient. : อากาศแวดล้อม (RH > 75%), FR = อัตราการป้อนข้าวเปลือก

^[1] Jittanit et al. (2010), ^[2] Madhiyanon and Soponronnarit (2005), ^[3] สุพิชญาย์ และ ทวีช (2552ก),
^[4] สุพิชญาย์ และ ทวีช (2552ข), ^[5] Prachayawarakorn et al. (2005a), ^[6] Soponronnarit et al. (2001),
^[7] Madhiyanon et al. (2001a), ^[8] Nimmol and Devahastin (2010) , ^[9] สุชาติ และคณะ (2554)

(a) : ทำการอบในที่อับอากาศระหว่างรอบการอบแห้งครั้งละ > 2 h

(b) : 0% สัดส่วนอากาศไหลเข้าคาน์คัมเมอร์

(c) : 20% สัดส่วนอากาศไหลเข้าคาน์คัมเมอร์

(d) : 30% สัดส่วนอากาศไหลเข้าคาน์คัมเมอร์

(e) : ระยะพักระหว่างรอบอบแห้ง 1 min

(f) : ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน 1. FBD 2. Tempering (19-26min) 3. AAV (20-24min) 4. FBD
 5. Tempering (20-27min) 6. AAV (25-32min)

(g) : double point feeding , 5 cm impinging distance

(h) : single point feeding , 5 cm impinging distance, ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน 1. ISD 2. Tempering
 (30min) 3. ISD 4. Tempering (30min) 5. AAV (45min) 6. Aerate (2-3day)

บทที่ 7

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง สำหรับใช้จำลองการอบแห้งข้าวเปลือก โดยทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยผลการทดลองที่แสดงในบทที่ 6 เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ไม่สามารถศึกษาได้โดยง่ายด้วยวิธีการทดลองด้วยการจำลองผลการอบแห้ง จากนั้นศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้งและความยาวท่อลมเป่าที่เพิ่มขึ้น ที่มีต่อจลนศาสตร์การอบแห้งและการสิ้นเปลืองพลังงาน ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

7.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

7.1.1 สมมุติฐานการสร้างแบบจำลอง

1. วัสดุมีขนาดสม่ำเสมอ มีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียว และสามารถประมาณเป็นรูปทรงกลมได้
2. การแพร่ความชื้นจากภายในเป็นกลไกหลักในการอบแห้ง และเป็นการแพร่ของเหลวเป็นหลัก
3. ความชื้นที่ผิวของวัสดุถึงจุดสมดุลกับอากาศอบแห้งในทันทีที่สัมผัส
4. ความชื้นของอุณหภูมิในวัสดุมีค่าน้อย
5. การนำความร้อนและการส่งผ่านความชื้นระหว่างวัสดุ และความร้อนสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมมีค่าน้อย
6. วัสดุไม่มีการหดตัว
7. การสะสมพลังงานความร้อนและไอน้ำของอากาศในชั้นวัสดุมีค่าน้อย
8. การไหลของอากาศและวัสดุเป็นแบบ 1-D (plug type)

การจำลองการอบแห้งแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก คือ 1. ส่วนสเปาต์ (spouted region) เป็นแบบจำลองในช่วงท่อลมเป่า 2. ส่วนหล่นหน่วง (sustained-fall region) เป็นแบบจำลองในช่วงท่อครอบ 3. ส่วนดาวน์คัมเมอร์ (downcomer region) เป็นแบบจำลองในช่วงถึงพัก โดยสมมุติในแต่ละส่วนแบ่งเป็นอนุกรมของชั้นบาง ที่มีความหนาคงที่ ในส่วนสเปาต์และส่วนหล่นหน่วงรูปแบบการไหลของวัสดุและอากาศเป็นแบบไหลตามกัน (concurrent flow) แต่ส่วนดาวน์คัมเมอร์เป็นแบบไหล

ส่วนทางกัน (counter current flow) เนื่องจากมีลมร้อนบางส่วนไหลแทรกขึ้นด้านบนซึ่งส่วนทางกับการไหลลงด้านล่างของชั้นวัสดุในถังพัก ดังแสดงในรูปที่ 7.1

7.1.2 ระบบสมการอนุพันธ์ควบคุม

สมการอนุพันธ์ควบคุมสร้างจากความรู้พื้นฐานของสมดุลมวลและพลังงาน โดยพิจารณาเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแบบบังคับระหว่างอากาศและวัสดุ (forced convective heat transfer) และการถ่ายเทมวลด้วยการแพร่ภายในวัสดุ ซึ่งการอบแห้งเกิดขึ้นภายในชั้นบางที่กำหนด โดย Brooker et al. (1992) ได้นำเสนอกลุ่มของสมการอนุพันธ์ดังนี้

7.1.2.1 สมดุลมวลระหว่างวัฏภาคของแข็งและแก๊ส

$$G_p \frac{dM}{dy} = \pm G_a \frac{dW}{dy} \quad (7.1)$$

7.1.2.2 สมดุลพลังงานของวัสดุ

$$\delta Q = (G_p C_p + G_p M C_w) \frac{dT_p}{dy} - G_p \lambda \frac{dM}{dy} - G_p C_v (T_a - T_p) \frac{dM}{dy} \quad (7.2)$$

7.1.2.3 สมดุลพลังงานของอากาศ

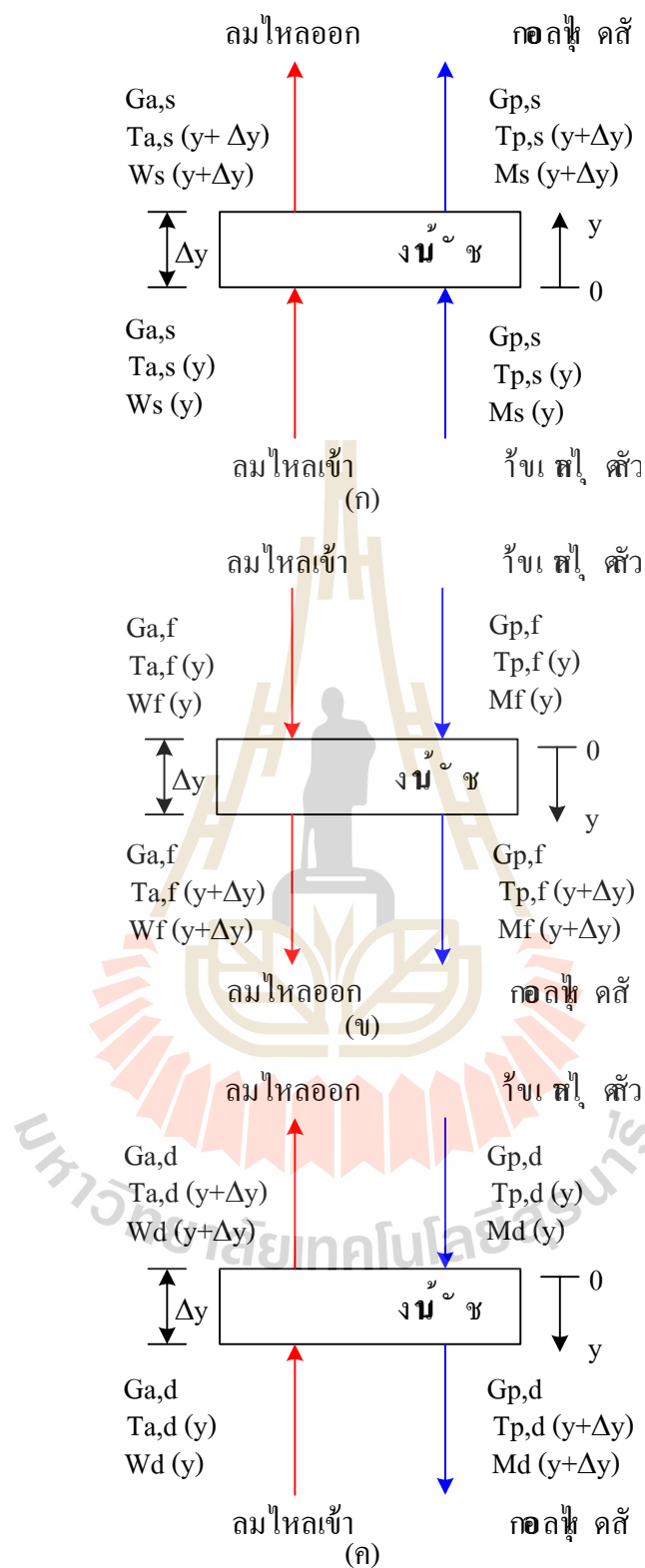
$$\delta Q = \pm (G_a C_a + G_a W C_v) \frac{dT_a}{dy} \quad (7.3)$$

7.1.2.4 สมการอัตราถ่ายเทความร้อนจากอากาศสู่วัสดุ

$$\delta Q = h a_p (T_a - T_p) \quad (7.4)$$

แทนสมการที่ (7.4) ในสมการ (7.2) และ (7.3) จะได้ว่า

$$\frac{dT_a}{dy} = \pm \frac{h a_p (T_a - T_p)}{G_a C_a + G_a W C_v} \quad (7.5)$$



รูปที่ 7.1 การแบ่งชั้นบางเพื่อสร้างแบบจำลอง (ก) ส่วนเสาปัด, (ข) ส่วนหล่นหน่วง และ (ค) ส่วนคาน้ำคัมเมอร์

$$\frac{dT_p}{dy} = \frac{ha_p(T_a - T_p)}{G_p C_p + G_p MC_w} + \frac{\lambda + C_v(T_a - T_p)}{C_p + MC_w} \frac{dM}{dy} \quad (7.6)$$

เครื่องหมายลบในสมการที่ (7.1) (7.3) และ (7.5) สำหรับการไหลแบบตามกัน (concurrent flow) ในส่วนสเปคต์และส่วนหล่นหน่วง เครื่องหมายบวกสำหรับการไหลแบบสวนทางกัน (counter current flow) ในส่วนคาน์คัมเมอร์

เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบสำหรับสมการที่ (7.5) และ (7.6) สมมุติให้ค่าเงื่อนไขที่ทางออกของชั้นบางก่อนหน้าเป็นค่าเงื่อนไขทางเข้าของชั้นบางถัดมา กำหนดให้

ส่วนสเปคต์:

ที่ $y=0, t=0$

$$T_p = T_{p,in}$$

$$M = M_{in}$$

$$T_a = T_{a,in}$$

$$W = W_{amb}$$

$t > 0$ $T_p = T_p$ (ที่ออกจากคาน์คัมเมอร์)

$M = M$ (ที่ออกจากคาน์คัมเมอร์)

$$T_a = T_{a,in}$$

$$W = W_{amb}$$

ส่วนหล่นหน่วง:

ที่ $y=0, t \geq 0$ $T_p = T_p$ (ที่ออกจากสเปคต์)

$M = M$ (ที่ออกจากสเปคต์)

$T_a = T_a$ (ที่ออกจากสเปคต์)

$W = W$ (ที่ออกจากสเปคต์)

ส่วนคาน์คัมเมอร์:

ที่ $y=0, t \geq 0$ $T_p = T_p$ (ที่ออกจากหล่นหน่วง)

$M = M$ (ที่ออกจากหล่นหน่วง)

$$T_a = T_{a,in}$$

$$W = W_{amb}$$

7.1.2.5 สมการอัตราอบแห้ง

ใช้สมการการแพร่ใน 1 มิติ สำหรับรูปทรงกลม (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540) โดยสมมุติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ และมีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบดังที่แสดง

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial^2 r} + \left(\frac{2}{r} \right) \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (7.7)$$

$$\begin{array}{lll} \text{ที่ } t=0, & 0 \leq r \leq R & M = M_{in} \\ \text{ที่ } t > 0, & r = R & M = M_{eq} \quad (\text{ชั้นที่อบแห้ง}) \\ & r = R & \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \quad (\text{ชั้นที่เทมเปอร์ริง}) \\ & r = 0 & \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \end{array}$$

7.1.3 สมการประกอบที่สำคัญ

7.1.3.1 สัมประสิทธิ์การแพร่

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (effective moisture diffusion coefficient) ภายในข้าวเปลือก โดยพิจารณาข้าวเปลือกเป็นรูปทรงกลม สามารถทำนายได้จากสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation) โดยใช้ผลการทดลองของ Poomsa-ad et al. (2002) ดังที่ Madhiyanon et al. (2002) ได้นำเสนอไว้

$$D_{eff} = 5.68033 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-3445.66}{T_{abs}}\right) \quad (7.8)$$

7.1.3.2 การคำนวณความเร็ววัตถุ

ในส่วนสเปคต์และส่วนหล่นหน่วง ความเร็วข้าวเปลือกจะเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวท่อลมเป่า ตามความเร็วอากาศในท่อลมเป่า อัตราการไหลข้าวเปลือก และแรงโน้มถ่วง อีกทั้งชั้นตะแกรงหน่วงข้าวในท่อครอบส่งผลให้ข้าวเปลือกมีความเร็วเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวท่อครอบด้วย ในแบบจำลองจึงใช้สมการสมดุลแรงของอนุภาค (particle force balance) (The FLUENT user's guide, 2001) ดังแสดงในสมการที่ (7.9) เพื่อทำนายความเร็วของข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของแรงต้านอากาศและแรงโน้มถ่วง

$$\frac{dV_p}{dt} = F_D (V_a - V_p) \pm g \left(\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \right) \quad (7.9)$$

$$F_D = \left(\frac{18\mu_a}{\rho_p D_p^2} \right) \left(\frac{C_D \text{Re}}{24} \right) \quad (7.10)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_a D_p |V_p - V_a|}{\mu_a} \quad (7.11)$$

สมการที่ (7.9) เครื่องหมายลบสำหรับส่วนสเปาต์และเครื่องหมายบวกสำหรับส่วนหล่นหน่วง กำหนดให้ความเร็วช้าวนเปลือกเริ่มต้นที่ส่วนสเปาต์และหล่นหน่วงเท่ากับศูนย์ และกำหนดให้ความเร็วช้าวนเปลือกเท่ากับศูนย์เมื่อช้าวนเปลือกเคลื่อนที่ถึงระยะที่ติดตั้งตะแกรงหน่วงช้าวน โดยเลือกใช้สัมประสิทธิ์แรงต้านทานอากาศของอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลม (non-spherical particles) ของ Haider and Levenspiel (1989) ที่ $0.1 < \text{Re} < 5 \times 10^5$ ดังสมการที่ (7.12) และค่าภาวะทรงกลมของช้าวนเปลือกพันธุ์ชัชนาท1 ตามสมการที่ (7.13) มีค่าเท่ากับ $0.7186 \text{ m}^2/\text{m}^2$

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + e^{2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2} \text{Re}^{0.0964 + 0.5565\phi} \right) + \frac{\text{Re} \cdot e^{4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3}}{\text{Re} + e^{1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3}} \quad (7.12)$$

$$\phi = \frac{S}{S} \quad (7.13)$$

7.1.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ในส่วนสเปาต์และส่วนหล่นหน่วงใช้สมการความสัมพัทธ์การถ่ายเทความร้อนผ่านเม็ดทรงกลมของ Whitaker's ที่นำเสนอในปี 1972 สำหรับการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการไหลผ่านรูปทรงกลมที่ $3.5 < \text{Re} < 80,000$ และ $0.7 < \text{Pr} < 380$ โดยสมบัติของของไหลประมาณจากอุณหภูมิอากาศ ยกเว้น μ_s ซึ่งประมาณจากอุณหภูมิผิวของวัสดุ

$$\text{Nu} = 2 + \left(0.4 \text{Re}^{1/2} + 0.06 \text{Re}^{2/3} \right) \text{Pr}^{0.4} \left(\frac{\mu_a}{\mu_s} \right)^{1/4} \quad (7.14)$$

ในส่วนคานันคัมเมอร์ใช้สมการความสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนผ่านเบดแน่น (packed bed) ซึ่งมีค่า Re ของวัสดุต่ำกว่า 100 ของ Mathur and Epstein (1974)

$$Nu = 0.42 + 0.35 Re^{0.8} \quad (7.15)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้จากสมการ (7.15)

$$h = \frac{Nu \cdot k_a}{D_p} \quad (7.16)$$

พื้นที่การถ่ายเทความร้อนของอนุภาคต่อปริมาตรของชั้นบาง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7.17) โดยค่าความพรุน, ε ในส่วนสเปคต์และส่วนหล่นหน่วงคำนวณจากความเร็วข้าวเปลือกในแต่ละชั้นบางที่ได้จากหัวข้อ 7.1.3.2 โดยใช้สมการ (7.18) ในส่วนคานันคัมเมอร์ใช้ค่าความพรุนในกองข้าวเปลือกเฉลี่ยตลอดช่วงความชื้น 14-23% w.b. มีค่าเท่ากับ 0.57

$$a_p = \frac{6(1-\varepsilon)}{D_p} \quad (7.17)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_p}{\rho_p AV_p} \quad (7.18)$$

7.1.3.4 ค่าความชื้นสมดุล

ใช้แบบจำลอง Semi-empirical ของ Henderson ค่าสัมประสิทธิ์ได้จากการทดสอบค่าความชื้นสมดุลขณะคายความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์กข23 โดย ชอบ ลายทอง (2530) โดยสัมประสิทธิ์ $C_1 = -3.146 \times 10^{-6}$ และ $C_2 = 2.464$

$$M_{eq} = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1-RH)}{C_1 T_{abs}} \right]^{\frac{1}{C_2}} \quad (7.19)$$

7.1.3.5 สัดส่วนการรั่วไหลของอากาศเข้าส่วนดาวน์คัมเมอร์

สัดส่วนการรั่วไหลของอากาศ (air leakage ratio) เข้าส่วนดาวน์คัมเมอร์ ขึ้นกับความเร็วมวลอากาศในท่อลมเข้า (superficial velocity) และระยะยกท่อลมเข้า (entrance height) การจำลองใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในภาคผนวก ข. รูปที่ ข.6 โดยสัดส่วนการรั่วไหลของอากาศคืออัตราการไหลอากาศในถังพักต่ออัตราการไหลอากาศในท่อลมเข้า

7.1.3.6 ความชื้นภายในเมล็ดเฉลี่ย

ความชื้นภายในเมล็ดเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ $\bar{M}(t)$ ของเมล็ดข้าวเปลือกได้จากการหาปริพันธ์ของความชื้น $\bar{M}(r, t)$ โดยตลอดปริมาตรทรงกลม

$$\bar{M}(t) = \frac{4\pi}{V} \int_0^R r^2 \bar{M}(r, t) dr \quad (7.20)$$

7.1.3.7 ข้อจำกัดการระเหย

เมื่อสัดส่วนระหว่างมวลของวัสดุต่ออากาศมีค่าสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนดาวน์คัมเมอร์ จะนำไปสู่การประมาณอัตราอบแห้งที่สูงเกินไป และอาจทำให้อัตราการระเหยมากกว่าความจุที่อากาศสามารถรับได้ โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็นตัวบ่งบอกถึงศักยภาพในการรับความชื้น ซึ่งหากมีค่าเกิน 100% ความชื้นที่มากเกินไปต้องถูกควบคุมให้ออกจากอากาศสู่วัสดุ โดยอุณหภูมิและความชื้นอากาศที่ถูกต้องสามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลพลังงาน ซึ่งนำเสนอโดย Saponronnarit (1988)

$$C_a T_i + W_i (2502 + C_v T_i) + (G_p / G_a) C_{pw} T_i = L \\ C_a T_j + W_j (2502 + C_v T_j) + (G_p / G_a) C \quad (7.21)$$

โดย i และ j หมายถึงเงื่อนไขที่เป็นไปไม่ได้และเงื่อนไขที่เป็นไปได้ตามลำดับ ด้วยการแทนค่าความชื้นสัมบูรณ์อากาศ W_j เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_j ในสมการที่ (7.21) แล้วใช้เทคนิค Newton Raphson เพื่อหาค่า T_j และ W_j แล้วคำนวณหาค่าความชื้นเฉลี่ยที่ถูกต้องด้วยสมการที่ (7.21)

$$\bar{M}_j = \bar{M}_i + (W_j - W_i) \frac{G_a}{G_p} \quad (7.22)$$

เมื่อได้ความชื้นเฉลี่ยที่ถูกต้อง จึงหาปริมาณความชื้นส่วนที่เกิน เพื่อป้อนกลับสู่ภายในเมล็ด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\overline{M}_i - \overline{M}$ วิธีการคำนวณความชื้นแต่ละโนดภายในเมล็ดขึ้นกับวิธีการอิมิตัวของความชื้นอากาศซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี 1. เนื่องจากการอบแห้งซึ่งมีการถ่ายเทมวลความชื้นจากเมล็ดสู่อากาศและมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและเมล็ด และ 2. เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเพียงอย่างเดียวทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงจึงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์อิมิตัว ในกรณีที่ 1 แบ่งความชื้นส่วนที่เกินตามน้ำหนักของเมล็ดที่สัมพันธ์กับแต่ละโนด ในกรณีที่ 2 ความชื้นส่วนที่เกินจะถูกป้อนกลับไปยังโนดที่ผิวของเมล็ดเท่านั้น

7.1.3.8 สมการสมบัติของข้าวเปลือกและอากาศ

สมการที่ใช้ในการคำนวณสมบัติของข้าวเปลือกและอากาศที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 7.1 และ 7.2

ตารางที่ 7.1 สมบัติของข้าวเปลือกที่ใช้ในการจำลอง

สมบัติ	สมการสมบัติ	หน่วย	สมการที่	อ้างอิง
λ	$(2502.2 - 2.39T)(1 + 2.0692 \exp(-21.739M_d)) \times 10^3$	J/kg	7.23	i
C_{pw}	$1110 + 44.8(100M_d / (1 + M_d))$	J/kg K	7.24	i
ρ_b	$(552 + 282M_d)$ สำหรับข้าวเปลือกพันธุ์ กข7	kg/m ³	7.25	ii
ε_b	$(62.3 - 25M_d) / 100$ สำหรับข้าวเปลือกพันธุ์ กข7	-	7.26	ii

หมายเหตุ M_d unit decimal dry basis, i = Brooker et al. (1992), ii = สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ (2540)

ตารางที่ 7.2 สมบัติของอากาศอบแห้งที่ใช้ในการจำลอง (Madhiyanon et al., 2001b)

สมบัติ	สมการสมบัติ	หน่วย	สมการที่
RH	$101.3W / (0.62189P_{vs} + WP_{vs})$	decimal	7.27
P_{vs}	$100 \exp(27.0214 - 6887 / T_{abs} - 5.3 \ln(T_{abs} / 273.16))$	Pa	7.28
C_a	$1.00926 \times 10^3 - 4.0403 \times 10^{-2}T + 6.1759 \times 10^{-4}T^2 - 4.097 \times 10^{-7}T^3$	J/kg K	7.29
k_a	$2.425 \times 10^{-2} + 7.889 \times 10^{-5}T - 1.790 \times 10^{-8}T^2 - 8.570 \times 10^{-12}T^3$	W/m K	7.30
ρ_a	$101.325 / (0.287T_{abs})$	kg/m ³	7.31
μ_a	$1.691 \times 10^{-5} + 4.984 \times 10^{-8}T - 3.187 \times 10^{-11}T^2 + 1.319 \times 10^{-14}T^3$	Kg/m s	7.32
C_v	$1.883 \times 10^3 - 1.6737 \times 10^{-1}T + 8.4386 \times 10^{-4}T^2 - 2.6966 \times 10^{-7}T^3$	J/kg K	7.33
C_w	$2.8223 \times 10^3 + 11.823T - 3.5043 \times 10^{-2}T^2 + 3.601 \times 10^{-5}T^3$	J/kg K	7.34

7.2 กระบวนการจำลองผล

จำลองการอบแห้ง โดยแบ่งส่วนอบแห้งเป็น 3 ส่วน คือส่วนสเปาต์, หล่นหน่วง และ คาวนั้คัมเมอร์ โดยในแต่ละส่วนแบ่งเป็นชั้นบางที่มีความหนาคงที่ตามแนวการเคลื่อนที่ของ ข้าวเปลือก ดังแสดงในรูปที่ 7.1 พิจารณาการอบแห้งตามการเคลื่อนที่ของเมล็ด โดยเริ่มจากส่วนสเปาต์ ต่อมาที่ส่วนหล่นหน่วง และส่วนคาวนั้คัมเมอร์เป็นส่วนสุดท้าย หลังจากนั้นข้าวเปลือกจะไหลเข้าสู่ส่วนสเปาต์อีกครั้งเป็นการเริ่มการอบแห้งในรอบถัดไป หมุนเวียนเช่นนี้จนกระทั่งได้ จำนวนรอบอบแห้งที่ต้องการ ดังนั้นเงื่อนไขของเมล็ดที่ออกจากส่วนอบแห้งที่พิจารณาจะถูกใช้เป็น เงื่อนไขเริ่มต้นของส่วนอบแห้งถัดไป กระบวนการหาผลเฉลยของสมการควบคุมแสดงดังต่อไปนี้

1. ส่วนสเปาต์ประกอบด้วยชั้นบางที่ซ้อนทับกันในแนวตั้งตามแนวท่อลมเป่า ด้วยการกำหนดความหนาของชั้นบางที่แน่นอน เพื่อคำนวณการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างอากาศ และเมล็ดในชั้นบาง โดยเริ่มจากการคำนวณหาความเร็วข้าวเปลือกและเวลาอบแห้งในชั้นบางนั้น ๆ ด้วยสมการสมดุลแรงของอนุภาคตามสมการที่ (7.9) โดยใช้เทคนิค Runge-Kutta order 4 ได้ ระยะเวลาอบแห้งในชั้นบาง จากนั้นคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างความชื้น (moisture profile) ภายในเมล็ด เนื่องจากการอบแห้งในชั้นบางตามเวลาอบแห้งที่คำนวณได้ก่อนหน้า ด้วย สมการการแพร่ตามสมการที่ (7.7) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของ Crank-Nicholson แล้ว คำนวณหาความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดภายหลังจากชั้นบางตามสมการที่ (7.20) ด้วย Simpson's rule และสามารถคำนวณความชื้นอากาศที่ไหลออกจากชั้นบางด้วยสมการสมดุลมวลตามสมการที่ (7.1)

2. เนื่องจากทราบเงื่อนไขของเมล็ดและอากาศที่เข้าสู่ชั้นบาง อีกทั้งได้คำนวณเวลาอบแห้งในชั้นบางและปริมาณความชื้นที่เมล็ดระเหยได้ในชั้นบางแล้ว ลำดับถัดไปจึงคำนวณ เงื่อนไขของเมล็ดและอากาศที่ออกจากชั้นบางด้วยสมการสมดุลพลังงานดังสมการที่ (7.5) และ (7.6) โดยใช้เทคนิค Multivariable Runge-Kutta order 4

3. โดยใช้เงื่อนไขของเมล็ดและอากาศที่ออกจากชั้นบางก่อนหน้า เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของชั้นบางถัดไป เพื่อทำซ้ำกระบวนการที่ 1. และ 2. กับชั้นบางถัดไป จนกระทั่งถึงชั้นบางบนสุดของส่วนสเปาต์

4. เงื่อนไขเมล็ดและอากาศที่ทางออกส่วนสเปาต์ถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขทางเข้าส่วน หล่นหน่วง การคำนวณเริ่มจากชั้นบางบนสุดของส่วนหล่นหน่วง โดยใช้กระบวนการและระเบียบวิธีเช่นเดียวกับส่วนสเปาต์ ตามกระบวนการที่ 1. 2. และ 3. จนกระทั่งได้เงื่อนไขเมล็ดและอากาศที่ทางออกส่วนหล่นหน่วง

5. เงื่อนไขเมล็ดที่ทางออกส่วนหล่นหน่วงถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขทางเข้าส่วน คาวนั้คัมเมอร์ การคำนวณเริ่มจากชั้นบางบนสุดของส่วนคาวนั้คัมเมอร์ เนื่องจากลักษณะการไหล

ระหว่างอากาศและเมล็ดเป็นแบบสวนทางกัน ซึ่งทราบเฉพาะเงื่อนไขเมล็ดที่ชั้นบนสุดของส่วนควาน์คัมเมอร์ และทราบเฉพาะเงื่อนไขอากาศที่ชั้นล่างสุดของส่วนควาน์คัมเมอร์ ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (iterative method) ในรอบแรกของการคำนวณซ้ำ ใช้ค่าเงื่อนไขอากาศที่เข้าด้านล่างของส่วนควาน์คัมเมอร์ (เงื่อนไขอากาศที่อุณหภูมิเข้า) โดยกำหนดให้เป็นเงื่อนไขอากาศที่เข้าแต่ละชั้นบาง โดยตลอดส่วนควาน์คัมเมอร์ ด้วยกระบวนการคำนวณเช่นเดียวกับส่วนสเปคต์ สมการเชิงอนุพันธ์ทั้ง 4 สมการ คือ สมการที่ (7.7) (7.1) (7.5) และ (7.6) ถูกคำนวณพร้อมกันด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยเงื่อนไขอากาศที่ทางออกของแต่ละชั้นบางจะถูกใช้เป็นเงื่อนไขอากาศของการการคำนวณซ้ำในรอบถัดไป กระบวนการทั้งหมดจะถูกคำนวณซ้ำจนกระทั่งคำตอบเข้าโดยตลอดส่วนควาน์คัมเมอร์

6. ในส่วนควาน์คัมเมอร์เนื่องจากกองเมล็ดมีความพรุนค่อนข้างคงที่ตลอดการอบแห้ง อีกทั้งอัตราการไหลเมล็ดขึ้นกับแรงโน้มถ่วงเป็นหลัก จึงใช้ความเร็วเมล็ดคงที่ในส่วนนี้ นอกจากนี้ลักษณะกั้นดังพักที่เป็นรูปกรวย ทำให้อากาศและเมล็ดมีความเร็วเปลี่ยนไป แบบจำลองจึงได้คำนวณความเร็วอากาศและเมล็ดในส่วนถึงพักกรวยตามกฎอนุรักษ์มวล

7. ในแต่ละชั้นบาง แบบจำลองจะตรวจสอบความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ได้จากการคำนวณอุณหภูมิและความชื้นสมบูรณ์ของอากาศอบแห้ง หากมีค่ามากกว่า 100% จะทำการคำนวณย้อนกลับด้วยสมการที่ (7.21) และ (7.22) เพื่อหาปริมาณความชื้นและอุณหภูมิอากาศที่ถูกต้อง

8. การคำนวณในรอบอบแห้งถัดไปจะเริ่มจากกระบวนการที่ 1. โดยใช้เงื่อนไขเมล็ดที่ออกจากชั้นล่างสุดของส่วนควาน์คัมเมอร์ และเงื่อนไขอากาศทางเข้าที่อุณหภูมิเข้า เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในส่วนสเปคต์สำหรับการคำนวณในรอบถัดไป การคำนวณจะทำซ้ำเป็นวงรอบจนกระทั่งได้จำนวนรอบอบแห้งที่ต้องการ

7.3 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองผลการอบแห้ง ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB และใช้เงื่อนไขอบแห้งเช่นเดียวกับการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง ที่ได้ทำการทดลองดังแสดงในบทที่ 6 เนื่องจากมีผลการทดลองอบแห้งจำนวนมาก เพื่อความเหมาะสม จึงเลือกเฉพาะการทดลองที่มีการปรับปัจจัยหลักคือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ระยะยกที่อุณหภูมิเข้า และความเร็วอากาศที่อุณหภูมิเข้า ซึ่งมีผลต่อการอบแห้งโดยตรง โดยเลือกการทดลองที่ค่าเงื่อนไขปัจจัยหลักมีค่าสูงสุดและต่ำสุด ดังแสดงเงื่อนไขการทดลองที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองในตารางที่ 7.3 และขนาดเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการจำลองในตารางที่ 7.4

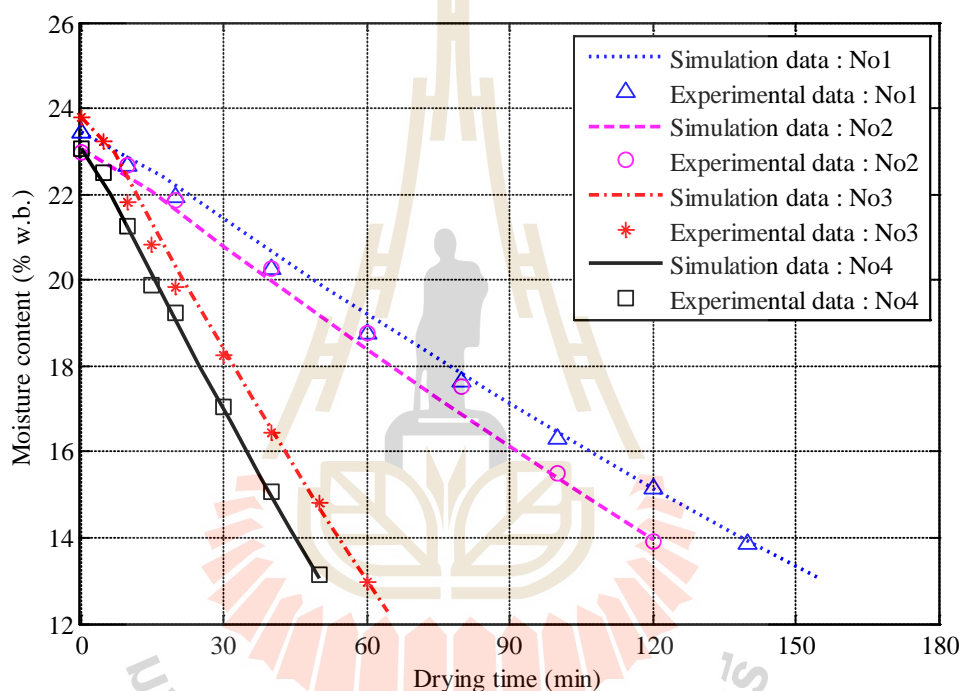
ตารางที่ 7.3 เงื่อนไขจำลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

เงื่อนไขการทดลอง	การทดลองที่			
	1	2	3	4
อุณหภูมิอากาศทางเข้า, °C	80	80	120	120
ความเร็วอากาศที่อลมเข้า, m/s	17	23	20	23
ระยะยกที่อลมเป่า, cm	4	4	6	6
มวลข้าวเปลือกในถัง, kg	20	20	20	20
จำนวนตะแกรงหน่วงข้าว, ชั้น	11	11	11	11
พันธุ์ข้าวเปลือก	ชัยนาท1	ชัยนาท1	ชัยนาท1	ชัยนาท1
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, °C	30.84	32.83	29.38	32.69
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม, %	59.37	49.47	65.92	48.23
อุณหภูมิข้าวเปลือกเริ่มต้น, °C	20.1	20.12	20.05	20.2
ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น, % w.b.	23.44	23.04	23.8	23.04
เส้นผ่านศูนย์กลางเมล็ด, mm	3.4886	3.4886	3.4886	3.4886
สัดส่วนการรั่วไหลของอากาศ, %	18.59	17.11	27.16	25.43
อัตราการไหลข้าวเปลือก, kg/min	1.16	1.33	2.79	3.18

ตารางที่ 7.4 ขนาดเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

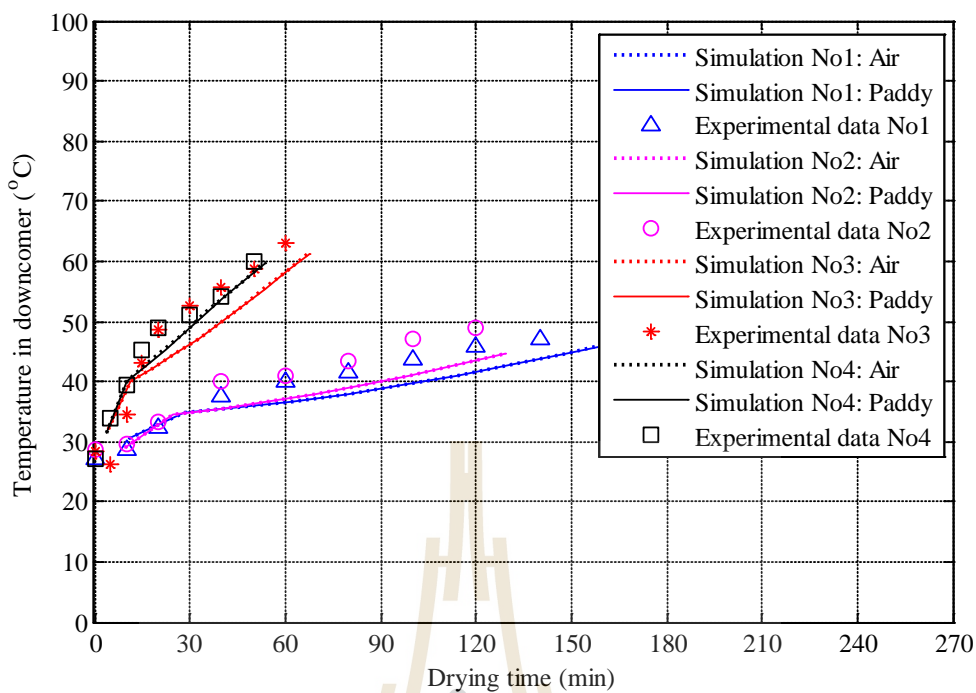
ขนาดเครื่องอบแห้ง	ค่า
ความยาวที่อลมเป่า, m	4
ความยาวที่อกรอบ, m	3
ความสูงถึงพัก, m	1
เส้นผ่านศูนย์กลางที่อลมเข้า, m	0.043
เส้นผ่านศูนย์กลางที่อลมเป่า, m	0.059
เส้นผ่านศูนย์กลางที่อกรอบ, m	0.124
เส้นผ่านศูนย์กลางถึงพัก, m	0.32
มุมยอดฐานรูปกรวย, องศา	60
ความสูงของชั้นเมล็ด, m	0.4875

ผลการจำลองและผลการทดลองแสดงในรูปที่ 7.2-7.8 จากรูปที่ 7.2 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกได้อย่างถูกต้องในทุกเงื่อนไขการจำลอง ขณะที่ผลการจำลองอุณหภูมิข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งในถังพักที่ระยะความสูงจากพื้นถึงที่ 25 และ 45 cm แสดงในรูปที่ 7.3-7.4 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งในถังพักมีค่าใกล้เคียงกันมากโดยตลอดการอบแห้ง และมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองที่วัดได้ แต่ค่าอุณหภูมิที่จำลองได้มีค่าต่ำกว่าผลการทดลองในบางกรณีศึกษา โดยในกรณีทดสอบนี้ อุณหภูมิมีความแตกต่างสูงสุดเท่ากับ 7.65°C

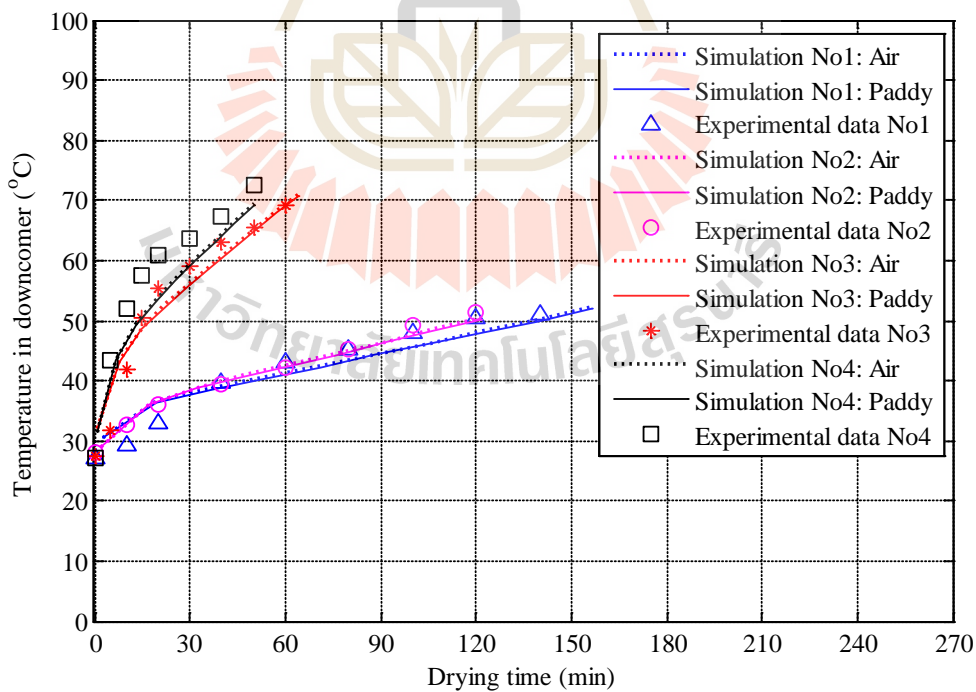


รูปที่ 7.2 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับผลการทดลองที่ 1-4

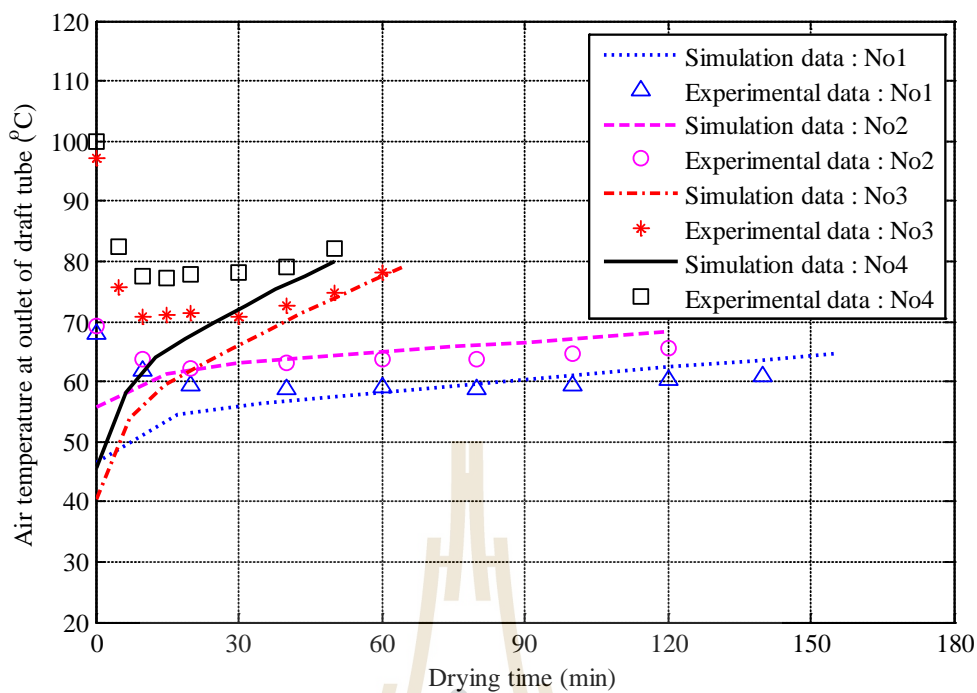
อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ออกจากส่วนสเปาต์และส่วนหล่นหน่วงแสดงในรูปที่ 7.5-7.6 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิอากาศที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงในช่วงแรกของการทดลองและมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ และมีแนวโน้มสูงขึ้นในช่วงท้ายของการอบแห้ง ขณะที่ในช่วงแรกของการอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่วัดได้จากการทดลองมาก และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มเข้าสู่อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่วัดได้จากการทดลอง โดยความแตกต่างจะเกิดขึ้นในช่วง 25-30 นาทีแรกของการอบแห้ง



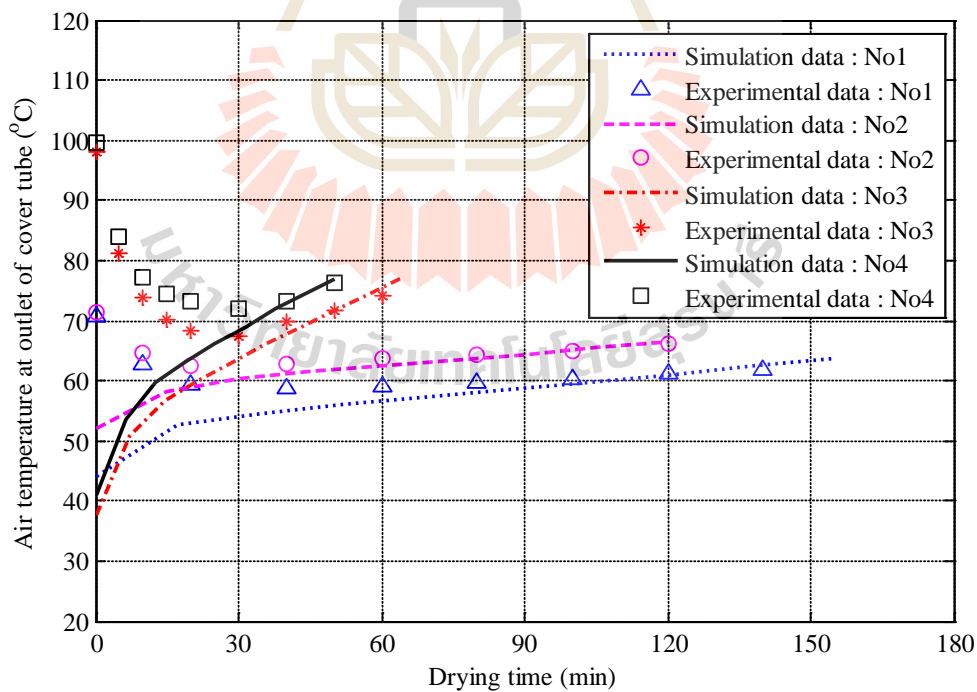
รูปที่ 7.3 ผลจำลองอุณหภูมิข้าวเปลือกและอากาศในถังพักที่ความสูง 25 cm เทียบกับผลการทดลอง



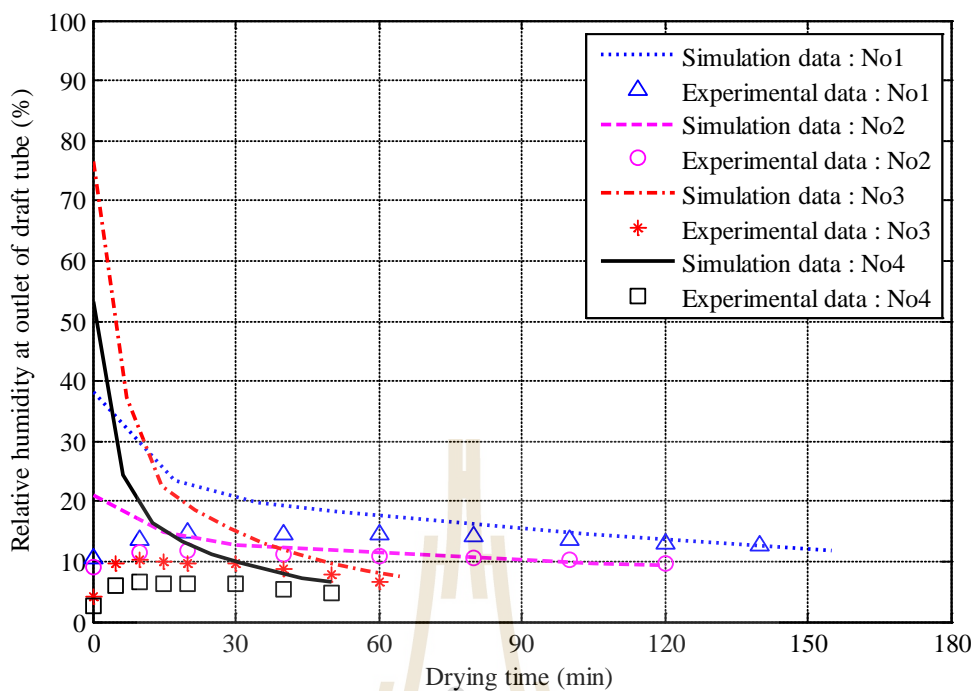
รูปที่ 7.4 ผลจำลองอุณหภูมิข้าวเปลือกและอากาศในถังพักที่ความสูง 45 cm เทียบกับผลการทดลอง



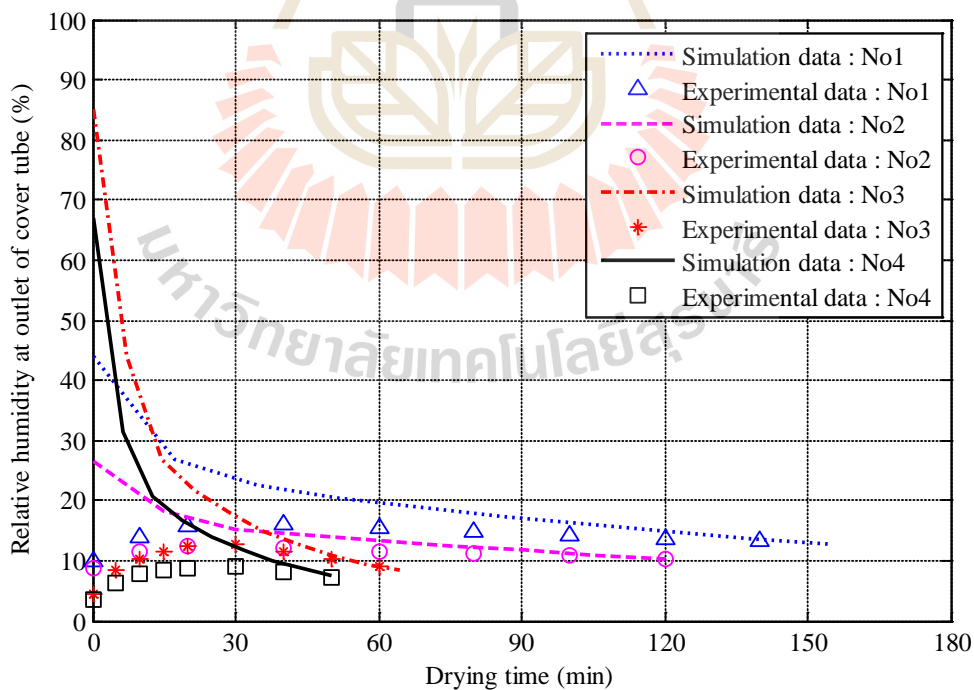
รูปที่ 7.5 ผลจำลองอุณหภูมิอากาศที่ทางออกท่อลมเป่าเทียบกับผลการทดลองที่ 1-4



รูปที่ 7.6 ผลจำลองอุณหภูมิอากาศที่ทางออกท่อครอบเทียบกับผลการทดลองที่ 1-4



รูปที่ 7.7 ผลจำลองความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางออกท่อลมเป่าเทียบกับผลการทดลองที่ 1-4



รูปที่ 7.8 ผลจำลองความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางออกท่อครอบเทียบกับผลการทดลองที่ 1-4

ในการทดลอง เพื่อให้ลมร้อนที่ใช้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ตั้งแต่เริ่มต้นการอบแห้ง และเพื่อลดการสูญเสียความร้อนให้กับผนังห้องอบแห้ง จึงทำการเปิดเครื่องทำความร้อนและพัดลมก่อนทำการทดลอง และเริ่มทำการทดลองหลังจากที่อุณหภูมิลมร้อนที่ทางออกเครื่องอบแห้งมีค่าคงที่ (เกิดการสะสมความร้อนในผนังและฉนวนเครื่องอบแห้ง) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง ค่าอุณหภูมิอากาศที่วัดได้จึงมีค่าสูงกว่าผลการจำลอง เพราะมีการถ่ายเทความร้อนจากผนังเครื่องอบแห้งสู่ลมร้อน ดังแสดงในรูปที่ 7.5-7.6 ขณะที่แบบจำลองสามารถทำนายอุณหภูมิที่ปลายท่อลมเป่าและปลายท่อครอบได้สอดคล้องในช่วงกลางจนถึงสิ้นสุดการอบแห้ง

ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเป็นปัจจัยที่บ่งชี้ถึงศักยภาพอากาศในการรับความชื้นจากเมล็ดได้ โดยความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งที่ออกจากส่วนสเปาต์และส่วนหล่นหน่วงแสดงในรูปที่ 7.7-7.8 ตามลำดับ พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงในช่วงแรกของการอบแห้งและลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มมากขึ้น เพราะข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นจึงจำกัดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศอบแห้งในส่วนสเปาต์และส่วนหล่นหน่วง อากาศอบแห้งที่ออกจากทั้ง 2 ส่วน จึงมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าลดลงดังที่แสดง ประกอบกับเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นลดลง การแพร่ความชื้นจากภายในสู่ผิวต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นที่ระเหยได้ที่ผิวจึงมีค่าลดลง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าลดลง นอกจากนี้พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดขณะทดลอง เฉพาะในช่วงกลางและช่วงท้ายของการอบแห้ง โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้งเป็นผลของการอบอุ่นเครื่องอบแห้งดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้นี้ ความสอดคล้องของค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างผลการจำลองและผลการวัดที่ได้จากการทดลองแสดงถึงความถูกต้องของแบบจำลองในการทำนายการแลกเปลี่ยนความชื้นและความร้อนระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งในส่วนท่อลมเป่าและท่อครอบได้ เห็นได้ว่าแบบจำลองให้ผลที่น่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง และสามารถนำไปใช้ในการทำนายผลการวิจัยต่อไปได้

7.4 ลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 4 ที่แสดงในตารางที่ 7.3 เป็นเงื่อนไขในการจำลองการอบแห้ง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น ของอากาศอบแห้งและข้าวเปลือกในส่วนอบแห้งที่แตกต่าง ๆ กัน

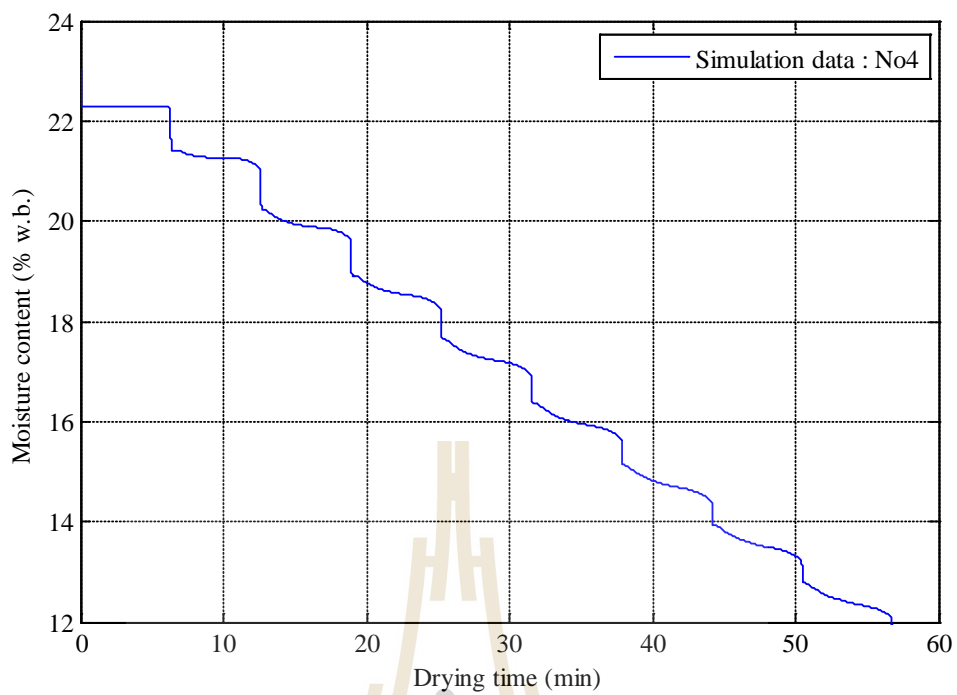
7.4.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง

การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยตลอดการอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 7.2 แต่ผลการจำลองแสดงให้เห็นการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วในส่วนสเปคต์และส่วนหล่นหน่วง ขณะที่ในส่วนดาวน์คัมเมอร์ความชื้นข้าวเปลือกจะลดลงอย่างช้า ๆ การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกจึงมีลักษณะเป็นแบบขยัก ดังแสดงในรูปที่ 7.9 แต่โดยภาพรวมแล้วอัตราการอบแห้งเฉลี่ยยังคงมีค่าคงที่ ในทำนองเดียวกันอุณหภูมิข้าวเปลือกจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในส่วนสเปคต์และส่วนหล่นอิสระ และมีการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าในส่วนดาวน์คัมเมอร์ ทำให้อุณหภูมิข้าวเปลือกมีการกวัดแกว่งขึ้นลง ดังแสดงในรูปที่ 7.10 แต่โดยภาพรวมแล้วอุณหภูมิข้าวเปลือกมีค่าสูงขึ้นเมื่อผ่านการอบแห้ง การลดลงและการเพิ่มขึ้นของความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วในส่วนสเปคต์และส่วนหล่นหน่วง อาจส่งผลเสียในด้านปริมาณข้าวต้นได้ ซึ่งจะได้ทำการวิเคราะห์ห้อย่างละเอียดในบทที่ 8

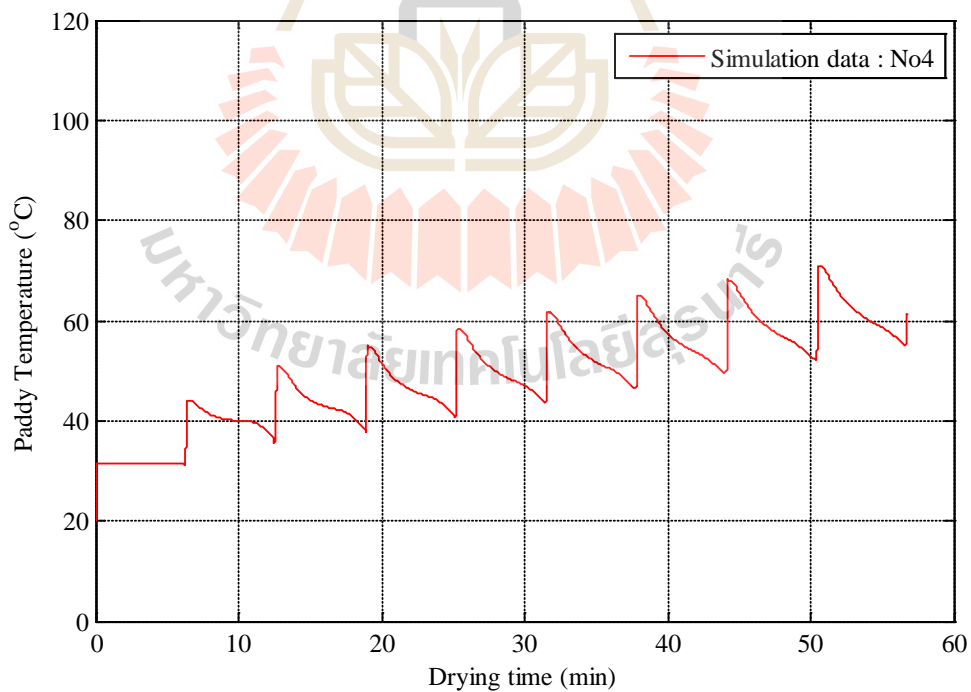
7.4.2 ความเร็วข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

ผลการจำลองความเร็วข้าวเปลือกในส่วนสเปคต์, ส่วนหล่นหน่วง และส่วนดาวน์คัมเมอร์ แสดงในรูปที่ 7.11-7.13 ตามลำดับ พบว่าในส่วนสเปคต์ข้าวเปลือกมีความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากหุคหนึ่งจนมีความเร็วสูงสุดที่ 1.37 m/s ที่ความสูง 27 cm จากทางเข้าท่อลมเป่า และมีความลดเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องตามความยาวท่อลมเป่าที่มากขึ้น เนื่องจากอากาศอบแห้งมีอุณหภูมิลดลง โดยความพรุนในท่อลมเป่าที่คำนวณได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.5482-0.9873 และค่าความพรุนเฉลี่ยในท่อลมเป่ามีค่าเท่ากับ 0.9882 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความพรุนที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ด้วยพาหะลม (pneumatic transport) คือ 0.98

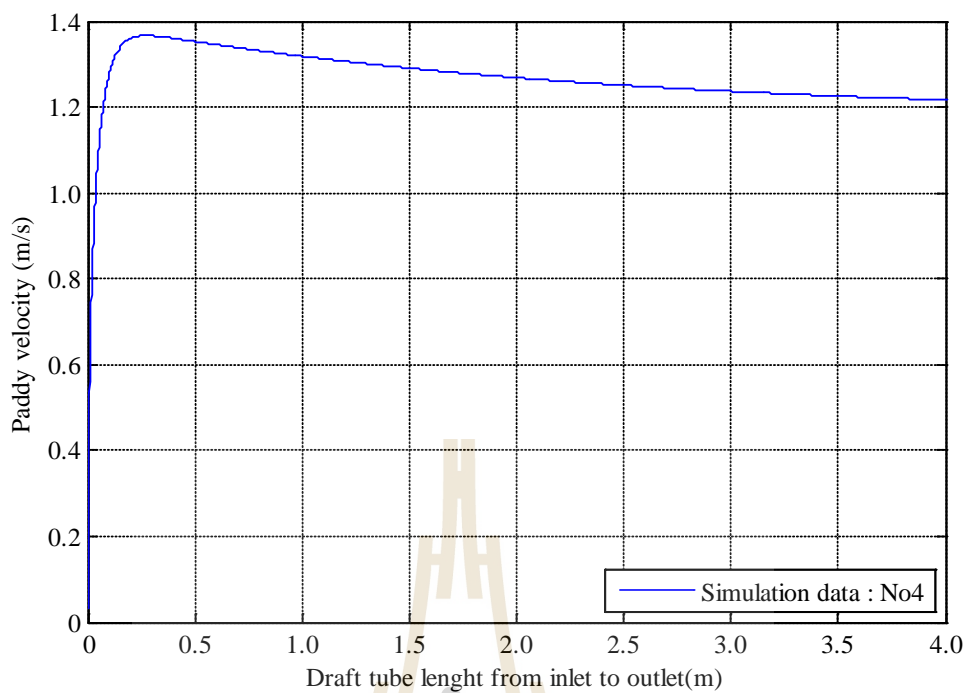
ในส่วนหล่นหน่วงข้าวเปลือกจะตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงและความเร็วอากาศที่ผลักให้ข้าวเปลือกเคลื่อนที่ลงมา โดยตะแกรงหน่วงข้าวมีส่วนช่วยชะลอการตกลงของข้าวเปลือก ในแบบจำลองจึงกำหนดให้ข้าวเปลือกมีความเร็วเป็นศูนย์เมื่อไหลถึงระยะที่ติดตั้งตะแกรงหน่วงข้าวไว้ จึงทำให้ได้ลักษณะความเร็วเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นช่วง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.12 โดยความเร็วข้าวเปลือกสูงสุดในส่วนหล่นหน่วงอยู่ที่ประมาณ 3 m/s ลักษณะการเพิ่มขึ้นของความเร็วข้าวเปลือกแสดงให้เห็นว่าความเร็วข้าวเปลือกสูงสุดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วปลาย (terminal velocity) โดยความพรุนในท่อครอบที่คำนวณได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.5513-0.9987 และค่าความพรุนเฉลี่ยในท่อครอบมีค่าเท่ากับ 0.9953 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความพรุนที่ทดสอบได้ดังแสดงในภาคผนวก ข.6 คือ 0.9965 ในการอบแห้งจริงข้าวเปลือกไม่ได้หยุดโดยสมบูรณ์เช่นเดียวกับการจำลองจึงทำให้ค่าความพรุนในท่อครอบที่ได้จากการจำลองมีค่าน้อยกว่าการทดลองจริง



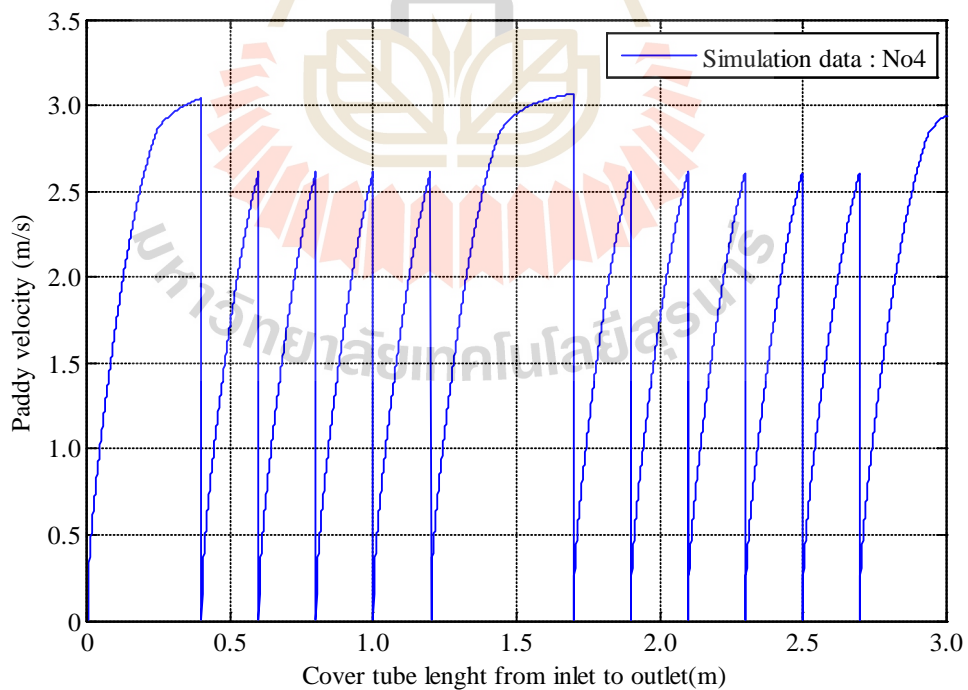
รูปที่ 7.9 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือกตลอดช่วงการอบแห้ง



รูปที่ 7.10 ผลจำลองอุณหภูมิข้าวเปลือกตลอดช่วงการอบแห้ง

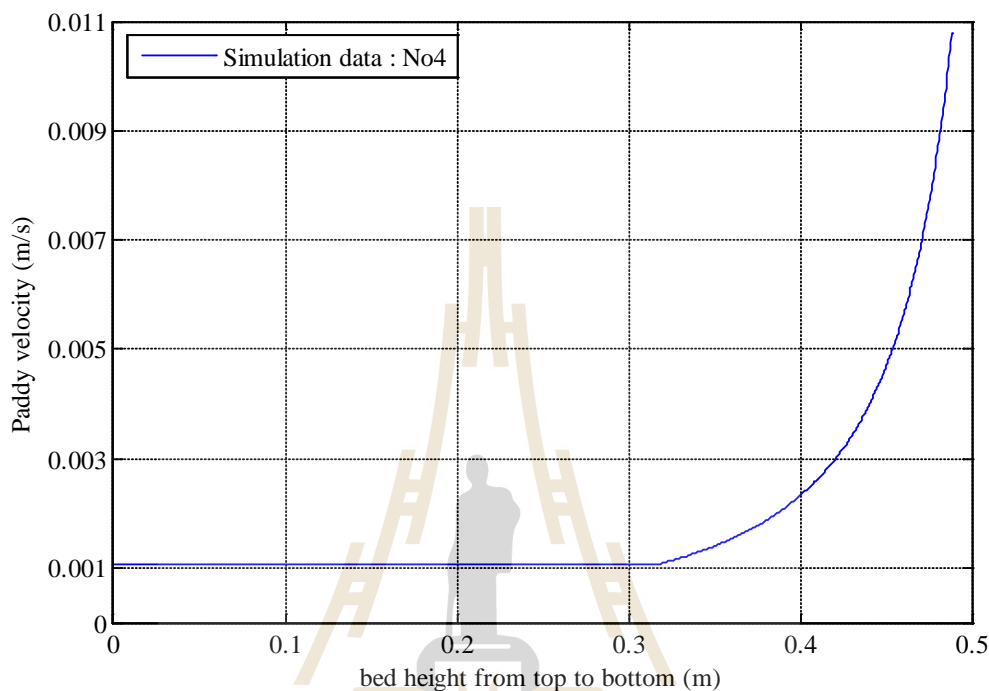


รูปที่ 7.11 ผลจำลองความเร็วข้าวเปลือกตลอดความยาวท่อลมเป่า



รูปที่ 7.12 ผลจำลองความเร็วข้าวเปลือกตลอดความยาวท่อครอบ

ในส่วนควาน้ำคัมเมอร์ความเร็วข้าวเปลือกในแบบจำลองจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.0011 m/s แต่เมื่อข้าวเปลือกไหลลงมาสู่ช่วงกรวยของถังพัก ความเร็วข้าวเปลือกจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามกฎอนุรักษ์มวล จนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ก้นถังพักเท่ากับ 0.0108 m/s ดังแสดงในรูปที่ 7.13

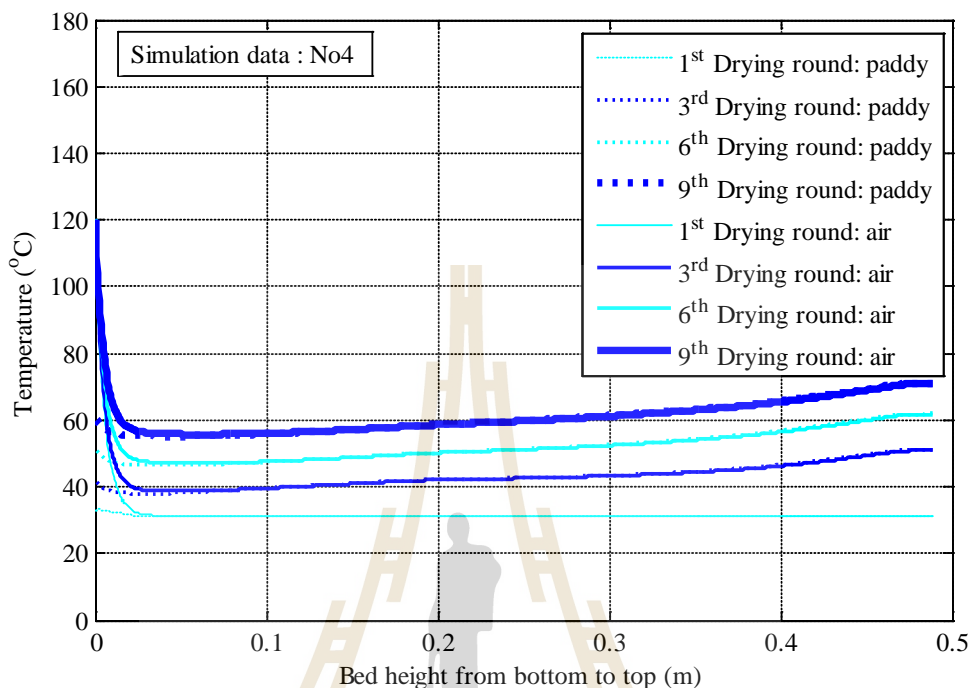


รูปที่ 7.13 ผลจำลองความเร็วข้าวเปลือกตลอดความสูงชั้นเมล็ดในถังพัก

7.4.3 อุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งในถังพัก

กลไกการลดความชื้นในช่วงควาน้ำคัมเมอร์ โดยส่วนใหญ่ใช้การระเหยความชื้นจากผิวเมล็ดด้วยความร้อนภายในตัวเองจึงทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิลดลงตลอดความสูงของชั้นเมล็ดที่เคลื่อนที่ลง (evaporative cooling) (ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2546) ดังแสดงในรูปที่ 7.14 โดยลมร้อนที่เร็วไหลเข้าถังพักจะทำหน้าที่หลักในการขนถ่ายความชื้นที่ระเหยจากข้าวเปลือกสู่สิ่งแวดล้อม ขณะที่อากาศอบแห้งจะมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วภายหลังไหลเข้าสู่ถังพัก เนื่องจากสัดส่วนระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศอบแห้งมีค่าสูงมาก โดยอุณหภูมิอากาศจะเริ่มคงตัวที่ประมาณ 5 cm จากทางเข้าที่ท่อลมเป่า เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Madhiyanon et al. (2001b) นอกจากนี้ยังพบว่าในรอบแรกของการอบแห้ง ในส่วนควาน้ำคัมเมอร์จะมีการอบแห้งเฉพาะบริเวณใกล้ทางออกถังพักเท่านั้น ดังจะเห็นได้จากอากาศและข้าวเปลือกในถังพัก โดยส่วนใหญ่มีค่าอุณหภูมิมืดที่และเท่ากัน และอากาศอบแห้งในถังพักมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อิมตัวที่รอบแรก

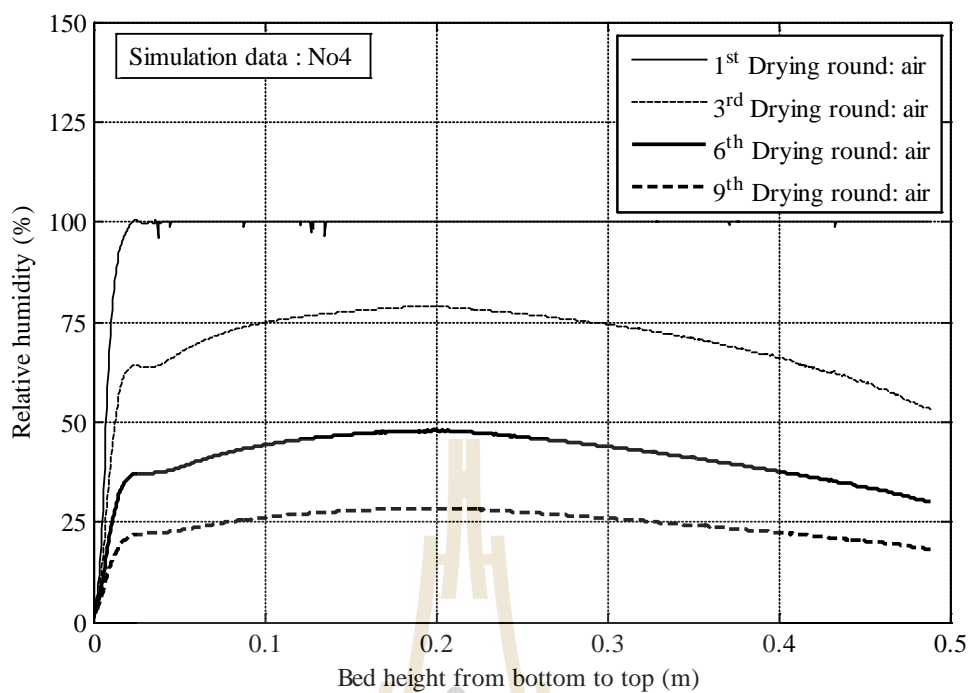
ของการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 7.15 แต่ในรอบอบแห้งถัดไปค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าลดลงมากขึ้น แสดงถึงอากาศที่ไหลออกจากถังพักยังคงมีศักยภาพในการขนถ่ายความชื้นเหลืออยู่



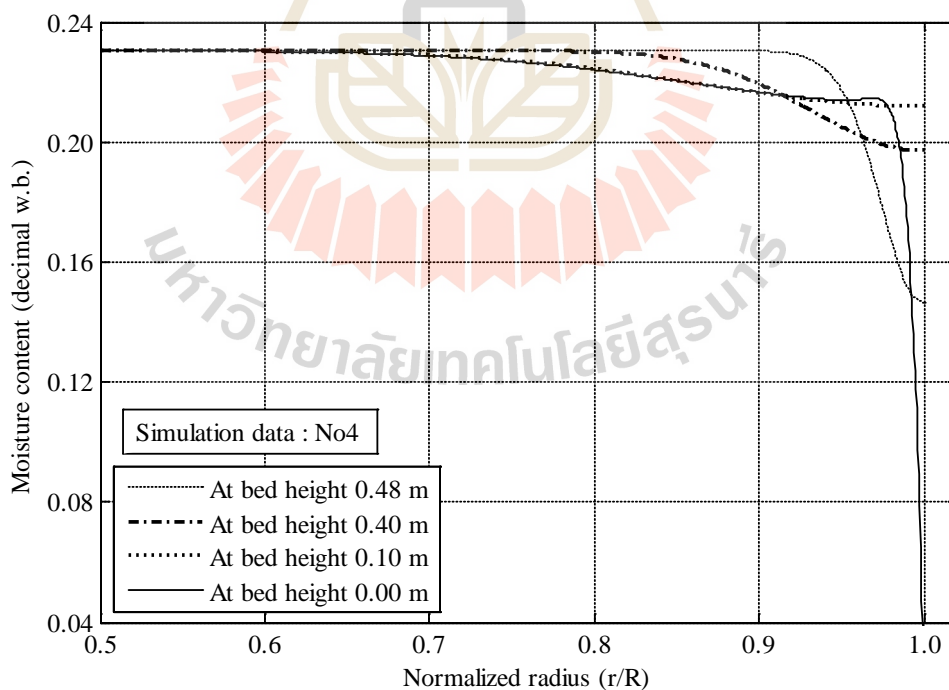
รูปที่ 7.14 ผลจำลองอุณหภูมิข้าวเปลือกและอากาศตลอดความสูงชั้นเมล็ดในถังพัก

การกระจายความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกในรอบแรกของการอบแห้ง ขณะเคลื่อนที่ในถังพัก แสดงในรูปที่ 7.16 พบว่าความชื้นภายในเมล็ดจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากความชื้นที่ผิวเมล็ดมีค่าสูงขึ้นเมื่อข้าวเปลือกไหลลงจากระดับความสูงชั้นเมล็ดที่ 0.48 m ถึงระดับความสูงชั้นเมล็ดที่ 0.1 m แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของข้าวเปลือกในถังพักช่วยให้ความชื้นมีระยะเวลาในการกระจายตัวที่สม่ำเสมอทั่วทั้งเมล็ดมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาการกระจายความชื้นภายในเมล็ดที่ก้นถังพัก (ระดับความสูงชั้นเมล็ด 0 m) พบว่าความชื้นที่ผิวเมล็ดมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากเมล็ดจะสัมผัสอากาศที่เร็วไหลเข้าสู่ถังพักขณะที่ยังมีอุณหภูมิสูง ประกอบกับผลของการกระจายความชื้นภายในเมล็ดระหว่างที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่ในถังพัก จึงทำให้ข้าวเปลือกสูญเสียความชื้นที่ผิวให้กับอากาศอบแห้งอย่างรวดเร็ว

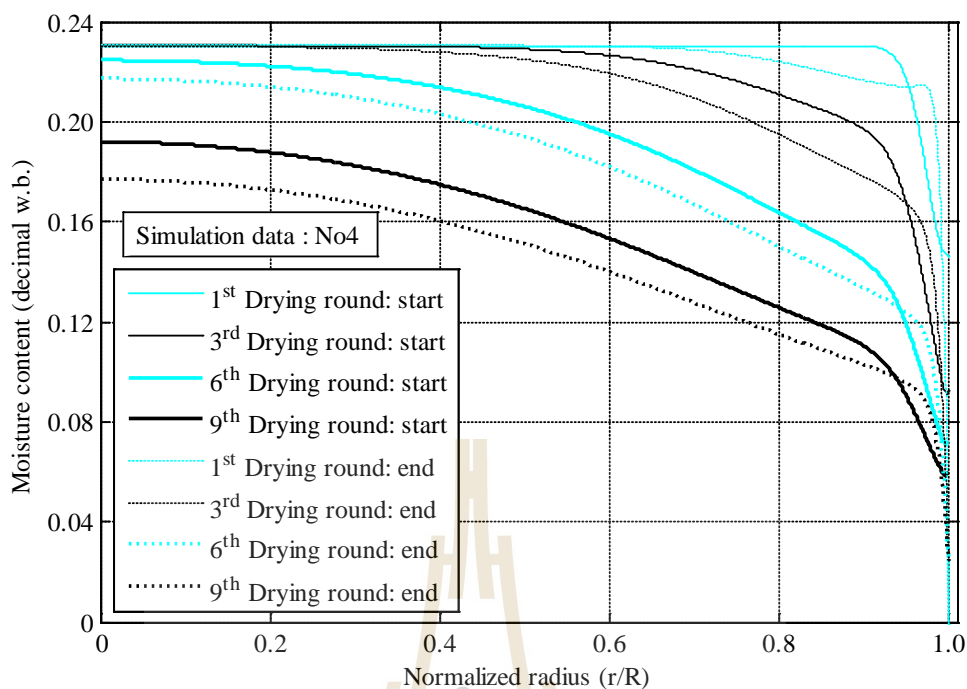
การกระจายความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกก่อนและหลังการอบแห้งในถังพัก แสดงในรูปที่ 7.17 แสดงให้เห็นถึงการลดลงของระดับความชื้นภายในเมล็ดในแต่ละรอบการอบแห้งและการกระจายความชื้นภายในเมล็ดที่เกิดขึ้นในทุกรอบของการอบแห้งในถังพัก



รูปที่ 7.15 ผลจำลองความชื้นสัมพัทธ์อากาศรอบแห้งตลอดความสูงชั้นเมล็ดในถังพัก



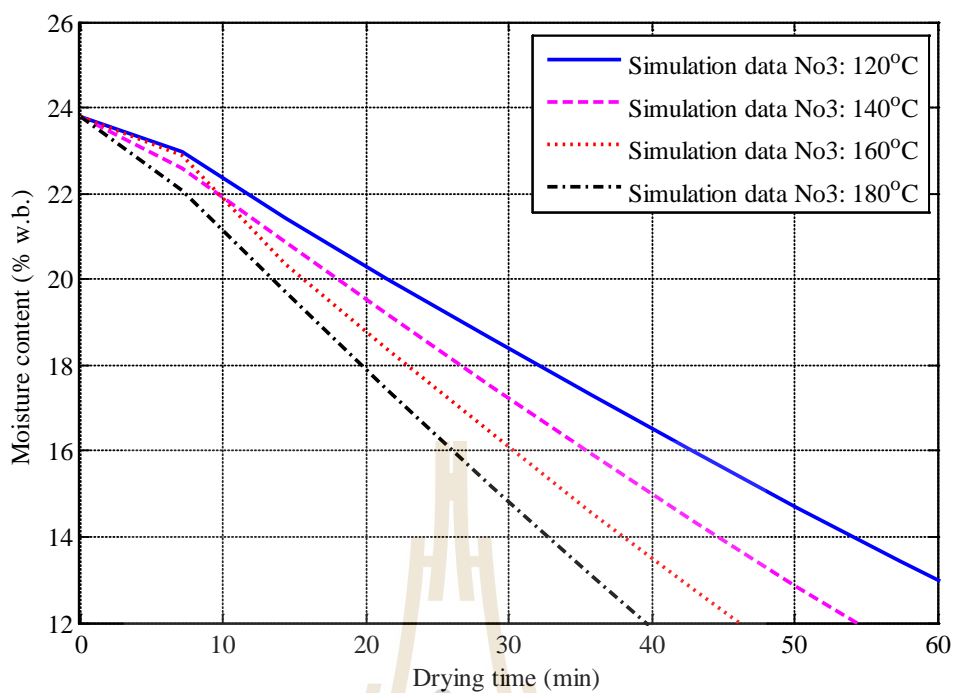
รูปที่ 7.16 ผลจำลองความชื้นภายในเมล็ดระหว่างกรอบแห้งในถังพัก รอบอบแห้งที่ 1



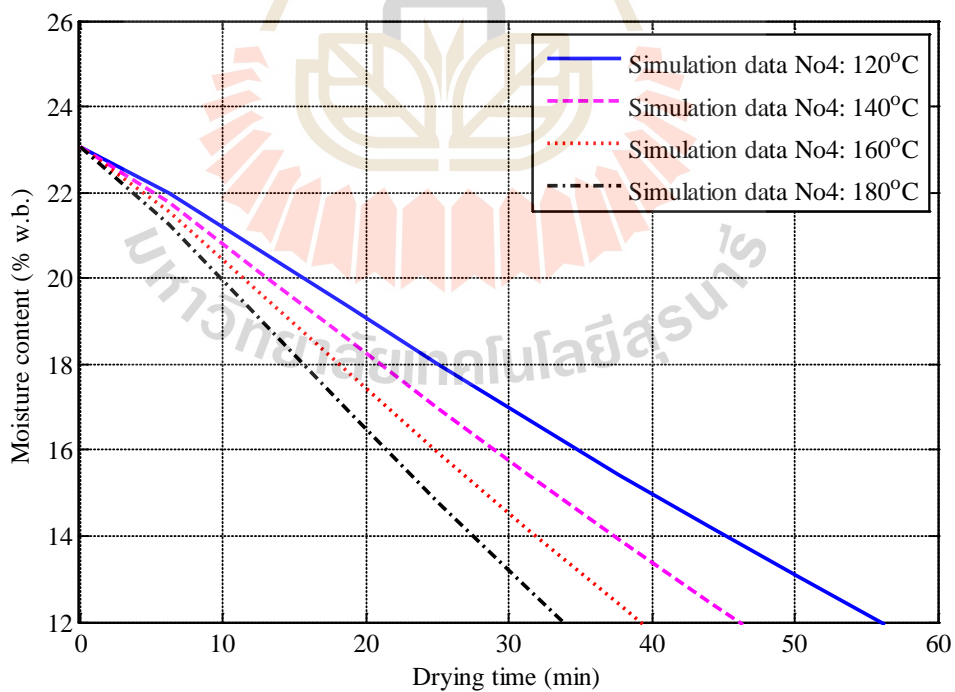
รูปที่ 7.17 ผลจำลองความชื้นภายในเมล็ดก่อนและหลังการอบแห้งในถังพัก

7.5 ผลของอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงต่ออัตราการอบแห้งและการใช้พลังงาน

ผลการทดลองอบแห้งที่นำเสนอในบทที่ 6 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งถึง 120°C อัตราอบแห้งเพิ่มขึ้นและการใช้พลังงานลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้จากรูปที่ 6.22 พบแนวโน้มการใช้พลังงานรวมจำเพาะลดลงและอัตราอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงกว่า 120°C เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จึงทำการจำลองการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยใช้เงื่อนไขขอบแห้งจากการทดลองที่นำเสนอในบทที่ 6 ที่ให้อัตราอบแห้งสูงสุดและที่ใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำสุด คือการทดลองที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 7.3 โดยจำลองผลการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120 140 160 และ 180°C ผลการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกด้วยการจำลองการอบแห้งตามเงื่อนไขการทดลองที่ 3 และ 4 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง แสดงในรูปที่ 7.18-7.19 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจาก 120 ถึง 180°C สามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้อย่างชัดเจนแสดงถึงอัตราอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเงื่อนไขการทดลองที่ 4 อบแห้งได้รวดเร็วกว่าการทดลองที่ 3 เนื่องจากผลของความเร็วกวอากาศที่ลมเป่าที่มากกว่า

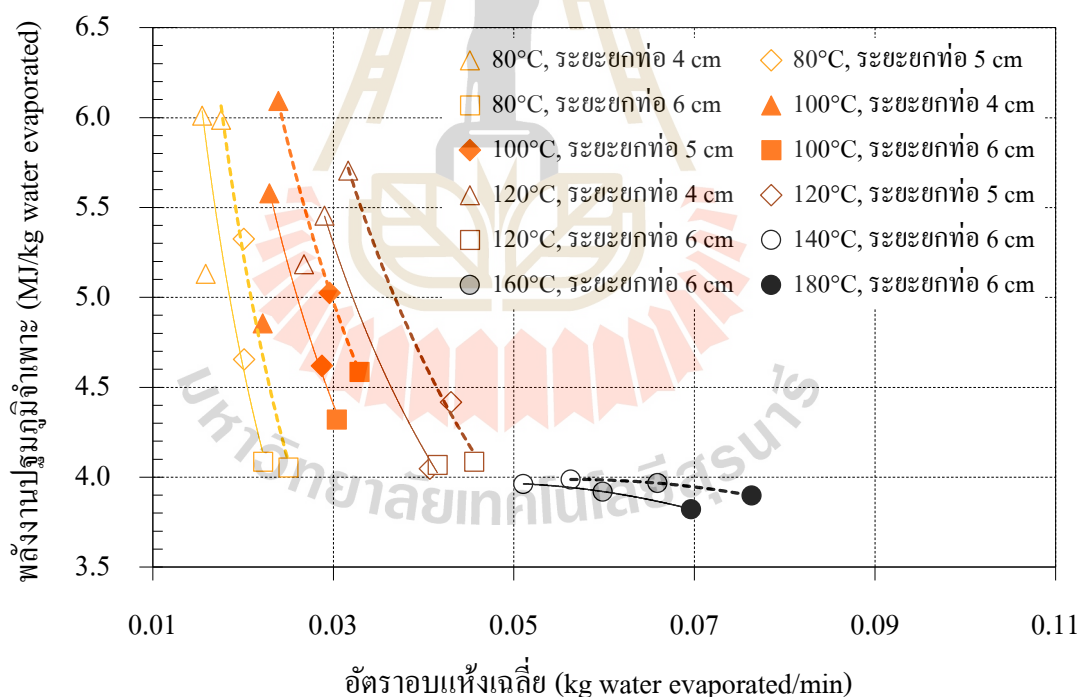


รูปที่ 7.18 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือก เมื่อใช้การทดลองที่ 3 อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120-180°C

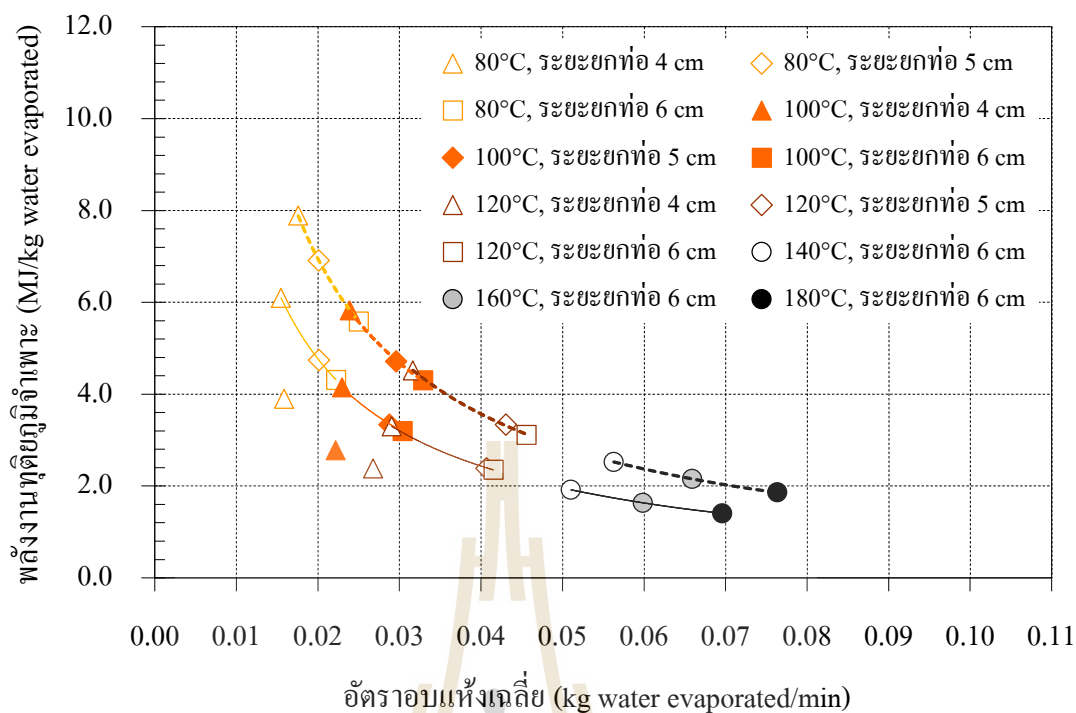


รูปที่ 7.19 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือก เมื่อใช้การทดลองที่ 4 อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120-180°C

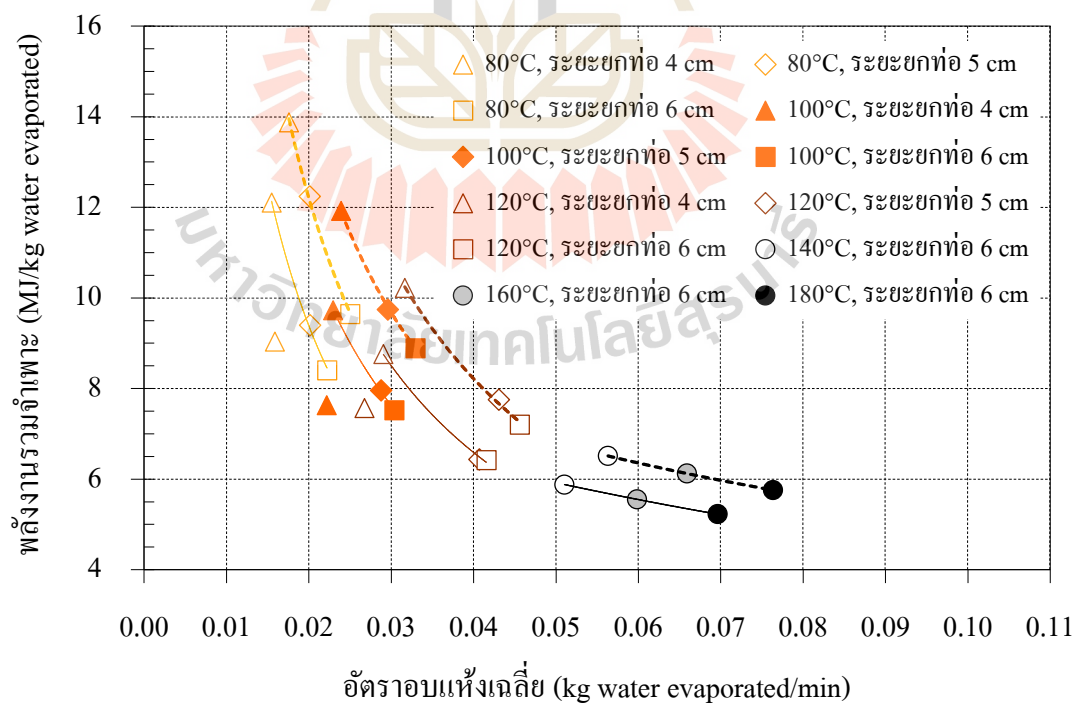
พลังงานปรุหมุมิจำเพาะมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจาก 120 ถึง 180°C ดังแสดงในรูปที่ 7.20 ขณะที่อัตราอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยสัญลักษณ์รูปวงกลมแสดงผลที่ได้จากการจำลอง เส้นทึบและเส้นประแสดงเงื่อนไขอบแห้งที่ใช้ความเร็วอากาศที่ลมเข้า 20 และ 23 m/s ตามลำดับ ถึงแม้การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งทำให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ระยะเวลาอบแห้งและระยะเวลาทำงานของเครื่องทำความร้อนจึงลดลงอย่างชัดเจน แต่เนื่องจากการใช้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ต้องใช้กำลังไฟฟ้าในการทำความร้อนสูงขึ้น โดยภาพรวมแล้วจึงลดการใช้พลังงานปรุหมุมิจำเพาะได้เล็กน้อย ขณะที่สามารถลดพลังงานทุติยภูมิจำเพาะได้อย่างชัดเจนเนื่องจากการลดระยะเวลาทำงานของเครื่องเป่าลม ดังแสดงในรูปที่ 7.21 จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยหลักที่ทำให้พลังงานรวมจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งคือระยะเวลาอบแห้งที่ลดลง จึงทำให้ระยะเวลาการทำงานของเครื่องเป่าลมลดลง ซึ่งสังเกตได้ว่าลักษณะการลดลงของพลังงานรวมจำเพาะสอดคล้องกับลักษณะการลดลงของพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ ดังแสดงในรูปที่ 7.22



รูปที่ 7.20 อัตราอบแห้งเฉลี่ยกับพลังงานปรุหมุมิจำเพาะ จากผลการทดลองและผลจำลองอบแห้ง



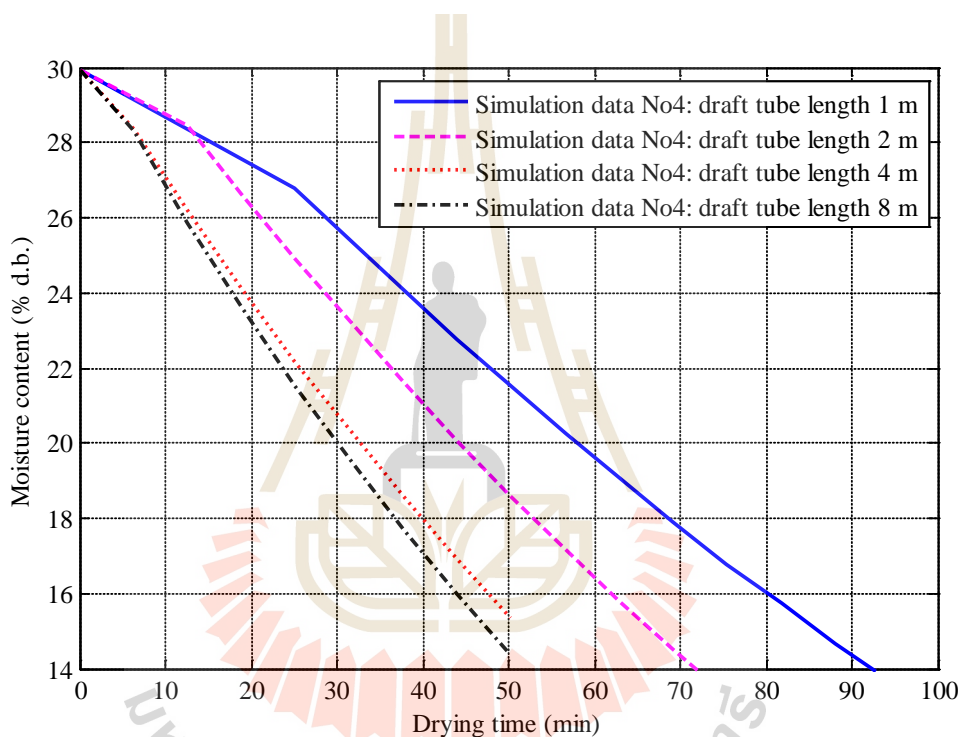
รูปที่ 7.21 อัตราอบแห้งเฉลี่ยกับพลังงานทุดียกมีจำเพาะ จากผลการทดลองและผลจำลองอบแห้ง



รูปที่ 7.22 อัตราอบแห้งเฉลี่ยกับพลังงานรวมจำเพาะ จากผลการทดลองและผลจำลองอบแห้ง

7.6 ผลของความยาวท่อลมเป่าต่อจลนศาสตร์การอบแห้งและการใช้พลังงาน

เพื่อศึกษาผลของความยาวท่อลมเป่าที่มีต่ออัตราอบแห้งและการใช้พลังงาน จึงทำการจำลองการอบแห้งโดยใช้เงื่อนไขขอบแห้งเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4 ดังแสดงในตารางที่ 7.3 โดยปรับความยาวท่อลมเป่าที่ 1 2 4 และ 8 m และเพื่อให้เห็นผลของความยาวท่อลมเป่าที่ชัดเจนมากขึ้น ในแบบจำลองจึงละการพิจารณาตะแกรงหน่วยข้าวในการคำนวณ เสมือนไม่มีการติดตั้งตะแกรงหน่วยข้าว ซึ่งข้าวเปลือกในท่อครอบจะตกได้อย่างอิสระ โดยผลจำลองการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกแสดงในรูปที่ 7.23



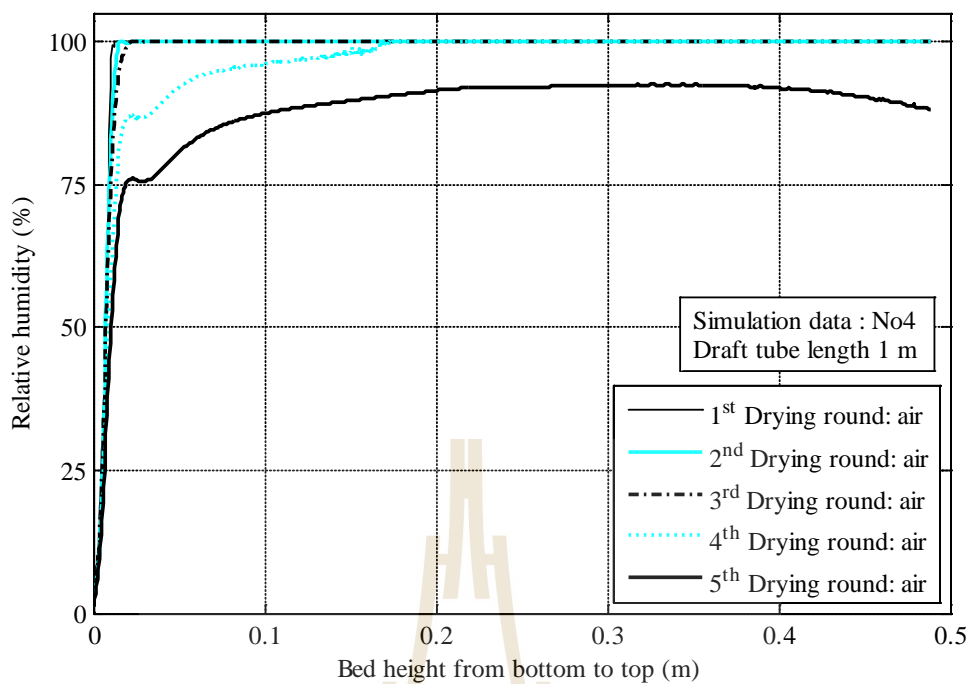
รูปที่ 7.23 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือก เมื่อใช้ความยาวท่อลมเป่า 1-8 m

พบว่าลักษณะการลดลงของความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง (อัตราอบแห้งคงที่) ตลอดช่วงการอบแห้ง ยกเว้นในช่วงแรกของการอบแห้งซึ่งอัตราอบแห้งมีค่าต่ำกว่าภาพรวม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nguyen et al. (1998) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความยาวท่อลมเป่า 1 และ 2 m เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการอบแห้งที่ใช้ความยาวท่อลมเป่า 1 และ 2 m ข้าวเปลือกจะมีระยะเวลาสัมผัสอากาศร้อนในส่วนสเปาต์และหล่นอิสระสั้น จึงทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงไม่เพียงพอสู่การอบแห้งในส่วนคานันคัมเมอร์ เพราะการลดความชื้นในส่วนคานันคัมเมอร์โดยส่วนใหญ่ใช้การระเหยความชื้นจากผิวเมล็ดด้วยความร้อนภายในข้าวเปลือก ดังที่ได้

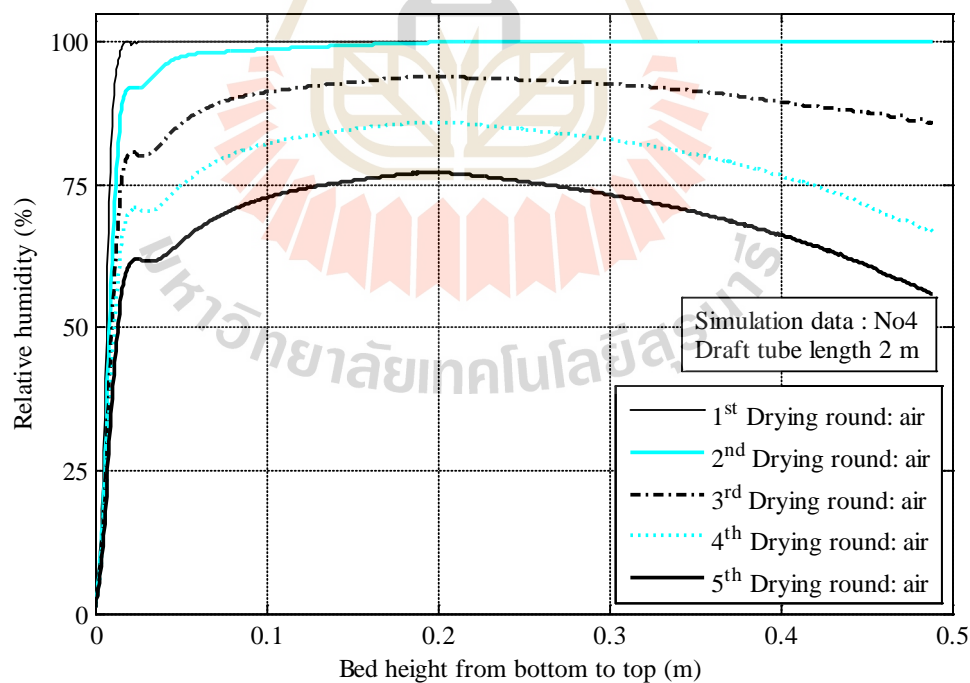
นำเสนอในหัวข้อ 7.4.3 ดังนั้นกรณีที่อุณหภูมิข้าวเปลือกที่ออกจากส่วนหล่นหน่วงมีค่าน้อย ขณะที่ข้าวเปลือกไหลผ่านส่วนดาวน์คัมเมอร์จึงเกิดลดความชื้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งในถังพักจะมีค่าอิมตัว (100%) ในรอบที่ 1-4 และรอบที่ 1 ในกรณีท่อลมเป่ามีความยาว 1 และ 2 m ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7.24-7.25 ตามลำดับ จึงสามารถพิจารณาได้ว่าในกรณีนี้ในช่วงรอบแรก ๆ ของการอบแห้ง การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกส่วนใหญ่เกิดขึ้นในส่วนสเปาต์และหล่นหน่วงเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความยาวท่อลมเป่าสามารถลดเวลาอบแห้งได้ แต่พบว่าการเพิ่มความยาวท่อลมเป่าเป็น 2 เท่าจาก 2 m เป็น 4 m สามารถลดเวลาอบแห้งได้มากกว่าจาก 4 m เป็น 8 m แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อลมเป่ากับเวลาอบแห้งไม่เป็นเชิงเส้น

พิจารณาการลดลงของความชื้นข้าวเปลือก ในแต่ละส่วนของเครื่องอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 7.26 พบว่าเกิดการอบแห้งในทุกส่วนของเครื่องอบแห้ง และมีปริมาณลดลงตลอดการอบแห้ง สอดคล้องกับการทดลองของ Madhiyanon and Soponronarit (2005) และ Bie et al. (2007) ซึ่งพบว่าการลดลงของความชื้นในส่วนดาวน์คัมเมอร์ด้วย โดยผลการจำลองแสดงว่าดาวน์คัมเมอร์เป็นส่วนที่ลดความชื้นได้ปริมาณมากที่สุด รองลงมาเป็นส่วน สเปาต์และหล่นอิสระตามลำดับ เหตุเพราะข้าวเปลือกจะใช้เวลาเคลื่อนตัวในส่วนดาวน์คัมเมอร์นานกว่าส่วนที่เหลือมาก เช่น ในกรณีศึกษาที่ชั้นเมล็ดสูง 48 cm เมล็ดจะใช้เวลาประมาณ 6 min เพื่อเคลื่อนที่ออกจากดาวน์คัมเมอร์ ขณะที่เวลาในส่วนสเปาต์และหล่นหน่วงเพียงประมาณ 4.5 s (ในกรณีท่อลมเป่ายาว 4 m)

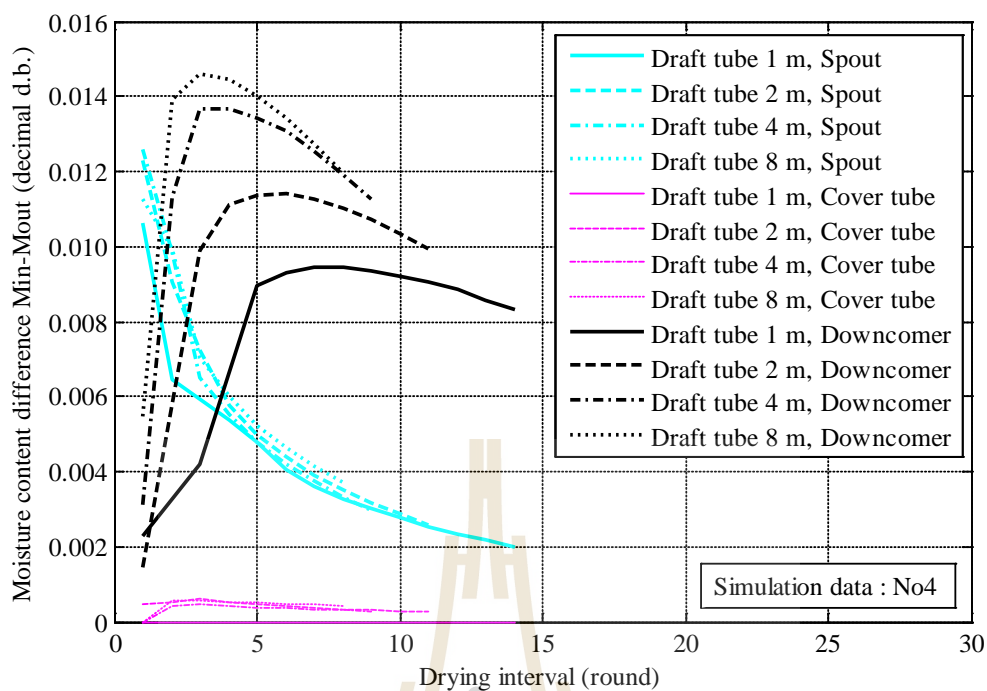
เมื่อพิจารณาอัตราอบแห้งเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 7.27 พบว่าส่วนสเปาต์เป็นส่วนที่มีอัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาเป็นส่วนหล่นหน่วงและดาวน์คัมเมอร์ ตามลำดับ ถึงแม้ส่วนสเปาต์จะใช้เวลาเพียงเล็กน้อยแต่เพราะอุณหภูมิอากาศที่สูงและสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศต่อเมล็ดมีค่าสูงมาก ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลที่สูงกว่า จึงมีอัตราอบแห้งที่สูงกว่าตลอดการอบแห้ง การเพิ่มความยาวท่อลมเป่าจาก 1 m เป็น 8 m ดังแสดงในรูปที่ 7.26 สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกในส่วน สเปาต์และหล่นหน่วงได้มากขึ้นในแต่ละรอบอบแห้ง เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาสัมผัสระหว่างลมร้อนและข้าวเปลือกในส่วนดังกล่าว แต่เมื่อพิจารณาอัตราอบแห้งเฉลี่ยในรูปที่ 7.27 พบว่าในส่วนสเปาต์ ท่อลมเป่ายาว 1 m มีอัตราอบแห้งสูงกว่าท่อลมเป่ายาว 8 m ในทุกรอบแม้การเพิ่มความยาวท่อลมเป่าเป็นการเพิ่มเวลาสัมผัสให้นานขึ้น ทำให้สามารถลดความชื้นในแต่ละรอบได้มากขึ้น แต่เมื่อเมล็ดผ่านท่อลมเป่านานขึ้นจะทำให้ความชื้นความชื้น (moisture content gradient) ในเมล็ดลดลง ซึ่งทำให้อัตราการแพร่ความชื้นลดลง ส่งผลให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยลดลง (แต่การอบแห้งสุทธิสูงมากขึ้น)



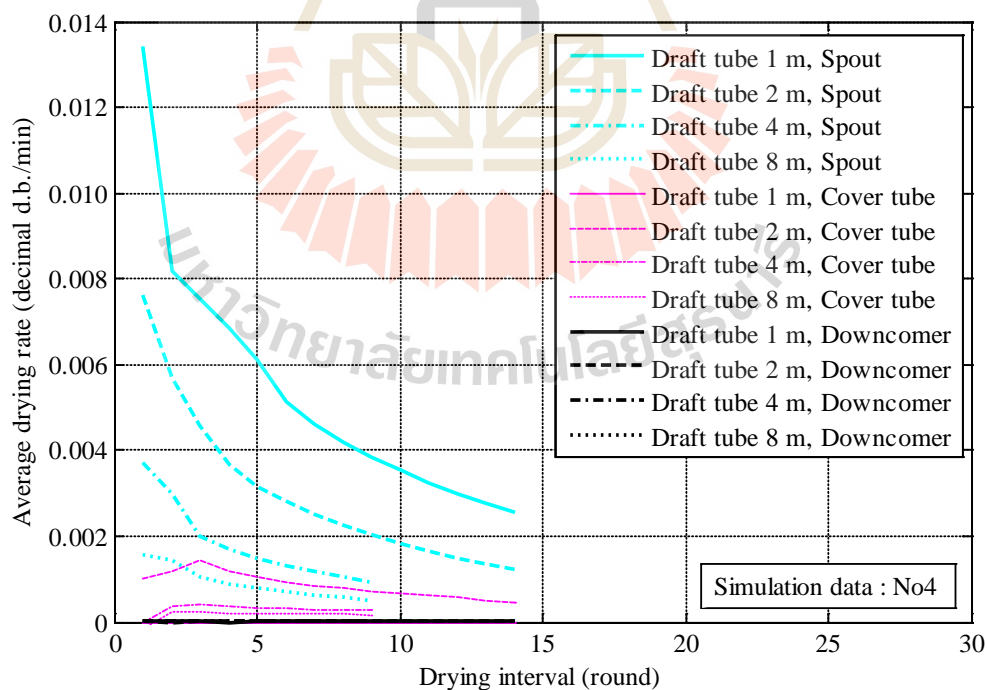
รูปที่ 7.24 ผลการจำลองความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งในถังพัก เมื่อใช้ความยาวท่อลมเป่า 1 m



รูปที่ 7.25 ผลการจำลองความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งในถังพัก เมื่อใช้ความยาวท่อลมเป่า 2 m



รูปที่ 7.26 ผลจำลองความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงในแต่ละรอบการอบแห้ง เมื่อท่อลมเป่ายาว 1-8 m



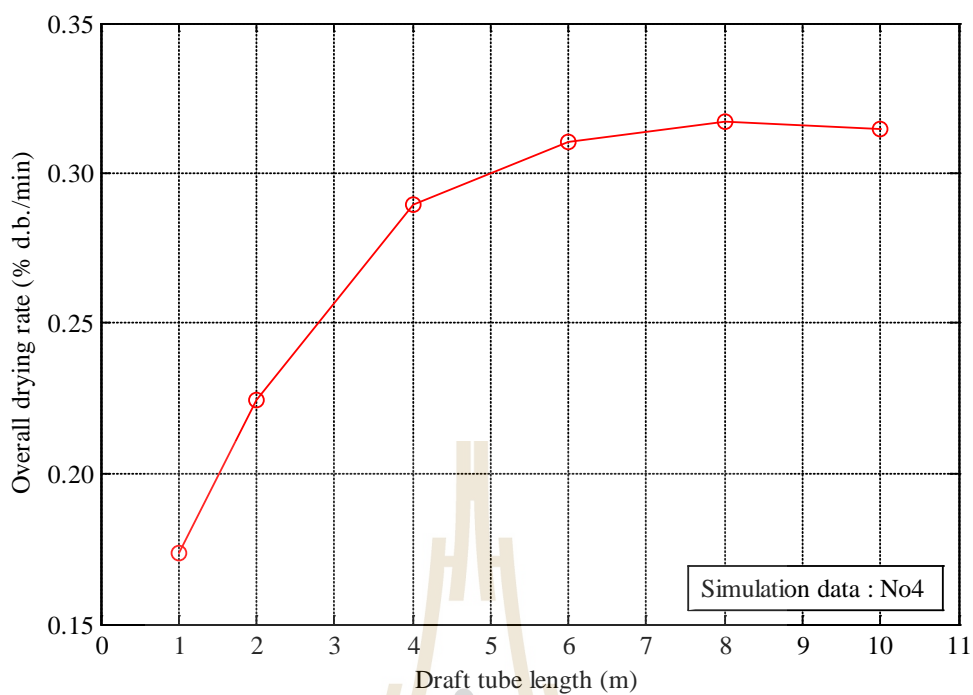
รูปที่ 7.27 ผลจำลองอัตราอบแห้งเฉลี่ยในแต่ละรอบการอบแห้ง เมื่อท่อลมเป่ายาว 1-8 m

เมื่อพิจารณาผลของความยาวท่อลมเป่าที่มีต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ยโดยภาพรวม (สุทธิ) ดังแสดงในรูปที่ 7.28 พบว่าอัตราอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวท่อลมเป่าที่เพิ่มขึ้น และพบว่าในกรณีเงื่อนไขการทดลองที่ 4 อัตราอบแห้งเฉลี่ยมีค่าสูงสุดที่ความยาวท่อลมเป่าเท่ากับ 8 m โดยเมื่อเพิ่มความยาวท่อลมเป่าเป็น 10 m พบการลดลงของอัตราอบแห้งเฉลี่ย การลดลงดังกล่าวเกิดเนื่องจากความยาวท่อลมเป่าที่เพิ่มขึ้นทำให้มีระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศอบแห้งและข้าวเปลือกในท่อลมเป่ามากขึ้น อุณหภูมิอากาศภายในท่อลมเป่าจึงลดลงตามความยาวท่อลมเป่าที่เพิ่มขึ้น ในรอบแรกของการอบแห้งอุณหภูมิอากาศสามารถลดลงได้มากกว่ารอบการอบแห้งถัดมาเพราะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งมาก พบว่าในกรณีความยาวท่อลมเป่า 10 m อากาศอบแห้งไหลออกจากท่อลมเป่าด้วยอุณหภูมิประมาณ 35°C และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกขณะเคลื่อนที่ภายในท่อลมเป่าพบว่าข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงโดยตลอดความยาวท่อลมเป่า ยกเว้นในช่วงปลายของท่อลมเป่าที่ข้าวเปลือกเกิดการรับความชื้นจากอากาศอบแห้งกลับเข้าสู่ภายในเมล็ด ทำให้ความชื้นภายในเมล็ดสูงขึ้น ส่งผลให้เมื่อข้าวเปลือกไหลเข้าสู่ส่วนดาวน์คัมเมอร์ ข้าวเปลือกจะใช้ความร้อนสะสมภายในเพื่อระเหยความชื้น ทำให้อุณหภูมิข้าวเปลือกที่ออกจากส่วนดาวน์คัมเมอร์ในกรณีท่อลมเป่ายาว 10 m มีค่าต่ำกว่ากรณีท่อลมเป่ายาว 8 m และส่งผลให้อุณหภูมิข้าวเปลือกมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยโดยตลอดการอบแห้งด้วย

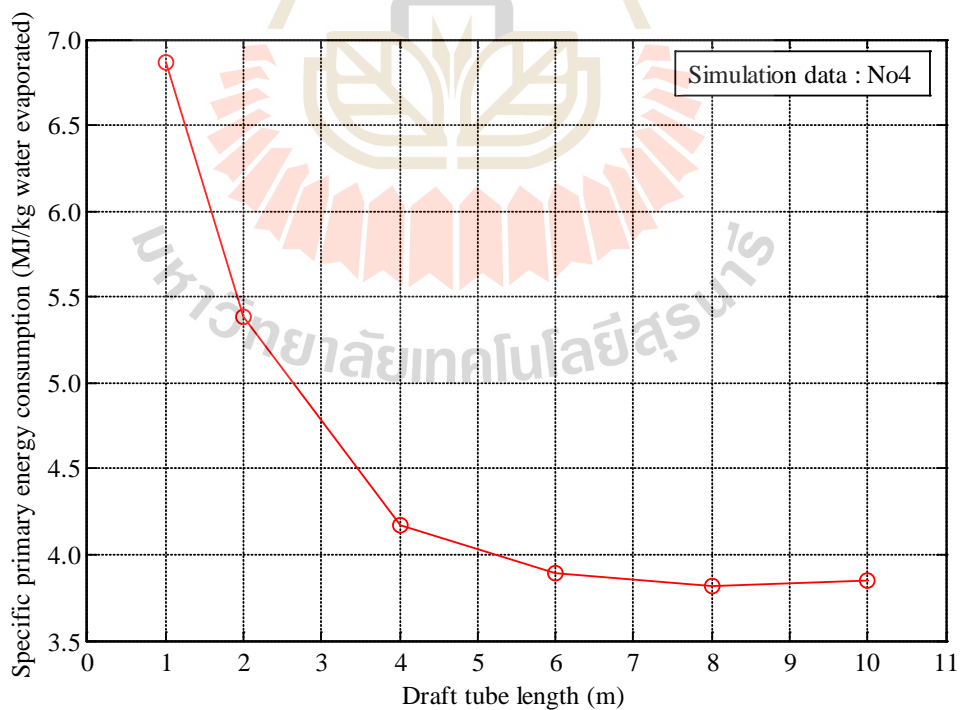
การเพิ่มความยาวท่อลมเป่าส่งผลให้เครื่องเป่าลมต้องใช้แรงขับเคลื่อนมากขึ้นเพื่อเอาชนะแรงต้านทานในระบบที่มากขึ้น แต่เนื่องจากแบบจำลองนี้ไม่สามารถคำนวณพลังงานที่เครื่องเป่าลมต้องการเมื่อเพิ่มความยาวท่อลมเป่าได้ จึงพิจารณาผลของความยาวท่อลมเป่าที่มีต่อพลังงานป้อนรวมเฉพาะเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 7.29 พบว่าพลังงานป้อนรวมเฉพาะมีค่าลดลงตามความยาวท่อลมเป่าที่เพิ่มขึ้น และพบว่าในกรณีเงื่อนไขการทดลองที่ พลังงานป้อนรวมเฉพาะมีค่าต่ำสุดที่ความยาวท่อลมเป่าเท่ากับ 8 m โดยเมื่อเพิ่มความยาวท่อลมเป่าเป็น 10 m พบการเพิ่มขึ้นของพลังงานป้อนรวมเฉพาะเล็กน้อย เนื่องจากอัตราอบแห้งเฉลี่ยมีค่าลดลง ดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้

รูปที่ 7.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานป้อนรวมเฉพาะและอัตราอบแห้งเฉลี่ยที่อบแห้งด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 4 เมื่อเพิ่มความยาวท่อลมเป่า ซึ่งพบว่าที่ความยาวท่อลมเป่า 8 m ค่าพลังงานป้อนรวมเฉพาะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ $3.82 \text{ MJ/kg water evaporated}$ และให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ $0.32\% \text{ d.b./min}$

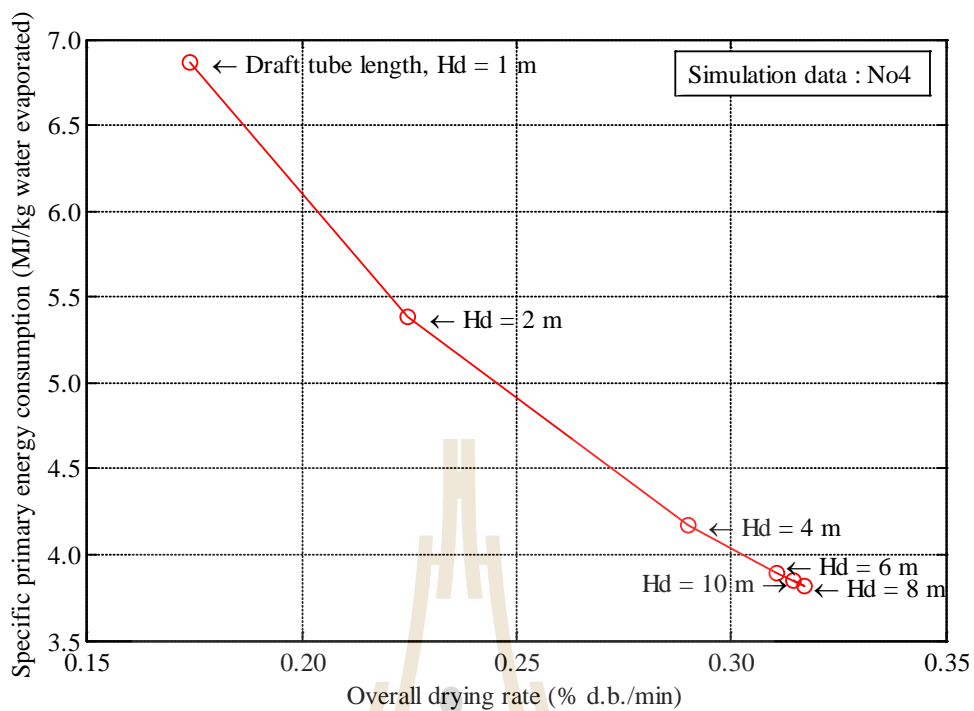
จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความยาวท่อลมเป่าสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งและลดการใช้พลังงานป้อนรวมได้ ซึ่งความยาวท่อลมเป่าที่เหมาะสมจะขึ้นกับเงื่อนไขอบแห้งประกอบอื่น ๆ ด้วยเช่น อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ระยะยกท่อลมเป่า ความเร็วอากาศท่อลมเข้า มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น จำนวนชั้นตะแกรงหน่วงข้าว เป็นต้น



รูปที่ 7.28 ผลจำลองอัตราอบแห้งเฉลี่ย เมื่อท่อลมเป่ายาว 1-10 m



รูปที่ 7.29 ผลจำลองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ เมื่อท่อลมเป่ายาว 1-10 m



รูปที่ 7.30 ผลจำลองอัตราอบแห้งเฉลี่ยและพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ เมื่อท่อลมเป่ายาว 1-10 m

ชั้นบาง

36.53

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 8

แนวทางป้องกันการแตกร้าวข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

ในบทนี้จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงที่ได้นำเสนอในบทที่ 7 มาพัฒนาเพื่อทำนายอุณหภูมิและความชื้นภายในข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองมาวิเคราะห์ด้วยสมมติฐานอุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว ประกอบกับผลการทดลองอบแห้งที่ได้นำเสนอในบทที่ 6 เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณข้าวต้นเนื่องจากกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง และวิเคราะห์หาเงื่อนไขเพื่อป้องกันการลดลงของปริมาณข้าวต้น นำเงื่อนไขที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงที่มีประสิทธิภาพทั้งด้านการใช้พลังงานและได้ข้าวเปลือกคุณภาพสูง

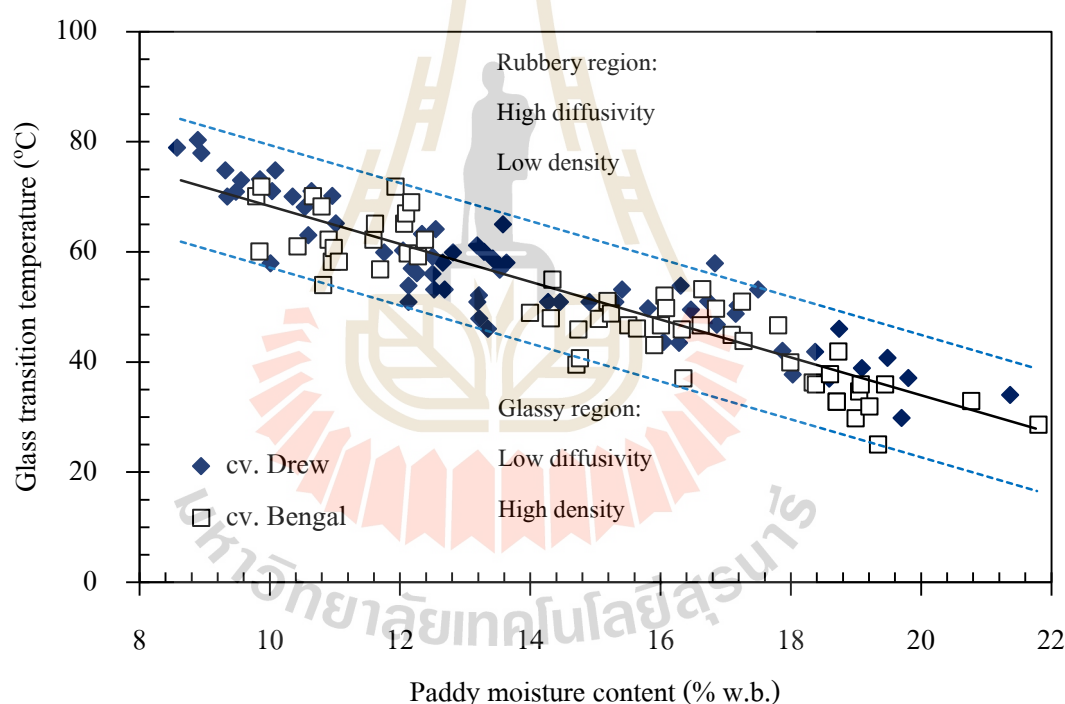
8.1 การแตกร้าวของเมล็ดข้าวเนื่องจากการอบแห้ง

การเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดข้าวเนื่องจากการอบแห้ง มีสมมติฐานทั่วไปคือ เมื่อปริมาณความชื้นจำนวนมากถูกระเหยออกจากเมล็ดข้าวอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง นำไปสู่การพัฒนาของความชันความชื้น (moisture content gradient) ขนาดใหญ่จากผิวไปยังแกนกลางของเมล็ดข้าว จึงเกิดความเค้นดึงที่ผิวเมล็ดและความเค้นอัดที่แกนกลางเมล็ดขณะอบแห้ง และเกิดความเค้นในทิศทางตรงข้ามขณะลดอุณหภูมิเมล็ด ความเค้นที่เกินจุดวิกฤตทำให้เกิดรอยร้าวระหว่างการอบแห้งหรือการลดอุณหภูมิ และเกิดการแตกหักระหว่างกระบวนการขัดสี (Kunze and Choudhury, 1972)

วิทยาศาสตร์สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ถูกประยุกต์ในการศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นที่เปลี่ยนระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก แบ่งเป็นองค์ประกอบหลักของข้าวประกอบด้วยอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ของกลูโคส การเปลี่ยนคุณสมบัติทางความร้อนและทางกลขึ้นกับความชื้นอุณหภูมิและความชื้น (temperature and moisture gradient) ภายในเมล็ดที่ถูกสร้างขึ้นระหว่างกระบวนการอบแห้ง

สมบัติเปลี่ยนแก้ว (glass transition property) เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุพอลิเมอร์ สำหรับแป้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว (glass transition temperature, T_g) แป้งจะอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว, ปริมาตรจำเพาะ และการแพร่

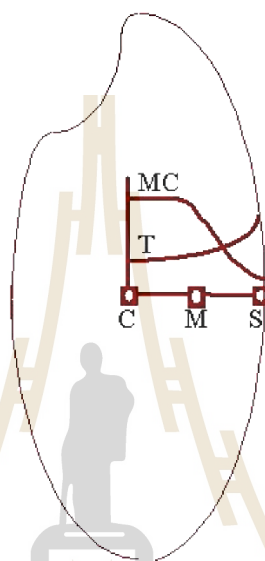
ความชื้นต่ำ เมื่ออุณหภูมิแห้งสูงขึ้นเกินกว่า T_g แป้งจากสถานะคล้ายแก้วจะเปลี่ยนไปยังสถานะคล้ายยาง (rubbery state) แป้งที่อยู่ในสถานะคล้ายยางจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว ปริมาตรจำเพาะ และการแพร่ความชื้นที่สูงกว่า (Perdon et al., 2000) ค่า T_g สำหรับข้าวพันธุ์ Drew และ Bengal แสดงในรูปที่ 8.1 ซึ่งพบว่าค่า T_g เปลี่ยนตามความชื้นภายในข้าว โดยมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นภายในข้าวลดลง และค่า T_g ของข้าวทั้งสองพันธุ์มีค่าใกล้เคียงกัน (Perdon et al., 2000) เส้นค่า T_g เฉลี่ย (เส้นทึบสีดำ) คือเส้นแบ่งระหว่างช่วงคล้ายแก้ว (glassy region) และช่วงคล้ายยาง (rubbery region) ขณะที่เส้นประสีฟ้าแสดงค่า T_g ขอบเขตบนและล่างที่ความมั่นใจ 95% ระยะระหว่างขอบเขตทั้งสองพิจารณาเป็นช่วงเปลี่ยนผ่าน (transition zone) ที่วัสดุมีสถานะเปลี่ยนผ่าน (transition state) นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนสถานะดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิและความชื้นภายในข้าวที่พบได้ในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยทั่วไป



รูปที่ 8.1 อุณหภูมิเปลี่ยนแก้วของข้าวพันธุ์ Drew และ Bengal (Siebenmorgen et al., 2004)

Cnossen and Siebenmorgen (2000) ได้สร้างสมมุติฐานเกี่ยวกับแนวคิดอุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว (glass transition temperature hypothesis) เพื่ออธิบายการเกิดรอยร้าวของข้าวระหว่างการอบแห้ง (drying) และการพักในที่อับอากาศ (tempering) รูปที่ 8.2 แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดข้าวระหว่างการอบแห้ง

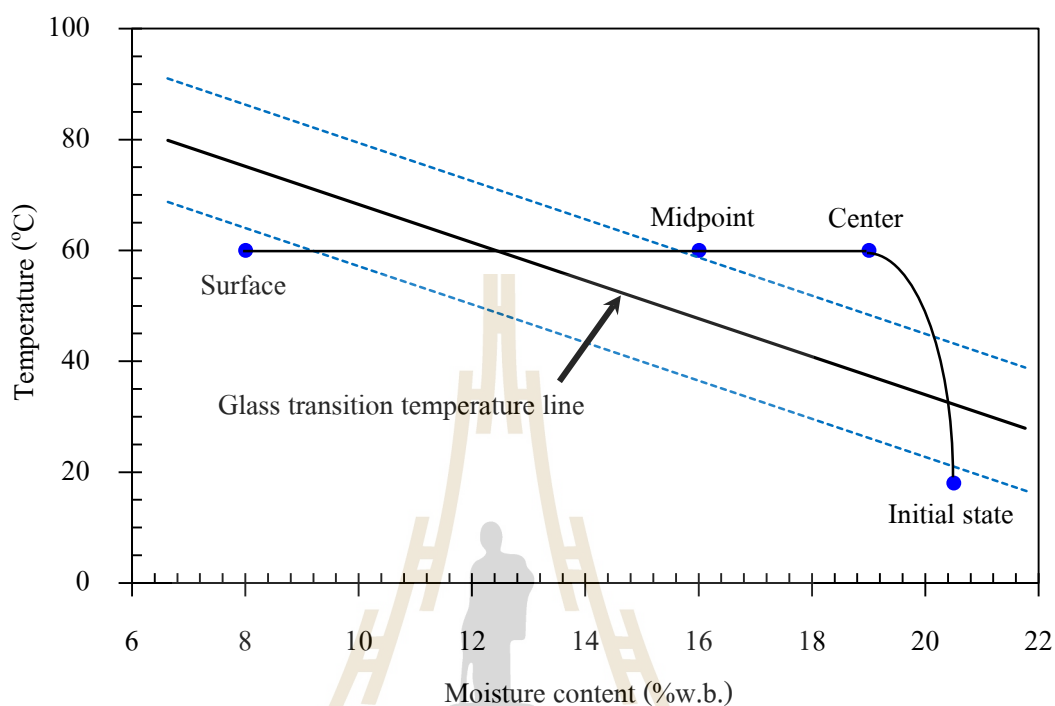
ช่วงเริ่มการอบแห้ง เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูงกว่า T_g เมล็ดข้าวจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดกว่า T_g และเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางพร้อมกันทั้งเมล็ด การเปลี่ยนสถานะนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติวัสดุอย่างมาก โดยเฉพาะสัมประสิทธิ์การขยายปริมาตรเชิงความร้อน จะเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 5 เท่า (Perdon et al., 2000) แต่เนื่องจากในช่วงนี้ความชื้นภายในเมล็ดค่อนข้างสม่ำเสมอ ทำให้การขยายตัวเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งเมล็ด จึงไม่ทำให้เกิดรอยร้าวภายในเมล็ด



รูปที่ 8.2 อุณหภูมิและความชื้นภายในข้าวขณะอบแห้ง (Siebenmorgen et al., 2004)

ในลำดับถัดมา เมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงกว่า T_g อย่างต่อเนื่อง ค่าความชื้นชั้นรอบนอกเมล็ดจะต่ำกว่าที่แกนกลางเมล็ด ดังแสดงในรูปที่ 8.2 เป็นเหตุให้ค่า T_g ของชั้นรอบนอกเมล็ดสูงกว่าที่แกนกลางเมล็ด ดังนั้นจึงเกิดความชันของอุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว (glass transition temperature gradient) ขึ้นภายในเมล็ด และเกิดการเปลี่ยนสถานะจากคล้ายยางเป็นคล้ายแก้วที่บริเวณชั้นรอบนอกเมล็ด ขณะที่แกนกลางเมล็ดยังคงมีสถานะคล้ายยาง ดังแสดงในรูปที่ 8.3 ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของขนาดคุณสมบัติวัสดุภายในเมล็ดระหว่างชั้นที่มีสถานะคล้ายแก้วกับสถานะคล้ายยาง สมมุติฐานอุณหภูมิเปลี่ยนแก้วทำนายว่า ถ้าค่าคุณสมบัติทางความร้อนและความชื้น (thermal and hygroscopic property) ระหว่างปริมาตรชั้นรอบนอกและแกนกลางเมล็ดมีขนาดแตกต่างอย่างเพียงพอ (และปริมาตรสถานะคล้ายแก้วที่ชั้นรอบนอกเมล็ดเพิ่มขึ้นถึงปริมาตรที่เพียงพอเมื่อเทียบกับปริมาตรสถานะคล้ายยางที่แกนกลางเมล็ด) ดังนั้นรอยร้าวจะเริ่มเกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสของปริมาตรทั้งสอง

- กระบวนการหลังการอบแห้ง ประกอบด้วย 1. การพักในที่อับอากาศ (tempering) และหรือ 2. การลดอุณหภูมิเมล็ด (cooling) ซึ่งสถานะแข็งแต่ละชั้นภายในเมล็ดจะเปลี่ยนไปขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้

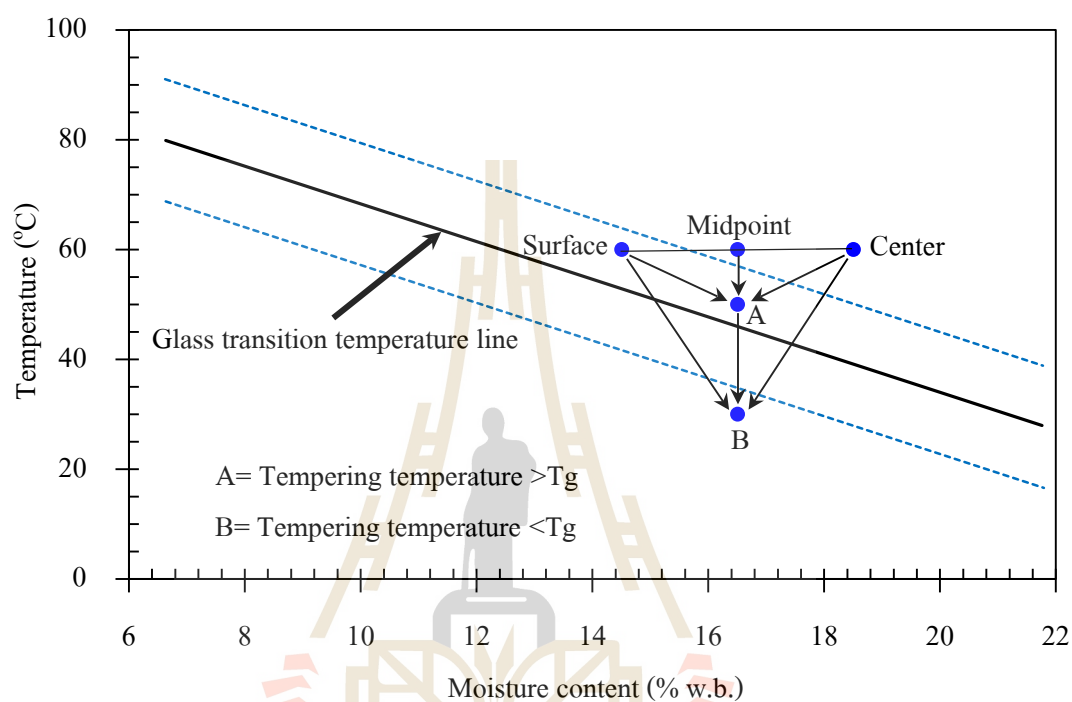


รูปที่ 8.3 อุณหภูมิและความชื้นภายในข้าว ณ ตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 8.2 ขณะอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิสูง (Siebenmorgen et al., 2004)

ภายหลังการอบแห้ง เมล็ดยังคงมีความชื้นความชื้นเนื่องจากการอบแห้ง และถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการหลังการอบแห้งต่ำกว่าค่า T_g ของข้าว ขณะที่อุณหภูมิลดลง จะทำให้ชั้นที่ผิว, ชั้นระหว่างกลางและชั้นแกนกลางเมล็ดข้ามเส้น T_g ที่ระดับความชื้นที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8.4 (สถานการณ์ B) โดยชั้นรอบนอกเมล็ดจะถูกบังคับให้เปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายแก้วเป็นชั้นแรก การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและต่อเนื่องของแนวการเย็นตัวภายในเมล็ด (intra-kernel cooling front) จะทำให้มีปริมาตรชั้นรอบนอกเมล็ด ที่มีสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่แกนกลางเมล็ดยังคงอยู่ในสถานะคล้ายยาง ความแตกต่างของขนาดคุณสมบัติวัสดุภายในเมล็ดระหว่างชั้นที่มีสถานะคล้ายแก้วกับสถานะคล้ายยาง จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ซึ่งสามารถทำให้เกิดรอยร้าวภายในเมล็ดได้ ดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้

ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิที่ใช้สำหรับกระบวนการพักในที่อับอากาศจึงควรสูงกว่า T_g ของข้าว ดังแสดงในรูปที่ 8.4 (สถานการณ์ A) เพราะความชื้นจะเกิดการแพร่จากแกนกลางเมล็ดไปยังผิวเมล็ด

โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะระหว่างกระบวนการ เมื่อความชื้นความชื้นลดลงถึงระดับที่เหมาะสม จึงทำการลดอุณหภูมิเมล็ด ซึ่งทำให้การเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายยางเป็นสถานะคล้ายแก้ว เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งเมล็ด จึงไม่เกิดความแตกต่างของขนาดคุณสมบัติตัวสดภายในเมล็ด ทำให้ไม่เกิด รอยร้าวภายในเมล็ด



รูปที่ 8.4 อุณหภูมิและความชื้นภายในข้าว ณ ตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 8.2 เมื่อใช้อุณหภูมิพัก ในที่อับอากาศสูงและต่ำกว่า T_g (Siebenmorgen et al., 2004)

สมมุติฐานอุณหภูมิเปลี่ยนแก้วถูกประยุกต์ใช้ในการอธิบายและทำนายการแตกหักของข้าว เนื่องจากกระบวนการอบแห้ง ทั้งในงานวิจัยด้านการทดลอง (Cnossen and Siebenmorgen, 2000), (Yang et al., 2005), (Schluterma and Siebenmorgen, 2007), (Dong et al., 2010), (Ondier et al., 2012) และการจำลองผลเชิงตัวเลข (Yang et al., 2002), (Yang et al., 2003) โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ ศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-60°C และมักอยู่ในรูปของการอบแห้งแบบชั้นบาง หรือเครื่องอบแห้ง ที่อุณหภูมิเมล็ดค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Yang et al., 2003), (Ondier et al., 2012) ซึ่งแตกต่างกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงที่ใช้อากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงกว่า และมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมเมล็ดข้าวตลอดการอบแห้ง

8.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสถานะข้าวเปลือก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง ที่ใช้จำลองการอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งได้นำเสนอในบทที่ 7 ถูกนำมาพัฒนาเพื่อให้สามารถทำนายสถานะของชั้นแป้งภายในเมล็ดข้าวขณะอบแห้งและขณะลดอุณหภูมิเมล็ดข้าวภายหลังการอบแห้ง การทำนายสถานะของชั้นแป้งภายในเมล็ดข้าว จำเป็นต้องทราบอุณหภูมิและความชื้นของชั้นแป้งภายในเมล็ดข้าว แต่เนื่องจากแบบจำลองที่ได้นำเสนอก่อนหน้า สามารถทำนายความชื้นภายในเมล็ดข้าว (ความชื้นของชั้นแป้งในเมล็ดข้าว) ด้วยสมการอัตราอบแห้ง และสามารถทำนายได้เฉพาะอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิเมล็ดข้าว (อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งเมล็ดข้าว) ที่ทางเข้าและออกจากชั้นบาง ด้วยสมการสมดุลพลังงานในชั้นบาง

ด้วยเหตุนี้จึงต้องพัฒนาแบบจำลองให้สามารถทำนายอุณหภูมิของชั้นแป้งภายในเมล็ดได้ โดยใช้สมการความร้อนใน 1 มิติ สำหรับรูปทรงกลม ดังแสดงในสมการที่ (8.1) โดยสมมุติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงความร้อนภายในเมล็ดมีค่าคงที่ เมื่ออยู่ในชั้นบาง ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (8.2) และค่าการนำความร้อนในข้าวเปลือกคำนวณได้ตามสมการที่ (8.3) (Brooker et al, 1992)

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T_p}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r} \right) \frac{\partial T_p}{\partial r} \right] \quad (8.1)$$

$$\alpha = \frac{k_p}{\rho_p C_{pw}} \quad (8.2)$$

$$k_p = 0.0863 + 0.00134 \left(\frac{100M}{1+M} \right) \quad (8.3)$$

จากผลเฉลยของสมการสมดุลพลังงานระหว่างอากาศและเมล็ดข้าวในชั้นบาง ทำให้ทราบผลต่างของอุณหภูมิของเมล็ดข้าวก่อนและหลังผ่านชั้นบาง ดังนั้นการหาผลเฉลยของสมการที่ (8.1) จึงพิจารณาเป็นปัญหาการนำความร้อนซึ่งความชันความร้อนที่ผิววัสดุมีค่าคงที่ จึงได้เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบดังที่แสดง

$$\begin{aligned}
 \text{ที่ } t=0, \quad 0 \leq r \leq R & \quad T_p = T_{p,in} \\
 \text{ที่ } t>0, \quad r=0 & \quad \frac{\partial T_p}{\partial r} = 0 \\
 \text{ที่ } t>0, \quad r=R & \quad \frac{\partial T_p}{\partial r} = \frac{-R(T_{p,out} - T_{p,in})}{3\alpha t_{layer}}
 \end{aligned}$$

Siebenmorgen et al. (2004) นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นภายในเมล็ดข้าวและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากผลทดสอบกับข้าวพันธุ์ Drew และ Bengal ดังแสดงในสมการที่ (8.4) และ ค่า T_g ขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่ระดับความมั่นใจ 95% (observation bound at 95% confidence level) แสดงในสมการที่ (8.5) และ (8.6) ตามลำดับ ด้วยสมการที่นำเสนอข้างต้นจึงสามารถทำนายสถานะของชั้นแป้งภายในเมล็ดข้าวได้โดยตลอดการอบแห้ง

$$T_{g,avg} = 101.2 - 333 \left(\frac{M}{1+M} \right) \quad (8.4)$$

$$T_{g,upper} = 113.88 - 344.67 \left(\frac{M}{1+M} \right) \quad (8.5)$$

$$T_{g,lower} = 91.614 - 344.35 \left(\frac{M}{1+M} \right) \quad (8.6)$$

8.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดข้าว

การเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดข้าวเนื่องจากกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง สามารถวิเคราะห์ด้วยสมมุติฐานอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยพิจารณาการเกิดรอยร้าวใน 2 ช่วง 1. ช่วงการอบแห้ง และ 2. ช่วงการลดอุณหภูมิข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้ง ปัจจัยที่นำมาพิจารณาการเกิดรอยร้าวในทั้ง 2 ช่วงคือความแตกต่างของปริมาตรระหว่างสถานะคล้ายแก้วและสถานะคล้ายยางในเมล็ดข้าว ด้วยการใช้สมการที่ (8.5) เพื่อคำนวณปริมาตรสถานะคล้ายยางโดยใช้เส้นขอบเขตบนที่ความน่าจะเป็น 95% ของการเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยาง (ดังแสดงในรูปที่ 8.1) ช่วยระบุชั้นแป้งภายในเมล็ดที่มีสถานะคล้ายยาง เพื่อคำนวณปริมาตรสถานะคล้ายยางภายในเมล็ด ณ ขณะนั้น แล้วนำมาสัดส่วนกับปริมาตรรวมทั้งเมล็ด เรียกว่าสัดส่วนปริมาตรสถานะคล้ายยาง (rubbery state volume ratio, RSVR) ดังแสดงในสมการที่ (8.7)

$$\text{RSVR} = \frac{\text{Rubbery state volume of 1 grain}}{\text{Total volume of 1 grain}} \quad (8.7)$$

ค่าความชื้นความชื้นเป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาในช่วงการอบแห้งด้วย แม้ว่า การอบแห้งด้วย อุณหภูมิสูงกว่า 100°C ตามแผนภาพ T_g เมล็ดข้าวจะมีสถานะคล้ายยางทั้งเมล็ดตลอดการอบแห้ง จึง ไม่มีความแตกต่างของปริมาตรระหว่างสถานะคล้ายแก้วและคล้ายยางขณะอบแห้ง ตามสมมติฐาน อุณหภูมิเปลี่ยนแก้วจึงไม่ควรเกิดรอยร้าวภายในเมล็ด แต่งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการอบแห้งด้วย อุณหภูมิสูงกว่า 100°C จะเพิ่มรอยร้าวต่อเมล็ดข้าวอย่างมาก เนื่องจากการหดตัวอย่างรุนแรงและ ต่อเนื่องของชั้นแป้งบริเวณรอบนอกเมล็ดทำให้เกิดความเค้นดึง (tensile stress) ที่ชั้นแป้งรอบนอก เมล็ดและความเค้นกด (compressive stress) ที่แกนกลางเมล็ด จากผลทดสอบคุณสมบัติทางกลของ เมล็ดข้าวพบว่าเมล็ดข้าวมีความสามารถรับแรงดึงได้น้อยกว่าแรงกดหลายเท่า (Kunze et al., 1985) จึงน่าเชื่อว่ากรณีนี้ หากอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดความชื้นความชื้นสูงตลอด ทั้งเมล็ด (ไม่เฉพาะที่ผิวเมล็ด) ทำให้ค่าความเค้นดึงสูงขึ้นที่บริเวณรอบนอกเมล็ด จนกระทั่งค่าความ เค้นดึงถึงค่าความเค้นแตกหัก (fracture stress) จึงทำให้เกิดรอยร้าวที่บริเวณรอบนอกเมล็ด ขณะ อบแห้ง ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกหักขณะขัดสี ค่าความชื้นความชื้น (moisture content gradient, MCG) คำนวณได้จากสมการที่ (8.8)

$$\text{MCG} = \frac{M_{r=0} - M_{r=R}}{R} \quad (8.8)$$

งานวิจัยนี้จะพิจารณาการเกิดรอยร้าวช่วงการอบแห้งด้วยค่า RSVR และ MCG และ พิจารณาการเกิดรอยร้าวช่วงการลดอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกด้วยค่า RSVR

8.4 เงื่อนไขการอบแห้งสำหรับการจำลองและปริมาณข้าวต้นที่ได้จากการอบแห้ง

เพื่อศึกษาการเกิดรอยร้าวในเมล็ดข้าวเนื่องจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น- หล่นหน่วง และเพื่อหาแนวทางในการอบแห้งที่สามารถอบแห้งได้รวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และได้ ปริมาณข้าวต้นสูง จึงเลือกเงื่อนไขการทดลองที่ได้นำเสนอในบทที่ 6 ในส่วนการทดลองปัจจัยหลัก จำนวน 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 คือเงื่อนไขอบแห้งที่อัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงสุด, การทดลองที่ 2 คือเงื่อนไขอบแห้งที่ใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำที่สุด และการทดลองที่ 3 คือเงื่อนไขอบแห้งที่ได้ ปริมาณข้าวต้นภายหลังการอบแห้งสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 8.1 โดยใช้ขนาดเครื่องอบแห้งดัง แสดงในตารางที่ 8.2 ทำการจำลองเงื่อนไขอบแห้งทั้ง 3 การทดลอง

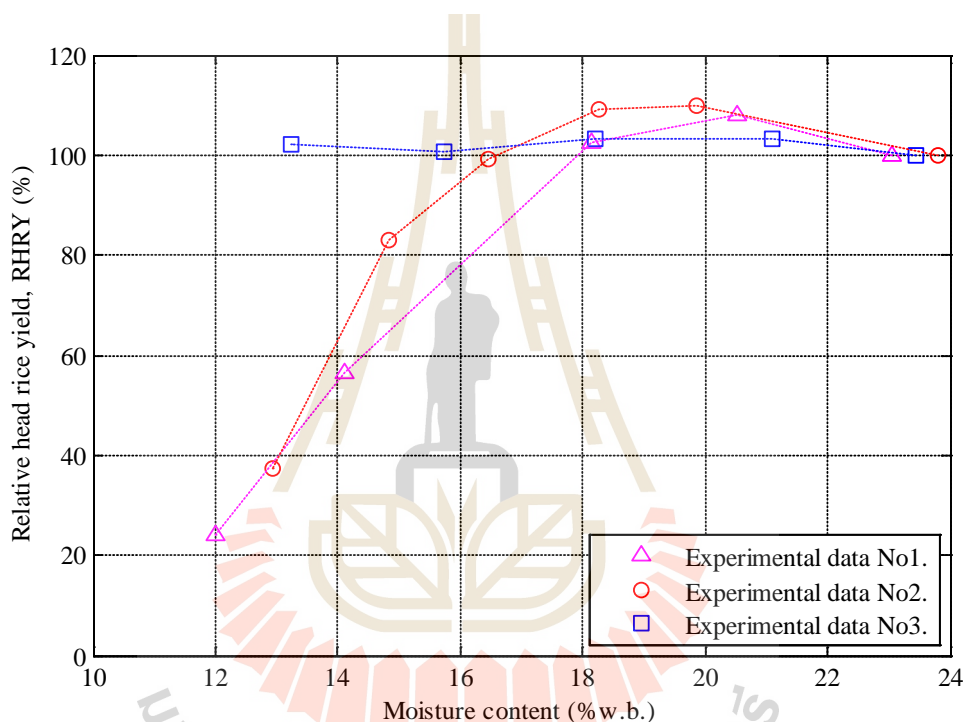
ตารางที่ 8.1 เงื่อนไขจำลองอบแห้ง เพื่อศึกษาการแตกตัวของข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง

เงื่อนไขการทดลอง	การทดลองที่		
	1	2	3
อุณหภูมิอากาศทางเข้า, °C	120	120	80
ความเร็วอากาศที่อลมเข้า, m/s	23	20	17
ระยะยกที่อลมเป่า, cm	6	6	4
มวลข้าวเปลือกในถัง, kg	20	20	20
จำนวนตะแกรงหว่งข้าว, ชั้น	11	11	11
พันธุ์ข้าวเปลือก	ชัยนาท1	ชัยนาท1	ชัยนาท1
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, °C	32.69	29.38	30.84
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม, %	48.23	65.92	59.37
อุณหภูมิข้าวเปลือกเริ่มต้น, °C	20.2	20.05	20.1
ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น, % w.b.	23.04	23.8	23.44
เส้นผ่านศูนย์กลางเมล็ด, mm	3.4886	3.4886	3.4886
สัดส่วนการรั่วไหลของอากาศ, %	25.43	27.16	18.59
อัตราการไหลข้าวเปลือก, kg/min	3.18	2.79	1.16

ตารางที่ 8.2 ขนาดเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหว่ง

ขนาดเครื่องอบแห้ง	ค่า
ความยาวที่อลมเป่า, m	4
ความยาวที่ครอบ, m	3
ความสูงถึงพัก, m	1
เส้นผ่านศูนย์กลางที่อลมเข้า, m	0.043
เส้นผ่านศูนย์กลางที่อลมเป่า, m	0.059
เส้นผ่านศูนย์กลางที่ครอบ, m	0.124
เส้นผ่านศูนย์กลางถึงพัก, m	0.32
มุมยอดฐานรูปกรวย, องศา	60
ความสูงของชั้นเมล็ด, m	0.4875

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบร้อยละปริมาณข้าวต้น (head rice yield, HRY) ของแต่ละการทดลองได้ชัดเจน จึงนำเสนอปริมาณข้าวต้นในรูปปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ (relative head rice yield, RHRy) ค่า RHRy ขณะอบแห้งเทียบกับความชื้นข้าวเปลือก แสดงในรูปที่ 8.5 ความชื้นข้าวเปลือกที่แสดงในรูป 8.5 คือค่าความชื้นข้าวเปลือกขณะนำตัวอย่างข้าวเปลือกออกจากเครื่องอบแห้ง (มิใช่ความชื้นข้าวเปลือกขณะขัดสี) และปริมาณข้าวต้นได้จากตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บระหว่างการทดลองและผ่านกระบวนการลดความชื้นในเตาอบจนได้ความชื้นประมาณ 14%w.b. ก่อนทำการขัดสี (ดังที่ได้แสดงวิธีการในบทที่ 5 หัวข้อ 5.3)



รูปที่ 8.5 ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ (relative head rice yield, RHRy) ขณะทดลองอบแห้ง

รูปที่ 8.5 แสดงให้เห็นว่าค่า RHRy มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้ง (ช่วงความชื้นข้าวเปลือกลดลงจาก 24 ถึง 20%w.b.) เนื่องจากช่วงแรกของการอบแห้ง ข้าวเปลือกมีระดับความชื้นที่ผิวสูง ประกอบกับการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูง จึงทำให้เกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันบางส่วนของแป้งที่ชั้นผิวเมล็ดข้าว รอยร้าวบางส่วนที่เกิดขึ้นและระหว่างการอบแห้งจึงถูกเชื่อมเข้าหากัน ข้าวเปลือกจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงได้ค่า RHRy สูงขึ้น (Madhiyanon and Soponronmarit, 2005) โดยเฉพาะกรณีการทดลองที่ 1 และ 2 (อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C) มีค่า RHRy เพิ่มขึ้นมากกว่าการทดลองที่ 3 (อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C) เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำ

กว่า 18 % w.b. ในการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่าค่า RHRV ลดลงอย่างชัดเจน ตามความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลง ขณะที่การทดลองที่ 3 ค่า RHRV มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง

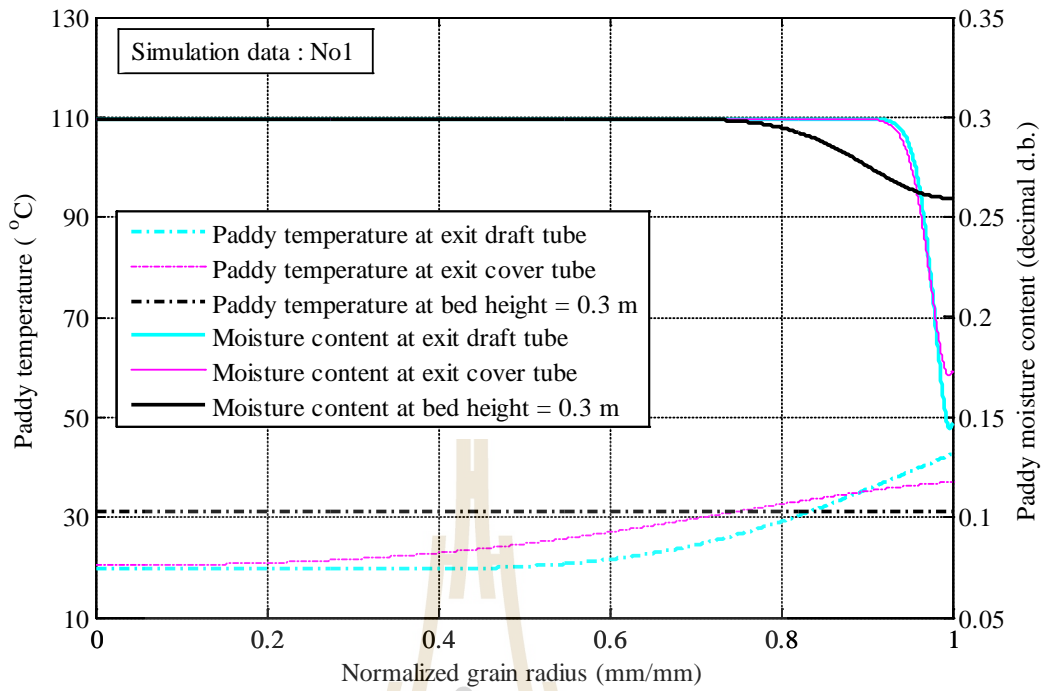
งานวิจัยนี้ใช้เงื่อนไขการอบแห้งของการทดลองที่ 1 และ 2 เป็นกรณีศึกษาการเกิดรอยร้าวของเมล็ดข้าวระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง โดยศึกษาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการอบแห้งของการทดลองที่ 3 ซึ่งเมล็ดข้าวไม่เกิดการแตกหักเนื่องจากการอบแห้ง

8.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยร้าวในเมล็ดข้าว

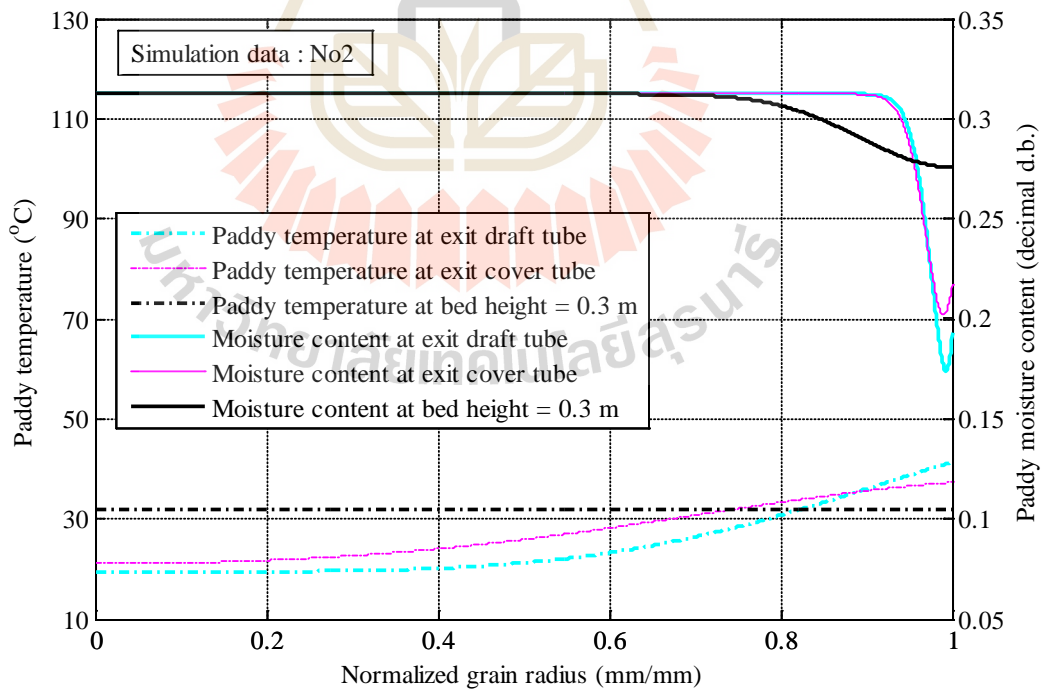
8.5.1 การเกิดรอยร้าวขณะอบแห้ง : ความชันความชื้น

ค่าอุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ดข้าว ณ.รอบแรกของการอบแห้งที่ได้จากการจำลองแสดงในรูปที่ 8.6-8.8 จากผลการจำลองด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 1-3 ตามลำดับ พบว่าในส่วนสเปคต์และหล่นหน่วง ความชื้นเฉพาะที่ผิวเมล็ดจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะอากาศอบแห้งมีอุณหภูมิ, ความเร็วและความพรุน (bed porosity) สูง และเนื่องจากระยะเวลาที่เมล็ดอยู่ในท่อลมเป่าและท่อครอบสั้น (ประมาณ 4.5 s) จึงทำให้ค่าความชันความชื้นภายในเมล็ด (moisture content gradient, MCG) และค่าความชันอุณหภูมิ (temperature gradient, TG) เกิดขึ้นที่บริเวณชั้นรอบนอกเมล็ดเป็นหลัก ในส่วนดาวน์คัมเมอร์พบว่าเมล็ดสูญเสียความชื้นด้วยอัตราที่ต่ำกว่า ดึงนำเสนอบทที่ 7 และมีการกระจายความชื้นและอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตลอดทั้งเมล็ด เนื่องจากอากาศอบแห้งมีอุณหภูมิ, ความเร็วและความพรุน (bed porosity) ต่ำและระยะเวลาที่เมล็ดอยู่ในส่วนนี้นาน (ประมาณ 8 min ต่อ 1 รอบการอบแห้ง) จึงทำให้ค่า MCG และค่า TG ลดลง ประกอบกับเมล็ดใช้ความร้อนส่วนหนึ่งจากเมล็ด เพื่อระเหยความชื้น จึงทำให้อุณหภูมิเมล็ดเฉลี่ยลดลง (Madhiyanon and Soponronnarit, 2005) แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงส่งผลให้ค่า MCG และค่า TG ของเมล็ดเปลี่ยนแปลงตลอดการอบแห้ง โดยส่วนสเปคต์และหล่นหน่วงจะทำให้ค่า MCG และค่า TG เพิ่มขึ้นบริเวณชั้นรอบนอกเมล็ด ขณะที่ส่วนดาวน์คัมเมอร์จะช่วยทำให้ค่า MCG และค่า TG ลดลงและมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งเมล็ดมากขึ้น

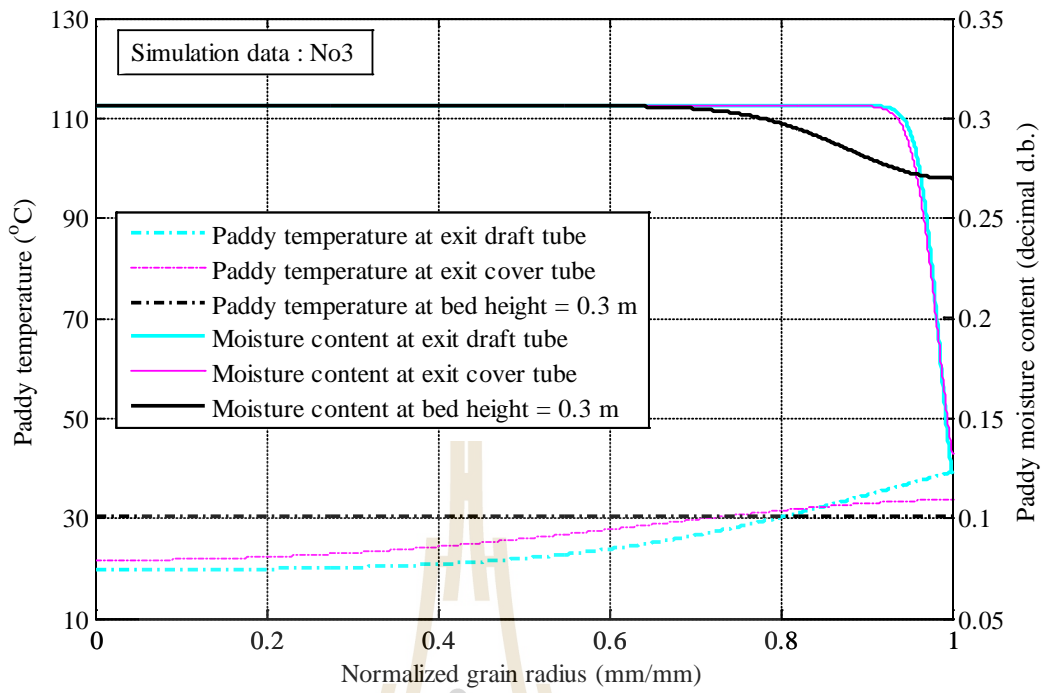
ค่า MCG เพิ่มขึ้นในส่วนสเปคต์และหล่นหน่วง และลดลงในส่วนดาวน์คัมเมอร์ หมายความว่าอัตราการอบแห้ง ซึ่งค่าความชันความชื้นสูงสุดของแต่ละรอบการอบแห้ง (maximum moisture content gradient, MaxMG) มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากความชื้นที่แกนกลางเมล็ดลดลง ขณะที่ค่าความชันความชื้นต่ำสุดของแต่ละรอบอบแห้ง (minimum moisture content gradient, MinMG) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิก๊าซในส่วนของดาวน์คัมเมอร์มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิเมล็ดในดาวน์คัมเมอร์ที่สูงขึ้น ทำให้ค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ที่ผิวเมล็ดข้าวมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8.9-8.11



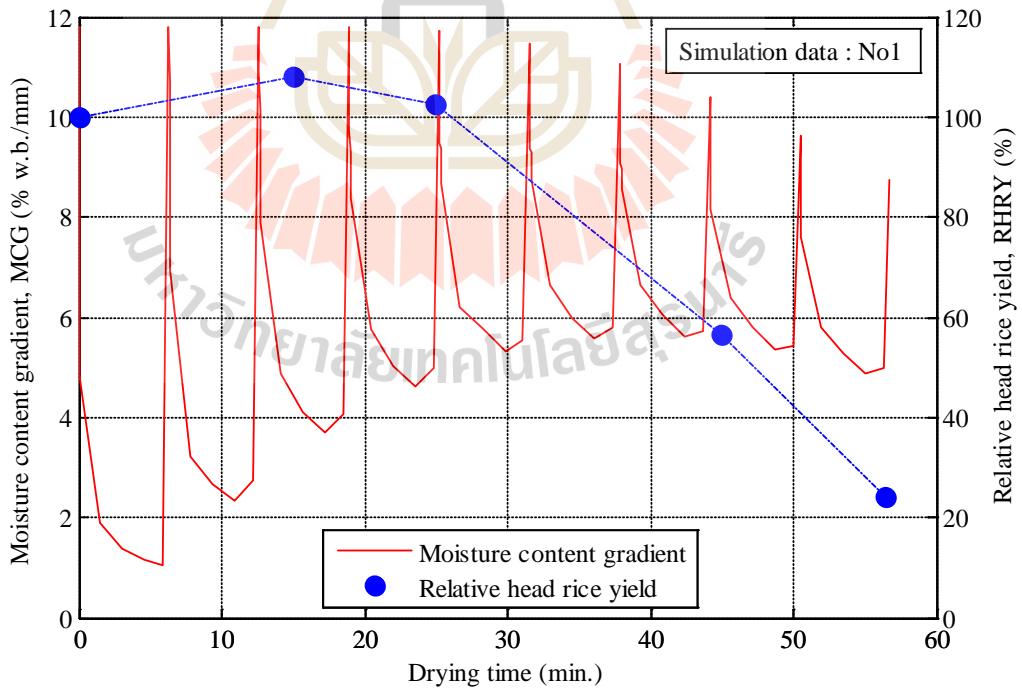
รูปที่ 8.6 ผลจำลองอุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ด อบแห้งรอบที่ 1 ด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 1



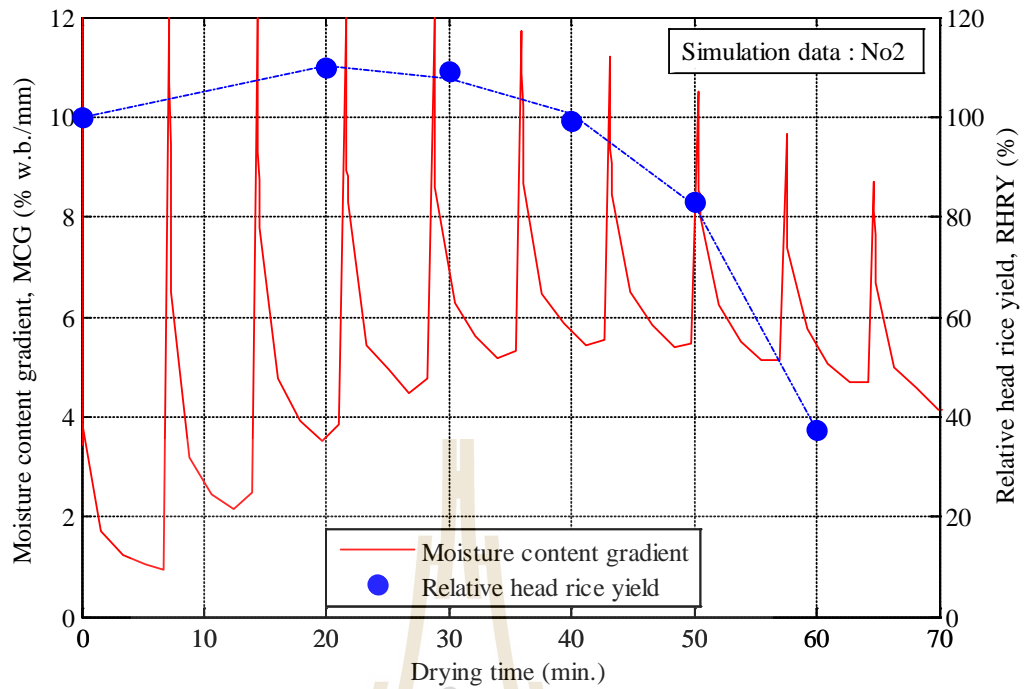
รูปที่ 8.7 ผลจำลองอุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ด อบแห้งรอบที่ 1 ด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 2



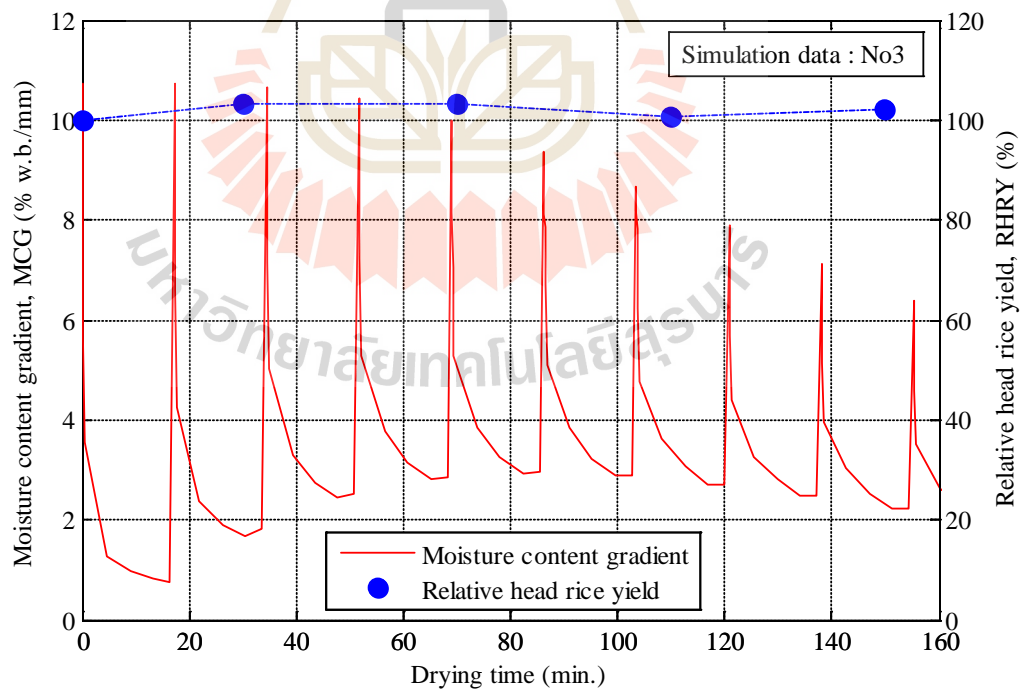
รูปที่ 8.8 ผลจำลองอุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ด ออบแห้งรอบที่ 1 ด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 3



รูปที่ 8.9 ความชันความชื้นเมล็ดข้าวและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 1



รูปที่ 8.10 ความชันความชื้นเมล็ดข้าวและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 2



รูปที่ 8.11 ความชันความชื้นเมล็ดข้าวและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 3

จากผลการจำลองด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 1-3 ตามลำดับ ผลการจำลองด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 1 และ 2 ในรูปที่ 8.9-8.10 ตามลำดับ พบว่าค่า MinMG เพิ่มขึ้นจากประมาณ 1 %w.b./mm ถึงประมาณ 5.5 %w.b./mm และค่า RHRV ที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อค่า MinMG สูงกว่า 4 %w.b./mm ขณะที่ผลการจำลองด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 3 รูปที่ 8.11 ค่า MinMG เพิ่มขึ้นจากประมาณ 1 %w.b./mm ถึงประมาณ 3 %w.b./mm เท่านั้น โดยที่ค่า RHRV มีค่าคงที่

การอบแห้งในส่วนคาน์คัมเมอร์ แม้เมล็ดจะสูญเสียความชื้นโดยตลอดการอบแห้ง แต่อัตราการระเหยที่ผิวต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการแพร่ภายในเมล็ด จึงทำให้เมล็ดเกิดการกระจายความชื้นที่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นการลดความเค้นที่สะสมภายในเมล็ดที่เกิดจากการอบแห้งอย่างเข้มข้นในส่วนสเป่าและหล่นหน่วง กรณีศึกษา นี้ จึงอาจสรุปได้ว่า เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวของข้าวเนื่องจาก MCG ขณะอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง จึงควรรักษา ค่า MCG ในเมล็ดข้าวก่อนเข้าสู่ท่อลมเป่าให้ต่ำกว่า 3 %w.b./mm. ตลอดการอบแห้ง

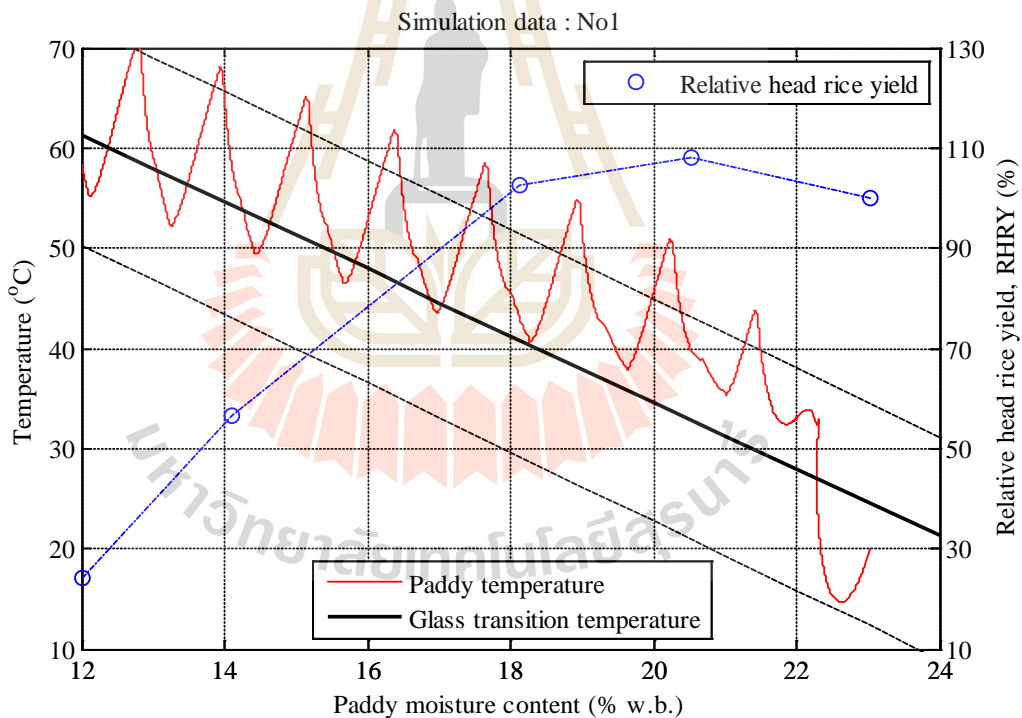
8.5.2 การเกิดรอยร้าวเนื่องจาก : อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิเมล็ดเฉลี่ย ขณะอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง มีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไปมา ดังแสดงในรูปที่ 8.12-8.14 จากผลการจำลองด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 1-3 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเกิดขึ้นในช่วงก่อนเข้าสู่ท่อลมเป่า (ส่วนกรวยในถังพัก), ส่วนสเป่าและส่วนหล่นหน่วง ขณะที่การลดลงของอุณหภูมิเมล็ดจะเกิดขึ้นในส่วนคาน์คัมเมอร์ แต่โดยภาพรวมแล้วอุณหภูมิเมล็ดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาอบแห้งที่เพิ่มมากขึ้น โดยในกรณีศึกษา นี้ อุณหภูมิเมล็ดจะอยู่ในช่วงเปลี่ยนผ่าน (transition zone) ระหว่างสถานะคล้ายแก้วและสถานะคล้ายยาง ผลการจำลองด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 8.12-8.13 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิเมล็ดเฉลี่ยบางช่วงจะสูงกว่าเส้นขอบเขตบนที่ความมั่นใจ 95% ของการเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยาง ซึ่งมีความสอดคล้องกับช่วงที่เกิดการลดลงของ RHRV ในกรณีเงื่อนไขของการทดลองที่ 3 ค่าอุณหภูมิเมล็ดมีค่าต่ำกว่าขอบเขตบนของช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนแก้ว โดยตลอดการทดลองและค่า RHRV มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง

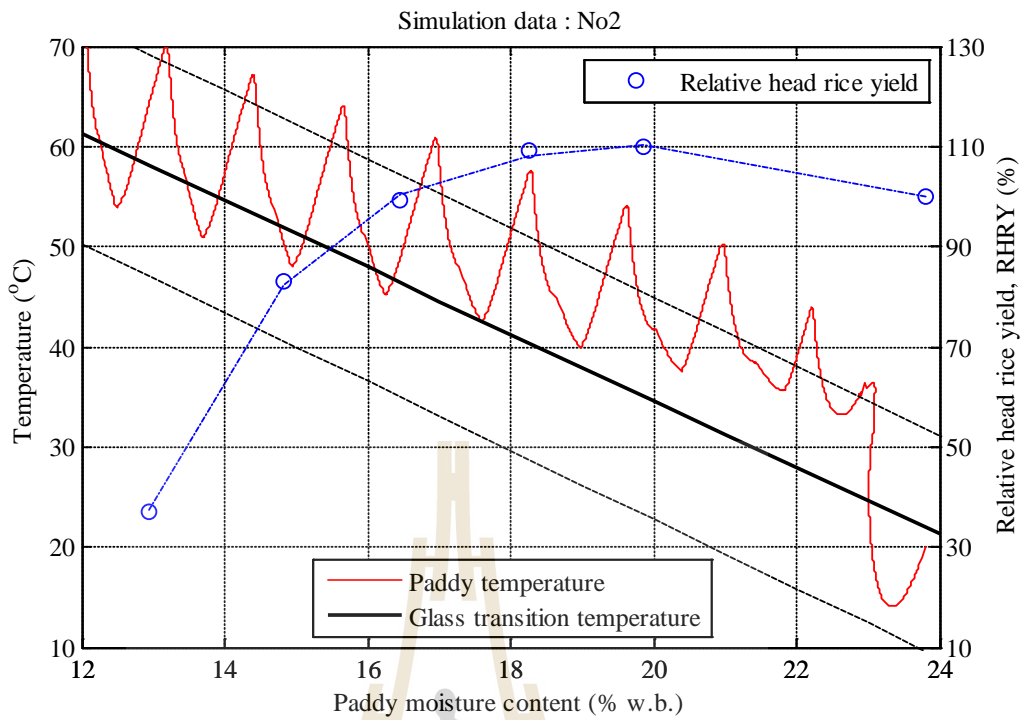
จากรูปที่ 8.12-8.14 แสดงว่ากรณีศึกษา นี้ การแตกร้าวมีความสัมพันธ์กับค่า T_g นำไปสู่การคำนวณ RSVR เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการแตกร้าวกับค่า RSVR ดังแสดงในรูปที่ 8.15-8.17 จากผลการจำลองด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 1-3 ตามลำดับ ขณะอบแห้งพบว่าค่า RSVR ที่คำนวณได้จากผลการจำลองของทั้ง 3 เงื่อนไขการทดลองมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไปมา เช่นเดียวกับ MCG และอุณหภูมิเมล็ดเฉลี่ย โดยค่า RSVR จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในส่วนสเป่าและส่วนหล่นหน่วงขณะที่การลดลงของ RSVR จะเกิดขึ้นในส่วนคาน์คัมเมอร์อย่างช้า ๆ ในช่วงแรกของการอบแห้งค่า RSVR มีค่าสูงขึ้นมากกว่า 0.8 แสดงถึงการเปลี่ยนสถานะของแป้ง

เป็นสถานะคล้ายขงมากกว่า 80% ของปริมาตรเมล็ด โดยเกิดในส่วนแกนกลางเมล็ดถึงชั้นใกล้ผิวเมล็ด หลังจากนั้นค่า RSVR จะลดลงอย่างช้า ๆ ตามอุณหภูมิภายในเมล็ดและ MCG ที่ลดลง

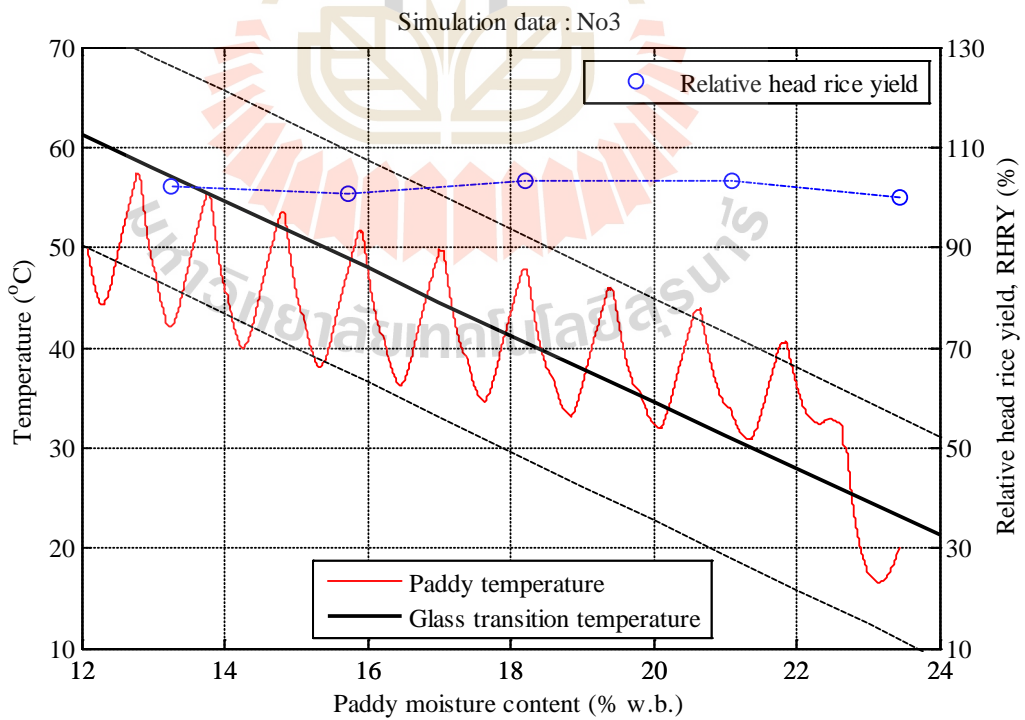
การเปลี่ยนอุณหภูมิเมล็ดอย่างรวดเร็วและความแตกต่างของความชื้นภายในเมล็ดทำให้ชั้นแป้งเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายขงและเกิดการขยายปริมาตรอย่างรวดเร็วจนอาจทำให้เกิดรอยร้าวภายในเมล็ดได้ แต่ในกรณีเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นห่นวง ค่า RSVR ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสเปาต์เกิดเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเมล็ดอย่างรวดเร็วเพราะมีการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วในช่วงสเปาต์ขณะที่เมล็ดได้รับการลด MCG อย่างเพียงพอในส่วนดาวนคัมเมอร์ก่อนเข้าสู่ส่วนสเปาต์ ทำให้การเปลี่ยนสถานะเป็นคล้ายขงเกิดขึ้นพร้อมกันอย่างรวดเร็วโดยตลอดทั้งเมล็ด (ประมาณ 80%) ยกเว้นเฉพาะบริเวณผิวเมล็ดที่ยังคงมีสถานะคล้ายแก้วเพราะการสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการอบแห้งอย่างเข้มข้นในท่อลมเป่า จึงทำให้ไม่เกิดรอยร้าวภายในเมล็ดเนื่องจากการอบแห้งในส่วนสเปาต์และหล่นห่นวง



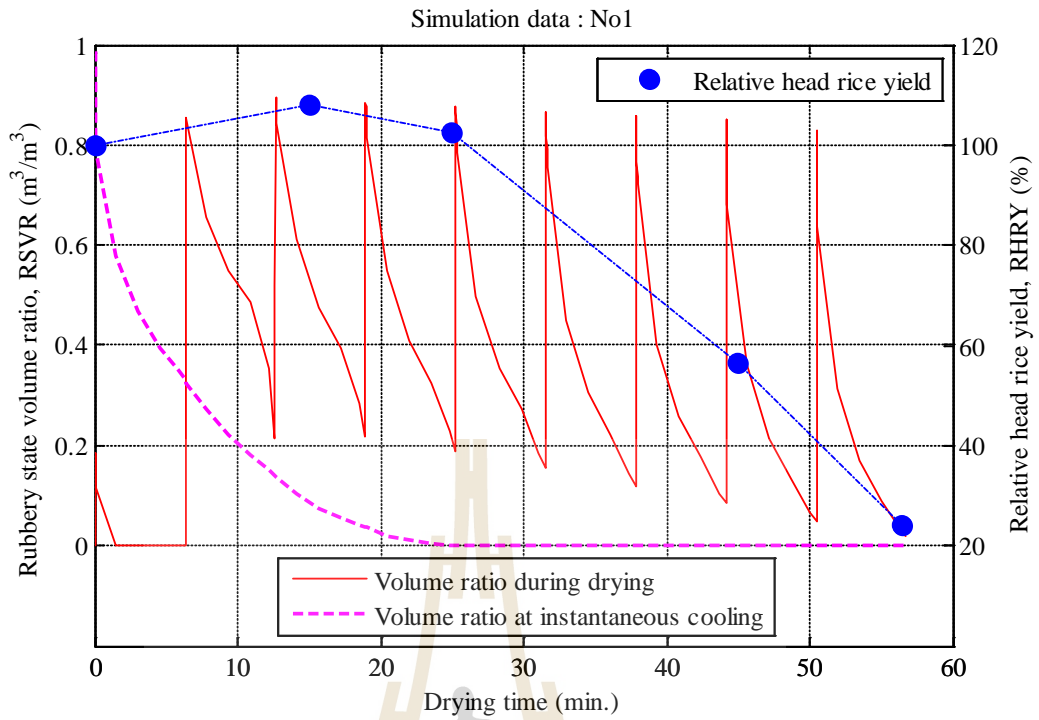
รูปที่ 8.12 อุณหภูมิเมล็ดข้าวเฉลี่ยและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 1



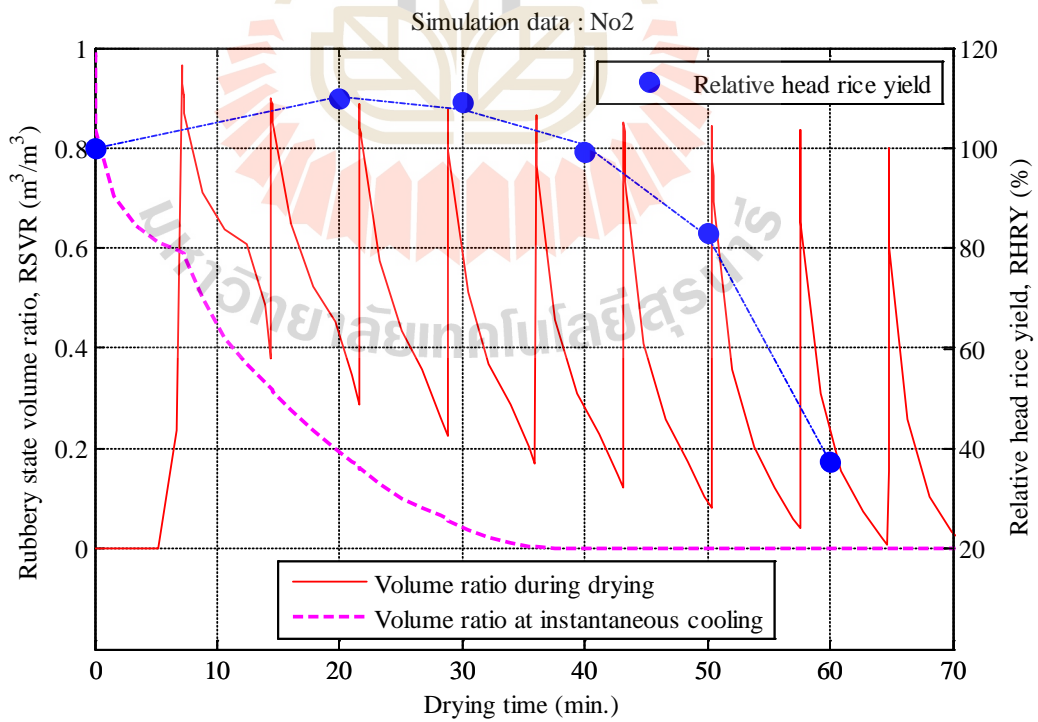
รูปที่ 8.13 อุณหภูมิเมล็ดข้าวเฉลี่ยและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 2



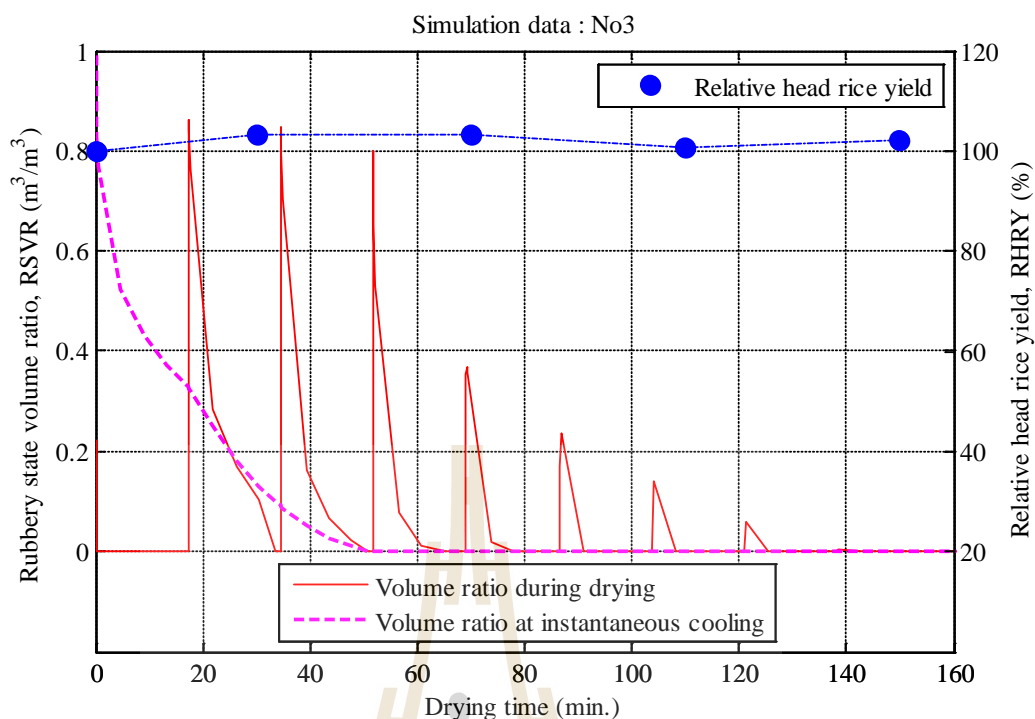
รูปที่ 8.14 อุณหภูมิเมล็ดข้าวเฉลี่ยและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 3



รูปที่ 8.15 สัดส่วนปริมาตรคล้ายยางและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 1



รูปที่ 8.16 สัดส่วนปริมาตรคล้ายยางและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 2



รูปที่ 8.17 สัดส่วนปริมาตรคล้ายยางและปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ เมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองที่ 3

เมื่อเมล็ดเข้าสู่ส่วนคาน์คัมเมอร์ ค่า RSVR จะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ เพราะอัตราการอบแห้งในส่วนคาน์คัมเมอร์มีค่าต่ำกว่าการแพร่ของความชื้นภายในเมล็ด ทำให้ค่า MCG ลดลงอย่างช้า ๆ ประกอบกับเมล็ดถูกบรรจุอยู่ในกองเมล็ดที่มีอุณหภูมิและความชื้นใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่าอุณหภูมิเมล็ดค่อย ๆ เปลี่ยนแปลง โดยอุณหภูมิเมล็ดจะลดลงอย่างช้า ๆ เพราะการระเหยความชื้นด้วยความร้อนภายในเมล็ด (evaporative cooling) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เมล็ดเกิดการเปลี่ยนสถานะจากคล้ายยางสู่คล้ายแก้วอย่างค่อยเป็นค่อยไป จึงไม่ทำให้เกิดรอยร้าวขึ้นภายในเมล็ดขณะอบแห้งในส่วนคาน์คัมเมอร์

นอกจากนี้ในรูปที่ 8.15-8.17 ได้นำเสนอค่า RSVR ขณะลดอุณหภูมิเมล็ดภายหลังการอบแห้ง (cooling process) เนื่องจากขั้นตอนการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อหาปริมาณข้าวต้นขณะทำการอบแห้ง ต้องนำตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บระหว่างกระบวนการอบแห้งมาอบต่อแบบชั้นบางอย่างช้า ๆ ในเตาอบที่อุณหภูมิ 35°C จนได้ความชื้นภายในประมาณ 14% w.b. ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวเทียบได้กับการลดความร้อนเมล็ดโดยทันที โดยการเปลี่ยนสภาวะอุณหภูมิอากาศแวดล้อมรอบเมล็ดจะทำให้เมล็ดลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วกว่าการสูญเสียความชื้นมาก ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้การคำนวณค่า RSVR ขณะลดอุณหภูมิเมล็ดภายหลังการอบแห้งจึงสมมุติให้เมล็ดยังคงมีลักษณะ MCG เช่นเดียวกับขณะนำเมล็ดออกจากเครื่องอบแห้งและเมล็ดมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอากาศในเตาอบ

(35°C) โดยทันที เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงสถานะของเมล็ดเนื่องจากการลดอุณหภูมิเมล็ดหลังการอบแห้ง

เมื่อเปรียบเทียบค่า RSVR ขณะอบแห้งกับขณะลดอุณหภูมิเมล็ดภายหลังจากการอบแห้ง พบความแตกต่างของค่า RSVR ทั้งสองกระบวนการตลอดการอบแห้ง โดยเฉพาะผลการคำนวณจากเงื่อนไขการทดลองที่ 1 และ 2 มีความแตกต่างทั้งในส่วนสเปาต์, หล่นหน่วงและคาวนั้คัมเมอร์ ขณะที่ผลการคำนวณจากเงื่อนไขการทดลองที่ 3 มีความแตกต่างเฉพาะส่วนสเปาต์และหล่นหน่วง ความแตกต่างดังกล่าวอาจนำไปสู่การเกิดรอยร้าวจากการเปลี่ยนแปลงสถานะอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแป้งจากสถานะคล้ายขำนำไปสู่สถานะคล้ายแก้วจะทำให้เกิดการหดตัวทันทีในส่วนรอบนอกของเมล็ด ทำให้เกิดความเค้นดึงที่ผิวเมล็ดอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวเริ่มต้นบริเวณผิวเมล็ดและสามารถกระจายเข้าสู่แกนกลางเมล็ดได้ นำไปสู่การแตกหักขณะขัดสีได้โดยง่าย นอกจากนี้จากรูปที่ 8.15-8.17 พบว่าค่า RSVR สูงสุดของแต่ละรอบการอบแห้ง ของกรณีเงื่อนไขการทดลองที่ 1 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ 0.8-0.9) ซึ่งในกรณีเงื่อนไขการทดลองที่ 1 และ 2 จะมีค่า RSVR สูงสุดอยู่ในระดับสูงโดยตลอดการอบแห้ง แต่กรณีเงื่อนไขการทดลองที่ 3 พบว่าภายหลังจากที่ 60 ของการอบแห้งค่า RSVR สูงสุดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าประมาณศูนย์ในรอบสุดท้ายของการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบปรากฏการณ์ดังกล่าวกับค่า RHRV พบว่ามีความสัมพันธ์กันดังนี้ ในช่วงแรกของการอบแห้งที่ใช้อากาศอุณหภูมิสูง (มากกว่า 80°C) และเมล็ดยังคงมีความชื้นอยู่ในระดับสูง ขณะที่เมล็ดเข้าสู่ส่วนสเปาต์และหล่นหน่วง เมล็ดจะได้รับการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วที่ผิวเมล็ดทำให้ผิวเมล็ดมีอุณหภูมิสูงถึงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของแป้งที่ผิวเป็นเจลแป็ง (partial gelatinization) ซึ่งเจลแป็งดังกล่าวจะช่วยเชื่อมรอยร้าวที่เกิดขึ้นก่อนทำการอบแห้งและระหว่างอบแห้ง นอกจากนี้ยังช่วยเชื่อมรอยร้าวที่เกิดขึ้นในการลดอุณหภูมิเมล็ด อันเนื่องมาจากความแตกต่างของค่า RSVR ขณะอบแห้งกับขณะลดอุณหภูมิเมล็ดด้วย ส่งผลให้ค่า RHRV ทั้ง 3 การทดลองมีค่าสูง แต่หลังจากที่ความชื้นที่ผิวลดลงจนไม่เกิดสภาพเจลภายในผิวเมล็ดแล้ว ค่า RHRV ลดลงอย่างต่อเนื่อง เพราะความแตกต่างของค่า RSVR ขณะอบแห้งกับขณะลดอุณหภูมิเมล็ดดังเห็นได้จากรูปที่ 8.15-8.16 แต่ในกรณีการทดลองที่ 3 RHRV มีค่าคงที่โดยตลอดการทดลอง เนื่องจากค่า RSVR มีความแตกต่างน้อยจึงไม่เกิดรอยร้าวขึ้นเนื่องจากการลดอุณหภูมิเมล็ดภายหลังจากการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 8.17 แนวทางการลดระดับ RSVR ขณะอบแห้งให้มีค่าต่ำใกล้เคียงค่า RSVR ขณะลดอุณหภูมิเมล็ดจึงเป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาเพื่อเพิ่มคุณภาพการขัดสีข้าวเปลือกข้อสังเกตที่สำคัญคือการทดลองที่ 1 2 และ 3 จะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ตำแหน่งทางออกส่วนหล่นหน่วง ซึ่งเป็นช่วงที่ค่า RSVR มีค่าสูง ทำให้มีความแตกต่างสูงมากระหว่างค่า RSVR ขณะอบแห้งกับขณะลดอุณหภูมิเมล็ด ด้วยเหตุนี้จึงควรเก็บข้าวเปลือกภายหลังจากการผ่านส่วนคาวนั้คัมเมอร์ ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า RSVR ต่ำ

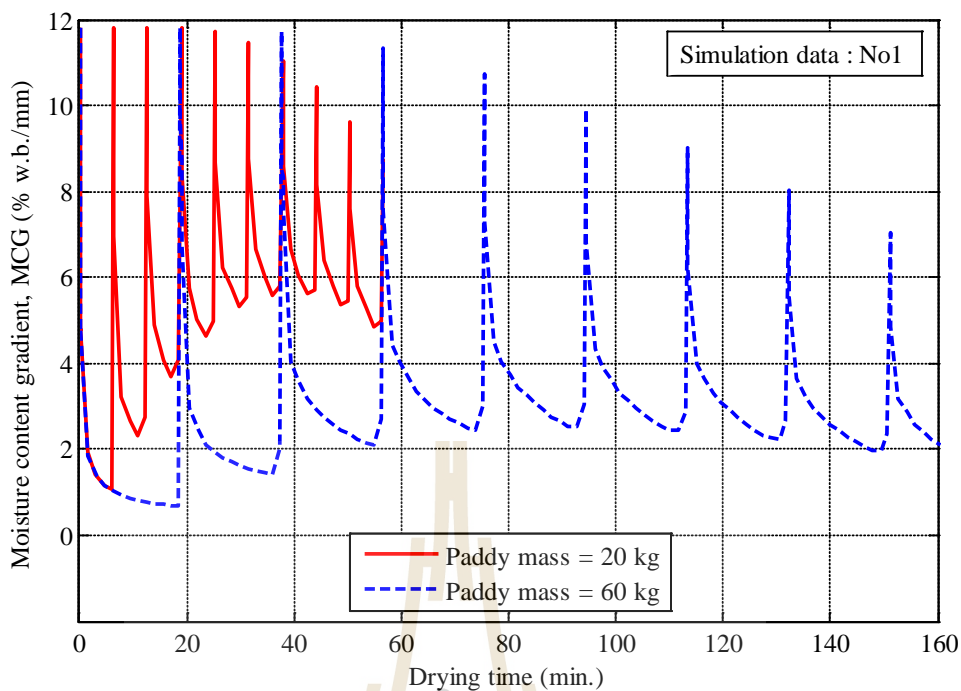
8.6 แนวทางป้องกันการแตกร้าวข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 8.5 ทำให้ได้บรรทัดฐานที่ต้องพิจารณาเพื่อลดการเกิดรอยร้าวของข้าวดังนี้

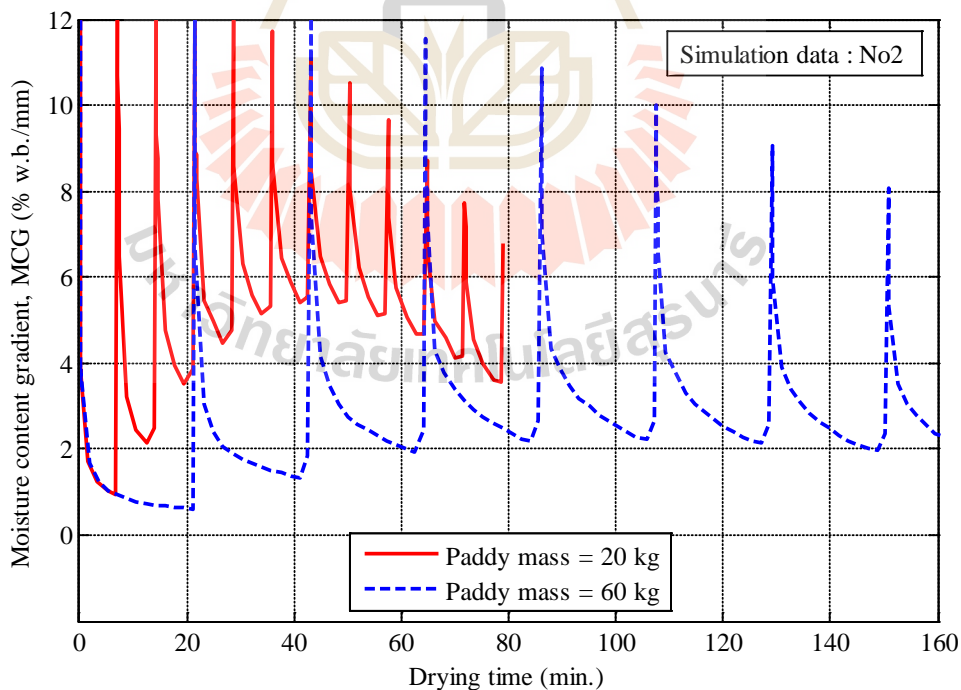
1. ควรรักษาค่า MCG ในเมล็ดก่อนเข้าสู่ท่อลมเป่าให้ต่ำกว่า 3 %w.b./mm. ตลอดการอบแห้ง
2. ข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งควรมีค่า RSVR ใกล้เคียงกับค่า RSVR ขณะลดอุณหภูมิข้าวเปลือก
3. ควรเก็บข้าวเปลือกขณะที่ออกจากส่วนดาวน์คัมเมอร์เนื่องจากเป็นช่วงที่มีค่า RSVR ต่ำที่สุด

เพื่อสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็วและประหยัดพลังงาน โดยยังได้ข้าวเปลือกที่มีคุณภาพการขัดสีที่สูง ผู้วิจัยจึงเลือกเงื่อนไขการทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งจากการทดลองอบแห้งจริง ดังแสดงในบทที่ 6 พบว่าเงื่อนไขทั้ง 2 มีอัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงสุดและประหยัดพลังงานรวมจำเพาะที่สุดตามลำดับ แต่ยังคงพบปัญหาการแตกหักของข้าวเนื่องจากกระบวนการอบแห้ง เป็นเงื่อนไขตั้งต้นและทำการวิเคราะห์ผลการจำลองการอบแห้งพบว่าปัจจัยที่สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ระบบมีการตอบสนองสอดคล้องกับบรรทัดฐานที่นำเสนอข้างต้นคือปริมาณข้าวเปลือกเริ่มต้น การเพิ่มปริมาณข้าวเปลือกเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 60 kg ในขณะที่อัตราการไหลข้าวเปลือกยังเท่าเดิม จะช่วยให้เมล็ดมีระยะเวลาในส่วนดาวน์คัมเมอร์มากขึ้น จนสามารถลดระดับ MCG ก่อนเข้าสู่ท่อลมเป่าให้อยู่ในระดับประมาณ 2 %w.b./mm ได้โดยตลอดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 8.18-8.19 ขณะที่อุณหภูมิเมล็ดเฉลี่ยจะมีค่าลดลงในช่วงเปลี่ยนผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 8.20-8.21 ขณะที่ค่า RSVR สูงสุดมีค่าลดลงโดยตลอดการอบแห้งและค่า RSVR ที่ออกจากส่วนดาวน์คัมเมอร์ก็มีค่าใกล้กับค่า RSVR ขณะลดอุณหภูมิข้าวเปลือกด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 8.22-8.23 ประกอบกับการจัดเก็บข้าวเปลือกออกจากเครื่องอบแห้ง ณ ตำแหน่งทางออกจากส่วนดาวน์คัมเมอร์ จึงทำให้เชื่อได้ว่าเงื่อนไขการทดลองที่ 1 และ 2 ที่ปรับปริมาณมวลเริ่มต้นเป็น 60 kg จะสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็วและประหยัดพลังงาน โดยยังคงสามารถรักษาปริมาณข้าวต้นที่ดีได้

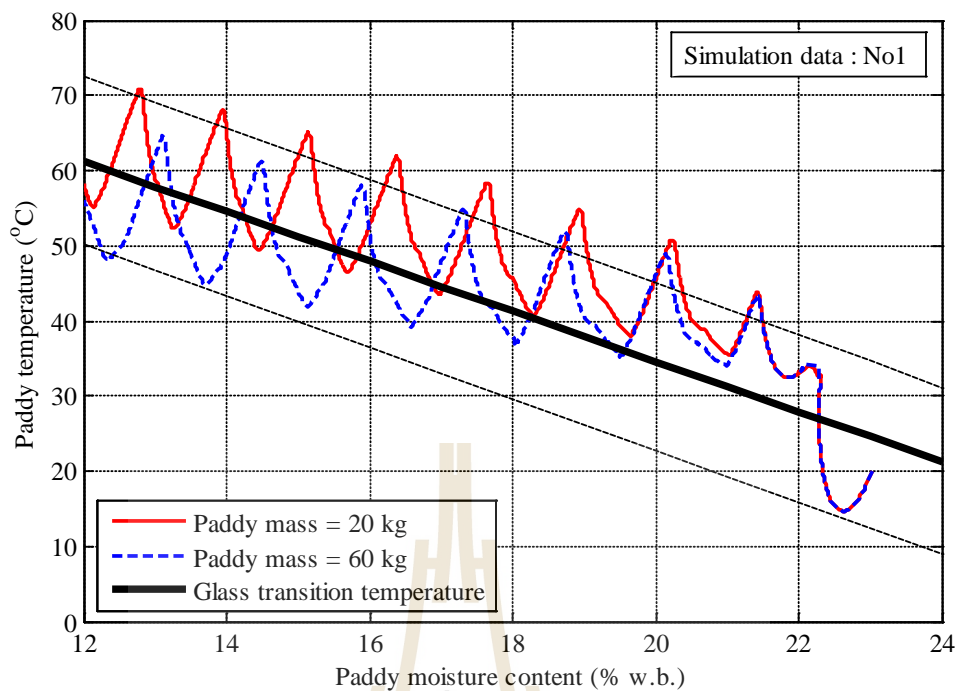
เมื่อเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นจาก 20 kg เป็น 60 kg ในกรณีเงื่อนไขการทดลองที่ 1 ทำให้ระยะเวลาเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกในถังพักข้าวเพิ่มขึ้นจากประมาณ 6 เป็น 19 นาทีต่อรอบการอบแห้ง และในกรณีเงื่อนไขการทดลองที่ 2 ทำให้ระยะเวลาเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกในถังพักข้าวเพิ่มขึ้นจากประมาณ 7 เป็น 22 นาทีต่อรอบการอบแห้ง ผลของระยะเวลาพักต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลอง ดังที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ในบทที่ 6 รูปที่ 6.44 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะเวลาพักของเงื่อนไขการทดลองที่ 1 และ 2 ที่เพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นเป็น 60 kg ดังแสดงในรูปที่ 8.24 โดยเส้นปะแทนระยะเวลาพักที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มมวลข้าวเปลือกเป็น 60 kg



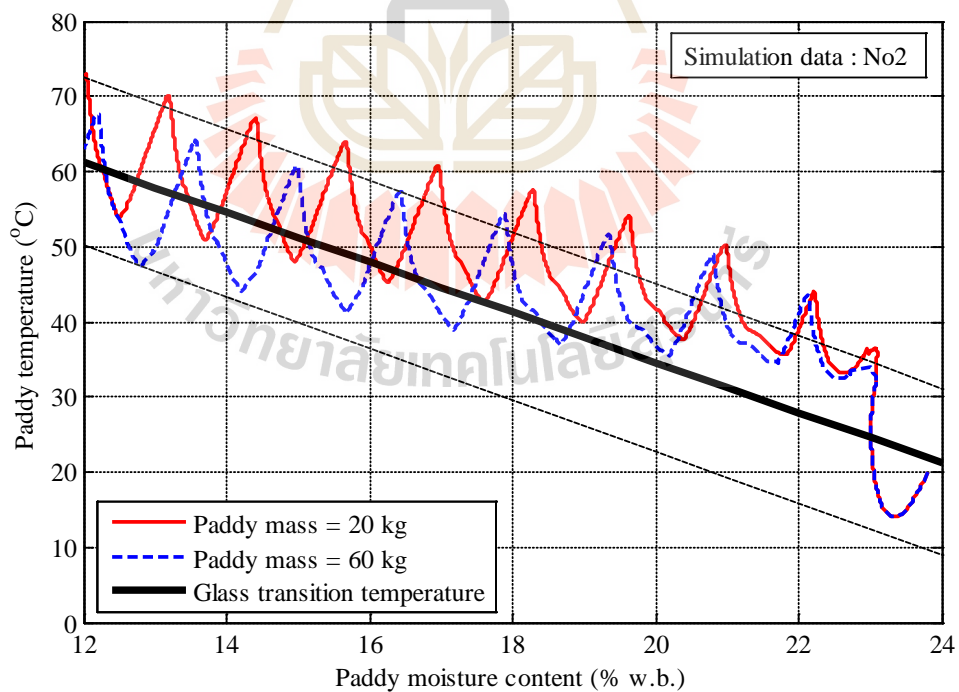
รูปที่ 8.18 ความชันความชื้นเมล็ดข้าวที่เงื่อนไขการทดลองที่ 1 เมื่อใช้มวลข้าวเปลือก 20 และ 60 kg



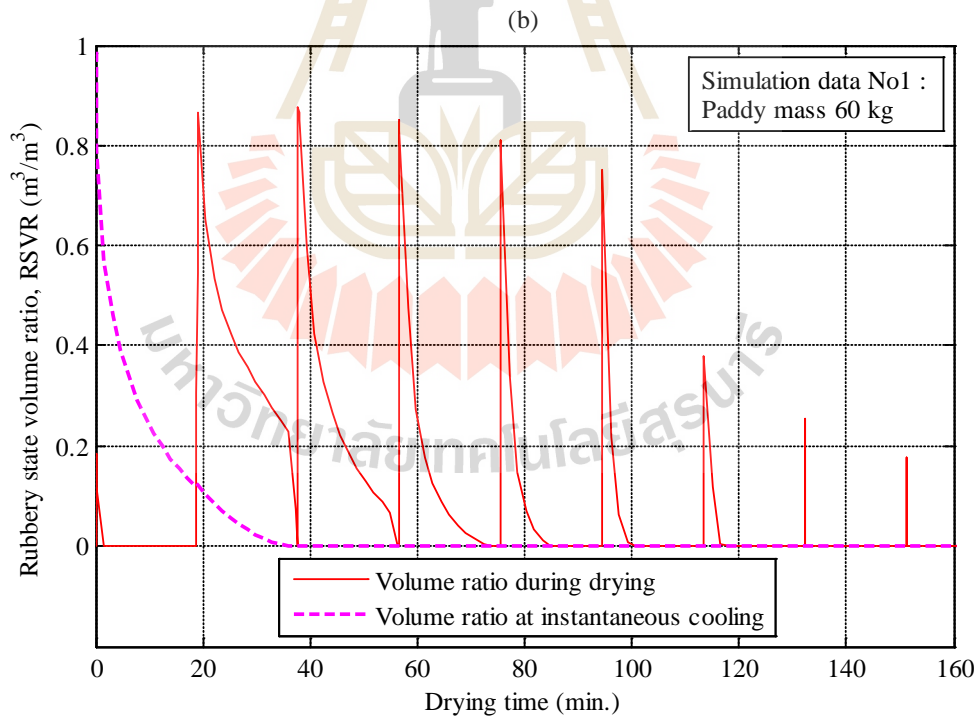
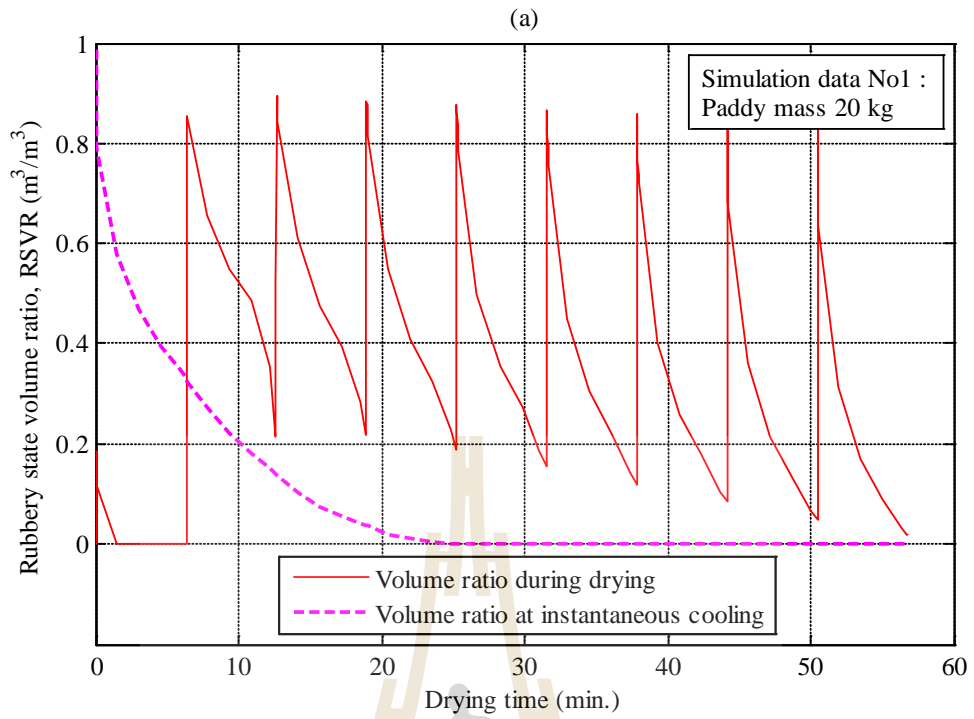
รูปที่ 8.19 ความชันความชื้นเมล็ดข้าวที่เงื่อนไขการทดลองที่ 2 เมื่อใช้มวลข้าวเปลือก 20 และ 60 kg



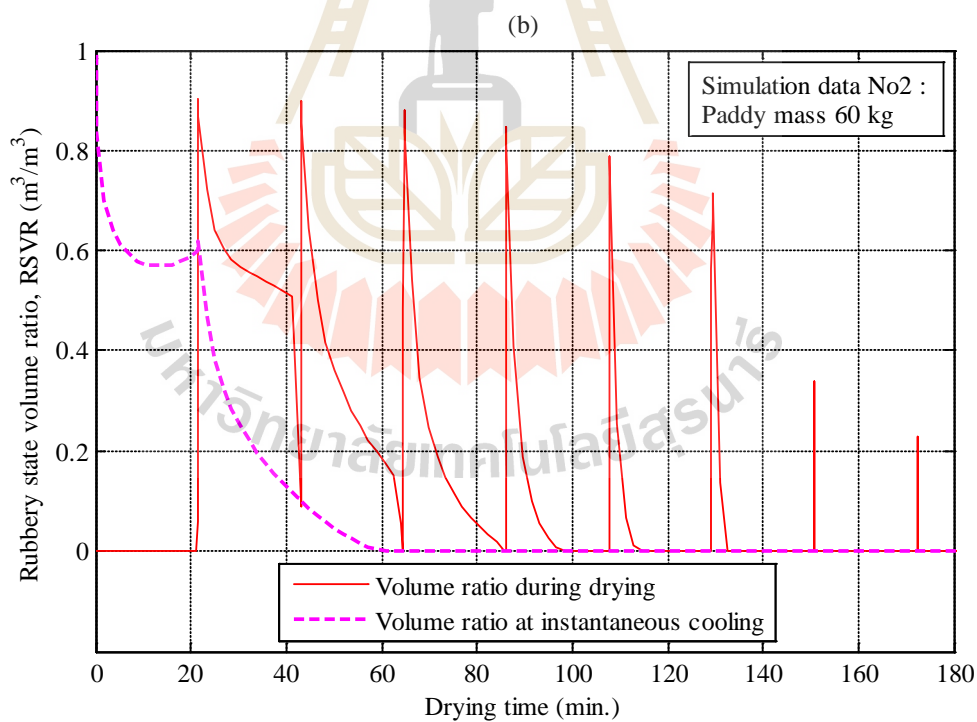
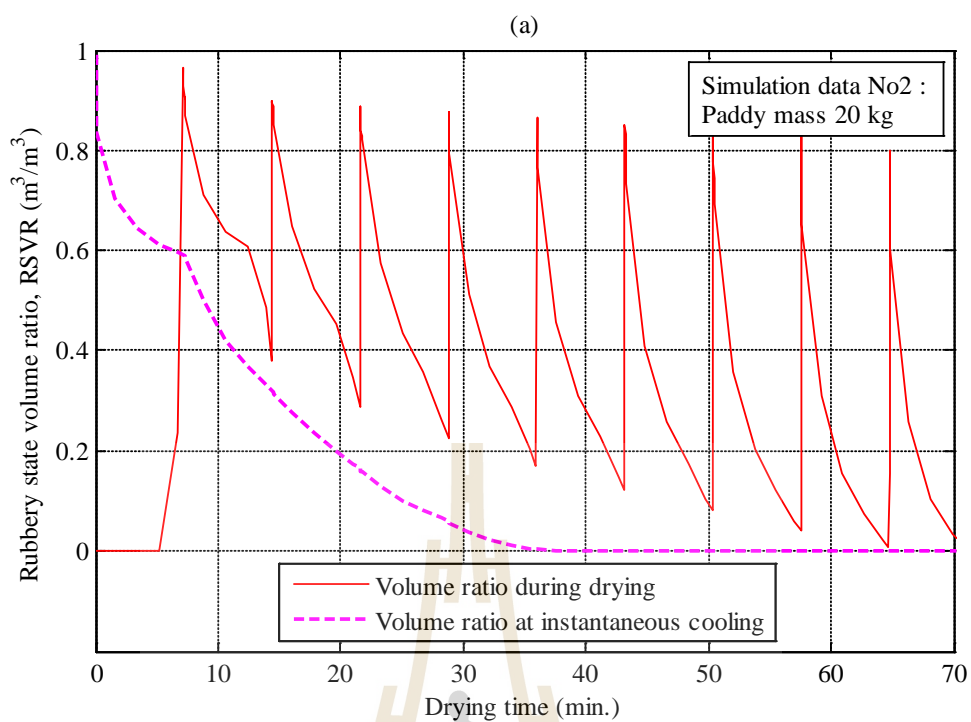
รูปที่ 8.20 อุณหภูมิเมล็ดข้าวเฉลี่ยที่เงื่อนไขการทดลองที่ 1 เมื่อใช้มวลข้าวเปลือก 20 และ 60 kg



รูปที่ 8.21 อุณหภูมิเมล็ดข้าวเฉลี่ยที่เงื่อนไขการทดลองที่ 2 เมื่อใช้มวลข้าวเปลือก 20 และ 60 kg

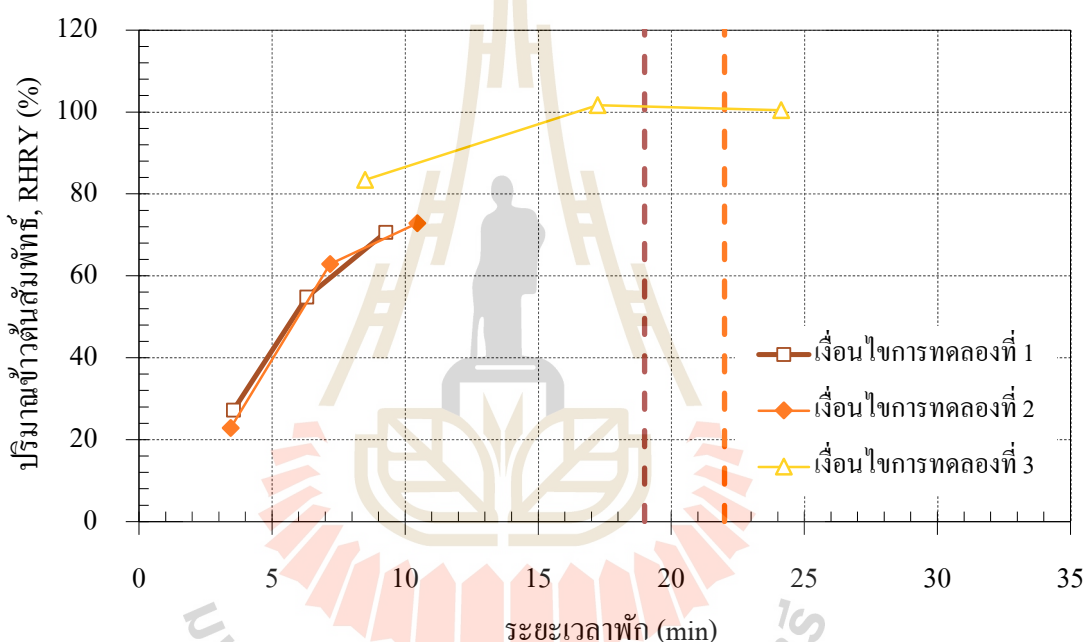


รูปที่ 8.22 สัดส่วนปริมาตรคล้ายยางที่เงื่อนไขการทดลองที่ 1 ที่มีมวลข้าวเปลือก (a) 20 kg, (b) 60 kg



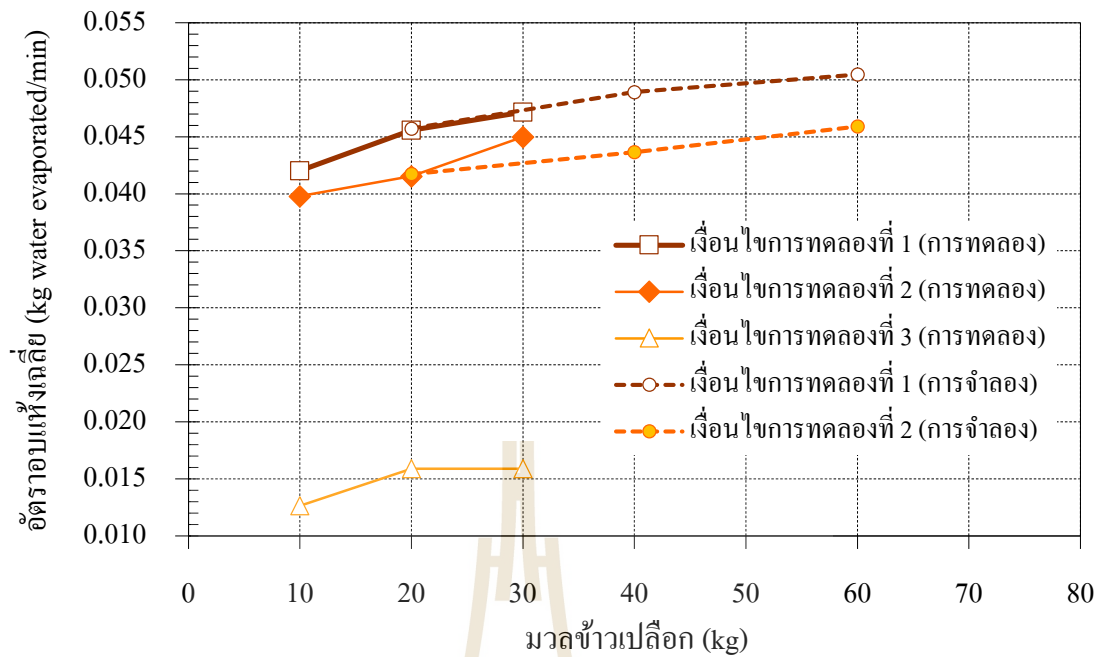
รูปที่ 8.23 สัดส่วนปริมาตรคล้ายยางที่เงื่อนไขการทดลองที่ 2 ที่มีมวลข้าวเปลือก (a) 20 kg, (b) 60 kg

จากรูปที่ 8.24 พบว่าการเงื่อนไขทดลองที่ 3 ซึ่งจากการทดลองอบแห้งจริงได้ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์หลังการอบแห้งประมาณ 100% มีระยะเวลาพักใกล้เคียงกับระยะเวลาพักของเงื่อนไขการทดลองที่ 1 และ 2 ที่เพิ่มมวลข้าวเปลือกเป็น 60 kg ซึ่งถูกคาดหมายว่าจะไม่เกิดการลดลงของปริมาณข้าวต้นภายหลังการอบแห้งเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3 แนวคิดนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุพิชญ์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์ (2552) ซึ่งพบว่าระยะเวลาพักระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ปริมาณข้าวต้นสูง แม้ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงถึง 150°C ถึงแม้ว่าจะมีความสอดคล้องระหว่างระยะเวลาพักที่ได้จากการจำลองและการทดลอง แต่ยังคงต้องทำการทดสอบจริงในอนาคต เพื่อพิสูจน์แนวทางที่ได้นำเสนอไว้

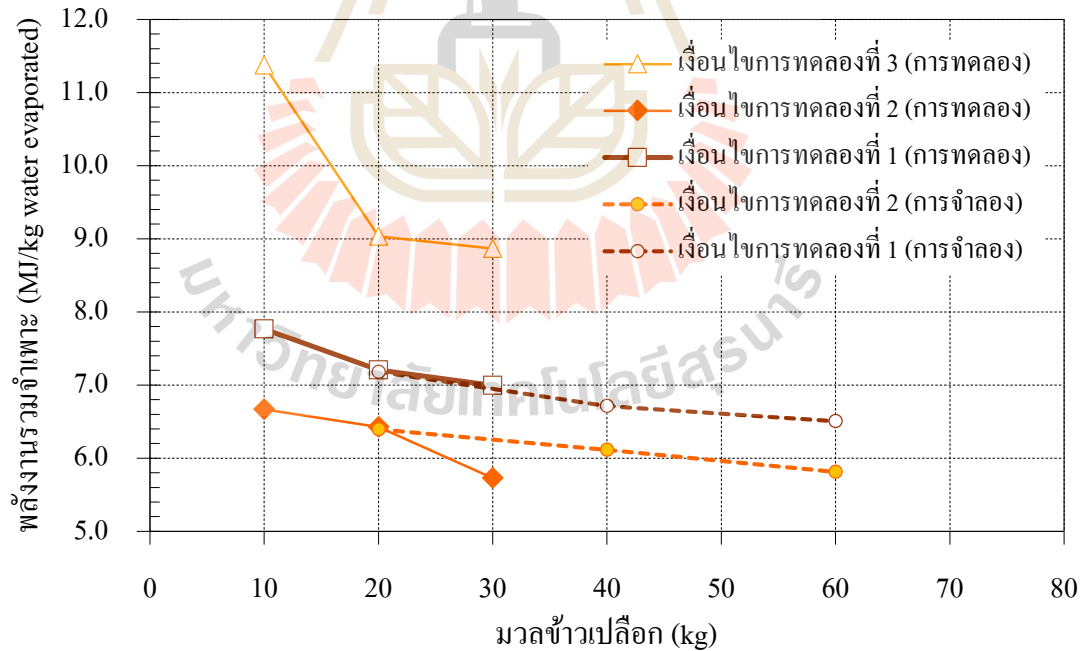


รูปที่ 8.24 ผลของระยะเวลาพักต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% w.b. จากการทดลอง และระยะเวลาพักที่เหมาะสมต่อการรักษาปริมาณข้าวต้นซึ่งได้จากแบบจำลอง

ผลจำลองการอบแห้ง ด้วยการเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นเป็น 60 kg นอกจากมีส่วนช่วยลดการแตกร้าวของข้าวในการอบแห้งได้ ยังได้เสนอแนวโน้มนำการเพิ่มอัตราอบแห้งเฉลี่ยและลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะเมื่อเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 8.25-8.26 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มนสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้นำเสนอใน บทที่ 6 หัวข้อ 6.2.3.2 และ 6.2.3.3 ในทางปฏิบัติผู้วิจัยเชื่อว่าการใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่มากเกินไป จะส่งผลเสียต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ยและพลังงานรวมจำเพาะได้ จึงยังคงต้องทดสอบหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ของแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง



รูปที่ 8.25 ผลของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ออัตราอบแห้งเฉลี่ยจากการทดลองและการจำลอง



รูปที่ 8.26 ผลของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่อพลังงานรวมจำเพาะจากการทดลองและการจำลอง

เมื่อเปรียบเทียบอัตราอบแห้งเฉลี่ยและพลังงานรวมจำเพาะระหว่างเงื่อนไขการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่าเงื่อนไขการทดลองที่ 1 สามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้มากกว่าประมาณ 10% ขณะที่เงื่อนไขการทดลองที่ 2 ใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำกว่าประมาณ 10% เนื่องจากเงื่อนไขการทดลองทั้ง 2 เงื่อนไข สามารถอบแห้งได้รวดเร็วและระยะเวลาอบแห้งที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก จึงเลือกเงื่อนไขการทดลองที่ 2 เป็นเงื่อนไขอบแห้งที่แนะนำ โดยสรุปตามขอบเขตที่ศึกษา พบว่าเงื่อนไขอบแห้งที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง เมื่อใช้อบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b. จนได้ความชื้นสุดท้ายที่ 14% w.b. คือ ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศที่อลมเข้า 20 m/s ระยะยกที่อลมเป่า 6 cm มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 60 kg และจำนวนตะแกรงหน่วงข้าว 11 ชั้น ซึ่งให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยที่ 0.0459 kg water evaporated/min. โดยใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ 3.68 MJ/kg water evaporated และพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ 2.13 MJ/kg water evaporated ซึ่งน่าเชื่อว่าจะได้ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ 100%



บทที่ 9

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล จึงสรุปผลและเสนอแนะได้ดังนี้ :

9.1 สรุปผลการวิจัย

1. เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100-120°C จะมีลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกที่รวดเร็วและค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการอบแห้งที่ศึกษา (23-14% w.b.) โดยไม่มีช่วงอบแห้งแบบถดถอย เนื่องจากขณะที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่ในถังพัก (ส่วนคาน์คัมเมอร์) ความชื้นภายในข้าวเปลือกจะแพร่กระจายมาสู่ที่ผิวเมล็ด ทำให้ความชื้นที่ผิวเมล็ดค่อนข้างสม่ำเสมอในทุกรอบหลังการพัก จึงทำให้ขณะอบแห้งสามารถดึงปริมาณน้ำได้จำนวนมาก และค่อนข้างคงที่ในทุกรอบของการอบแห้ง ขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C จะปรากฏช่วงอบแห้งแบบถดถอยในช่วงกลางและท้ายของการอบแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราหมุนเวียนข้าวในเครื่องอบแห้งต่ำ

2. อุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งที่สูงสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งได้อย่างเด่นชัด โดยเฉพาะอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่ออัตราอบแห้ง ในขณะที่ความเร็วมีผลต่ออัตราอบแห้งมากขึ้นเมื่ออากาศอบแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่เนื่องจากระดับความเร็วอากาศที่ใช้ค่อนข้างสูง (เพื่อรักษาเสถียรภาพการไหลข้าวเปลือก) เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งจึงสามารถเพิ่มอัตราอบแห้งได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น

3. อัตราการไหลข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของเมล็ดในท่อลมเป่าและท่อครอบเพิ่มสูงขึ้น จึงช่วยคงสภาพอากาศอบแห้งที่คงเหลือได้มากขึ้น และทำให้ข้าวเปลือกมีความดีในการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นในท่อลมเป่าและท่อครอบมากขึ้น ข้าวเปลือกจึงมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะเคลื่อนที่ในถังพัก จึงมีอัตราการแพร่ความชื้นจากภายในสู่ผิวรวดเร็วยิ่งขึ้น อัตราอบแห้งจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน

4. ปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่มากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาพักตัวนานยิ่งขึ้น ข้าวเปลือกจึงมีระยะเวลาในการแพร่กระจายความชื้นจากภายในสู่ผิวเมล็ดมากขึ้น ความชันความชื้นภายในเมล็ดจึงลดลงมากขึ้น ทำให้ในท่อลมเป่าและท่อครอบสามารถระเหยความชื้นที่บริเวณผิวข้าวเปลือกได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เพิ่มอัตราอบแห้งได้ การเพิ่มมวลข้าวเปลือกยังทำให้อุณหภูมิเมล็ด

เพิ่มขึ้นช้าลง ทำให้อัตราการแพร่ความชื้นภายในเมล็ดต่ำลง ซึ่งน่าจะส่งผลให้อัตราอบแห้งลดลงได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงควรทดสอบหาปริมาณมวลข้าวเปลือกที่เหมาะสมกับแต่ละชุดเงื่อนไขการอบแห้ง

5. การเพิ่มจำนวนชั้นตะแกรงหว่งข้าวในท่อครอบ ทำให้ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกหล่นลงถึงพักนานมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มระยะเวลาอบแห้งในท่อครอบ อีกทั้งความหนาแน่นของข้าวเปลือกสูงขึ้นในขณะที่ความพรุนลดลง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวลสูงขึ้น จึงเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลความชื้นระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งมากขึ้น ทำให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยและอุณหภูมิข้าวเปลือกมีค่าสูงขึ้น

6. ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 ที่ใช้ในงานวิจัยมีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าข้าวเปลือกพันธุ์กข105 ส่งผลให้ระดับความชื้นที่ผิวข้าวเปลือกมีค่าสูงกว่า จึงสามารถระเหยได้ง่ายและรวดเร็วกว่า ทำให้เมื่อใช้เงื่อนไขอบแห้งเดียวกันจึงมีอัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงกว่าพันธุ์กข105 เล็กน้อย แต่โดยภาพรวมแล้วข้าวเปลือกทั้งสองพันธุ์มีอัตราอบแห้งใกล้เคียงกัน

7. อัตราอบแห้งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.0126-0.0472 kg water evaporated/min โดยชุดเงื่อนไขการทดลองที่มีอัตราอบแห้งเฉลี่ยสูงสุดคือ ใช้ $T_a = 120^{\circ}\text{C}$ $V_a = 23$ m/s ระยะยกท่อลมเป่า 6 cm จำนวนชั้นตะแกรงหว่งข้าว 11 ชั้น และมวลข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 จำนวน 30 kg

8. TSEC มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้ง อัตราการไหลข้าวเปลือก มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น และจำนวนชั้นตะแกรงหว่งข้าว มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ความเร็วอากาศส่งผลตรงข้าม โดยเฉพาะเมื่ออัตราการไหลข้าวเปลือกต่ำ ในงานวิจัยนี้ TSEC อยู่ในช่วง 5.73-13.88 MJ/kg water evaporated โดยชุดเงื่อนไขการทดลองที่มี TSEC ต่ำสุดคือ $T_a = 120^{\circ}\text{C}$ $V_a = 20$ m/s ระยะยกท่อลมเป่า 6 cm จำนวนชั้นตะแกรงหว่งข้าว 11 ชั้น และมวลข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 จำนวน 30 kg

9. ปริมาณข้าวต้นมีค่าลดลงเมื่ออัตราอบแห้งเพิ่มขึ้น ยกเว้นในกรณีการเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นซึ่งทำให้อัตราอบแห้งสูงขึ้นและได้ปริมาณข้าวต้นมากขึ้นด้วย ปริมาณข้าวต้นที่ความชื้นประมาณ 14% w.b. มีค่าอยู่ในช่วง 6.73-40.06% ขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อมได้ 44.31% เงื่อนไขที่ได้ปริมาณข้าวต้นสูงสุดคือ $T_a = 80^{\circ}\text{C}$ $V_a = 17$ m/s ระยะยกท่อลมเป่า 4 cm จำนวนชั้นตะแกรงหว่งข้าว 11 ชั้น และมวลข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 จำนวน 20 kg ปริมาณข้าวต้นมีการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการอบแห้ง ในกรณีข้าวพันธุ์ชัยนาท1 ในช่วงแรกที่ข้าวเปลือกมีความชื้นสูงปริมาณข้าวต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งภายในข้าวเปลือกบางส่วนเปลี่ยนเป็นเจล (partial gelatinization) ซึ่งเจลที่เกิดขึ้นจะช่วยประสานรอยร้าวที่เกิดขึ้นก่อนและระหว่างการอบแห้งได้ แต่เมื่อความชื้นข้าวเปลือกลดลงถึงช่วงกลางและท้ายของการอบแห้งปริมาณข้าวต้นมีแนวโน้มลดลง โดยอัตราการลดลงของปริมาณข้าวต้นแปรผันตรงกับอัตราอบแห้งที่เกิดขึ้น ยกเว้นในกรณีที่ใช้ $T_a = 80^{\circ}\text{C}$ $V_a = 17$ m/s ระยะยกท่อลมเป่า 4 cm จำนวนชั้นตะแกรงหว่งข้าว 11 ชั้น และมวล

ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1 จำนวน 20 หรือ 30 kg ไม่พบการลดลงของปริมาณข้าวต้นภายหลังการอบแห้ง และเป็นชุดเงื่อนไขการทดลองที่ได้ปริมาณข้าวต้นสูงสุด ในกรณีข้าวพันธุ์กข105 ไม่พบการเพิ่มขึ้นของปริมาณข้าวต้นระหว่างการอบแห้ง เพราะข้าวพันธุ์กข105 มีระดับอะไมโลสต่ำ และในกรณีศึกษาข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นต่ำ ซึ่งอาจไม่เหมาะสมต่อการเกิดเจล

10. ค่าดัชนีความขาวมีแนวโน้มลดลงและค่าดัชนีความเหลืองมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นและระยะเวลาอบแห้งนานมากขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (nonenzymic browning reaction) เช่นในกรณีการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความเร็วอากาศอบแห้ง อัตราการไหลข้าว หรือจำนวนชั้นตะแกรงหว่งข้าว และกรณีการลดมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ซึ่งส่งผลให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถสรุปได้ดังนี้

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถทำนายการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกได้ดี และสามารถทำนายอุณหภูมิอากาศและข้าวเปลือกได้ค่อนข้างดี ผลการจำลองแสดงให้เห็นการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วในส่วนสเปคต์และส่วนหล่นหว่ง ขณะที่ในส่วนดาวน์คัมเมอร์ความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกจะลดลงอย่างช้า ๆ การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกจึงมีลักษณะเป็นแบบขั๊ก ขณะที่อุณหภูมิข้าวเปลือกมีการกวัดแกว่งขึ้นลง

2. ผลการจำลองในส่วนดาวน์คัมเมอร์แสดงการลดลงของความชื้นด้วยความร้อนภายในตัวเองจึงทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิลดลงตลอดความสูงของชั้นเมล็ดที่เคลื่อนที่ลง (evaporative cooling) และแสดงให้เห็นลักษณะคล้ายสมดุลทางความร้อนระหว่างข้าวเปลือกและอากาศในถังพักตั้งแต่ระยะ 5 cm จากกันถึงพักถึงชั้นบนของกองข้าว นอกจากนี้ยังพบการกระจายความชื้นภายในข้าวเปลือกที่สม่ำเสมอมากขึ้นระหว่างที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่ในส่วนดาวน์คัมเมอร์

3. เมื่อจำลองการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ (120-180°C) ซึ่งสูงกว่าการทดลองที่ได้ นำเสนอก่อนหน้านี้ พบการลดลงของพลังงานปฏิกิริยาเฉพาะเพียงเล็กน้อย ขณะที่สามารถเพิ่มอัตราอบแห้งเฉลี่ยได้ดี จึงทำให้พลังงานรวมจำเพาะมีค่าลดลงได้ เนื่องจากการลดพลังงานทุติยภูมิจำเพาะเป็นหลัก โดย TSEC ต่ำสุดที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 5.23 MJ/kg water evaporated ด้วยชุดเงื่อนไขการจำลองที่ใช้ $T_a = 180^\circ\text{C}$ $V_a = 20$ m/s ระยะยกท่อลมเป่า 6 cm จำนวนชั้นตะแกรงหว่งข้าว 11 ชั้น และมวลข้าวเปลือกจำนวน 20 kg ซึ่งให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 0.0696 kg water evaporated/min

4. เมื่อจำลองผลการอบแห้งโดยเปลี่ยนระยะความยาวท่อลมเป่า (1-8 m) พบว่าเมื่อใช้ท่อลมเป่าความยาว 1-2 m จะพบลักษณะการลดลงของความชื้นเป็น 2 ช่วงคือ 1.ช่วงอัตราอบแห้งต่ำ และ 2.ช่วงอัตราอบแห้งสูง เหตุที่เกิดช่วงอัตราอบแห้งต่ำ เนื่องจากเมื่อท่อลมเป่ามีความยาวลดลงในรอบแรก ๆ ของการอบแห้งข้าวเปลือกจะมีระยะเวลาสัมผัสอากาศร้อนในส่วนสเปคต์และหล่นอิสระ

สั้น จึงทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงไม่เพียงพอต่อการอบแห้งในส่วนดาวน์คัมเมอร์ เพราะการลดความชื้นในส่วนดาวน์คัมเมอร์โดยส่วนใหญ่ใช้การระเหยความชื้นจากผิวเมล็ดด้วยความร้อนภายในข้าวเปลือก และพบว่าในส่วนที่สามารถลดความชื้นได้มากที่สุดคือส่วนดาวน์คัมเมอร์ รองมาคือส่วนสเปคต์ และส่วนท่อครอบลดได้น้อยที่สุด นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มความยาวท่อลมเป่าทำให้สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกในแต่ละรอบได้มากขึ้น โดยพบว่าเมื่อใช้ความยาวท่อลมเป่า 8 m พลังงานป้อนรวมมีค่าเท่ากับ 3.82 MJ/kg water evaporated และให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 0.32 %d.b./min

การวิเคราะห์เงื่อนไขป้องกันการแตกร้าวในข้าวเปลือก เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง ที่ได้กล่าวในบทที่ 8 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการจำลองการอบแห้งและการวิเคราะห์การแตกร้าวของข้าวเปลือกแสดงให้เห็นว่า เงื่อนไขที่ต้องพิจารณาเพื่อลดการแตกร้าวของข้าวเปลือกเนื่องจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง คือดังนี้

- 1.1 ความชันความชื้นภายในข้าวเปลือกก่อนเข้าสู่ท่อลมเป่าควรมีค่าต่ำกว่า 3 %w.b./mm
- 1.2 ค่าสัดส่วนปริมาตรสถานะคล้ายยางขณะอบแห้ง ควรมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัดส่วนปริมาตรสถานะคล้ายยางขณะลดอุณหภูมิเมล็ดภายหลังการอบแห้ง
- 1.3 ควรเก็บข้าวเปลือกออกจากเครื่องอบแห้ง ณ ตำแหน่งทางออกส่วนดาวน์คัมเมอร์

2. พบว่าในกรณีศึกษาการเพิ่มปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นเป็น 60 kg ทำให้การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง มีผลการจำลองที่สอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น ซึ่งน่าจะเชื่อว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งจะมีคุณภาพการขัดสีสูง โดยยังคงสามารถใช้เงื่อนไขการอบแห้งที่รวดเร็วและประหยัดพลังงานได้

3. โดยสรุปตามขอบเขตที่ศึกษา พบว่าเงื่อนไขอบแห้งที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วง เมื่อใช้อบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b. จนได้ความชื้นสุดท้ายที่ 14% w.b. คือ $T_a = 120^{\circ}\text{C}$ $V_a = 23$ m/s ระยะยกท่อลมเป่า 6 cm มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 60 kg และจำนวนตะแกรงหน่วงข้าว 11 ชั้น ซึ่งให้อัตราอบแห้งเฉลี่ยที่ 0.0459 kg water evaporated/min โดยใช้พลังงานป้อนรวมมีค่าเท่ากับ 3.68 MJ/kg water evaporated และพลังงานสูญเสียรวมมีค่าเท่ากับ 2.13 MJ/kg water evaporated ซึ่งเชื่อว่าจะได้ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์สูง

9.2 สรุปปัญหาจากการทดลอง

เนื่องจากระยะเวลาทำงานวิจัยที่จำกัด จึงมิได้ทำการทดลองซ้ำเพื่อหาอัตราผิดพลาด (error bar) และช่วงการทดลองใช้ระยะเวลาสั้น จึงเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมของแต่ละการทดลองอบแห้ง ซึ่งมีผลต่อการอบแห้งในระดับหนึ่ง นอกจากนี้การจัดเก็บข้าวเปลือกสดเป็นระยะเวลาสั้นยังส่งผลต่อคุณภาพของข้าว ผลการทดลองที่ได้จึงอาจมีความแปรปรวนอยู่บ้าง

9.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมในขอบเขตที่ได้ศึกษา แต่จากแนวโน้มที่ได้จากการทดลองและผลการจำลอง แสดงให้เห็นช่วงการทำงานที่สามารถลดการใช้พลังงานได้มากขึ้นและอบแห้งได้รวดเร็วกว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งหรือความยาวท่อลมเป่า อีกทั้งเงื่อนไขป้องกันการแตกร้าวที่ได้นำเสนอในบทที่ 8 ยังคงเป็นเพียงแนวทางที่ยังคงต้องการการทดสอบความถูกต้องในการทดลองอบแห้งต่อไป จึงควรจะมีการทำวิจัยต่อในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

1. การทดลองอบแห้งโดยเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งและหรือความยาวท่อลมเป่า
2. การทดลองอบแห้งโดยใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นมากขึ้น
3. หาจุดปฏิบัติการที่ดีที่สุดในการอบแห้งที่กว้างขึ้น
4. สร้างและทดสอบในขนาดที่เหมาะสมต่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

รายการอ้างอิง

- กรมทรัพย์สินทางปัญญา, สิทธิบัตรการประดิษฐ์ชื่อ “เครื่องอบแห้งแบบการไหลสวนทางในแนวดิ่ง”, เลขที่สิทธิบัตร 22985, ออกเมื่อ 27 ธันวาคม 2550
- กัญญา เชื้อพันธุ์. (2547). คุณภาพข้าวทางกายภาพ. ใน นงมจีน คงเสรี (บรรณาธิการ). **คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย**. (หน้า 31-40). กรุงเทพฯ: บริษัทจิรวัดน์เอ็กซ์เพรส จำกัด.
- กิตติยา กิจควรดี. (2547). การเก็บเกี่ยวและปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ได้ข้าวคุณภาพดี. ใน นงมจีน คงเสรี (บรรณาธิการ). **คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย**. (หน้า 1-16). กรุงเทพฯ: บริษัทจิรวัดน์เอ็กซ์เพรส จำกัด.
- เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวีช จิตรสมบุญ. (2551). ผลของความเร็วอากาศต่ออัตราอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22**. 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- ขุนพล สังข์อริยกุล. (2544). **การประเมินสถานภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จินดา พานิชองอร. (2541). **การอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดสองมิติ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ใจทิพย์ วานิชชัง ผดุงศักดิ์ วานิชชัง และเพ็ญขวัญ วานิชชัง. (2556). ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับการขัดสีต่อคุณภาพการสีของข้าว. **วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ**. หน้า 392-398.
- ชอบ ลายทอง. (2530). **การศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ความร้อนของข้าวเปลือก**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์. (2546). การอบแห้งเมล็ดพืชที่อุณหภูมิสูงโดยเทคนิค สเปาเต็ดเบดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเข้าดาวนั้กัมเมอร์ได้. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17**. 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี.

- ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสโรภา แจ่มการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ: รวดเร็วและประหยัดพลังงาน. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2. 27-29 กรกฎาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา.
- ทวิช จิตรสมบูรณ์, โสโรภา แจ่มการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). ผลกระทบของลมหมุนวนต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา.
- ไมตรี แนวพนิช. (ม.ป.ป.). **หลักการลดความชื้นเมล็ดพืช**. กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. (2546) การศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวพันธุ์ต่างๆ ในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 160 หน้า.
- ศูนย์ข้อมูลการเกษตร. (2550). **สารสนเทศจากสมุดข้าวไทย**. สุพรรณบุรี: ศูนย์ข้อมูลการเกษตร ฝ่ายแผนงานพัฒนาการเกษตร สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดสุพรรณบุรี
- สมชาติ โสภณธฤทธิ. (2540). **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุชาติ ชนสุขประเสริฐ, ธนิต สวัสดิ์เสวี, ลักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา และ สมชาติ โสภณธฤทธิ. (2554). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน, การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 8 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม. หน้า 889-897.
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552ก). ผลของระยะพัก อุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5. 29 เมษายน-1 พฤษภาคม 2552. มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552ข). เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ : เงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมต่อคุณภาพข้าวเปลือก. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. 4-7 พฤศจิกายน 2552. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). **ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- อารีย์ ทิมนิกุล และ นิทัศน์ ตั้งพินิจกุล. (2547). ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจสอบความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องวัดความชื้น [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://210.246.186.28/AedWeb/48-7-ricemoisture.pdf>
- AACC (1995). Approved method of the American association of cereal chemists (9thed.). MN: **American Association of Cereal Chemists St. Paul.**
- Aquerreta, J., Iguaz, A., Arroqui, C. and Virseda, P. (2007). Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality. **Journal of Food Engineering**. 80:611-618.
- Bala, B. K. (1997). **Drying and Storage of Cereal Grains**. Science Publishers, Inc., U.S.A., 302 pages.
- Banaszek, M. M. and Siebenmorgen, T. J. (1990). Head Rice Yield Reduction Rates Caused by Moisture Adsorption. **American Society of Agricultural Engineers**. Vol. 33(4)
- Bie, W. B., Szrednicki, G. and Driscoll, R. H. (2007). Study of Temperature and Moisture Distribution in Paddy in a Triangular Spouted Bed Dryer. **Drying Technology**, 25: 177-183.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C. W. (1992). **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. An AVI Book, U.S.A., 450 pages.
- Chua, K. J., Mujumdar, A. S. and Chou, S. K. (2003). Intermittent Drying of Bioproducts - an Overview, **Bioresource Technology**, Vol. 90, pp. 285-295.
- Cnossen, A.G. and Siebenmorgen, T. J (2000). The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect on milling quality, **Transactions of the American Society of Agricultural Engineering**, vol. 43(6), pp. 1661-1667.
- Cnossen, A.G., Siebenmorgen, T. J. and Yang, W. (2002). The glass transition temperature concept in drying and tempering : effect of drying rate. **American Society of Agricultural Engineering (ASAE)**. 45(3):759-766.
- Cnossen, A. G., Jimenez, M. J. and Siebenmorgen, T. J. (2003). Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. **Journal of Food Engineering**. 59:61-69.
- Cowie, J.M.G. (1991). **Polymers : Chemistry & Physics of Modern Materials**, 2nd. edition, Blackie Academic & Professional.
- Dong, R., Lu, Z., Liu, Z., Nishiyama, Y. and Cao, W. (2009). Moisture distribution in a rice kernel during tempering drying. **Journal of Food Engineering**. 91:126-132.

- Dong, R., Lu, Z., Liu, Z., Koide, S. and Cao, W. (2010). Effect of drying and tempering on rice fissuring analysed by integrating intra-kernel moisture distribution, **Journal of Food Engineering**, vol. 97, pp. 161-167.
- Evin, D., Gul, H. and Tanyildizi, V. (2008). Grain drying in paraboloid-based spouted bed with and without draft tube. **Drying Technology**. 26:1577-1583.
- Ghamari, S., Borghei, A. M., Rabbani, H., Khazaei, J. and Basati, F. (2010). Modeling the Terminal Velocity of Agricultural Seeds with Artificial Neural Networks. **African Journal of Agricultural Research**, Vol. 5(5), pp. 389-398.
- Go, A., Das, S. K., Srzednicki, G. and Driscoll, R. H. (2007). Modeling of moisture and temperature changes of wheat during drying in a triangular spouted bed dryer. **Drying Technology**. 25:575-580.
- Haider, A. and Levenspiel, O. (1989). Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles, **Powder Technology**, vol. 58, pp. 63-70.
- Hajidavalloo, E. and Humdullahpur, F. (2000). Thermal analysis of a fluidized bed drying process for crops. Part II: Experimental results and model verification, **International Journal of Energy Research**, Vol. 24, pp. 809-820.
- Iguaz, A., Rodriguez, M. and Virseda, P. (2006). Influence of handling and processing of rough rice on fissures and head rice yields. **Journal of Food Engineering**. 77:803-809.
- Jittanit, W., Saeteaw, N. and Charoenchaisri, A. (2010). Industrial paddy drying and energy saving options. **Journal of Stored Products Research**. 46:209-213.
- Kunze, O. R. and Choudhury, M.S.U. (1972). Moisture adsorption related to the tensile strength of rice, **Cereal Chemistry**, vol. 49(6), pp. 684-696.
- Kunze, O. R., Lan, Y. and Wratten, F.T. (1985). Physical and mechanical properties of rice. In: **Rice: Chemistry and Technology**, Juliano, B.O. (Ed.) American Association of Cereal Chemists Inc. St Paul MN, USA.
- Li, Y. B., Cao, C. W., Yu, Q. L. and Zhong, Q. X. (1999). Study on rough rice fissuring during intermittent drying. **Drying Technology**. 17(9):1779-1793.
- Madamba, P. S. and Yabes, R. P. (2004). Determination of the optimum intermittent drying conditions for rough rice (*Oryza sativa*, L.). **Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie**. 38:157-165.

- Madhiyanon, T., Soponronnarit, S. and Tia, W. (2001a). Industrial-scale Prototype of Continuous Spouted Bed Paddy Dryer. **Drying Technology**, 19(1), 207-216
- Madhiyanon, T., Soponronnarit, S. and Tia, W. (2001b). A Two-region Mathematical Model for Batch Drying of Grains in a Two-dimensional Spouted Bed. **Drying Technology**, 19(6), 1045-1064.
- Madhiyanon, T., Soponronnarit, S. and Tia, W. (2002). A Mathematical Model for Continuous Drying of Grains in a Spouted Bed Dryer, **Drying Technology**, vol. 20(3), pp. 587-614.
- Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. (2005). High temperature spouted bed paddy drying with varied downcomer air flows and moisture contents: effects on drying kinetics, critical moisture content, and milling quality, **Drying Technology**, vol. 23, pp. 473-495.
- Markowski, M., Bialobrzewski, I. and Modrzewska, A. (2010). Kinetics of spouted-bed drying of barley: diffusivities for sphere and ellipsoid. **Journal of Food Engineering**. 96:380-387.
- Mathur, K. B. and Epstein, N. (1974). **Spouted Bed**. Academic Press, New York.
- Mujumdar, A. S. and Suvachittanont, S. (2000). **Developments in Drying Volume II : Drying of Food and Agro-Products**. Kasetsart University Press, Bangkok, Thailand, 242 pages
- Ng, P. P., Law, C. L. and Tasirin, S. M. (2006). Drying kinetics of malaysian paddy (group D particles) in spouted bed dryer. **International Journal of Food Engineering**. Vol. 2(3):1-12.
- Nguyen, L. H., Driscoll, R. H. and Srzednicki, G. S. (1998). Flowing performance and drying characteristics of paddy in a triangular spoutedbed. Presented at **7th International Working Conference on Stored-Product Protection**, Beijing, China. October 14-20.
- Nguyen, L.H., Driscoll, R. H. and Srzednicki, G. S. (2001). Drying of High Moisture Content Paddy in A Pilot Scale Triangular Spouted Bed **Dryer**. **Drying Technology**, 19(2), 375-387.
- Nimmol, C. and Devahastin, S. (2010). Evaluation of Performance and Energy Consumption of an Impinging Stream Dryer for Paddy. **Applied Thermal Engineering**, 30: 2204-2212.
- Nishiyama, Y., Cao, W. and Li, B. (2006). Grain intermittent drying characteristic analyzed by a simplified model. **Journal of Food Engineering**. 76:272-279.

- Ondier, G. O., Siebenmorgen, T. J. and Moustakos, A. M. (2012). Drying characteristics and milling quality of rough rice dried in a single pass incorporating glass transition principles, **Drying Technology**, vol. 30, pp. 1821-1830.
- Perdon, A. A., Siebenmorgen, T. J., and Mauromoustakos, A. (2000). Glassy state transition and rice drying: Development of a brown rice state diagram. **Cereal Chemistry**. 77:708-713.
- Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Terdyothin, A. (2002). Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidization technique. **Drying Technology**. 20(1):195-210.
- Poomsa-ad, N., Terdyothin, A., Soponronnarit, S., and Prachayawarakorn, S. (2005). Investigations on head-rice yield and operating time in the fluidised-bed drying process : experiment and simulation. **Journal of Stored Products Research**. 41:387-400.
- Prachayawarakorn, S., Poomsa-ad, N. and Soponronnarit, S. (2005a). 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. (2005b). Comparison of performances of pulsed and conventional fluidised-bed dryers. **Journal of Stored Products Research**. 41:479-497.
- Rajabipour, A., Tabatabaefar, A. and Farahani. (2004). Moisture-dependent Terminal Velocity of Wheat and Rice Varieties. **ASAE Annual Meeting**. (doi: 10.13031/2013.16919) @2004.
- Rordprapat, W., Nathakaranakule, A., Tia, W. and Soponronnarit, S. (2005). Comparative Study of Fluidized Bed Paddy Drying Using Hot Air and Superheated Steam. **Journal of Food Engineering**. 71(2005) 28-36.
- Schluterman, D. A. and Siebenmorgen, T. J. (2007). Relating rough rice moisture content reduction and tempering duration to head rice yield reduction, **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineering**, vol. 50(1), pp. 137-142.
- Shei, H. J. and Chen, Y. L. (2002). Computer simulation on intermittent drying of rough rice. **Drying Technology**. 20(3):615-636.
- Shei, H. J. and Chen, Y. L. (1998). Intermittent drying of rough rice. **Drying Technology**. 16(3-5):839-851.

- Siebenmorgen, T. J., Yang, W., and Sun, Z. (2004). Glass transition temperature of rice kernels determined by dynamic mechanical thermal analysis, **Transactions of the American Society of Agricultural Engineering**, vol. 47(3), pp. 835-839.
- Soponronnarit, S. (1988). Energy Model of Grain Drying System. **ASEAN Journal on Science and Technology for Development**, 5(2), 43-68.
- Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Trutassanawin, S. and Jariyatontivait, W. (2001). Design, Testing, and Optimization of Vibro-Fluidized Bed Paddy Dryer. **Drying Technology**, 19(8), 1891-1908.
- Sun, Z., Yang, W., Stelwagen, A. M., Siebenmorgen, T.J. and Cnossen, A.G. (2002). Thermomechanical transitions of rice kernels. **Cereal Chemistry**. 79(3):349-353.
- Thakur, A. K. and Gupta, A. K. (2006). Two stage drying of high moisture paddy with intervening rest period. **Energy Conversion and Management**. 47:3069-3083.
- The FLUENT user's guide, Chapter 19: discrete phase models, Fluent Inc., December 3, 2001.
- Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul, P. and SoponRonnarit, S. (2004). Effect of Fluidized Bed Drying Temperature on Various Quality Attributes of Paddy. **Drying Technology : An International Journal**. 22:7, 1731-1754.
- Whitaker, S. (1972). Force convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres and for flow in packed beds and tube bundles, **AIChE**, vol. 18(2), pp. 361-371.
- Wimberly, J. E. (1983). Drying. Technical Handbook for the Paddy Rice Postharvest Industry in Developing Countries. **International Rice Research Institute**. Los Baos, Laguna, Phillipines. pp. 18-19.
- Yang, W., Jia, C.-C. and Howell, T.A. (2003c). Relationship of moisture content gradients and glass transition temperature to head rice yield during cross-flow drying. **Biosystems Engineering**. 86(2):199-206.
- Yang, W., Jia, C.-C., Siebenmorgen, T.J., Pan, Z. and A.G. Cnossen (2003b). Relationship of kernel moisture content gradients and glass transition temperature to head rice yield. **Biosystems Engineering**. 85(4):467-476.
- Yang, W., Jia, C.-C., Siebenmorgen, T. J., Howell T. A. and Cnossen, A. G. (2002). Intra-kernel moisture responses of rice to drying and tempering treatments by finite element

- simulation, **Transactions of the American Society of Agricultural Engineering**, vol. 45(4), pp. 1037-1044.
- Yang, W., Siebenmorgen, T. J., Thielen, T.P.H. and Cossen, A.G. (2003a). Effect of glass transition on thermal conductivity of rough rice. **Biosystems Engineering**. 84(2):193-200.
- Yang, W., Zhang, Q. and Jia, C.-C. (2005). Understanding rice breakage through internal work, fracture energy, and glass transition of individual kernels, **Transactions of the American Society of Agricultural Engineering**, vol. 48(3), pp. 1157-1164.
- Zhang, Q., Yang, W. and Jia, C. (2003). Preservation of head rice yield under high-temperature tempering as explained by the glass transition of rice kernels. **Cereal Chemistry**. 80(6):684-688.





ภาคผนวก ก

การพิสูจน์สมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก. เป็นการพิสูจน์สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณในวิทยานิพนธ์แสดงดังต่อไปนี้

ก.1 สมการคำนวณหาค่าอัตราอบแห้งเฉลี่ย

โดยนิยามอัตราอบแห้งเฉลี่ยคือ มวลความชื้นทั้งหมดที่ระเหยจากกองข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งต่อด้วยระยะเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในเครื่องอบแห้ง มวลความชื้นทั้งหมดที่ระเหยจากกองข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งสามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นกับมวลข้าวเปลือกสุดท้าย ซึ่งแสดงตามสมการดังนี้

$$\bar{m}_w = w_i - w_f \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ \bar{m}_w = มวลความชื้นทั้งหมดที่ระเหยจากกองข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง, kg
 w_i, w_f = มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นและสุดท้าย ตามลำดับ, kg

พิจารณาความชื้นข้าวเปลือกตามมาตรฐานเปียก (ทศนิยม)

$$M_i = \frac{(w_i - d)}{w_i} \quad (\text{ก.2})$$

$$M_f = \frac{(w_f - d)}{w_f} \quad (\text{ก.3})$$

$$M_i - M_f = \frac{(w_i - d)}{w_i} - \frac{(w_f - d)}{w_f} = \frac{d(w_i - w_f)}{w_i \cdot w_f} \quad (\text{ก.4})$$

$$\therefore w_i - w_f = \frac{(w_i \cdot w_f) \cdot (M_i - M_f)}{d} \quad (\text{ก.5})$$

$$M_f = \frac{(w_f - d)}{w_f} = 1 - \left(\frac{d}{w_f} \right) \quad (\text{ก.6})$$

$$\left(\frac{w_f}{d} \right) = \left(\frac{1}{1 - M_f} \right) \quad (\text{ก.7})$$

$$\therefore w_i - w_f = w_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \quad (\text{ก.8})$$

- เมื่อ M_i = ความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานเปียกก่อนเริ่มการอบแห้ง, decimal w.b.
 M_f = ความชื้นข้าวเปลือกมาตรฐานเปียกเมื่อเสร็จสิ้นการอบแห้ง, decimal w.b.
 d = มวลข้าวเปลือกแห้ง, kg

ดังนั้นอัตราการอบแห้งเฉลี่ย คือ

$$\overline{R}_w = \frac{w_i - w_f}{\Delta t_T} \quad (\text{ก.9})$$

$$\overline{R}_w = \left(\frac{w_i}{\Delta t_T} \right) \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \quad (\text{ก.10})$$

- เมื่อ \overline{R}_w = อัตราอบแห้งเฉลี่ย, kg water evaporated/min.
 Δt_T = ระยะเวลาอบแห้งรวม, min.

โดยพิจารณาความชื้นข้าวเปลือกตั้งแต่ความชื้นเริ่มต้น (ประมาณ 23%w.b.) ถึงความชื้นสุดท้าย (ประมาณ 14%w.b.)

ก.2 สมการคำนวณหาค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก

พิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้งกับปริมาณน้ำที่ระเหยจากข้าวเปลือกในการอบแห้ง

$$E_p = \frac{Q}{w_i - w_f} \quad (\text{ก.11})$$

$$Q = \dot{m}_a [(1 - W_a)C_a + C_v W_a] (T_{out} - T_{in}) \Delta t_T \quad (\text{ก.12})$$

$$\dot{m}_a = \rho_a A \bar{V} \quad (\text{ก.13})$$

$$E_p = \frac{\rho_a A \bar{V} [(1 - W_a)C_a + C_v W_a] (T_{out} - T_{in}) \Delta t_T}{w_i - w_f} \quad (\text{ก.14})$$

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

$$\begin{aligned}\Delta t_T &= \text{ระยะเวลาอบแห้งรวม, s} \\ w_i, w_f &= \text{มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นและสุดท้าย ตามลำดับ, kg}\end{aligned}$$

แทนค่า $w_i - w_f$ จากสมการ (ก.8) ลงในสมการคำนวณหาค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (ก.14) ที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกได้

$$E_p = \frac{\rho_a A \bar{V} [(1 - w_a) C_a + C_v w_a] (T_{out} - T_{in}) \Delta t_T}{\left(w_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right) \right)} \quad (\text{ก.15})$$

ก.3 สมการคำนวณหาค่าพลังงานทฤษฎีจำเพาะและพลังงานรวมจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งพลังงานทฤษฎีจำเพาะที่พิจารณาคือพลังงานขับเคลื่อนเครื่องเป่าลมโดยพิจารณาในรูปของพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ขณะทำการอบแห้ง โดยที่พลังงานขับเคลื่อนเครื่องเป่าลมหาได้จาก

$$E_s = \left(\frac{\sqrt{3} \cdot V_B \cdot I_B \cdot P_f}{w_i - w_f} \right) \cdot \Delta t_T \quad (\text{ก.16})$$

เมื่อ E_s = พลังงานทฤษฎีจำเพาะที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องเป่าลม, MJ/kg น้ำที่ระเหย
 V_B = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมขณะอบแห้ง, volt
 I_B = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมขณะอบแห้ง, amp
 P_f = ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor), -
 Δt_T = ระยะเวลาอบแห้งรวม, s

โดยที่ $(w_i - w_f)$ มีค่าเช่นเดียวกับกรณีพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ ดังนั้นพลังงานทฤษฎีจำเพาะ, E_s มีค่าเท่ากับ

$$E_s = \frac{\sqrt{3} \cdot V_B \cdot I_B \cdot P_f}{w_i \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right)} \cdot \Delta t_T \quad (\text{ก.17})$$

พลังงานรวมจำเพาะมีค่าเท่ากับผลรวมพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะกับทุกขบวนการต่อไปนี้

$$E_T = E_P + E_S \quad (ก.18)$$

$$E_T = \left[\rho_a A \bar{V} \cdot ((1 - W_a) C_a + C_v W_a) \cdot (T_{out} - T_{in}) + (\sqrt{3} \cdot V_B \cdot I_B \cdot P_f) \right] \cdot \frac{\Delta t_T}{w_i \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{1 - M_f} \right)} \quad (ก.19)$$

ก.4 สมการคำนวณหาร้อยละข้าวต้นและค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร

ในการศึกษานี้พิจารณาปริมาณข้าวต้นในรูปร้อยละข้าวต้น (head rice yield, HRY) ซึ่งคำนวณได้ ตามสมการดังนี้

$$\text{HRY} = (\text{น้ำหนักข้าวต้น} / \text{น้ำหนักข้าวเปลือก}) \cdot 100\% \quad (ก.20)$$

เพื่อสามารถเปรียบเทียบปริมาณข้าวต้นของแต่ละการทดลองได้ชัดเจน จึงนำเสนอปริมาณข้าวต้นในรูปร้อยละข้าวต้นสัมพัทธ์ (relative head rice yield, RHRy) ซึ่งคือสัดส่วนของร้อยละข้าวต้นขณะอบแห้งเทียบกับร้อยละข้าวต้นก่อนอบแห้ง ตามสมการดังนี้

$$\text{RHRy} = (\text{HRY ขณะอบแห้ง} / \text{HRY ก่อนอบแห้ง}) \cdot 100\% \quad (ก.21)$$

ในการวิเคราะห์ค่าความขาวของข้าวสารที่ขัดสีได้ เนื่องจากผลจากเครื่องมือทดสอบสีให้ค่าตามมาตรฐานสี $L^*a^*b^*$ โดยค่า L^* แทนสว่าง-มืด, a^* แทนแดง-เขียว, b^* แทนเหลือง-น้ำเงิน และคำนวณค่าดัชนีความขาว (whiteness index, WI), และดัชนีความเหลือง (yellowness index, YI), ตามมาตรฐาน ASTM E313-96 โดยคำนวณได้จากสมการดังนี้

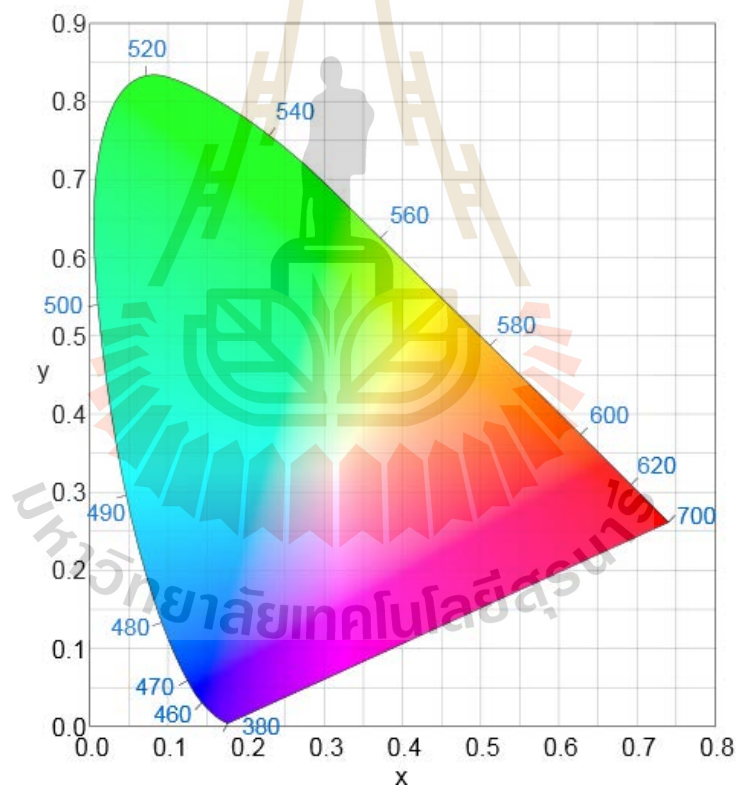
$$WI = Y + 800(x_n - x) + 1700(y_n - y) \quad (ก.22)$$

เมื่อ Y = ระดับความสว่าง (luminance factor)
 x, y = ระยะพิกัดสารสีของตัวอย่าง (chromaticity coordinates of the specimen)
 โดยแผนภาพสารสีตามความยาวคลื่นแสงแสดงในรูปที่ ก.1

$x_n, y_n =$ ระยะพิกัดสารสีตามมาตรฐาน CIE ของชนิดแหล่งกำเนิดแสง (งานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 และมุมผู้สังเกต 10° ซึ่งค่า $x_n = 0.3138$ และ $y_n = 0.3310$)

$$YI = 100 \frac{(C_x \cdot X - C_z \cdot Z)}{Y} \quad (\text{ก.23})$$

เมื่อ $X, Y, Z =$ tri-stimulus value
 $C_x, C_y =$ ค่าคงที่ (งานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 และมุมผู้สังเกต 10° ซึ่งค่า $C_x = 1.3013$ และ $C_y = 1.1498$)



รูปที่ ก.1 แผนภาพสารสีตามความยาวคลื่นแสงระดับนาโนเมตรของ CIE 1931

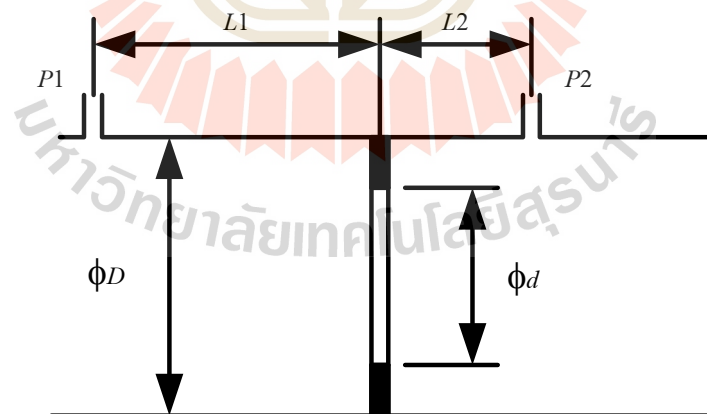


ภาคผนวก ข แสดงข้อมูลเกี่ยวกับ Orifice plate, เครื่องเป่าลม (blower), เครื่องทำความร้อน (heater), อัตราการไหลชั่วเปิด, ความเร็วอากาศในท่อลมเป่า, สัดส่วนช่องว่างในท่อครอบ, การใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลม

ข.1 Orifice plate

งานวิจัยนี้วัดความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ผ่านเข้าสู่เครื่องอบแห้งด้วยแผ่นออริฟิส ที่เกรียงไกร (2551) ออกแบบและสร้างตามมาตรฐาน ISO 5167 มีลักษณะเป็นแบบ concentric orifice plate (square edge) จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างแบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps) แสดงดังรูป ข.1 มีรายละเอียดของขนาดชุดออริฟิส เพื่อใช้ในการคำนวณความเร็วดังนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	D	=	44	mm
เส้นผ่านศูนย์กลาง orifice plate	d	=	20	mm
อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ($0.2 \leq \beta \leq 0.75$)	$\beta = (d/D)$	=	0.4545	
กรณี $\beta < 0.6$ จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างมีค่าเป็น				
ระยะด้านเหนือหน้า $D \pm 0.1D$ ในงานวิจัยเลือกใช้ระยะ		=	44	mm
ระยะด้านปลายหน้า $0.5D \pm 0.02D$ ในงานวิจัยเลือกใช้ระยะ		=	22	mm



รูปที่ ข.1 แผนภาพแสดงลักษณะของท่อ orifice plate และจุดต่อสำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันแบบระยะ D และ $0.5D$ (vena contracta taps)

พิจารณาการไหลของของไหลระหว่างสองจุดใด ๆ โดยใช้สมการเบอร์นูลลี ภายใต้สมมติฐานคือ ไม่มีการส่งผ่านความร้อนทั้งโดยตรง และ โดยอ้อม และไม่มีการส่งผ่านงาน กำหนดให้ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งของท่อขนาดใหญ่ และตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง orifice plate ดังรูปที่ ข.1 สามารถเขียนสมการได้เป็น

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

จัดรูปสมการใหม่เป็น

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

จากสมการอนุรักษ์มวล

$$\rho_1 \bar{V}_1 = \rho_2 \bar{V}_2 \quad (\text{ข.3})$$

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

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

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

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

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

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

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

ดังนั้นสามารถหาค่าอัตราไหลปริมาตรที่ตำแหน่ง orifice plate ได้เป็น

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

สมการที่ได้มาเป็นอัตราไหลปริมาตรโดยทางทฤษฎี ซึ่งต้องมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงเนื่องจากไม่ได้คิดความฝืดที่ต้านทานการไหล ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) และสัมประสิทธิ์การขยายตัว (ε) เพื่อสามารถนำไปใช้ได้กับการวัดค่าจริง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

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

โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองได้ดังนี้
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (ε) พิจารณาได้จากสมการ

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

เมื่อ P_1 = ความดันสัมบูรณ์ที่ท่อก่อนถึง orifice plate, Pa
 ΔP = ผลต่างความดันตกคร่อมที่ orifice plate, Pa
 k = specific heat ratio = 1.4 (ที่อุณหภูมิอากาศ 60°C)

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (ε) ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (ข.11) มีค่าเท่ากับ 0.940088

สัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) หาได้จากสมการ Reader-Harris/Gallagher

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

เมื่อ $L_1 = 1$
 $L'_2 = 0.47$

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

โดยชุดออริฟิสมิค่าสัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (ข. 12) เท่ากับ 0.6087 การทดสอบเพื่อตรวจสอบค่า C_d ที่ได้จากการคำนวณ เกรียงไกร (2551) ทำการทดสอบโดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงานพบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยค่า C_d ที่ได้จากการทดสอบกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.6-0.7 ทดสอบในช่วงค่าเลขเรโนลด์ภายในท่อเท่ากับ 1800-20000

ข.2 เครื่องเป่าลม (blower) มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2.2 kW ควบคุมเครื่องเป่าลมให้สร้างอากาศอบแห้งที่มีความเร็วคงที่ด้วยการวัดความดันอากาศตกร้อม orifice plate โดยใช้ pressure transmitter และส่งสัญญาณจาก pressure transmitter ป้อนกลับไปยัง inverter แล้วเปรียบเทียบค่าสัญญาณป้อนกลับกับค่า set point ของ inverter เพื่อให้ inverter ปรับแรงดันและความถี่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องเป่าลมด้วยตัวควบคุมแบบ PID เพื่อให้ได้ความเร็วอากาศอบแห้งที่ต้องการ

ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า set point ของ inverter กับความดันตกร้อม orifice plate ที่ pressure transmitter วัดได้เพื่อนำไปคำนวณค่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเข้าถึงพัก โดยใช้สมการ (ข.10) และ (ข.5) พบว่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเข้ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ set point ของ inverter มีค่าเพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในตาราง ข.1 และรูปที่ ข.2 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการโพลิโนเมียลได้เป็น

$$\bar{V} = -2.52 \times 10^{-9} SP^6 + 6.29 \times 10^{-7} SP^5 + 6.24 \times 10^{-5} SP^4 + 3.15 \times 10^{-3} SP^3 \\ + 8.72 \times 10^{-2} SP^2 + 1.55 SP + 0.00129 \quad (\text{ข.13})$$

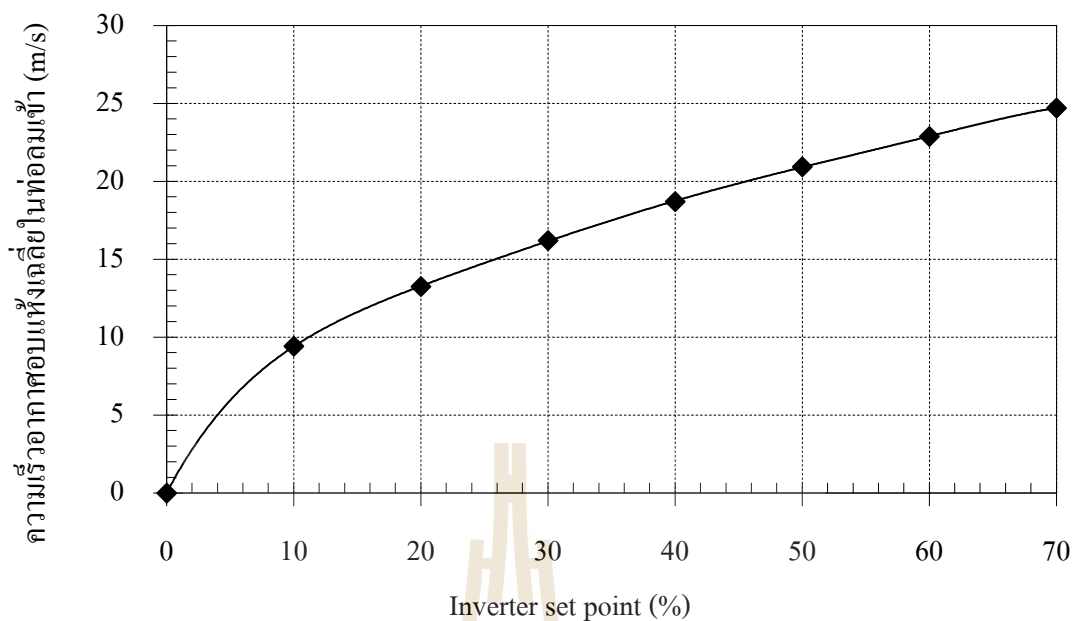
เมื่อ \bar{V} = ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเข้า, m/s
 SP = inverter set point, %

ข.3 เครื่องทำความร้อน (heater) มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 4.0 kW วัดค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งในท่อลมเข้าด้วย thermocouple type K ที่ตำแหน่งก่อนเข้าสู่ถังพัก 1.0 cm เป็นสัญญาณป้อนกลับให้ PID temperature controller เพื่อควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน

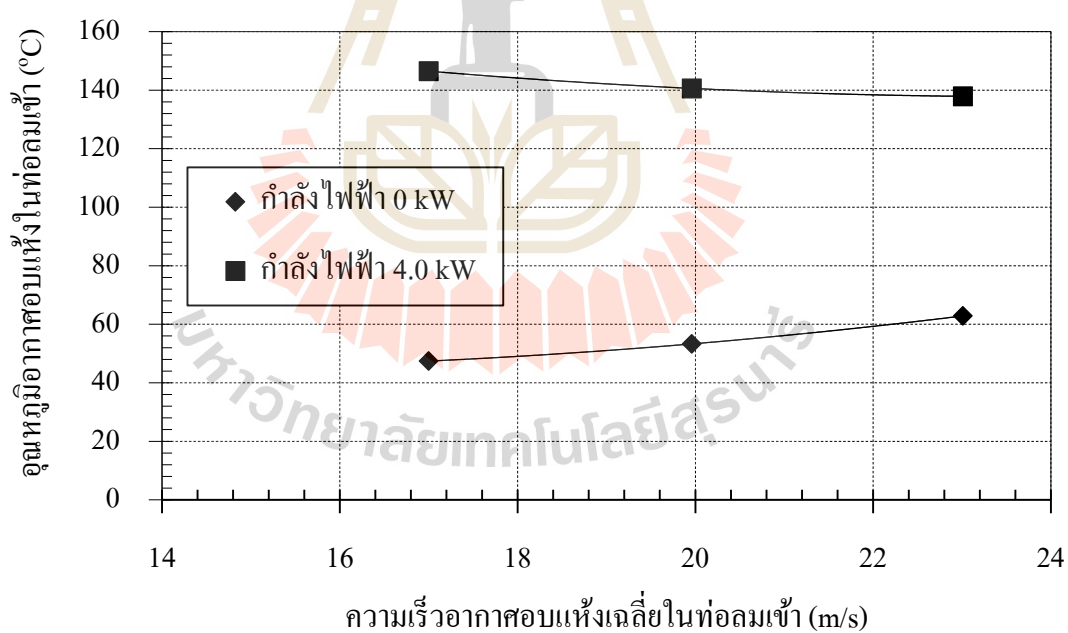
ตารางที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า inverter set point, ค่าความดันตกคร่อม orifice plate และค่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเข้า

Inverter set point (%)	ความดันตกคร่อม orifice plate (kPa)	ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเข้า (m/s)
0.0	0.00	0.00
10.0	3.00	9.41
20.0	5.95	13.25
30.0	8.90	16.21
40.0	11.85	18.70
50.0	14.85	20.93
60.0	17.75	22.89
70.0	20.70	24.71

ทดสอบค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงสุดที่เครื่องทำความร้อนสามารถทำได้ ที่ค่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเป่าค่าต่าง ๆ พบว่าเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเป่าอยู่ในช่วง 17.00-23.01 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงสุดที่สามารถทำได้อยู่ในช่วง 137.9-146.5°C โดยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมขณะทดสอบมีค่าประมาณ 29-32°C นอกจากนี้พบว่าเครื่องเป่าลมจะถ่ายเทความร้อนให้อากาศที่ไหลผ่าน ทำให้อากาศที่ไหลผ่านเครื่องเป่าลมมีอุณหภูมิสูงขึ้น และมีแนวโน้มสูงมากขึ้นเมื่อเครื่องเป่าลมต้องสร้างลมที่มีความเร็วสูงขึ้น ในช่วงความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยที่ทดสอบ พบว่าค่าต่ำสุดของอุณหภูมิอากาศอบแห้งในท่อลมเข้าอยู่ในช่วง 47.4-62.9°C แสดงในรูปที่ ข.3 จากการคำนวณพบว่าเครื่องเป่าลมจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศอบแห้งเท่ากับ 0.45, 0.76 และ 1.17 kW ที่ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเข้าเท่ากับ 17.00, 19.96 และ 23.01 m/s ตามลำดับ

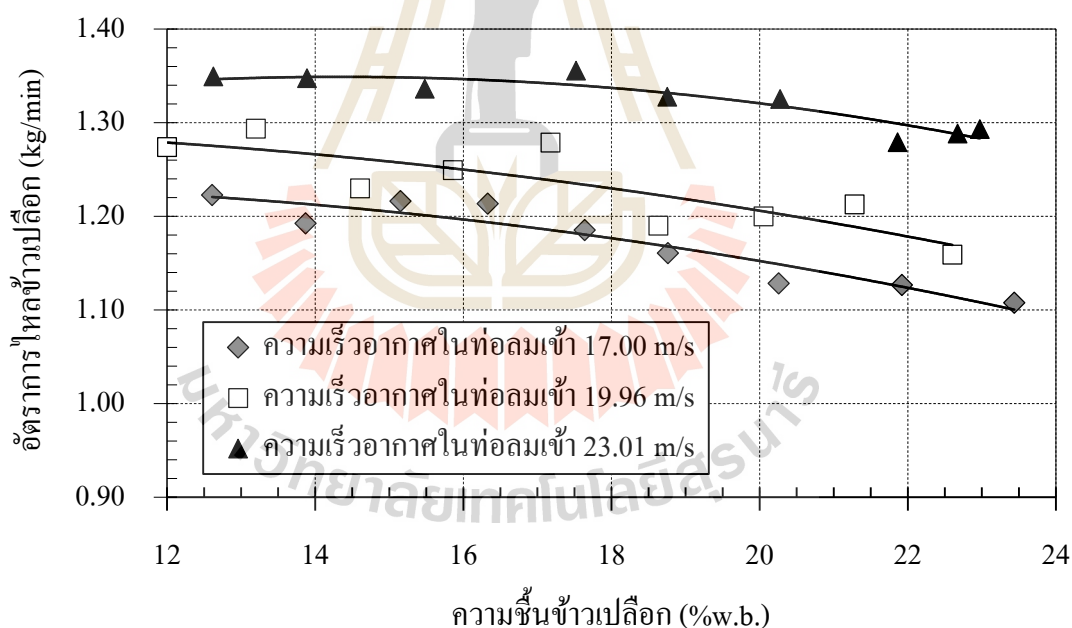


รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง inverter set point กับความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในท่อลมเข้า



รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยกับอุณหภูมิอากาศอบแห้งในท่อลมเข้า ขณะเครื่องทำความร้อนใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (4.0 kW) และขณะปิดเครื่องทำความร้อน

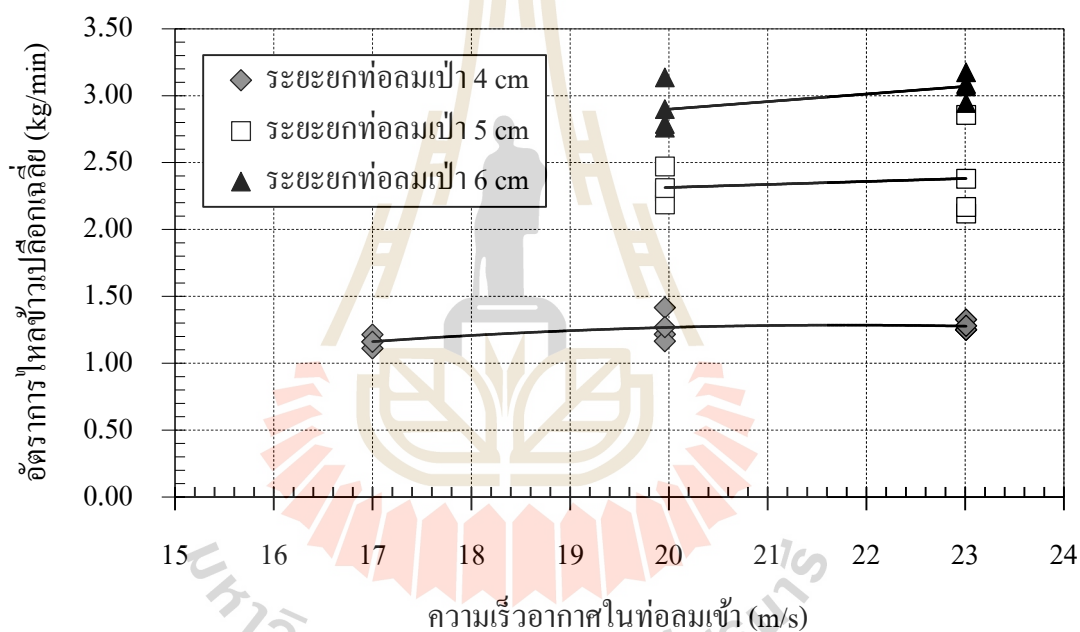
ข.4 อัตราการไหลข้าวเปลือก ชุดวัดอัตราการไหลข้าวเปลือกคั่งที่ได้อธิบายในบทที่ 4 วิธีการวัดอัตราการไหลข้าวเปลือกเริ่มจากโปรแกรม LabVIEW ส่งสัญญาณให้โซลินอยด์วาล์วเพื่อสั่งให้ลูกสูบนิวเมติกส์เคลื่อนที่ เพื่อให้บานพับปิดกล่องวัดอัตราการไหล ข้าวเปลือกที่ไหลผ่านทางออกท่อครอบจะกองตัวในกล่องวัดอัตราการไหล โดยมี load cell เป็นเครื่องวัดน้ำหนักข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้น และส่งสัญญาณที่วัดได้ให้โปรแกรม LabVIEW เพื่อคำนวณอัตราการไหลข้าวเปลือกจากมวลข้าวเปลือกที่วัดได้เทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการวัด โดยใช้เวลาในการวัดอัตราการไหลข้าวเปลือกครั้งละ 15 sec ทำให้สามารถวัดอัตราการไหลข้าวเปลือกตลอดการทดลองอบแห้ง ผลการทดสอบแสดงว่าอัตราการไหลข้าวเปลือกมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นลดลง เนื่องจากแรงเสียดทานการไหลระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกในกองและผนังของถังพักลดลง ทำให้ข้าวเปลือกสามารถไหลเข้าสู่ท่อลมเป่าได้รวดเร็วขึ้น และพบว่าเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งในท่อลมเข้าสูงขึ้นจะทำให้อัตราการไหลข้าวเปลือกสูงขึ้นโดยตลอดการอบแห้ง เพราะอากาศอบแห้งมีโมเมนตัมสูงขึ้นจึงสามารถยกเมล็ดเข้าสู่ท่อลมเป่าได้มาก และรวดเร็วขึ้น แสดงในรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับอัตราการไหลข้าวเปลือก ที่ความเร็วอากาศในท่อลมเข้าต่าง ๆ เมื่อระยะยกท่อลมเป่า 4 cm และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 20 kg

ระยะยกท่อลมเป่า (entrance height) คือความสูงนับจากปลายกรวยของถังพักถึงปลายท่อลมเป่าด้านล่าง ระยะดังกล่าวทำให้เกิดช่องว่างระหว่างปลายท่อลมเป่ากับทางเข้าท่อลมเข้า เนื่องจาก

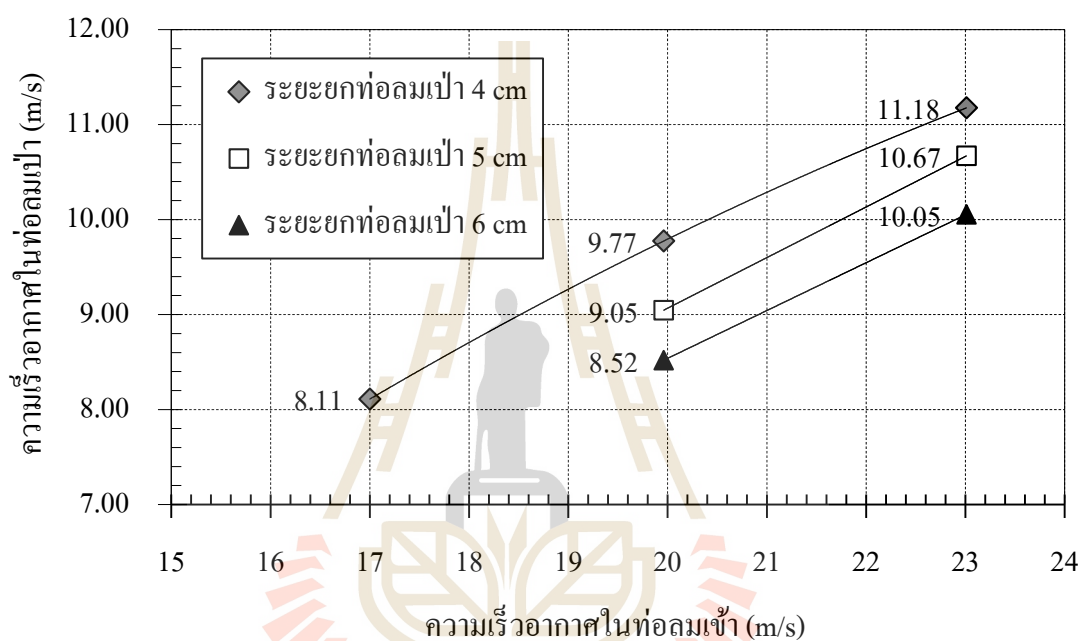
ช่องว่างดังกล่าวเป็นจุดต่ำสุดของถังพัก ข้าวเปลือกในถังพักจึงไหลเข้าสู่ช่องว่างดังกล่าวเป็นปกติด้วยแรงโน้มถ่วง ด้วยเหตุนี้ระยะยกท่อลมเป่าจึงมีผลต่อมวลข้าวเปลือกที่ป้อนเข้าสู่ท่อลมเป่า (มีผลต่ออัตราการไหลข้าวเปลือก) และมีผลต่อเสถียรภาพการไหลหมุนเวียนข้าวเปลือก (ช่วงการทำงานของเครื่องอบแห้ง) เพราะเสถียรภาพการไหลข้าวเปลือกขึ้นกับสมดุลระหว่างแรงยกของอากาศอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกเข้าสู่ท่อลมเป่า ดังแสดงในรูปที่ ข.5 พบว่าเมื่อระยะยกท่อลมเป่าสูงขึ้น เพื่อให้การไหลข้าวเปลือกมีเสถียรภาพต้องใช้ความเร็วอากาศในท่อลมเป่าที่เพิ่มขึ้น โดยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น-หล่นหน่วงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ข้าวเปลือกสามารถไหลหมุนเวียนอย่างมีเสถียรภาพ เมื่อใช้ระยะยกท่อลมเป่าในช่วง 4-6 cm โดยใช้ความเร็วอากาศในท่อลมเป่าในช่วง 17.00-23.01 m/s ทำให้ได้อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยตลอดช่วงความชื้นข้าวเปลือกที่ทดลอง (12-24%w.b.) ในช่วง 1.16-3.07 kg/min



รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศในท่อลมเป่ากับอัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ยตลอดการอบแห้ง (ช่วงความชื้นข้าวเปลือก 12-24%w.b.) ที่ระยะยกท่อลมเป่าต่าง ๆ เมื่อมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 20 kg

ข.5 ความเร็วอากาศในท่อลมเป่า ในทางปฏิบัติอากาศในท่อลมเป่าจะไหลเข้าสู่ท่อลมเป่าและถังพัก โดยสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลอากาศในถังพักกับในท่อลมเป่า เรียกว่าสัดส่วนการรั่วไหลของอากาศ (air leakage ratio) ซึ่งขึ้นกับความเร็วอากาศในท่อลมเป่า (superficial velocity) และระยะยกท่อลมเป่า (entrance height) งานวิจัยนี้วัดค่าสัดส่วนการรั่วไหลของอากาศ ด้วยการวัดความเร็วอากาศที่ทางออกท่อลมเป่า เพื่อคำนวณหาความเร็วอากาศในท่อลมเป่าและสัดส่วนการ

ร่วไหลของอากาศเข้าถึงพัก ดังแสดงในรูปที่ ข.6 และ ข.7 พบว่าความเร็วอากาศไหลในท่อลมเป่าต่ำกว่าในท่อลมเข้าเนื่องจากท่อลมเป่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าและมีอากาศบางส่วนร่วไหลเข้าสู่ถึงพัก นอกจากนี้พบว่าระยะยกท่อลมเป่าที่สูงขึ้นทำให้ความเร็วอากาศในท่อลมเป่าลดลงมากขึ้น เนื่องจากกระแสอากาศมีระยะทางในการบานตัวออกมากขึ้น จึงทำให้อากาศแทรกเข้าถึงพักได้มากขึ้น ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันนี้การเพิ่มความเร็วอากาศในท่อลมเข้าจึงทำให้สัดส่วนการร่วไหลของอากาศเข้าถึงพักมีค่าลดลง เพราะกระแสอากาศที่มีความเร็วสูงจะบานตัวได้น้อยกว่า

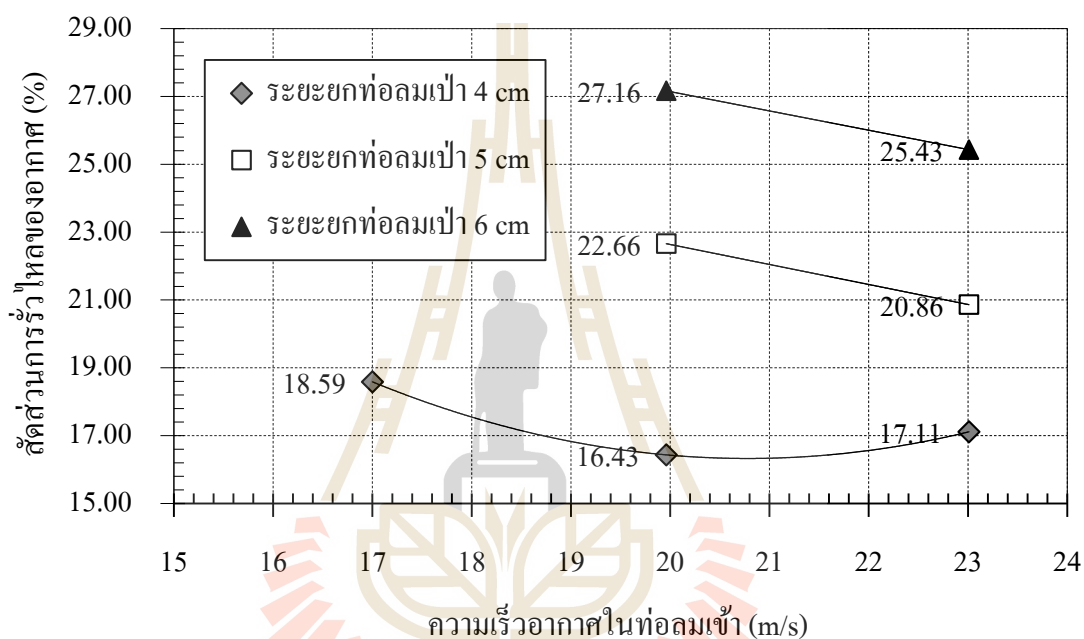


รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศในท่อลมเข้ากับความเร็วอากาศในท่อลมเป่า ที่ระยะยกท่อลมเป่าต่าง ๆ เมื่อข้าวเปลือกมีมวลเริ่มต้น 20 kg และความชื้น 12-14%w.b.

ข.6 สัดส่วนช่องว่างในท่อครอบ (void ratio in cover tube) เพื่อศึกษาผลของตะแกรงหว่งข้าวที่มีต่อการชะลอการตกของข้าวเปลือกในท่อครอบ จึงทดสอบหาปริมาณช่องว่างอากาศในท่อครอบขณะอบแห้ง ด้วยการวัดมวลข้าวเปลือกที่ค้างอยู่ในท่อครอบทันทีภายหลังการปิดเครื่องเป่าลม โดยตั้งสมมุติฐานว่าทันทีภายหลังการปิดเครื่องเป่าลมข้าวเปลือกที่ค้างอยู่ในท่อลมเป่าจะไม่ไหลเข้าสู่ท่อครอบ โดยจะตกย้อนกลับสู่ถึงพักผ่านทางท่อลมเป่า นำมวลข้าวเปลือกที่วัดได้ไปคำนวณหาปริมาณข้าวเปลือกจริง (true rough rice volume) แล้วนำไปคำนวณค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อครอบ (void ratio in cover tube) ตามสมการที่ (ข.14)

$$\varepsilon_c = \left(1 - \frac{V_{pc}}{V_c}\right) \times 100 \quad (\text{ข.14})$$

เมื่อ ε_c = สัดส่วนช่องว่างในท่อครอบ, %
 V_c = ปริมาตรช่องว่างอากาศในท่อครอบ, m^3
 V_{pc} = ปริมาตรข้าวเปลือกจริงในท่อครอบ, m^3



รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศในท่อลมเข้ากับสัดส่วนการรื้อไหลของอากาศเข้าถึงพัก ที่ระยะยกท่อลมเป่าต่าง ๆ เมื่อข้าวเปลือกมีมวลเริ่มต้น 20 kg และความชื้น 12-14%w.b.

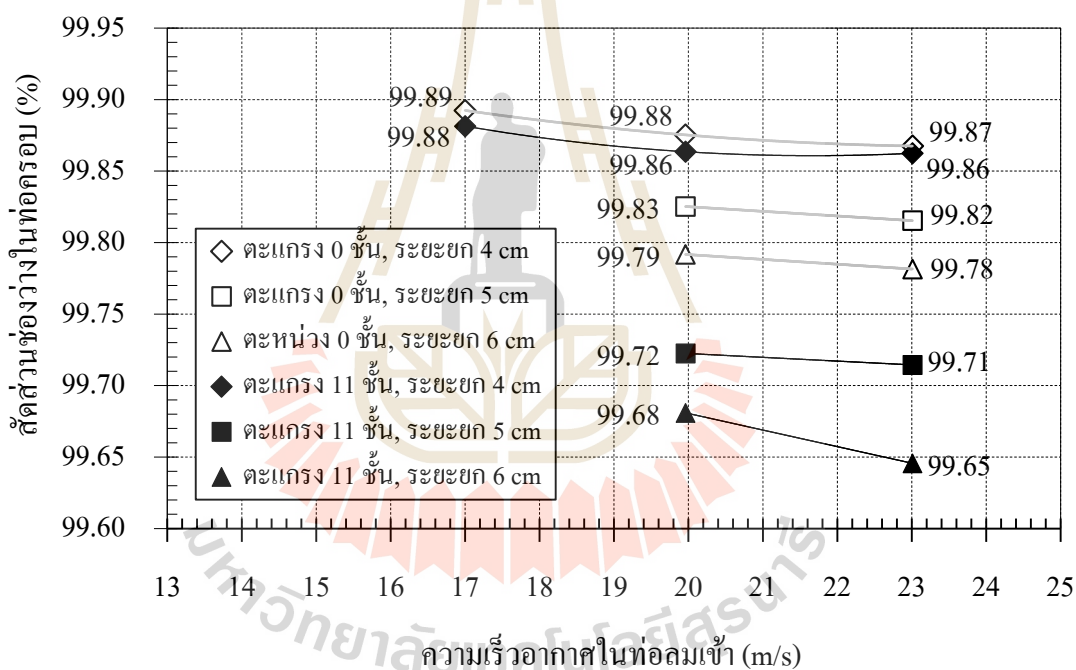
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ ข.8 พบว่าสัดส่วนช่องว่างในท่อครอบในกรณีศึกษาที่มีค่าในช่วง 99.65-99.89% โดยมีค่าลดลงเมื่อความเร็วอากาศในท่อลมเข้าและระยะยกท่อลมเป่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นดังที่ได้นำเสนอในหัวข้อ ข.4 และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นตะแกรงหน่วงข้าวทำให้ค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อครอบลดลงเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าตะแกรงหน่วงข้าวสามารถช่วยชะลอการตกของข้าวเปลือกในท่อครอบได้ โดยเฉพาะในกรณีที่อัตราการไหลข้าวเปลือกมีค่ามาก

ข.7 การใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลม เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานทฤษฎีจำเพาะซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานขับเคลื่อนเครื่องเป่าลม จึงทำการวัดกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า และตัว

ประกอบกำลังไฟฟ้า ที่ป้อนให้ inverter เพื่อป้อนให้กับเครื่องเป่าลมตลอดช่วงการอบแห้ง ทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ตามสมการที่ (ข.15) แล้วทำการเฉลี่ยค่ากำลังไฟฟ้าตลอดช่วงการอบแห้ง

$$P = \sqrt{3} \times I_B \times V_B \times P_f \quad (\text{ข.15})$$

เมื่อ	P	=	กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม, Watt
	I_B	=	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม, Amp
	V_B	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม, Volt
	P_f	=	ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor), -

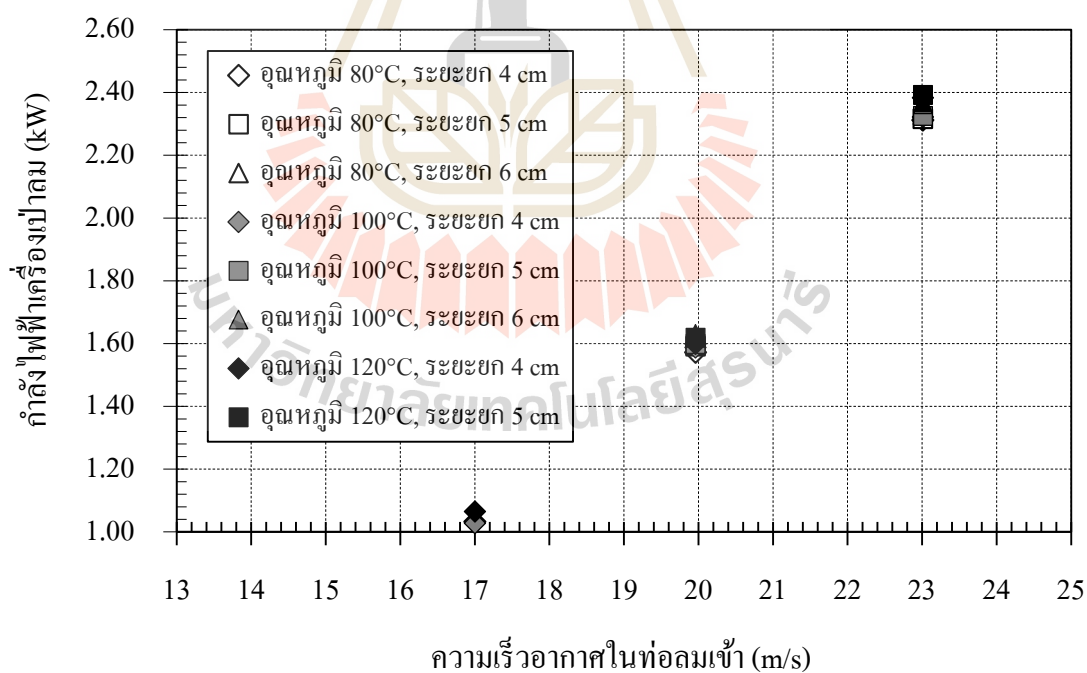


รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศในท่อลมเข้ากับสัดส่วนช่องว่างในท่อครอบขณะอบแห้งข้าวเปลือก ที่ระยะชกท่อลมเป่าต่าง ๆ และตะแกรงแห้งข้าวเท่ากับ 0 และ 11 ชั้น เมื่อข้าวเปลือกมีมวลเริ่มต้น 20 kg และความชื้น 12-14%w.b.

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องเป่าลม ในแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง แสดงในรูปที่ ข.9 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วง 1.33-1.92 kW โดยเครื่องเป่าลมต้องการกำลังไฟฟ้ามากขึ้นตามความเร็วอากาศที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อระยะชกท่อลมเป่าและอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้น จะทำให้เครื่องเป่าลมมีแนวโน้มใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องเป่าลม เกลี่ยตลอดการอบแห้ง มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 20 kg

กำลังไฟฟ้าเครื่องเป่าลม (kW)				
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (°C)	ระยะยกท่อลมเป่า (cm)	ความเร็วอากาศที่ลมเข้า (m/s)		
		17.00	19.96	23.01
80	4	1.03	1.57	2.31
	5	-	1.59	2.32
	6	-	1.60	2.33
100	4	1.03	1.59	2.32
	5	-	1.60	2.33
	6	-	1.62	2.36
120	4	1.06	1.60	2.38
	5	-	1.62	2.39
	6	-	1.63	2.37



รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศในท่อลมเข้ากับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องเป่าลม เกลี่ยตลอดการอบแห้ง (ช่วงความชื้นข้าวเปลือก 12-24%w.b.) ที่ระยะยกท่อลมเป่าและอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 20 kg

ข.8 ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศแวดล้อม ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองปัจจัยหลักและปัจจัยรองแสดงในตารางที่ ข.3-ข.4 และรูปที่ ข.10-ข.11 ตามลำดับ

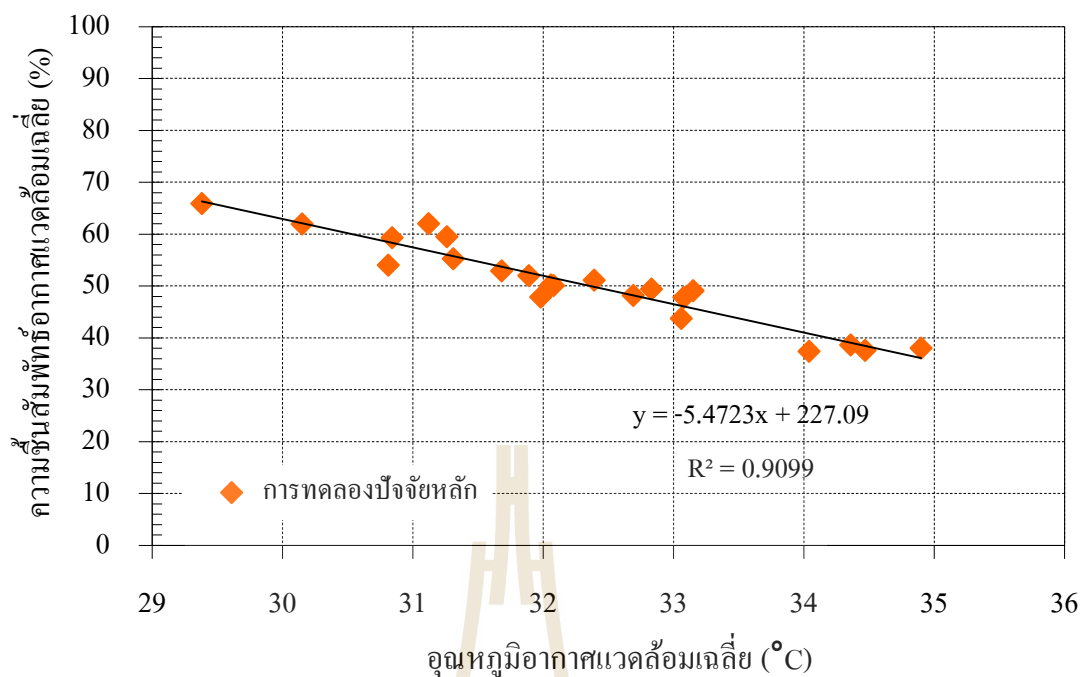
ตารางที่ ข.3 แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม (ปัจจัยหลัก)

การทดลองครั้งที่	วันที่ทำการทดลอง	อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (°C)	ความเร็วอากาศที่ลมเข้า (m/s)	ระยะที่ท่อลมเป่า (cm)	มวลข้าวเปลือก (kg)	จำนวนตะแกรงทวงข้าว (ชั้น)	พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมเฉลี่ย (%)
1	21-มิ.ย.-56	100	17	4	20	11	ชัยนาท1	33.08	47.85
2	20-มิ.ย.-56	120	23	6	20	11	ชัยนาท1	32.69	48.23
3	22-มิ.ย.-56	80	23	4	20	11	ชัยนาท1	32.83	49.47
4	22-มิ.ย.-56	120	17	4	20	11	ชัยนาท1	32.06	50.28
5	23-มิ.ย.-56	100	20	6	20	11	ชัยนาท1	30.81	54.06
6	23-มิ.ย.-56	80	17	4	20	11	ชัยนาท1	30.84	59.37
7	24-มิ.ย.-56	100	20	4	20	11	ชัยนาท1	32.39	51.21
8	24-มิ.ย.-56	100	23	4	20	11	ชัยนาท1	33.15	49.17
9	25-มิ.ย.-56	100	23	6	20	11	ชัยนาท1	31.12	62.10
10	26-มิ.ย.-56	120	20	6	20	11	ชัยนาท1	29.38	65.92
11	26-มิ.ย.-56	100	20	5	20	11	ชัยนาท1	30.15	61.98
12	27-มิ.ย.-56	80	20	5	20	11	ชัยนาท1	31.68	52.95
13	28-มิ.ย.-56	80	20	6	20	11	ชัยนาท1	33.06	43.78
14	28-มิ.ย.-56	120	23	4	20	11	ชัยนาท1	34.90	38.06
15	29-มิ.ย.-56	80	20	4	20	11	ชัยนาท1	31.98	47.93
16	29-มิ.ย.-56	80	23	6	20	11	ชัยนาท1	34.36	38.67
17	30-มิ.ย.-56	120	20	5	20	11	ชัยนาท1	34.47	37.64
18	30-มิ.ย.-56	120	20	4	20	11	ชัยนาท1	34.04	37.44
19	3-ส.ค.-56	80	23	5	20	11	ชัยนาท1	32.08	50.13
20	3-ส.ค.-56	100	23	5	20	11	ชัยนาท1	31.89	52.06
21	4-ส.ค.-56	120	20	5	20	11	ชัยนาท1	31.31	55.33
22	4-ส.ค.-56	120	23	5	20	11	ชัยนาท1	31.26	59.55

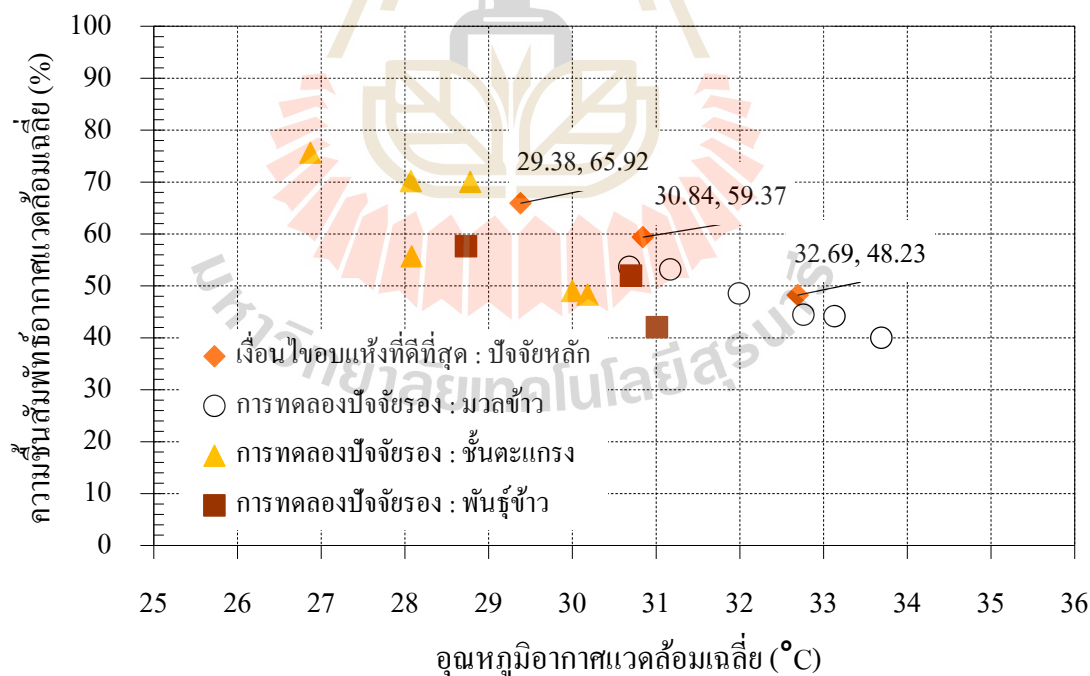
ตารางที่ ข.4 แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม (ปัจจัยรอง)

การทดลองครั้งที่	วันที่ทำการทดลอง	อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (°C)	ความเร็วอากาศที่ลมเข้า (m/s)	ระยะยทที่อุณหภูมิ (cm)	มวลข้าวเปลือก (kg)	จำนวนตะแกรงหว่งข้าว (ชิ้น)	พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมเฉลี่ย (%)
23	24-ส.ค.-56	80	17	4	10	11	ชัยนาท1	30.68	53.64
24	24-ส.ค.-56	120	20	6	10	11	ชัยนาท1	31.17	53.17
25	25-ส.ค.-56	120	23	6	30	11	ชัยนาท1	32.76	44.44
26	25-ส.ค.-56	120	23	6	10	11	ชัยนาท1	33.69	40.00
27	26-ส.ค.-56	80	17	4	30	11	ชัยนาท1	31.99	48.53
28	26-ส.ค.-56	120	20	6	30	11	ชัยนาท1	33.13	44.16
29	18-ต.ค.-56	120	20	6	20	0	ชัยนาท1	28.07	70.18
30	18-ต.ค.-56	120	23	6	20	0	ชัยนาท1	28.78	70.03
31	18-ต.ค.-56	80	17	4	20	0	ชัยนาท1	26.87	75.65
32	29-ต.ค.-56	120	20	6	20	6	ชัยนาท1	28.08	55.69
33	29-ต.ค.-56	120	23	6	20	6	ชัยนาท1	30.00	49.02
34	29-ต.ค.-56	80	17	4	20	6	ชัยนาท1	30.18	48.31
35	1-พ.ย.-56	120	20	6	20	11	กข105	28.73	57.62
36	1-พ.ย.-56	120	23	6	20	11	กข105	30.70	51.94
37	1-พ.ย.-56	80	17	4	20	11	กข105	31.01	42.04

โดยค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลอง ปัจจัยหลักและปัจจัยรองมีค่าอยู่ในช่วง 29.38-34.90°C และ 26.87-33.69°C ตามลำดับ ขณะที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองปัจจัยหลักและปัจจัยรองมีค่าอยู่ในช่วง 37.44-65.9% และ 40.00-75.65% ตามลำดับ และพบว่าวันที่มีอุณหภูมิค่ามีแนวโน้มของความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า และในการทดลองปัจจัยรองอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าต่ำกว่าและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงกว่าช่วงการทดลองปัจจัยหลัก โดยเฉพาะช่วงการทดลองปัจจัยรองเกี่ยวกับตะแกรงหว่งข้าวและพันธุ์ข้าว ซึ่งเข้าสู่ปลายเดือนตุลาคม อันเป็นช่วงเริ่มต้นของฤดูหนาว



รูปที่ ข.10 อุณหภูมิเฉลี่ยกับความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศแวดล้อม ช่วงทำการทดลองปัจจัยหลัก



รูปที่ ข.11 อุณหภูมิเฉลี่ยกับความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศแวดล้อม ช่วงทำการทดลองปัจจัยรอง

ประวัติผู้เขียน

นายสุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ เกิดเมื่อวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2542 ได้เข้าศึกษาในระดับอุดมศึกษา ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) และปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) ในปี พ.ศ. 2545 และ 2551 ตามลำดับ

ในปี พ.ศ. 2552 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) รุ่นที่ 11 ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ระหว่างศึกษาได้เดินทางไปทำงานวิจัยร่วมกับ Professor Ashim K. Datta ณ มหาวิทยาลัยคอร์เนล สหรัฐอเมริกา ในหัวข้อการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวัสดุพูนผลงานวิจัยในระดับปริญญาเอก ที่นำเสนอในการประชุมวิชาการ

- โสริฎา แข็งการ, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบุญ. (2553). รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อคัดเลือกแบบจำลองการอบแห้งข้าวเปลือก สำหรับเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. 20 – 22 ตุลาคม 2553 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. (รางวัลบทความดีเด่น)
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, โสริฎา แข็งการ และ ทวิช จิตรสมบุญ. (2556). ผลกระทบของความยาวท่อลมเป่าและความสูงของชั้นเบดต่อจลนศาสตร์การอบแห้งและการลั่นเปลือกพลังงานในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นอิสระ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9. 8– 10 พฤษภาคม 2556. นครนายก. (รางวัลบทความดีเด่น)
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบุญ. (2558). เงื่อนไขป้องกันการแตกร้าวข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นอิสระ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29. 30 มิถุนายน – 2 กรกฎาคม 2558. นครราชสีมา. (รางวัลบทความดีเด่น)

บทความวิจัยในระดับปริญญาเอก ที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- Meesukchaosumran S, Chitsomboon T. **Effects of resting periods, air temperatures and air velocities on free-fall paddy dryer performances.** Suranaree Journal of Science and Technology, 2018; 25(1): 11-26.
- Meesukchaosumran S, Chitsomboon T. **Dimensionless variable group for the free-fall grain dryer.** International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019; 12(4): 197-204.