

การทดลองและแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิค
เป่าพ่นหล่นอิสระ



นายศิวกร ศรีชัยญากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**EXPERIMENT AND MATHEMATICAL MODEL OF
PADDY DRYING USING SPOUTED FREE-FALL
TECHNIQUE**

Siwakorn Sritunyakorn



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การทดลองและแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคเป่าพ่น
หล่นอิสระ

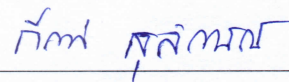
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.กীরติ สุตักษณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



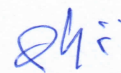
(ผศ. ดร.กระวี ศรีอำรรค)

กรรมการ



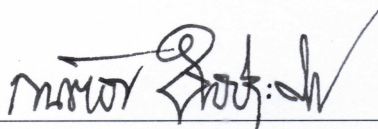
(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ศรีอำรรค)

กรรมการ



(ผศ. ดร.พรรษา ลิบถับ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนัตช์ชร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศิวกร ศรีรัชฎาภกร : การทดลองและแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคเป่าพ่นหล่นอิสระ (EXPERIMENT AND MATHEMATICAL MODEL OF PADDY DRYING USING SPOUTED FREE-FALL TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณ์, 153 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิร้อนที่ 60, 80, 100, 120 และ 150°C ความเร็วลมร้อน 19, 22 และ 25 m/s และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5, 10 และ 15 kg ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง พลังงานรวมจำเพาะและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง โดยทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นในช่วง 24.0-25.5% w.b. ถึงความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% w.b. พบว่าอุณหภูมิร้อนมีผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าอิทธิพลอื่น โดยเมื่ออุณหภูมิร้อนเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ใช้พลังงานรวมจำเพาะลดลง แต่ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลง มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นเป็นอิทธิพลรองโดยเมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นสูงขึ้นจะใช้พลังงานรวมจำเพาะลดลงและได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้น การเพิ่มความเร็วมร้อนส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น ค่าดัชนีความขาวข้าวเปลือกหลังการขัดสีมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างข้าวอ้างอิงถึงแม้จะใช้อุณหภูมิร้อนสูงถึง 150°C แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทำนายผลของอัตราส่วนความชื้น โดยสามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นแม่นยำที่ $RMSE=0.0279$, $\chi^2=0.00084$ และ $r=0.9938$ นอกจากนี้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่ถูกพัฒนาขึ้นถูกใช้เพื่อทำนายการอบแห้งด้วยแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางเชิงทฤษฎี พบว่าให้ผลการทำนายค่าความชื้นข้าวเปลือก อุณหภูมิเมล็ดข้าวในถังพัก อุณหภูมิร้อนและความชื้นสัมพัทธ์ปลายท่อเป่าพ่นได้สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยให้ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง 2.1-8.4%, 2.1-8.4%, 11.0-21.6%, 2.1-8.4% and 13.6-36.0% ตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา ศิวกร ศรีรัชฎาภกร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กิริติ

SIWAKORN SRITUNYAKORN : EXPERIMENT AND
MATHEMATICAL MODEL OF PADDY DRYING USING SPOUTED
FREE-FALL TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KEERATI
SULUKSNA, Ph.D., 153 PP.

SPOUTED BED DRYER/ FREE-FALL TECHNIQUE/ THIN-LAYER MODEL

This research aimed to construct and test paddy drying using the spouted free-fall bed dryer. Influence of hot air temperatures of 60, 80, 100, 120, and 150°C, hot air velocities of 19, 22, and 25 m/s and initial paddy masses of 5, 10, and 15 kg on drying rate (DR), specific energy consumption (SEC) and qualities of paddy after drying were studied. The experiment was conducted with drying paddy at initial moisture content in the range of 24.0-25.5% w.b. to the final moisture approximately of 14% w.b.. It is obtained that hot air temperature had more effect on the drying rate compared to the other parameters. When paddies were dried at higher hot air temperature, DR increased, SEC decreased but the quantity of head rice yield (HRY) decreased. The initial paddy mass is a secondary influence. Using higher initial paddy mass decreased the SEC and increased HRY. Additionally, increasing the hot air velocity resulted in a slight increase in the DR. But it wasted more energy. The whiteness index (WI) of paddy after milling was similar to that of the reference control paddy sample, although using the hot air temperature of 150°C. The empirical thin-layer drying model was developed to predict the effect of moisture ratio. It can accurately predict the moisture ratio at $RMSE = 0.0279$, $\chi^2 = 0.00084$, and $r = 0.9938$. In addition, prediction of the drying was estimated by the theoretical thin-layer drying model with the developed equations of moisture diffusion coefficient. It was found to predict the paddy moisture content, paddy

temperature in the downcomer region, hot air temperature, and relative humidity at the end of the draft tube to be consistent with the experimental results with the average %error in the range of 2.1-8.4%, 2.1-8.4%, 11.0-21.6%, 2.1-8.4%, and 13.6-36.0%, respectively.



School of Mechanical Engineering

Academic year 2019

Student's Signature ศุภกร ศรีชัยบุญการ

Advisor's Signature กัม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณการส่งเสริมของบุคคลและองค์กรต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุกฤษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา อบรมสั่งสอน ให้ความรู้คำชี้แนะในการทำวิจัย และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ คณะอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือต่าง ๆ ตลอดการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณเพื่อนพ้องบัณฑิตทุกท่านที่ช่วยให้คำปรึกษารวมถึงให้กำลังใจมาโดยตลอด โดยเฉพาะคุณสุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและสนับสนุนส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทำยที่สุดนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านเพื่อพัฒนาองค์ความรู้สืบต่อไป

ศิวกร ศรีชัยญากร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 แนวคิดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหมุนอิสระ.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
รายการอ้างอิง.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ส่วนประกอบและโครงสร้างเมล็ดข้าว.....	6
2.2 ความชื้นในเมล็ด.....	7
2.3 แผนภูมิไซโครเมตริก.....	8
2.4 ความชื้นสมดุลของเมล็ด.....	9
2.5 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง.....	10
2.6 การอบแห้ง.....	11
2.6.1 หลักการพื้นฐานของการอบแห้ง.....	11
2.6.2 พื้นฐานการอบแห้งวัสดุ.....	11
2.7 พื้นฐานการถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้ง.....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.1	หลักการถ่ายเทความร้อน	12
2.7.2	การถ่ายโอนมวลสำหรับการอบแห้ง	14
2.8	การพักในที่อับอากาศ	16
2.9	วิธีการหาค่าความชื้น	17
2.9.1	การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง.....	17
2.9.2	การหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม.....	17
2.10	ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล	17
2.10.1	ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอ็นไซม์เกี่ยวข้อง.....	18
2.10.2	ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอ็นไซม์เกี่ยวข้อง	18
2.11	การวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าว.....	18
2.11.1	เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน.....	18
2.11.2	สมบัติด้านแสงสี	18
2.12	เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น.....	20
2.12.1	การเกิดความเร็วต่ำสุดของการเป่าพ่น	22
2.13	การจำลองทางคณิตศาสตร์	24
2.14	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.14.1	งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น	25
2.14.2	งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบด	28
2.14.3	งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ	29
2.14.4	งานวิจัยการอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม.....	29
2.14.5	งานวิจัยการอบแห้งข้าวเปลือกอื่น ๆ	30
	รายการอ้างอิง.....	31
3	การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ	34
3.1	บทคัดย่อ.....	34
3.2	บทนำ.....	35
3.3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	36
3.3.1	การออกแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ.....	36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	การเตรียมข้าวเปลือกก่อนทดลองอบแห้ง	39
3.3.3	ขั้นตอนการทดลองอบแห้ง	39
3.3.4	ขั้นตอนการหาความชื้นข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง	40
3.3.5	ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง	41
3.3.6	ข้าวอ้างอิงควบคุม	42
3.4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล	42
3.4.1	อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อน มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นและ ความเร็วลมร้อนส่งผลต่อความชื้นข้าวเปลือก	42
3.4.2	อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อน ความเร็วลมร้อนและ มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย	47
3.4.3	อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อน ความเร็วลมร้อนและ มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ออัตราสิ้นเปลืองพลังงาน	53
3.4.4	อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อน ความเร็วลมร้อนและ มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่อคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง	59
3.5	สรุปผลการวิจัย	68
	รายการอ้างอิง	70
4	การทำนายการทดลองอบแห้งชั้นบางและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น	71
4.1	บทคัดย่อ	71
4.2	บทนำ	71
4.3	วิธีการดำเนินการวิจัย	73
4.3.1	แบบจำลองเอมพิริคัลสำหรับการอบแห้งชั้นบาง	73
4.4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล	76
4.4.1	การสอบเทียบผลการทดลองด้วยแบบจำลองการอบแห้ง	76
4.4.2	การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น	82
4.4.3	การจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น	84
4.5	สรุปผลการวิจัย	89
	รายการอ้างอิง	90

สารบัญ (ต่อ)

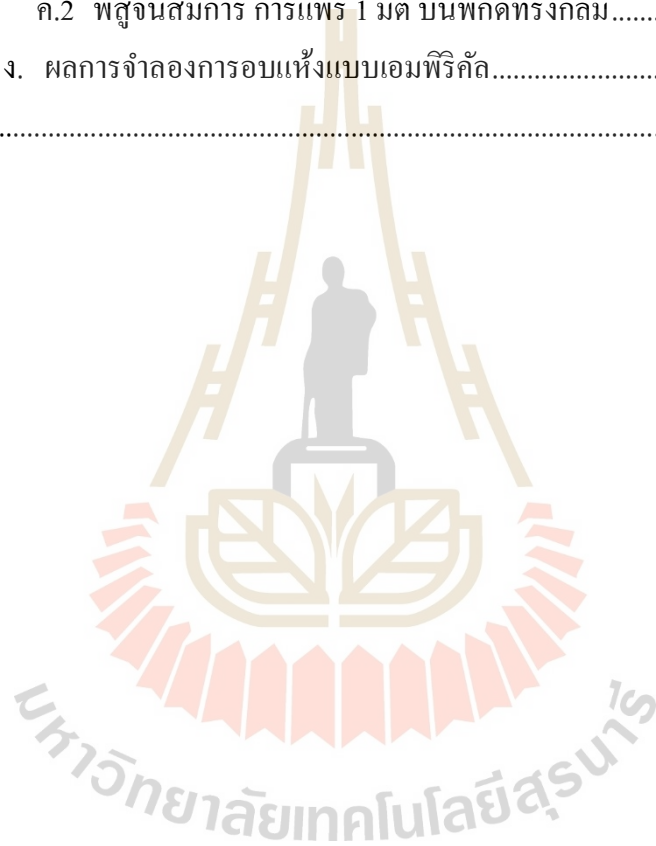
หน้า

5	แบบจำลองเชิงทฤษฎีสำหรับการอบแห้งชั้นบาง	92
5.1	บทคัดย่อ.....	92
5.2	บทนำ.....	92
5.3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	93
5.3.1	การพัฒนาแบบจำลองเชิงทฤษฎีของการอบแห้ง	93
5.3.2	สมการควบคุมสมดุลมวลและพลังงาน	94
5.3.3	สมการอัตราการอบแห้ง.....	96
5.3.4	สมการที่เกี่ยวข้อง.....	96
5.3.5	ขั้นตอนการจำลองผลการอบแห้ง	102
5.4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล	112
5.5	สรุปผลการวิจัย.....	116
	รายการอ้างอิง.....	117
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	118
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	118
6.2	ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป.....	120
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	การพิสูจน์สมการ	121
ก.1	การคำนวณค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ย	122
ก.2	สมการคำนวณหาค่าพลังงานรวมจำเพาะที่ใช้ ในการอบแห้งข้าวเปลือก.....	123
ก.3	สมการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร ...	124
ก.4	การวัดความเร็วลมโดยใช้แผ่นออริฟิส.....	124
ก.5	ความเร็วต่ำสุดของการเป่าพ่นและความดันตกคร่อมเบดสูงสุด.....	128
ก.6	ความสูงของเมล็ดเฉลี่ยจากถึงขณะเป่าพ่น	129
ก.7	อัตราการไหลข้าวเปลือก.....	132
ก.8	ค่าพลังงานและประสิทธิภาพของเครื่องเป่าลม	132

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	135
ภาคผนวก ค. ระเบียบวิธีการคำนวณ	141
ค.1 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	142
ค.2 พิสูจน์สมการ การแพร่ 1 มิติ บนพิกัดทรงกลม.....	144
ภาคผนวก ง. ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล.....	149
ประวัติผู้เขียน	153



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ประโยชน์และข้อจำกัดเครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไป.....22
4.1	แบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งข้าวเปลือก.....73
4.2	ค่าคงที่แบบจำลองและผลวิเคราะห์ความแม่นยำในการใช้งาน.....78
4.3	ค่าพารามิเตอร์ A และ B.....85
5.1	ขนาดเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ.....106
5.2	เงื่อนไขข้อมูลการทดลองที่ใช้จำลอง.....112
5.3	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการจำลอง.....113
ก.1	ค่า Inverter set point และความดันตกคร่อมแผ่นออร์ฟิส.....127
ก.2	ค่า Inverter set point ที่อุณหภูมิลมร้อน 60-150°C.....128
ก.3	อัตราการไหลของข้าวเปลือก.....132
ง.1	ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C.....150
ง.2	ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ที่อุณหภูมิลมร้อน 80°C.....150
ง.3	ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ที่อุณหภูมิลมร้อน 100°C.....151
ง.4	ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ที่อุณหภูมิลมร้อน 120°C.....151
ง.5	ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ที่อุณหภูมิลมร้อน 150°C.....152

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ3
2.1	โครงสร้างเมล็ดข้าว6
2.2	แผนภูมิไซโครเมตริก.....8
2.3	เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอร์มแบบคายน้ำ.....9
2.4	การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง.....11
2.5	กลไกถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างการอบแห้ง12
2.6	การถ่ายโอนมวลออกจากเมล็ด15
2.7	แผนภาพสีระบบ CIE.....19
2.8	ภาพโครงร่างเครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไป.....21
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดและความเร็วอากาศเข้าเบด23
3.1	แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ36
3.2	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหล่นอิสระที่ใช้ทดลอง.....37
3.3	ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่ความเร็วลมร้อน 19 m/s.....43
3.4	ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่ความเร็วลมร้อน 22 m/s.....44
3.5	ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่ความเร็วลมร้อน 25 m/s.....44
3.6	ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C.....45
3.7	ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่อุณหภูมิลมร้อน 80°C.....45
3.8	ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่อุณหภูมิลมร้อน 100°C.....46
3.9	ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่อุณหภูมิลมร้อน 120°C.....46
3.10	ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่อุณหภูมิลมร้อน 150°C.....47
3.11	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg.....48
3.12	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg.....49
3.13	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg.....49
3.14	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg.....50
3.15	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg.....50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.16	อัตรากรอบแห้งเฉลี่ยและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg.....	51
3.17	อัตรากรอบแห้งเฉลี่ยและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 19 m/s	52
3.18	อัตรากรอบแห้งเฉลี่ยและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 22 m/s	52
3.19	อัตรากรอบแห้งเฉลี่ยและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 25 m/s	53
3.20	พลังงานรวมจำเพาะและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg.....	54
3.21	พลังงานรวมจำเพาะและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg.....	55
3.22	พลังงานรวมจำเพาะและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg.....	55
3.23	พลังงานรวมจำเพาะและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg.....	56
3.24	พลังงานรวมจำเพาะและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg.....	56
3.25	พลังงานรวมจำเพาะและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg.....	57
3.26	พลังงานรวมจำเพาะและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 19 m/s	58
3.27	พลังงานรวมจำเพาะและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 22 m/s	58
3.28	พลังงานรวมจำเพาะและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 25 m/s	59
3.29	เปอร์เซ็นต์ข้าวคั่วและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg.....	60
3.30	เปอร์เซ็นต์ข้าวคั่วและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg.....	61
3.31	เปอร์เซ็นต์ข้าวคั่วและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg.....	61
3.32	เปอร์เซ็นต์ข้าวคั่วและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg	63
3.33	เปอร์เซ็นต์ข้าวคั่วและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg	63
3.34	เปอร์เซ็นต์ข้าวคั่วและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg	64
3.35	เปอร์เซ็นต์ข้าวคั่วและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 19 m/s.....	64
3.36	เปอร์เซ็นต์ข้าวคั่วและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 22 m/s.....	65
3.37	เปอร์เซ็นต์ข้าวคั่วและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 25 m/s.....	65
3.38	ดัชนีความขาวข้าวหลังขัดสีและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg.....	67
3.39	ดัชนีความขาวข้าวหลังขัดสีและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg.....	67
3.40	ดัชนีความขาวข้าวหลังขัดสีและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg.....	68
4.1	ผังที่ใช้คำนวณหาค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสม	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 อัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลองและ การทำนายด้วยแบบจำลอง ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg.....	80
4.3 อัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลองและ การทำนายด้วยแบบจำลอง ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg.....	80
4.4 อัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลองและ การทำนายด้วยแบบจำลอง ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg.....	81
4.5 อัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลองและ การทำนายด้วยแบบจำลอง.....	81
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง	82
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น.....	83
4.8 ลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg.....	85
4.9 ลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg.....	86
4.10 ลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg.....	86
4.11 เปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่นและ ผลการทดลองเมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg.....	87
4.12 เปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่นและ ผลการทดลองเมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg.....	87
4.13 เปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่นและ ผลการทดลองเมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg.....	88
5.1 แสดงการกำหนดในชั้นบางแต่ละชั้น ในทุกช่วงการอบแห้ง.....	101
5.2 การกำหนดชั้นบางในกรณีการไหลแบบสวนทางและแบบไหลตามกัน.....	102
5.3 การกำหนดโนดภายในเมตซ์.....	104
5.4 การเคลื่อนตัวของเมตซ์ข้าวเปลือกในแต่ละส่วนการอบแห้ง.....	106
5.5 พังการคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง.....	107
5.6 พังการคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง ส่วนเป่าพ่นในท่อ	108
5.7 พังการคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง ส่วนเป่าพ่นเหนือท่อ.....	109
5.8 พังการคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง ส่วนหล่นอิสระ.....	110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9	ผังการคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง ส่วนพักตัวในถัง111
5.10	ผลการจำลองความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับผลการทดลอง.....114
5.11	ผลการจำลองอุณหภูมิเมล็ดเทียบกับอุณหภูมิในถังพักที่ความสูง 15 cm114
5.12	ผลการจำลองอุณหภูมิลมร้อนที่ปลายท่อเป่าพ่นเทียบกับผลการทดลอง115
5.13	ผลการจำลองความชื้นสัมพัทธ์ที่ปลายท่อเป่าพ่นเทียบกับผลการทดลอง115
ก.1	การติดตั้ง orifice plate125
ก.2	Inverter set point ความเร็วอากาศก่อนเข้า Heater.....127
ก.3	Inverter set point กับ Pressure drop เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 3 kg เทียบกับการติดตั้งท่อเป่าพ่นและไม่ติดตั้งท่อเป่าพ่น128
ก.4	Inverter set point กับ Pressure drop เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5-15 kg โดยมีการติดตั้งท่อเป่าพ่น129
ก.5	ความสูงของเมล็ดช่วงเป่าพ่นเหนือท่อ.....130
ก.6	การลอยตัวของเมล็ดในช่วงเป่าพ่นเหนือท่อ.....131
ข.1	โครงสร้างอบแห้งที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น.....136
ข.2	เครื่องเป่าลมที่ใช้ในการทดลอง137
ข.3	ชุด PID ควบคุมความเร็วเครื่องเป่าลมที่ใช้ในการทดลอง137
ข.4	เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส ที่ใช้ในการทดลอง138
ข.5	เครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้าแบบ wat-hour meter ที่ใช้ในการทดลอง.....138
ข.6	เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นที่ใช้ในการทดลอง139
ข.7	เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล.....139
ข.8	เครื่องวัดสี140
ข.9	เครื่องอบแห้งแบบถาดที่ใช้อบแห้งตัวอย่างข้าวควบคุม140
ค.1	ตำแหน่ง โหนดในระเบียบวิธีของแรงก-นิโคลสัน.....143

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงความร้อน, m^2/s
β	=	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter ratio = d/D)
ε	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัว, ค่าความพรุน
ρ	=	ความหนาแน่น, kg/m^3
ϕ	=	ค่าความเป็นทรงกลมของวัสดุ
\forall	=	ปริมาตร, m^3
μ_a	=	ความหนืดของอากาศในกองวัสดุ, $kg/(m\ s)$
μ_s	=	ความหนืดของอากาศที่ผิววัสดุ, $kg/(m\ s)$
A, A_s	=	พื้นที่หน้าตัด, พื้นที่ผิว, m^2
a_p	=	พื้นที่ผิวของวัสดุต่อปริมาตรของเบด, m^2/m^3
a	=	ความเป็นสีแดง-เขียว, %
b	=	ความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน, %
C	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, $J/(kg\ K)$
C_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร, kg/m^3
C_D	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอากาศ
C_d	=	สัมประสิทธิ์อัตราไหล
C_v	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, $kJ/(kg\ K)$
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง, m
D_{AB}, D_{eff}	=	สัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจาย, สัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/s
d	=	มวลของวัสดุแห้ง, g
E_i	=	พลังงานรวม, MJ
G	=	ฟลักซ์ของมวล, kg/m^2
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2
HRY	=	เปอร์เซ็นต์ข้าวตัง, %
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, J/kg
h', h	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/(m^2\ ^\circ C)$
h'_D	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, $kg/(m^2\ s)$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, $W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$
L	=	ความเป็นสีขาว-ดำ, %
M	=	ความชื้นภายในข้าวเปลือก, decimal d.b.
\overline{M}	=	ความชื้นภายในเมล็ดเฉลี่ย, decimal d.b.
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	=	ความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย, decimal w.b.
M_i	=	ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น, decimal w.b.
M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก, decimal w.b. หรือ % w.b.
MR	=	อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย
N_A	=	ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท, kg/s
Nu	=	Nusselt number
P	=	ความดัน, Pa
Pr	=	Prandtl number
Q	=	พลังงานความร้อน, J, อัตราไหลปริมาตร, m^3/s
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
Re	=	Reynolds number
r	=	ระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง, m
r_o	=	รัศมีวงกลม, m
SEC	=	พลังงานรวมจำเพาะ, $MJ/kg_{\text{water evaporated}}$
Sc	=	Schmidt number
Sh	=	Sherwood number
SP	=	Inverter set point, %
T	=	อุณหภูมิ, $^\circ C$
T_s	=	อุณหภูมิที่ผิวของเมล็ด, $^\circ C$
T_{wb}	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียก, $^\circ C$
t	=	เวลา, s
t_T	=	เวลาอบแห้งทั้งหมด, min

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

U_{ms}	=	ความเร็วต่ำสุดของการเป่าฟัน m/s
V	=	ความเร็ว, m/s
W	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง
WI	=	Whiteness index
w	=	มวลของวัสดุขึ้น, g
w_i, w_f	=	มวลข้าวเปียกเริ่มต้นและสุดท้าย, g
y	=	ตำแหน่งตามแนวตั้ง, m

สัญลักษณ์ล่าง

a	=	อากาศ
abs	=	สัมบูรณ์
amb	=	อากาศแวดล้อม
g	=	แก๊ส, อากาศ
i	=	เข้า
p	=	เมล็ด
$prim$	=	ปฐมภูมิ
sec	=	ทุติยภูมิ
v	=	ไอน้ำ
w	=	น้ำ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเก็บเกี่ยวข้าวในปัจจุบัน ข้าวมักมีความชื้นสูงในช่วงร้อยละ 25-30% w.b. (เพื่อลดการหล่นร่วงของเมล็ดข้าว) และจะต้องลดความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา 13-14% w.b. โดยเร็ว เพื่อคงคุณภาพที่ดีป้องกันการเน่าเสีย ยืดอายุการเก็บรักษา ด้วยความชื้นเมล็ดที่ต่ำช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเชื้อรา การลดความชื้นให้อยู่ในระดับช่วงดังกล่าวจึงมีความสำคัญมาก เกษตรกรมักลดความชื้นข้าวเปลือกโดยการตากบนลานปูน ซึ่งประหยัดแต่มีข้อเสีย เช่น ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ ใช้เวลา แรงงานและพื้นที่มาก รวมถึงการปนเปื้อนและเสียหายปริมาณสูง ดังนั้นการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเชิงกลจึงช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ เพื่อลดความสูญเสียต่างๆ ทั้งยังสามารถศึกษาวิจัยปัจจัยต่างๆ รวมถึงควบคุมคุณภาพข้าวหลังการอบแห้งได้อีกด้วย ปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งหลายรูปแบบที่นิยมในเชิงพาณิชย์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนต่ำ เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบไหลตกเคล้า (LSU) เป็นต้น เครื่องอบแห้งแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมต่อคุณลักษณะการอบแห้งที่แตกต่างกัน ทั้งการใช้พลังงาน เวลา และคุณภาพข้าว จึงมีงานวิจัยด้านการอบแห้งในรูปแบบต่างๆ เกิดขึ้นมากมาย โดยมักมีจุดประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงาน ลดระยะเวลา และได้คุณภาพข้าวที่ดี เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด สามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิอากาศสูง แต่คุณภาพข้าวเปลือกที่ได้ต่ำ จึงไม่เหมาะสมกับการอบแห้งอนุภาคที่ไวต่อความร้อน รวมถึงมีขนาดใหญ่ โดยมีกอบแห้งเฉพาะช่วงความชื้นสูง และตามด้วยวิธีลดความชื้นแบบอื่น ซึ่งทำให้เกิดขั้นตอนต่างๆ มากขึ้น

เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น (spouted bed dryer) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดในระบบฟลูอิดไคซ์เบดในด้านขนาดอนุภาคที่ใช้ออบ สามารถอบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อนสูงได้ดี โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เวลาสัมผัสความร้อนสั้นทำให้อบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้ มีการพักตัวในถังพักหรือห้องอบแห้ง ทำให้มีระยะเวลาที่ความชื้นภายในจะแพร่ออกมาที่ผิวได้ มีความสม่ำเสมอของคุณภาพหลังการอบ และใช้พลังงานค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ดังนั้น เทคนิคแบบเป่าพ่นจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะการอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งพบว่าให้อัตราการอบแห้งสูงอบแห้งได้เร็ว ประหยัดพลังงาน และให้ข้าวมีคุณภาพดีในด้านคุณภาพ

การขัดสีและความขาวของข้าว แต่เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นดั้งเดิมมีข้อจำกัดมากมายคือ ใช้พลังงานสูงในช่วงแรกของการเป่าพ่น ทำให้ต้องใช้ขนาดพัดลมที่มีขนาดกำลังสูง การเป่าพ่นวัสดุจะไหลแบบไม่เป็นระเบียบ ซึ่งอาจทำให้วัสดุแห้งไม่เท่ากัน

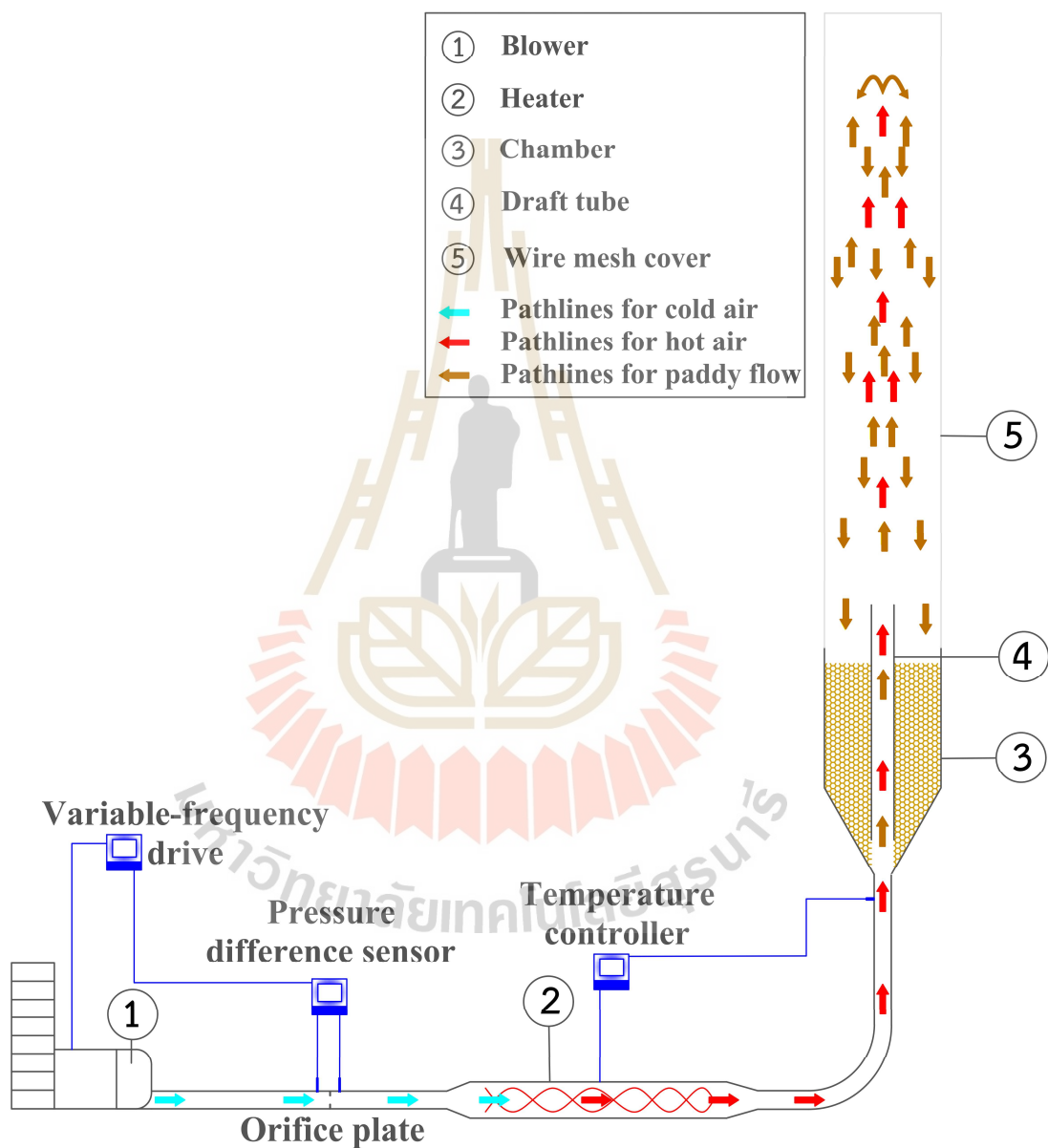
การอบแห้งข้าวด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ แสดงถึงกลไกการไหลแบบคลุกเคล้าระหว่างข้าวเปลือกและลมร้อนด้วยความเร็วสัมพัทธ์ที่สูง ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนและความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น (เกรียงไกร น้ำเพชรเจียว และคณะ, 2551) การพักข้าวจะทำให้ดึงความชื้นออกได้รวดเร็ว ลดการใช้พลังงานและอัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่ ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่สูง (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2552) แต่สูญเสียพลังงานไปกับเครื่องกระพ้อลำเลียง เพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้ขึ้นดังหัวข้อ 1.2

1.2 แนวคิดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระ

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระ เป็นการผนวกข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นและแบบหล่นอิสระ คือสามารถลำเลียงและอบแห้งวัสดุไปในเวลาเดียวกัน มีช่วงการพักตัวใหม่เมล็ดข้าวมีการกระจายความชื้นมาที่ผิวก่อนเข้าสู่รอบการอบแห้งใหม่ ดังรูปที่ 1.1 การทำงานเริ่มจากบรรจุข้าวในถังพัก อากาศแวดล้อมถูกอัดด้วยเครื่องเป่าลม (หมายเลข 1) ไหลผ่านเครื่องทำความร้อน (หมายเลข 2) จากนั้นลมร้อนไหลเข้าสู่ท่อลมร้อนด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดการพาวัสดุและลมร้อน ไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งหรือถังพัก (หมายเลข 3) โดยอากาศจะนำพาวัสดุเคลื่อนทะลุผ่านชั้นบนของข้าวตามลำกระแสอากาศในลักษณะไหลตามกันในท่อเป่าพ่น (หมายเลข 4) เมื่อลมร้อนและเมล็ดข้าวพุ่งสูงได้ระยะหนึ่งก็จะเกิดการบานตัวออกในลักษณะเหมือนน้ำพุ โดยถูกคลุมด้วยมุ้งตาข่าย (หมายเลข 5) เพื่อป้องกันข้าวกระจายออก จากนั้นเมล็ดข้าวจะตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะสวนทางกับกระแสลมร้อนที่ไหลสวนขึ้นมาในลักษณะแบบการตกอย่างอิสระ (free fall) โดยอากาศร้อนขึ้นจะถูกพัดพาออกจากห้องอบแห้งอย่างรวดเร็ว จากนั้นลมร้อนจะแยกตัวออกสู่สิ่งแวดล้อมขณะที่เมล็ดจะตกลงสู่ถังพัก และค่อย ๆ ไหลลงมาในขณะที่เดียวกันจะมีลมร้อนที่แทรกตัวไหลสวนทางกับเมล็ด ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วยิ่งขึ้น โดยเมล็ดข้าวจะวนในรูปแบบเช่นนี้ จนกระทั่งได้ระดับความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ

การออกแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระของงานวิจัยนี้ ข้าวเปลือกและลมร้อนควรไหลอย่างคลุกเคล้าด้วยความเร็วสัมพัทธ์ที่สูง ใช้อุณหภูมิลมร้อนที่สูง และมีเวลาการพักข้าวระหว่างการอบแห้ง ทำให้การอบแห้งรวดเร็วและประหยัดพลังงาน โดยที่ข้าวเปลือกยังคงคุณภาพดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน ความเร็ว

ลมร้อน และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ซึ่งมีผลกับระยะเวลาพักข้าว เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางการ
 อบแห้งที่ดี เพื่อให้ได้ข้าวเปลือกหลังการอบแห้งคุณภาพดี (เปอร์เซ็นต์ข้าวตันและค่าดัชนีความขาว)
 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาแบบจำลองการอบแห้ง เพื่อทำนายผลการอบแห้งในช่วงทดลอง ซึ่งช่วยลด
 เวลาและค่าใช้จ่ายการทดลองได้



รูปที่ 1.1 แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระ โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิและความเร็วลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น (ระยะเวลาพักข้าว) ที่มีต่ออัตราการอบแห้ง การใช้พลังงานและคุณภาพข้าวเปลือกที่ได้

1.3.2 วิเคราะห์หาเงื่อนไขหรือแนวทางการอบแห้งที่ดี เพื่อให้ข้าวมีคุณภาพดีและประหยัดพลังงาน เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระ เป็นเครื่องขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ มีขนาดถังบรรจุข้าวเปลือก 15 kg

1.4.2 การทดลองพิจารณาผลของอุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลมร้อน และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่มีต่ออัตราการอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพข้าวเปลือก

1.4.3 การศึกษาคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง พิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและค่าดัชนีความขาว

1.4.4 ใช้ข้าวเก็บเกี่ยวสด ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น มีค่าอยู่ในช่วงการเก็บเกี่ยวจริง 24.0-25.5% w.b.

1.4.5 ความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีค่าประมาณ 14% w.b.

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้จุดที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระ เพื่อให้ข้าวมีคุณภาพดีและประหยัดพลังงาน

1.5.2 ได้แนวทางและข้อมูลในการพัฒนาเครื่องอบแห้งต่อไป

1.5.3 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งประเภทอื่นได้

รายการอ้างอิง

เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2551). ผลของความเร็วอากาศต่ออัตราอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2552). เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ : เงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมต่อคุณภาพข้าวเปลือก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. 4-7 พฤศจิกายน 2552 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

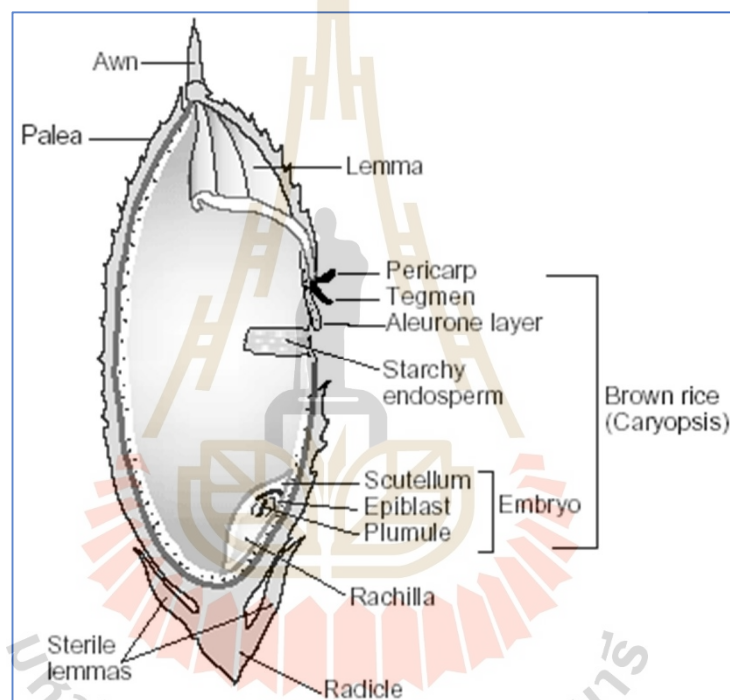


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ส่วนประกอบและโครงสร้างเมล็ดข้าว

โครงสร้างเมล็ดข้าวมีส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเมล็ดข้าว (Kennedy et al., 2002)

1) แกลบ (hull) เป็นเปลือกแข็งหุ้มเมล็ด ห่อหุ้มเมล็ดเอาไว้ภายใน มีประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักข้าวเปลือก ส่วนประกอบหลักคือ เซลลูโลส (cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ประมาณร้อยละ 68 เปลือกแข็งหุ้มเมล็ดมีความสำคัญในการป้องกันเชื้อราและแมลง ช่วยป้องกันการลดลงของความชื้นภายในเมล็ดอย่างฉับพลันในสิ่งแวดล้อม (Marshall and Wadsworth, 1994)

2) เยื่อหุ้มผล (pericarp) เป็นเซลล์รูปแท่งห่อหุ้มรอบเมล็ดหรือส่วนฝวนอกของข้าว กว้าง มีอยู่ด้วยกัน 6 ชั้น

- 3) เปลือกหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seed coat) เป็นผนังเซลล์บางประมาณ 0.5 μm อุดมไปด้วยไขมัน ป้องกันน้ำไม่ให้เข้าเมล็ด
 - 4) ชั้นเชื้อหุ้มเมล็ด (aleurone layer) มีลักษณะเซลล์รูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์และมีนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง มีคุณค่าทางอาหารสูง ประกอบด้วย โปรตีน ไขมัน วิตามิน และมีแป้งเล็กน้อย ผนังเซลล์ประกอบด้วยโปรตีน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส
 - 5) เนื้อเมล็ด หรือ เนื้อข้าว (Endosperm) มีประมาณ 70% ของเมล็ด ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตหรือแป้ง คือ อะมิโลส (Amylose) และอะมิโลเพคติน (Amylopectin) โดยมีโปรตีนเล็กน้อย
 - 6) คัพภะ (germ หรือ embryo) หรือที่เรียกกันว่าจมูกข้าว เป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน อุดมไปด้วยโปรตีน และไขมัน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)
- ข้าวสามารถแบ่งตามความแตกต่างของชนิดแป้งที่รวมอยู่ใน Endosperm โดยแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ข้าวเหนียว และข้าวเจ้า ในเมล็ดข้าวเหนียวประกอบด้วยแป้งชนิดอะไมโลเพคตินเป็นส่วนใหญ่ และมีปริมาณอะมิโลสน้อยมาก (ประมาณ 0-2%) ข้าวเหนียวเมื่อนำไปหุงสุกจะได้ข้าวที่มีเนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่ม สำหรับในเมล็ดข้าวเจ้า ประกอบด้วยแป้งชนิดอะมิโลสประมาณ 15-30%

2.2 ความชื้นในเมล็ด

ความชื้นในเมล็ด จะบ่งบอกถึงปริมาณน้ำในเมล็ดเทียบกับมวลเมล็ด ความชื้นในเมล็ดแบ่งเป็นความชื้นมาตรฐานเปียก และความชื้นมาตรฐานแห้ง ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เนื่องจากมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง คำนวณได้ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$M_w = \frac{(w-d)}{w} \times 100 \quad (2.1)$$

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \quad (2.2)$$

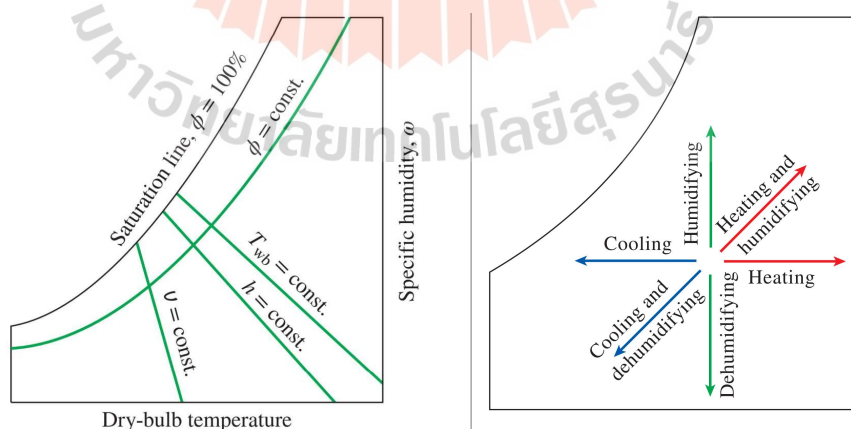
โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, % w.b
 M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, % d.b.
 w คือ มวลวัสดุเปียก, g
 d คือ มวลวัสดุแห้ง, g

ความชื้นเม็ล็ดพันธุ์แบ่งเป็น 3 ชนิดตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำและเม็ล็ดพันธุ์ ดังนี้

- 1) ความชื้นเกาะผิวเม็ล็ดพันธุ์ เป็นความชื้นที่เกินจุดอิ่มตัวของเม็ล็ดที่จะสามารถดูดซับไว้ได้ (เกินกว่า 24% w.b.) จึงระเหยออกไปได้ง่าย
- 2) ความชื้นภายในเม็ล็ด เป็นความชื้นที่เม็ล็ดสามารถดูดซับไว้ภายในได้ จึงระเหยได้ยากกว่า อัตราการระเหยหรืออัตราการคายความชื้นขึ้นอยู่กับระดับความชื้นภายในเม็ล็ด ลักษณะหรือชนิดของเม็ล็ด อุณหภูมิ และปริมาณลมร้อนที่ใช้ในการดูดความชื้น
- 3) ความชื้นซึ่งระเหยออกไม่ได้ เป็นความชื้นในเม็ล็ดซึ่งโมเลกุลของน้ำยึดติดแน่นกับโมเลกุลของแป้ง และโปรตีนซึ่งเป็นส่วนประกอบของเม็ล็ด (ต่ำกว่า 2% w.b.) (ไมตรี แนวพนิช, ม.ป.ป.)

2.3 แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart)

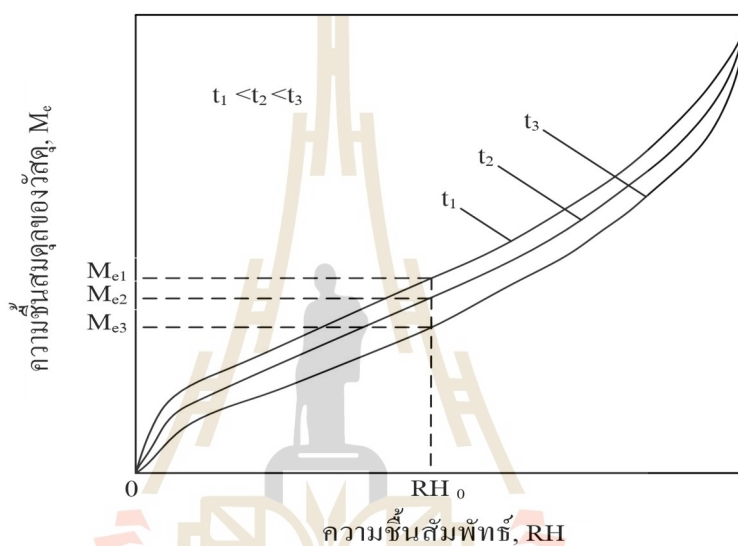
การอบแห้งส่วนใหญ่เป็นแบบพาความร้อน โดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางพาผลความชื้นให้ระเหยออกจากเม็ล็ด ภายในเครื่องอบแห้งลมร้อนจึงมีความชื้นเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิลดลงภายในเครื่องอบแห้ง ดังนั้นการหาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อการออกแบบกระบวนการอบแห้ง จึงต้องอาศัยแผนภูมิไซโครเมตริก แสดงดังรูปที่ 2.2 กรณีการอบแห้งอุณหภูมิกะเปาะเปียก (T_{wb}) จะมิต่ำเท่ากับอุณหภูมิชื้นฟิล์มของน้ำที่ผิวของเม็ล็ดในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ กรณีที่การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการพาความร้อน ไม่มีการนำหรือการแผ่รังสีร้อน



รูปที่ 2.2 แผนภูมิไซโครเมตริก (Yunus et al., 2019)

2.4 ความชื้นสมดุลของเมล็ด

ความชื้นสมดุล หมายถึง ความชื้นในวัสดุที่มีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุล และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิกงที่ค่าหนึ่งเรียกว่า เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอร์ม (equilibrium moisture isotherm) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอร์มแบบคายน้ำ (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, 2557)

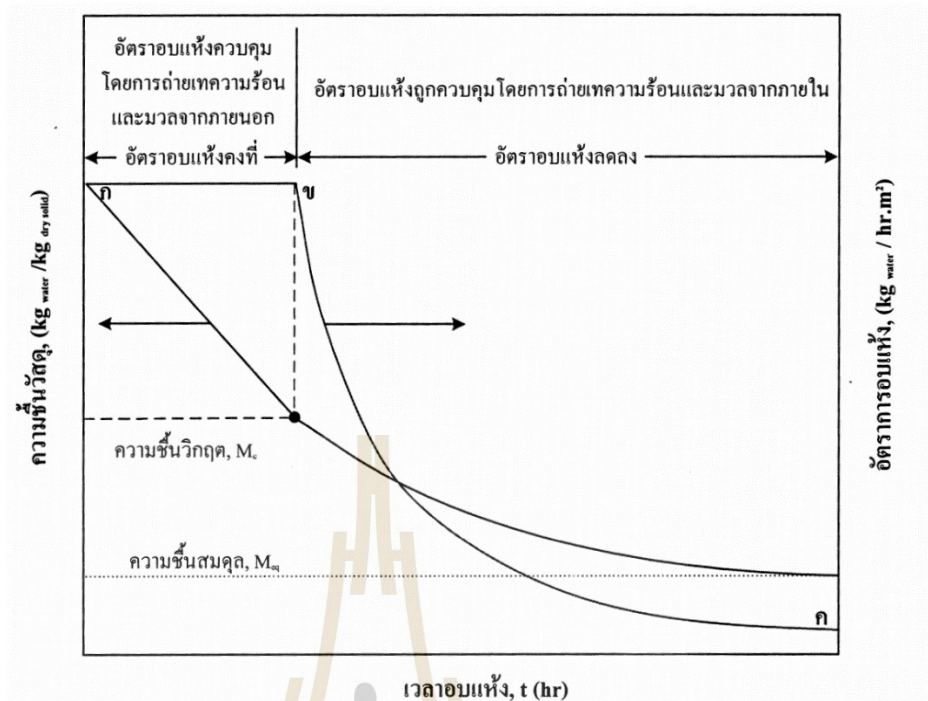
การอบแห้งระดับความชื้นเมล็ดต่ำสุดที่สภาวะอากาศอบแห้งนั้นๆ บอกถึงค่าความชื้นสมดุล การอบแห้งเมล็ดที่มีความชื้นสูงด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิ t_1 และความชื้นสัมพัทธ์ RH_0 พิจารณารูปที่ 2.3 ค่าความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับ M_{e1} เมื่อเมล็ดมีความชื้นลดลงเท่ากับ M_{e1} อากาศอบแห้งเดิมจะไม่สามารถลดความชื้นเมล็ดเพิ่มได้ เนื่องจากเกิดความสมดุลระหว่างความดันไอภายในเมล็ดกับความดันของความชื้นในอากาศอบแห้ง จึงไม่เกิดการถ่ายเทมวลความชื้นขึ้นระหว่างเมล็ดกับอากาศ (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, 2557)

2.5 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Drying Kinetics)

การศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้ง มักถูกนำเสนอในรูปแบบของจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของเมล็ดเทียบกับเวลาการอบแห้งเป็นการอบแห้งที่สภาวะใดสภาวะหนึ่ง ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วอากาศที่สัมผัสกับเมล็ด โดยจลนพลศาสตร์การอบแห้งเป็นการตรวจสอบว่ากระบวนการอบแห้งเมล็ดนั้นมีพฤติกรรมอย่างไร เพื่อจะได้เลือกสภาวะการอบแห้งได้

ในช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นของการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะเป็นการลดลงในรูปเชิงเส้น เมื่อเวลาอบแห้งเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดจะเริ่มลดลงในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นจนความชื้นของเมล็ดไม่เปลี่ยนแปลงที่ค่าความชื้นสมดุล ในรูปที่ 2.4 ลักษณะเส้นความชื้น แบ่งเป็น 2 ช่วงหลักที่สำคัญ คือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (ช่วง กข) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (ช่วง ขค)

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เป็นช่วงที่ผิวของเมล็ดมีน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้อัตราการระเหยของน้ำจากผิวเมล็ดขึ้นอยู่กับความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกเมล็ดอย่างเดียว กล่าวคือ ความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกเมล็ดมีค่าน้อย น้ำจึงระเหยจากผิวเมล็ดได้อย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการอบแห้งจะมีค่าสูง แต่หากความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกเมล็ดมีค่ามาก น้ำจะระเหยจากผิวเมล็ดได้ช้า ทำให้อัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะมีค่าต่ำ โดยค่าความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกเมล็ดนั้นระบุโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร โดยขึ้นอยู่กับค่าความเร็วและทิศทางการไหลของตัวกลางการอบแห้งผ่านเมล็ด ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นี้ อุณหภูมิผิวของเมล็ดจะมีค่าคงที่อยู่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของตัวกลางการอบแห้ง เนื่องจากผิวของเมล็ดมีชั้นฟิล์มน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลา เมื่อความชื้นของเมล็ดลดลงจนถึงค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ค่าความชื้นวิกฤต (M_c) ผิวของเมล็ดจะขาดชั้นฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่มากพอที่จะทำให้เกิดการระเหยของน้ำด้วยอัตราที่เท่ากับอัตราการระเหยของน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ อีกทั้งระยะเวลาที่น้ำต้องเคลื่อนที่จากภายในมายังผิวเมล็ดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยน้ำที่อยู่บริเวณใกล้ผิวเมล็ดเคลื่อนที่ออกไปทดแทนน้ำที่ระเหยจากผิวเมล็ดในช่วงแรกๆ ของการอบแห้งจนหมดแล้ว ทำให้น้ำเคลื่อนที่มาที่ผิวเมล็ดไม่ทันต่อการระเหย อัตราการอบแห้งในช่วงนี้จึงมีค่าลดลง ดังนั้นจึงเรียกช่วงการอบแห้งช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ในช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในเมล็ดเป็นหลัก กระบวนการอบแห้งในช่วงนี้จึงขึ้นอยู่กับทั้งสภาวะในการอบแห้งและชนิดของเมล็ด ท้ายที่สุดความชื้นของเมล็ดก็จะลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล (M_e)



รูปที่ 2.4 การอบแห้งในช่วงอัตรการอบแห้งคงที่และลดลง (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, 2557)

2.6 การอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ โดยการถ่ายโอนความร้อนไปยังเมล็ดที่ชื้น เพื่อขับความชื้นให้ระเหยออก ความร้อนหลักส่วนใหญ่เป็นความร้อนแฝงของการระเหย ผลผลิตทางการเกษตรมักมีความชื้นสูง โดยเฉพาะข้าวหลังการเก็บเกี่ยวจำเป็นต้องลดความชื้นลง โดยการอบแห้ง เพื่อเก็บรักษานานขึ้น การอบแห้งที่เหมาะสมช่วยให้เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดสูงขึ้น มีการแตกหักที่น้อย ทำให้เพิ่มรายได้กับเกษตรกร (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540)

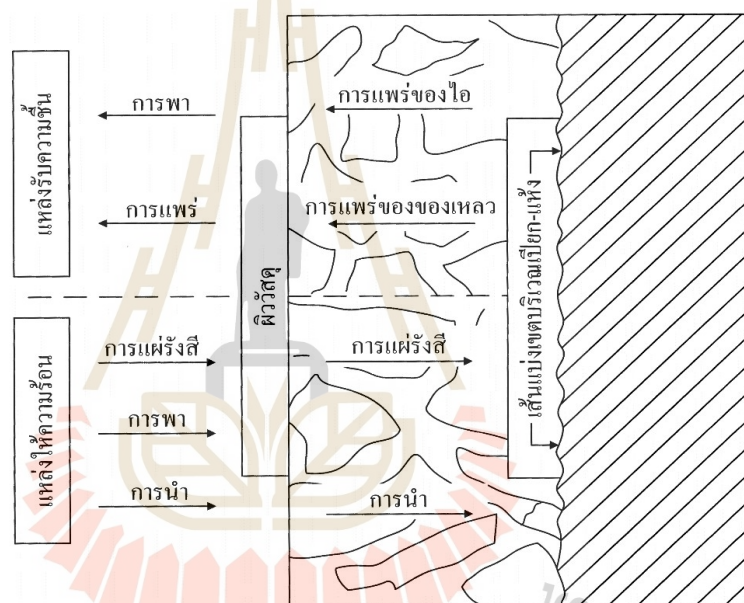
2.6.1 หลักการพื้นฐานของการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการซับซ้อน มีการเปลี่ยนแปลงของความร้อนและมวลน้ำไปตามเวลาที่ใช้ออบแห้ง การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของเมล็ด อาทิ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี ทางชีวเคมี ล้วนกระทบต่อคุณภาพของเมล็ด รวมถึงกระทบต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมล็ดอาจเกิดการหดตัว การพองตัว การเปลี่ยนแปลงทางเคมี อาจมีการเปลี่ยนสี เนื้อสัมผัส กลิ่นรสและคุณภาพอื่นๆ ของเมล็ด เป็นต้น

2.6.2 พื้นฐานการอบแห้งวัสดุ

ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่เป็นแบบพาความร้อน (convective dryers) อาศัยลมร้อนเป็นตัวกลางถ่ายเทมวล (ความชื้นในเมล็ด) โดยกระแสลมร้อนจะไหลผ่านผิวเมล็ด

ของเหลวที่อยู่ภายในเมล็ดจะเคลื่อนที่ออกมายังผิวด้วยกลไกต่างๆ เช่น กลไกการแพร่ของไอ กลไกการแพร่แบบ Knudsen และกลไกการแพร่ของของเหลว เป็นต้น จากนั้นมวลน้ำจะเคลื่อนที่จากผิวเมล็ดไปยังกระแสมร้อน โดยการพา ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างของความชื้น รวมถึงความดันไอที่แตกต่างระหว่างไอน้ำในเมล็ดกับลมร้อน (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) รูปที่ 2.5 แสดงกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการอบแห้ง โดยบริเวณชั้นในเมล็ดคือบริเวณที่เมล็ดยังคงมีความชื้นสูงและอีกบริเวณหนึ่งที่เมล็ดมีความชื้นต่ำ โดยโครงสร้างของเมล็ดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังกล่าวนี้ก็จะส่งผลต่อกลไกเคลื่อนที่ของความชื้นในเมล็ดด้วย (สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)



รูปที่ 2.5 กลไกถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างการอบแห้ง (ที่มา: สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

2.7 พื้นฐานการถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้ง

2.7.1 หลักการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน เกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยความร้อนจะเคลื่อนจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงไปยังตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำ ความแตกต่างของความชันอุณหภูมิผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน กลไกหลักในการถ่ายโอนความร้อนคือ การนำความร้อนและการพาความร้อน

สำหรับการนำความร้อน คือการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอนุภาคของสารที่อยู่ใกล้เคียงจากผลของอันตรกิริยาระหว่างกัน เกิดขึ้นได้ทั้งในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การนำความร้อนในสถานะก๊าซหรือของเหลว เกิดจากการชนกันและการแพร่ระหว่างโมเลกุล อัตราการถ่ายโอนความร้อนเป็นไปตามกฎการนำของฟูเรียร์ ดังสมการนี้

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

โดยที่	q_{cond}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
	$\frac{dT}{dx}$	คือ gradient ของอุณหภูมิ, °C/m
	k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/(m °C)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัด, m ²

การพาความร้อน คือการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของแข็งไปยังของเหลวหรือก๊าซที่กำลังเคลื่อนที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหล การพาความร้อนแบ่งได้เป็น การพาความร้อนแบบถูกบังคับ (force convection) เมื่อมีการบังคับของไหลให้ไหลผ่านจากแรงภายนอก และการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) ด้วยแรงลอยตัวของของไหลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของของไหลต่างกัน อัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนแสดงได้ดังสมการที่เรียกว่ากฎการทำให้เย็นของนิวตัน ดังนี้

$$q_{conv} = h' A_s (T_s - T_\infty) \quad (2.4)$$

โดยที่	q_{conv}	คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนออกจากวัสดุ, W
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิววัสดุ, °C
	T_∞	คือ อุณหภูมิของของไหล, °C
	A_s	คือ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเมล็ดของแข็ง และของไหล, m ²
	h'	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/(m ² °C)

สำหรับการอบแห้งโดยการถ่ายโอนความร้อนผ่านชั้นซิดผิว เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล การแผ่รังสีความร้อนจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้น

เกิดจากการพาของกระแสการไหลจะมีค่าเท่ากับการนำความร้อนที่ผิวของแข็ง เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ด D_p จักรูปใหม่จะได้ดังนี้

$$Nu = \frac{h'D_p}{k} = -\frac{D_p}{(T_s - T_\infty)} \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

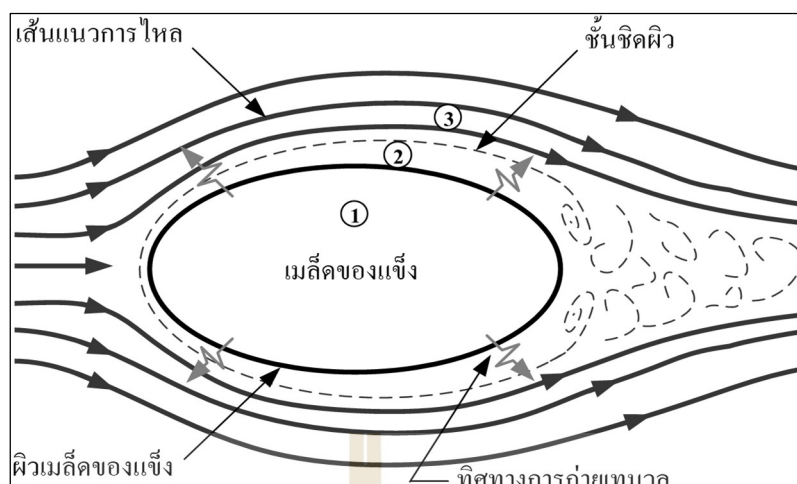
ตัวเลขนัสเซิลต์ (Nu) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการพาความร้อนผ่านชั้นของไหลเดียวกันกับการนำความร้อนในเม็ด โดยการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ จะได้ความสัมพันธ์ของเลขที่เป็นฟังก์ชันของเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) และเลขพรันด์เทิล (Prandtl number, Pr) ดังนี้ (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

$$Nu = Nu_0 + aRe^m Pr^n \quad (2.6)$$

โดยที่ Nu_0 คือ ค่าเลขนัสเซิลต์จากการถ่ายโอนด้วยการนำ
 a, m, n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง

2.7.2 การถ่ายโอนมวลสำหรับการอบแห้ง

สำหรับการถ่ายโอนมวลวัสดุหลักการเช่นเดียวกับการถ่ายโอนความร้อน ปริมาณการถ่ายโอนมวลจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร จากตำแหน่งที่มีมวลและความเข้มข้นมากกว่าแพร่กระจายไปสู่ตำแหน่งที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า โดยของไหลที่ผ่านบริเวณเม็ดที่เรียกว่าชั้นซิดผิว ที่ขึ้นกับความเร็วของตัวกลาง การถ่ายโอนมวลสารขึ้นกับอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุล เป็นการพาแบบบังคับ แสดงดังรูปที่ 2.6 การถ่ายโอนมวลออกจากเม็ด โดยความเข้มข้นของสารในกระแสของไหลต้องต่ำกว่าที่ขอบชั้นซิดผิว ความเข้มข้นที่ผิวเม็ดต้องต่ำกว่าชั้นซิดผิว



รูปที่ 2.6 การถ่ายโอนมวลออกจากเมล็ด (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, 2557)

สำหรับอัตราการแพร่มวลที่ผิวเมล็ดแบบการพังกระจาย ดังแสดงได้จากกฎของฟิคส์จากสมการ (2.7) นี้

$$N_A = -D_{AB} A_s \frac{dC_A}{dx} \quad (2.7)$$

โดยที่ N_A คือ ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท, kg/s
 D_{AB} คือ สัมประสิทธิ์การพังกระจาย, m^2/s
 $\frac{dC_A}{dx}$ คือ ความชันความเข้มข้นของมวลสาร A ต่อหนึ่งปริมาตร, $kg/(m^3 m)$
 A_s คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างเมล็ดของแข็ง และของไหล, m^2

การถ่ายโอนมวลสารแบบการพาผ่านชั้นขีดผิวของเมล็ดสู่กระแสของไหล ความสัมพันธ์เช่นเดียวกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน ดังนี้

$$N_A = h'_D A_s (C_{AS} - C_A) \quad (2.8)$$

โดยที่ N_A คือ ปริมาณของมวลสาร A ที่ถ่ายเท, kg/s
 h'_D คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, $kg/(m^2 s)$

- C_{AS} คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิมตัว
 C_A คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A
 A_s คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างเมล็ดของแข็ง และของไหล, m^2
 h' คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

เมื่อระบบมีสถานะสมดุลปริมาณมวลสารการแพร่เท่ากับการพา เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดจะได้ว่า

$$Sh = \frac{h'_D D_p}{D_{AB}} = - \frac{D_p}{(C_{AS} - C_A)} \frac{dC_A}{dx} \quad (2.9)$$

เลขเชอร์วูด (Sh) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการฟุ้งกระจายที่ผิวของเมล็ดกับการถ่ายโอนมวลด้วยการพาในกระแสนิ่งของไหล ค่าความเข้มข้นของสาร A ในกระแสนิ่งของไหลขึ้นกับขนาดการไหลและคุณสมบัติทางกายภาพของระบบ สามารถจัดให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติตามความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ และเลขชมิตต์ (Schmidt number, Sc) ดังนี้ (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540)

$$Sh = Sh_0 + a Re^m Sc^n \quad (2.10)$$

โดยที่ Sh_0 คือ ค่าเลขเชอร์วูดจากการถ่ายโอนแบบฟุ้งกระจาย
 a, m, n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง

2.8 การพักในที่อับอากาศ (Tempering)

การพักในที่อับอากาศ เป็นขั้นตอนต่อจากกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ใช้ระยะเวลาหนึ่ง โดยการนำข้าวเปลือกมาพักทันทีในที่ปิดอับอากาศ เพื่อให้ความชื้นกระจายสม่ำเสมอทั่วเมล็ด โดยให้อุณหภูมิข้าวเปลือกหลังจากเครื่องอบแห้งเท่าเดิมตลอดระยะเวลาพัก

การอบแห้งมักใช้ความร้อนเพื่อให้ความชื้นที่ผิวเมล็ดระเหยออก ทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นระหว่างภายในเมล็ดกับผิวเมล็ดขึ้น หรือเรียกว่าความชื้นความชื้นภายในเมล็ด ดังนั้นการพักในที่อับอากาศ จะทำให้เมล็ดมีระยะเวลาในการแพร่กระจายความชื้นจากภายในเมล็ดมาสู่ที่ผิว ทำให้ลดความแตกต่างของความชื้น เพื่อง่ายต่อการใช้ลมเป่าความชื้นได้ นอกจากนี้ยังส่งผลให้

ขนาดความเค้นลดลง ทำให้ลดการแตกร้าวภายในเมล็ด การพักในที่อับอากาศ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน และยังช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งภายหลังการทำการพักในที่อับอากาศได้ (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ และคณะ, 2541)

2.9 วิธีการหาค่าความชื้น

การหาค่าความชื้นของเมล็ดสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีประกอบด้วย การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง และการหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม

2.9.1 การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง นิยมใช้เป็นแบบตู้อบ โดยมีความเที่ยงตรงสูงแต่ใช้ระยะเวลานาน หาได้ดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักข้าวที่ต้องการหาค่าความชื้นจะได้มวลข้าวเปียก
- 2) นำข้าวไปอบในตู้อบเพื่อให้ไอน้ำในเมล็ดระเหยออกไปจนหมด
- 3) ข้าวที่อบเสร็จแล้ว นำเข้าในตู้ดูดความชื้นเพื่อให้เย็นตัวลง
- 4) ชั่งอีกครั้ง เพื่อหาน้ำหนักของเมล็ดแห้ง
- 5) คำนวณหาค่าความชื้น

สำหรับการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก มีมาตรฐานแตกต่างกันไปแล้วแต่กำหนด โดยจะกล่าวถึงการใช้นิยามมาตรฐานของ American Association of Cereal Chemists, AACC สำหรับการหาค่าความชื้นแบบไม่มีการบดละเอียด (ใช้ทั้งเมล็ดข้าวเปลือก) อุณหภูมิความร้อนที่ใช้คือ 103°C เป็นระยะเวลา 72 h (AACC, 1995)

2.9.2 การหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นการหาค่าความชื้นโดยใช้ความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งทำให้มีความสะดวกและรวดเร็วมาก แต่ความถูกต้องอาจไม่แม่นยำเพราะปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป เช่น อุณหภูมิและช่องว่างของการบรรจุ

2.10 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reactions)

รัชนี ตัณตะพานิชกุล (2535) ได้กล่าวถึงการทำให้สีของวัสดุมีสีน้ำตาล มักเกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งวัสดุ เกิดจากปฏิกิริยาที่มีเอ็นไซม์เกี่ยวข้องและเกิดจากปฏิกิริยาที่ไม่มีเอ็นไซม์เกี่ยวข้อง

2.10.1 ปฏิบัติการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอ็นไซม์เกี่ยวข้อง

ทำให้ผลไม้และผักมีรอยดำหรือเสียหาย เช่น โรคเกิดจากรอยปอก รอยชำ และ แขนง เนื้อเยื่อที่มีดำหนิ ทำให้เกิดปฏิกิริยาของสารประกอบโมโนฟีนอลที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสกับ ออกซิเจนในอากาศ จะเกิดเป็นสีน้ำตาล

2.10.2 ปฏิบัติการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอ็นไซม์เกี่ยวข้อง

1) ปฏิบัติการคาราเมลไลเซชัน (caramelization) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดเมื่อไม่มี สารประกอบไนโตรเจนอยู่ โดยการใช้ความร้อนสลายโมเลกุลของน้ำตาลให้แยกออก เมื่อได้รับความร้อนสูง

2) ปฏิบัติการเมลลาร์ด (maillard reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดเมื่อมี สารประกอบไนโตรเจนอยู่ เมื่อได้รับความร้อนสูงมากเกินไป เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจาก Carbonyl group ของน้ำตาลทำปฏิกิริยากับ Amino compound

2.11 การวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าว

การวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าว ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ข้าวตันและสมบัติด้านแสงสี ดังต่อไปนี้

2.11.1 เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน

เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน เป็นคุณภาพทางลักษณะกายภาพที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ การกำหนดราคาข้าว ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกคุณภาพการขัดสีหลังอบแห้ง โดยสังเกตจากเปอร์เซ็นต์ข้าว ตัน ซึ่งเป็นข้าวที่มีขนาดความยาว 8 ใน 10 ส่วนขึ้นไป ข้าวที่มีคุณภาพดี เป็นข้าวที่หลังขัดสีแล้วได้ ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดรวมถึงข้าวตันสูง นั่นคือมีปริมาณข้าวหักน้อย การขัดสีข้าวเริ่มจากการกะเทาะ เปลือก จะได้แกลบและข้าวกล้อง จากนั้นนำไปขัดขาวเพื่อให้เยื่อหุ้มต่างๆ หลุดออก จะได้รำและ ข้าวสาร โดยการขัดสีข้าวจะได้แกลบในช่วงร้อยละ 20-30 รำร้อยละ 8-11 และข้าวสารรวมประมาณ ร้อยละ 66-72 ของข้าวเปลือก (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) จากนั้นข้าวสารที่ได้จากการขัดขาวจะถูก นำไปคัดแยก เพื่อแยกข้าวหักหรือปลายข้าวออกจากข้าวเต็มเมล็ดรวมถึงข้าวตัน

2.11.2 สมบัติด้านแสงสี

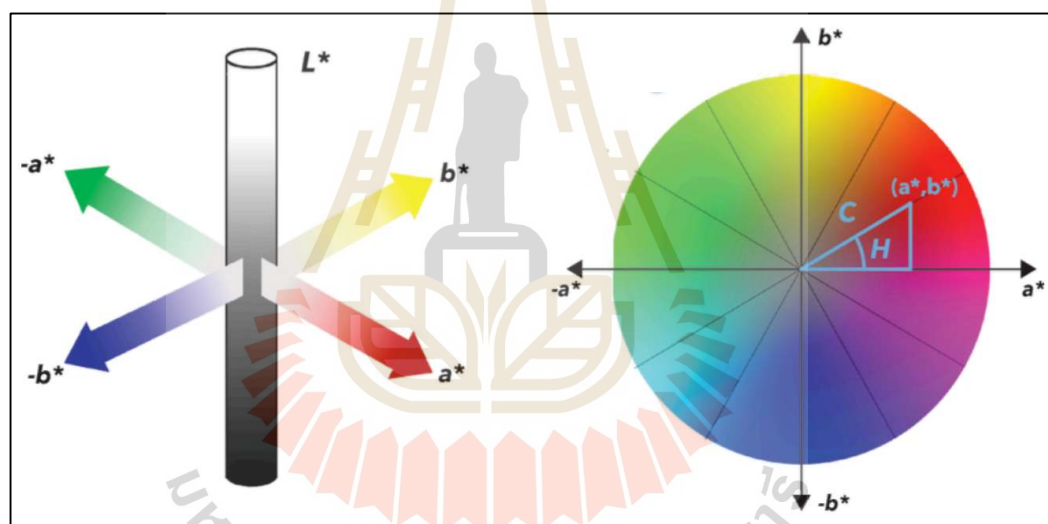
สีเป็นสมบัติที่แสดงถึงคุณภาพของอาหารที่สำคัญต่อผู้บริโภค สีที่มนุษย์มองเห็น อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380-770 nm โดยมนุษย์สามารถแยกแยะสีได้หลากหลาย แต่ไม่สามารถ จดจำ อธิบายค่าสีที่เห็นให้เข้าใจตรงกันได้ เพื่อให้เข้าใจตรงกันอย่างถูกต้องและเที่ยงตรง จึงต้องใช้ เครื่องมือวัดค่าสี ซึ่งได้ค่าออกมาในเชิงปริมาณ

ระบบการวัดสีมักนิยมใช้ 3 ระบบ คือ ระบบ Munsell ระบบ CIE และระบบ Hunter ซึ่งจะกล่าวถึงเฉพาะระบบ CIE โดยบอกค่าสีเป็น L^* , a^* และ b^* เครื่องมือวัดสีและสเปกโตรมิเตอร์ (spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunterlab รุ่น ColorFex โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงกลางวัน D65 มุมฐานการวัดกล้อง 10 องศา (D65/10°)

โดย L^* ใช้กำหนดค่าความสว่าง โดยที่ $L^* = 0$ ความสว่างจะมีค่ามืดที่สุด และเมื่อ $L^* = 100$ ความสว่างจะมีค่าสว่างที่สุด

a^* ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว โดยที่ a^* อยู่ฝั่งทาง + แสดงความเป็นสีแดง และเมื่อ a^* เป็น - เป็นการแสดงความเป็นสีเขียว

b^* ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน เมื่อ b^* อยู่ฝั่งทาง + แสดงความเป็นสีเหลือง และเมื่อ b^* เป็น - เป็นการแสดงความเป็นสีน้ำเงิน



รูปที่ 2.7 แผนภาพสีระบบ CIE (Delazio et al., 2017)

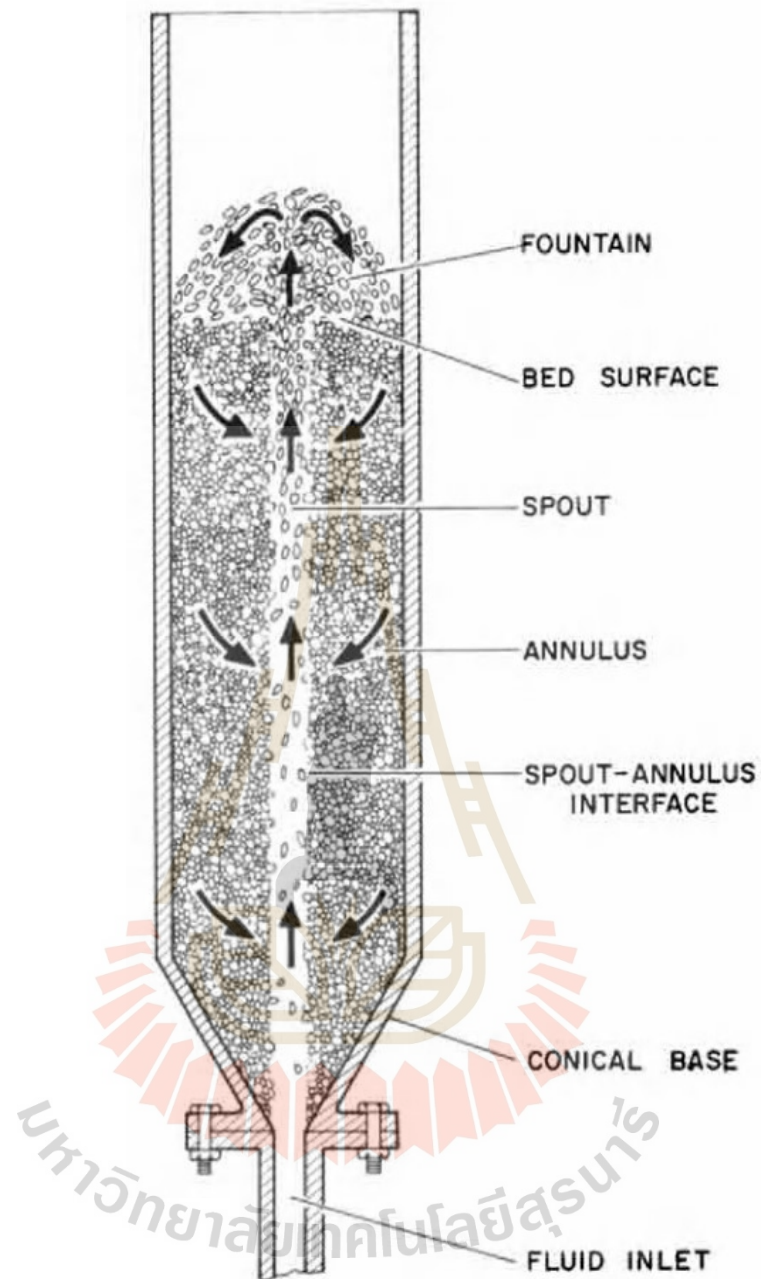
มาตรฐานการกำหนดคุณภาพสีของเมล็ดข้าว จะใช้วัดค่าดัชนีความขาว (Whiteness Index: WI) จากความสัมพันธ์ของ L^* , a^* และ b^* แสดงดังสมการที่ 2.11 (Jaiboon et al., 2009)

$$WI = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{0.5} \quad (2.11)$$

2.12 เครื่องอบแห้งแบบเป่าฟัน (Spouted bed dryer)

การพัฒนาเทคนิคการเป่าฟันได้เริ่มต้นมาจากการทดลองอบแห้งข้าวสาลีด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดโดย Gishler and Muthur ทำให้ได้ระบบใหม่ที่เหมาะกับการอบแห้งสำหรับอนุภาคประเภท เจลดาร์ทดี (Geldart's type D Particles) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ มีความหนาแน่นสูง นอกจากนี้ยังใช้ได้กับอนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นเรขาคณิต ดังนั้นอนุภาคชนิดนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับระบบฟลูอิดไรซ์ ตัวอย่างของอนุภาคชนิดนี้ได้แก่ เมล็ดข้าวโพด ข้าว ข้าวสาลี เป็นต้น รวมถึงพลังงานที่ใช้ยังต่ำกว่าในกรณีของฟลูอิดไรซ์เบด ทำให้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการเป่าฟันในงานชนิดต่างๆ เช่น การเคลือบเม็ดยา การอุ่นถ่านหิน การผสม การย่อยขนาดแร่เหล็ก การอบหินน้ำมัน และการทำน้ำมันปิโตรเลียมให้แตกตัวด้วยความร้อน รวมถึงการประยุกต์เป็นเครื่องอบแห้งเพื่อใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารหลายๆ ชนิด เช่น การอบแห้งข้าวเปลือก ข้าวบาร์เลย์ และการถั่วกาแฟ รวมทั้งการอบแห้งผลิตภัณฑ์ขั้นหัตถ์ให้เป็นผงโดยการเคลือบผิวอนุภาคเนื้อเยื่อ เช่น น้ำแป้ง และเกลือสัตว์ เนื่องจากการหมุนเวียนของอนุภาค ที่เป็นระเบียบและสม่ำเสมอภายในเบดทำให้การกระจายความร้อนและอุณหภูมิภายในเบดสม่ำเสมอ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูง รวมทั้งสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงโดยไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหาย เพราะระยะเวลาที่อยู่ในบริเวณสเปาท์สั้น

เครื่องเป่าฟันโดยทั่วไป (conventional spouted bed) ถังอบแห้งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหรือถังทรงกระบอกที่ก้นถังเป็นรูปกรวย มีช่องลมร้อนไหลผ่านที่ฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยส่วนหลักแบ่งย่อยได้ 3 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่เรียกว่า เป่าฟัน (spout region) และส่วนแอนนูลัส (annulus region) เป็นส่วนที่วัสดุของตัวมีการไหลเวียนช้า ในส่วนเป่าฟันเมื่ออนุภาคหรือเมล็ดไหลขึ้นตามกระแสลมเป่า ด้วยความเร็วค่าหนึ่งวัสดุจะทะลุผ่านชั้นผิวหน้าพุ่งขึ้นและบานตัวออกเรียกว่าส่วนน้ำพุ (fountain) ทำให้ความเร็วอนุภาคลดลงจนต่ำกว่าความเร็วปลาย อนุภาคของแข็งจึงเกิดการแยกตัวออกจากกระแสลม แล้วตกลงสู่ส่วนแอนนูลัส ทำให้เกิดการเคลื่อนที่หมุนวนอย่างเป็นระบบ



รูปที่ 2.8 ภาพโครงสร้างเครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไป (Madhiyanon, 2001b)

เครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไปมีข้อดีข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ประโยชน์และข้อจำกัด
เครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไป (Mujumdar and Suvachittanont, 2000)

ตารางที่ 2.1 ประโยชน์และข้อจำกัดเครื่องเป่าพ่นโดยทั่วไป (Mujumdar and Suvachittanont, 2000)

ประโยชน์	ข้อจำกัด
<ul style="list-style-type: none"> - สามารถขนถ่ายอนุภาคหยาบได้ ($D_p > 1 \text{ mm}$) - รูปแบบการไหลของลมและอนุภาคสามารถทำนายและทำซ้ำได้ - อนุภาคเคลื่อนที่ตลอดเวลาและเป็นวัฏจักร - การผสมกลับน้อย - ความดันลดลงน้อยกว่าเทคนิคฟลูอิดไอซ์เบด - การแยกขนาดของอนุภาคลดลง - ลมใช้เวลาไหลในระบบสั้น - การสร้างและซ่อมบำรุงง่าย ไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นส่วนทางกล - ค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ - ใช้พื้นที่น้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราการไหลอากาศถูกควบคุมด้วยข้อจำกัดของการเป่าพ่นมากกว่าเพื่อการถ่ายเทมวลและความร้อน หรือปฏิกิริยาเคมี - อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างกองอนุภาคกับผนังต่ำ - ความดันลดลงในช่วงเริ่มต้นการเป่าพ่น - ส่วนแอนนูลัสสัมผัสผสมน้อย - ข้อจำกัดของขนาดถังและความสูงของกองอนุภาคที่สามารถเป่าพ่นได้ - ขยายขนาดยาก เนื่องจากใช้พลังงานพัดลมสูงในช่วงแรก และข้อจำกัดของอัตราส่วนขนาดท่อทางเข้าและขนาดถัง

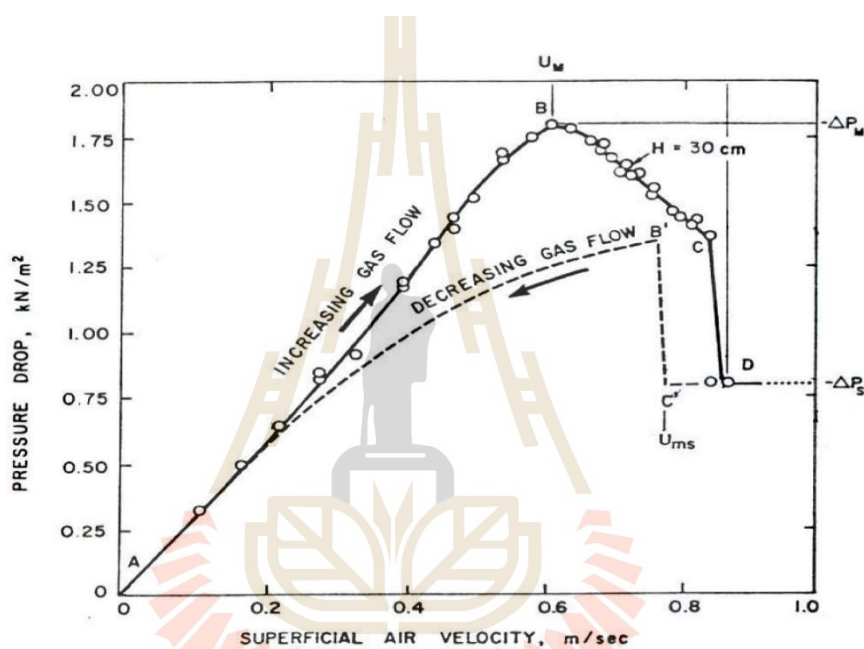
คุณลักษณะทางการไหลของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น เป็นการแสดงถึงความสามารถของไหลที่เป็นตัวกลางในการเป่าพ่น ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงอนุภาคจากหนึ่งอยู่กับที่จนเพิ่มความเร็วเกิดเป็นลักษณะการเป่าพ่น คุณลักษณะทางการไหลจะแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบดกับความเร็วอากาศขาเข้าเบด ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและการเดินเครื่องอบแห้ง

2.12.1 การเกิดความเร็วต่ำสุดของการเป่าพ่น

เริ่มจากการปล่อยลมเข้าระบบผ่านช่องทางเข้า โดยเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงแรกผิวหน้าเบดยังคงอยู่นิ่ง แต่ความดันตกคร่อมเบดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมให้มีความสูงขึ้นไป ความสัมพันธ์ของทั้งคู่ในช่วงนี้จะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงเส้น AB ดังแสดงในรูปที่ 2.9 สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบดที่จุด B เป็นค่าความดันตกคร่อมที่มากที่สุด ซึ่งเรียกได้ว่า ความดันตกคร่อมเบดสูงสุด (maximum pressure drop) หลังจากจุด B ความดันจะลดลง (เส้น BC) เนื่องจากเกิดเป็นช่องเป่าพ่นขึ้นเล็กน้อยที่ด้านล่าง เมื่อเพิ่มความเร็วลม ความสูงของลำเป่าพ่นจะเพิ่มขึ้น ความดันตกคร่อมเบดจะลดต่ำลงจนถึงจุด D ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มเกิดลำเป่าพ่น

ออกมาให้เห็น ค่าความดันตกคร่อมเบดที่จุดนี้เรียกว่า ความดันตกคร่อมเบดขณะที่เบดมีเสถียรภาพ (steady spouting pressure drop, Δp) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหลังจากนี้

ถัดมาเมื่อลดความเร็วลม ค่าความดันตกคร่อมเบดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเส้น C'B' ค่าความเร็วลม ณ จุด C' นี้ ก็คือค่าความเร็วลมต่ำสุดในการเกิดการเป่าฟั่น (minimum spouting velocity, U_{ms}) หลังจากนั้น จะไม่เกิดการเป่าฟั่นที่จุด B' เพราะว่าจะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของการเป่าฟั่นได้นั่นเองและเมื่อลดความเร็วลมจนกระทั่งเป็นศูนย์ค่าความดันตกคร่อมเบดจะมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบดและความเร็วอากาศเข้าเบด (คัดแปลงจาก Mathur and Epstein, 1978)

ค่าความเร็วลมต่ำสุดในการเกิดการเป่าฟั่น หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$U_{ms} = \left(\frac{D_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3} \left[2gH_b (\rho_p - \rho) / \rho \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

โดยที่ D_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค, m

D_c คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง, m

D_i	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางเข้า, m
H_b	คือ ความสูงของเบด, m
ρ_p	คือ ความหนาแน่นวัสดุ, kg/m ³
ρ	คือ ความหนาแน่นอากาศ, kg/m ³
g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s ²

2.13 การจำลองทางคณิตศาสตร์

การจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง ตลอดจนสามารถให้ข้อมูลบางประเภทได้ ซึ่งอาจวัดค่าได้ยากหรืออาจจะไม่สามารถวัดได้เลย เช่น การกระจายความชื้นภายในเมล็ด เป็นต้น การจำลองทางคณิตศาสตร์จะช่วยให้ได้ข้อมูลที่หลากหลาย ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งเมล็ด การจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง โดยแบบจำลองใช้จำลองการถ่ายโอนความร้อน (การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) และมวลสาร (การเปลี่ยนแปลงความชื้น) ของข้าวเปลือก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจำลองการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารระหว่างการอบแห้ง Lewis และ Sherwood การจำลองการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารในเมล็ด โดย Sherwood ได้แบ่งกลไกการถ่ายโอนความชื้นระหว่างการอบแห้งออกเป็น 3 แบบ (สัทกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555) ดังนี้

- 1) น้ำ (ความชื้น) เกิดการระเหยที่บริเวณผิวของเมล็ดและความต้านทานในการถ่ายโอนมวลสารภายในเมล็ดมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับความต้านทานในการถ่ายโอนมวลสารจากผิวเมล็ดไปสู่สิ่งแวดล้อม
- 2) น้ำเกิดการระเหยที่บริเวณผิวของเมล็ดและความต้านทานในการถ่ายโอนมวลสารภายในเมล็ดมีค่าสูง เมื่อเทียบกับความต้านทานในการถ่ายโอนมวลสารจากผิวเมล็ดไปสู่สิ่งแวดล้อม
- 3) น้ำเกิดการระเหยภายในเมล็ดและความต้านทานในการถ่ายโอนมวลสารภายในเมล็ดมีค่าสูง เมื่อเทียบกับความต้านทานในการถ่ายโอนมวลสารทั้งหมด

การถ่ายโอนมวลสารในช่วงแรกข้าวเปลือกยังมีความชื้นจะเป็นไปตามกลไกแบบที่ 1 ซึ่งก็คือการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อความชื้นของเมล็ดลดลงต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต กลไกการถ่ายโอนมวลสารจะเปลี่ยนไป โดยอาจเป็นไปตามกลไกที่ 2 หรือกลไกที่ 3 ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่น้ำจะระเหยจากผิวเมล็ดได้อย่างอิสระ โดยไม่มีอิทธิพลของเมล็ดเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงสามารถคำนวณอัตราการอบแห้งหรืออัตราการระเหยน้ำได้ หากทราบสภาวะการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ ความเร็ว ตลอดจนทิศทางไหลของตัวกลางการอบแห้งเมื่อเทียบกับผิวเมล็ด และ

พื้นที่ผิวของเมล็ด และการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อน และไม่มีการสูญเสียความร้อนจากห้องอบแห้งไปสู่สิ่งแวดล้อม ตลอดจนไม่มีการให้ความร้อนกับเมล็ดโดยวิธีอื่นใดนอกจากการพาความร้อน อุณหภูมิผิวเมล็ด ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคำนวณอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ได้ อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง มักต้องอาศัยข้อมูลผลการทดลองประกอบ ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้น สามารถทำได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การพัฒนาแบบจำลองเอมพิริคัล และแบบจำลองเชิงทฤษฎี (สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.14.1 งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น (spouted bed dryer)

ได้มีการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคการเป่าพ่นแบบสองมิติในระดับอุตสาหกรรม ขนาดบรรจุ 310 kg อบแห้งได้ 3500 kg/h มีลักษณะการทำงานที่ต่อเนื่อง ใช้อุณหภูมิลมร้อน 130-160°C โดยมีการใช้อากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ร้อยละ 60-70 โดยได้ข้อสรุปว่าการลดความชื้นข้าวเปลือกจากในช่วง 20.0-30.3% ลดลงถึงช่วง 14-25% d.b. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวอย่างมีนัยสำคัญที่สังเกตได้ทั้งเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและความขาวของข้าวสาร การใช้พลังงานความร้อนต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.1-3.8 MJ/kg_{water evaporated} ยังพบอีกว่าสามารถลดการใช้พลังงานความร้อน โดยการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนข้าวเปลือก (Madhiyanon et al., 2001a)

ต่อมา ได้มีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นแบบสองมิติ Madhiyanon et al. (2001b) ใช้การอบแห้งแบบงวด (batch dryer) โดยเลือกแบบจำลองแบบไม่สมดุลทางความร้อนและความชื้น แบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนเป่าพ่นและส่วนถังพักเป็นวงรอบการอบแห้ง ในแต่ละชั้นบางใช้สมการอนุพันธ์ประกอบด้วย สมดุลมวล สมดุลความร้อน การถ่ายเทความร้อน และอัตราการอบแห้ง ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาคำตอบของผลเฉลยที่อุณหภูมิลมร้อน 130, 140 และ 150°C เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ที่ความชื้นเมล็ด อุณหภูมิอากาศทางออกและอุณหภูมิผสมระหว่างเมล็ดกับอากาศในส่วนถังพัก พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง 1.5%, 10% และ 10% ตามลำดับ

การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกระดับอุตสาหกรรมที่ใช้เทคนิคการเป่าพ่นแบบสองมิติ พรศักดิ์ ทองมา (2542) ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 130-190°C ใช้ปริมาณข้าวเปลือก 190 kg อัตราการไหลอากาศอบแห้ง 0.7 kg/s สัดส่วนอากาศอบแห้งเวียนกลับ 0.62 ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้ง 17 min สามารถลดความชื้นของข้าวลงจาก 30.3 % d.b. เหลือ 21.3% d.b. ในส่วนของคุณภาพข้าว พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันก่อนและหลังการอบแห้งมีค่า 48.2 และ 48%

โดยความขาวของข้าวสารก่อนและหลังการอบแห้ง 46 และ 46.7 ตามลำดับ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในรูปพลังงานปฏิกิริยา 7.5 MJ/kg_{water evaporated}

เทคนิคเป่าพ่นแบบสองมิติถูกนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งข้าวโพด (กษมา เจน วิจิตรสกุล, 2543) ที่ความชื้นเริ่มต้น 38% d.b. อุณหภูมิลมร้อน 130, 140, และ 150°C ปริมาณข้าวโพด 20-30 kg พบว่าอุณหภูมิลมร้อนและปริมาณข้าวโพดมีอิทธิพลสูงต่ออัตราส่วนความชื้น โดยพบว่าสมการอบแห้งชั้นบางของ Lewis มีความเหมาะสมและสะดวกในการทำนายการอบแห้ง ซึ่งได้แนะนำว่าความชื้นสุดท้ายของเมล็ดไม่ควรต่ำกว่า 22% d.b. เพราะจะทำให้เกิดการแตกร้าวมากขึ้น นอกจากนี้จากผลการพัฒนาสมการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับเมล็ดข้าวโพดในช่องเป่าพ่นและสัมประสิทธิ์ผลรวมทั้งห้องอบแห้ง มีค่าอยู่ระหว่าง 83-173 W/m² °C และ 12-13 W/m² °C ตามลำดับ ซึ่งจะสัมพันธ์กับความสูงเบด Reynolds number และ Prandtl number

การศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งเป่าพ่นแบบสองมิติ ใช้ อุณหภูมิลมร้อน 110, 130 และ 150°C โดยปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าถึงพักที่ 0-30% ลักษณะความสัมพัทธ์ของการอบแห้งค่อนข้างอยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น เนื่องจากการพักตัวในถังพัก อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะในการอบแห้งลดลง เมื่อใช้อากาศเวียนกลับมาเพิ่มขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้งเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งและความชื้นเริ่มต้นสูง เนื่องจากเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันบางส่วน ภายในเมล็ดกระบวนการเจลาติไนเซชันของแป้งในข้าวเปลือกจะช่วยเชื่อมรอยร้าวภายในเมล็ดได้ ทำให้เมล็ดแข็งแรงมากขึ้น เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่ได้จึงสูง โดยอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อการเกิดเจล สำหรับข้าวเปลือกคือ 73-86°C และ 24-25% w.b. การรักษาคุณภาพข้าวเปลือกในด้านของเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นให้อยู่ในเกณฑ์ ความชื้นที่ลดลงไม่ควรเกิน 5 และ 8% d.b. สำหรับความชื้นเริ่มต้น 27 และ 35% d.b. ตามลำดับ สำหรับความขาวของข้าวหลังการอบแห้ง พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การใช้พลังงานความร้อนจำเพาะในการอบแห้งค่อนข้างคงที่ในทุกช่วงของความชื้นที่ลดลง โดยมีค่าประมาณ 5.5 MJ/kg_{water evaporated} (ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณฤทธิ, 2546)

Madhiyanon and Soponrommarit (2005) ได้เสนอว่าควรแบ่งการอบแห้งเป็น 2 รอบ โดยมีการพักในที่อับอากาศ (tempering process) ในช่วงอบแห้ง เพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น โดยรอบแรกอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงด้วยอุณหภูมิลมร้อน 130-150°C จนข้าวเปลือกมีความชื้น 24% d.b. ในรอบที่อบแห้งที่สอง ใช้อุณหภูมิลมร้อน 110°C โดยสามารถใช้อากาศไหลเข้าดาวนั้คัมเมอร์ได้ 0-30% จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้น 17-18% d.b. จากนั้นทำการลดอุณหภูมิด้วยอากาศแวดล้อมจนได้ความชื้น 16-17% d.b. โดยมีการเทียบกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด พบว่าในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบ

ฟลูอิดไชน์เบด เมื่ออบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นสูง 30-35% d.b ถึงความชื้นระดับต่ำ และสำหรับความชื้นเริ่มต้น 25% d.b. โดยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นลดความชื้นได้ดีตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นและได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่า แต่ระยะเวลาอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดใช้เวลาอบแห้งสั้นกว่า แต่เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งจำเพาะ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันในทุกช่วงอุณหภูมิลมร้อน

กรณีใช้รูปทรงแบบสามเหลี่ยม มีงานวิจัยที่ศึกษาการอบแห้งของ Nguyen et al. (2001) ที่ศึกษาเครื่องอบแห้งด้วยเทคนิคเป่าพ่นฐานรูปสามเหลี่ยม ขนาดถังบรรจุ 500 kg โดยทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบ่งเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกใช้อุณหภูมิลมร้อน 140-160°C โดยลดความชื้นข้าวเปลือกจนถึงช่วงความชื้น 18.5-20% w.b. ในช่วงที่สองใช้อุณหภูมิลมร้อนที่ 80-100°C เพื่อลดความชื้นข้าวเปลือกถึงช่วงความชื้น 15% w.b. โดยจากการทดลองพบว่าได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่ดี เมื่อในช่วงแรกใช้อุณหภูมิลมร้อน 140 และ 80°C สำหรับช่วงที่สองของการอบแห้ง ขณะที่การใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 160°C ในช่วงแรก ในช่วงที่สอง 80°C จะเห็นการลดลงของเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นอย่างมีนัยสำคัญที่ความชื้นประมาณ 17% w.b. กรณีที่อุณหภูมิลมร้อนช่วงที่สอง 90°C พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเริ่มลดลง ที่ความชื้น 20% w.b. โดยได้แนะนำการอบแห้งข้าวเปลือกมีความชื้นน้อยกว่า 20% w.b. ว่าควรใช้อุณหภูมิลมร้อนที่ต่ำกว่า 80°C

Wachiraphansakul and Devahastin (2007) ศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกากถั่วเหลือง อบแห้งโดยเทคนิคเป่าพ่นร่วมกับอนุภาคเฉื่อยคือ ซิลิกาเจล ซึ่งกากถั่วเหลืองมีความชื้นเริ่มต้น 550 g water/100 g solid หลังการอบแห้งพบว่า กากถั่วเหลืองมีความชื้นเท่ากับ 10 g water/100 g solid โดยพฤติกรรมของการอบแห้งคล้ายกับผลิตภัณฑ์อาหารอื่นๆ กากถั่วเหลืองอบแห้งที่ได้เป็นน้ำตาลอ่อน โดยค่าสีแดงมีค่าสูงกว่าค่าความสว่างและค่าสีเหลือง และเทคนิคนี้สามารถช่วยปรับปรุงจลนพลศาสตร์ในการอบแห้งและคุณภาพของกากถั่วเหลืองอบแห้งได้ เช่น ความสามารถในการคืนรูป และความสามารถในการละลาย เป็นต้น

Evin et al. (2008) ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวสาลีด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นที่รูปทรงฐานต่างกันคือ รูปทรงกรวย รูปครึ่งทรงกลม และรูปทรงพาราโบลา โดยออกแบบปริมาตรบรรจุเท่ากัน และศึกษาผลของกรณีที่ตั้งและไม่ติดตั้งท่อเป่าพ่น ซึ่งมี 2 ลักษณะ คือแบบท่อผนังทึบและแบบท่อผนังมีรูพรุน โดยอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้น 16-18% d.b. อุณหภูมิลมร้อน 80°C ใช้อากาศอัตรา 85 m³/h โดยพบว่าการติดตั้งท่อเป่าพ่น แบบท่อผนังทึบช่วยลดค่าความเร็วต่ำสุดของการเป่าพ่นและค่าความดันลดคร่อมเบดสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ รูปทรงฐานแบบพาราโบลาอบแห้งได้เร็วที่สุด เนื่องจากเหมาะสมต่อการไหลของเมล็ด จึงทำให้เกิดลดการเกิดจุดอับ (dead zone) เวลาอบแห้งจะลดลงมากที่สุดตามกรณีดังนี้ ไม่ติดตั้งท่อเป่าพ่น ติดตั้งท่อแบบผนังมีรูพรุนติดตั้ง และติดตั้งท่อแบบผนังทึบ ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับผลของการแทรกตัวของลมร้อน

Markowski et al. (2010) ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวบาร์เลย์ เพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น โดยใช้อุณหภูมิความร้อน 33-53°C ความเร็ว 30 m/s ใช้น้ำ 3.2 kg ความชื้นเริ่มต้น 17.5% w.b. พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิความร้อนช่วยลดเวลาการอบแห้ง อัตราการอบแห้งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิเมล็ด ไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เมื่อจำลองเมล็ดเป็นรูปทรงกลมและรูปทรงรีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นช่วงอุณหภูมิความร้อน 33-53°C มีค่าในช่วง 1.99×10^{-11} - 5.31×10^{-11} m²/s และ 1.39×10^{-11} - 3.94×10^{-11} m²/s ตามลำดับโดยการจำลองแบบรูปทรงรีที่มีลักษณะใกล้เคียงกับข้าวบาร์เลย์โดยให้ความถูกต้องมากกว่ารูปทรงกลม

2.14.2 งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไชน์เบด

Poomsa-ad et al. (2002) ศึกษาการจำลองความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกหนึ่งเมล็ด โดยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด ใช้อุณหภูมิความร้อน 110-170°C ความเร็ว 2.2 m/s ความหนาชั้นข้าวเปลือก 1.5 cm เวลาอบแห้ง 0-10 min ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 29.5% w.b. โดยอบแห้งเป็น 2 ช่วงและทำการ tempering ระหว่างช่วงการอบแห้ง ผลการทดลองนำไปสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูปแบบสมการ Arrhenius ที่ขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้ง และจำลองความชื้นภายในเมล็ดที่เวลาอบแห้งและเวลา tempering กรณีอื่นๆ ได้ ผลการจำลองแสดงให้เห็นทราบถึงขณะ tempering ความชื้นภายในเมล็ดที่สูงกว่าจะแพร่มาสู่ผิวเมล็ด ทำให้อัตราการอบแห้งในช่วงที่ 2 สูงขึ้น โดยระยะเวลา tempering ที่เหมาะสมขึ้นกับความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก อุณหภูมิความร้อนและระยะเวลาอบแห้ง โดยระยะเวลา tempering ไม่ควรน้อยกว่า 35 min

Poomsa-ad et al. (2005) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิความร้อนในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด ความชื้นข้าวเปลือก และระยะเวลา tempering ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและเวลาทำงานรวม ใช้ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 35, 30 และ 25% d.b. อบแห้งด้วยอุณหภูมิความร้อน 110-170°C ใช้เวลาอบแห้ง 1-4 min ใช้เวลา tempering 0-45 min และใช้การระบายอากาศในกองข้าวด้วยอากาศแวดล้อม โดยได้ผลการจำลองจุดที่เหมาะสมคือ ใช้อุณหภูมิความร้อนสูงสุดเท่ากับ 150°C และความชื้นข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งไม่น้อยกว่า 22.5% d.b. โดยใช้เวลา tempering ไม่ควรน้อยกว่า 25 min

Prachayawarakorn et al. (2005) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในขนาดอุตสาหกรรมด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดและแบบเครื่องอบแห้งแบบพัลส์ฟลูอิดไชน์เบด ผลการทดลองอบแห้งของเครื่องอบแห้งทั้ง 2 ชนิด พบว่ามีอุณหภูมิและความชื้นเมล็ดที่สม่ำเสมอ พลังงานความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน กรณีใช้สัดส่วนอากาศเวียนกลับ 0% และ 70-80% มีค่าพลังงานความร้อนประมาณ 7.2 และ 3-4 MJ/kg_{water evaporated} ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์ข้าวตันและความขาวของ

ข้าวสารก็มีค่าใกล้เคียงกัน โดยแนะนำว่าควรใช้อุณหภูมิความร้อนต่ำกว่า 145°C เมื่อความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ำกว่า 28% d.b. เพื่อคงคุณภาพความขาว

2.14.3 งานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ

เกรียงไกร เพ็ชรน้ำจิว และคณะ (2551) นำเสนอการอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระอย่างต่อเนื่องด้วยการลำเลียงข้าวเปลือกวนกลับด้วยกะพ้อลำเลียง ใช้อุณหภูมิความร้อน 90 และ 120°C ความเร็ว 1, 2, 3 และ 4 m/s ที่ความชื้นเริ่มต้น 26% w.b. อัตราการป้อนข้าวเปลือก 15.37 kg/min พบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมร้อน ทำให้ลดเวลาอบแห้งลง อัตราสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิความร้อน 90°C มีค่า 2.92-6.32 MJ/kg_{water evaporated} และที่ 120°C มีค่า 3.52-6.00 MJ/kg_{water evaporated}

ถัดมา สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2552ก) ได้ศึกษาผลการพักข้าว อุณหภูมิและความเร็วลมร้อนต่อพลังงานที่ใช้ ด้วยอุณหภูมิความร้อน 40, 60, 100, 130 และ 150°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2 และ 3 m/s ระยะเวลาพักข้าวเปลือก 1, 2 และ 4 min พบว่าความเร็วและอุณหภูมิความร้อนที่สูงขึ้นช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ พลังงานรวมจำเพาะที่ใช้อยู่ในช่วง 4.88-24.41 MJ/kg_{water evaporated} โดยค่าพลังงานทุกขุมจำเพาะของเครื่องอบแห้งชนิดนี้มีผลต่อพลังงานรวมจำเพาะมากกว่า ระยะเวลาพักที่ดีที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ มีระยะพัก 4 min

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2552ข) ยังศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและความขาวข้าว พบว่าการพักข้าวเปลือกเป็นเวลา 1-4 min ต่อรอบอบแห้ง ช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นได้สูงถึงประมาณ 55-60% ใกล้เคียงกับข้าวอ้างอิงที่อบแห้งด้วยอากาศแวดล้อมรวมถึงความขาวของข้าวสารด้วย แต่จะได้ผลของเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำหากอบแห้งอย่างต่อเนื่องไม่มีการพัก

2.14.4 งานวิจัยการอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม

ฉัตรชัย นิยมมล (2555) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว กระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งนี้ จะเกิดขึ้นภายในท่อแนวตั้งที่เรียกว่าหอบแห้ง อากาศร้อนที่ใช้จะเป็นตัวกลางในการลดความชื้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงไปพร้อมกับวัสดุที่ต้องการลดความชื้น ส่งผลให้ความชื้นในวัสดุระเหยไปตามกระแสอากาศ โดยกล่าวว่าเป็นหนึ่งในเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการลดความชื้นที่ผิวของวัสดุ ซึ่งรวมถึงข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งดังกล่าวยังสามารถเพิ่มขึ้นได้ จึงทำวิจัยหอบแห้ง

ชนิดท่อเกลียวซึ่งได้ถูกติดตั้งแทนหอบแห้งแบบดั้งเดิม (ท่อเรียบ) เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของอากาศ ซึ่งถูกใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิของอากาศขาเข้า (อุณหภูมิอบแห้ง) ความเร็วของอากาศและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้ง ผลที่ได้ยังถูกนำไปเปรียบเทียบกับกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบ จากการศึกษาพบว่าเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึง 4.4-10.3% d.b. ภายในระยเวลานานน้อยกว่า 5 s โดยความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ได้มีค่า 17.7% d.b. นอกจากนี้ยังพบว่า SEC ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่พัฒนาขึ้นมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ SEC ในกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบในทุกเงื่อนไขการทดลอง งานวิจัยนี้ SEC ต่ำที่สุดมีค่า $1.78 \text{ MJ/kg}_{\text{water evaporated}}$ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวที่อุณหภูมิ 100°C ความเร็วของอากาศ 30 m/s และอัตราการป้อนข้าวเปลือก $150 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$

2.14.5 งานวิจัยการอบแห้งข้าวเปลือกอื่น ๆ

Dong et al. (2009) ศึกษาการอบแห้งและการทำ tempering ด้วยแบบจำลองการอบแห้งรูปทรงกลมกับข้าวเปลือกพันธุ์เมล็ดยาวและพันธุ์เมล็ดสั้น โดยใช้อุณหภูมิร้อน 30, 40 และ 50°C เวลาอบแห้ง 60 min ใช้อุณหภูมิ tempering 30, 40 และ 50°C เป็นเวลา 0-300 min ตามเงื่อนไขการจำลอง ผลการจำลองพบว่าในช่วง tempering ความชื้นจะแพร่จากกึ่งกลางไปยังผิวเมล็ดเนื่องจากผลของความชื้นความชื้น และเมื่อจำลองการอบแห้งผ่านการ tempering พบว่าความชื้นในชั้นของเมล็ดจะลดลง ในขณะที่ข้าวที่ไม่ทำ tempering ความชื้นที่ชั้นด้านนอกของเมล็ดจะลดลงเล็กน้อย ทำให้อัตราการอบแห้งต่ำลง และพบว่าการทำ tempering ช่วยประหยัดพลังงานและลดเปอร์เซ็นต์รอยร้าวได้ สอดคล้องกับความชื้นความชื้นที่ลดลงตามผลการจำลอง

รายการอ้างอิง

- กษมา เจนวิจิตรสกุล (2543). การอบแห้งข้าวโพดโดยเทคนิคสเปาตัดเบดสองมิติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2551). ผลของความเร็วอากาศต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- ฉัตรชัย นิยมผล (2555). ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว. วารสาร มข. 17(1): 97-109.
- ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณธฤทธิ์ (2546). การอบแห้งเมล็ดพืชที่อุณหภูมิสูงโดยเทคนิคสเปาตัดเบดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ได้. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17. 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี.
- พรศักดิ์ ทองมา (2542). การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาตัดเบดขนาดอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ไมตรี แนวพนิช (ม.ป.ป.). หลักการลดความชื้นเมล็ดพืช. กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- รัชณี ดัชนีพานิชกุล (2542). เคมี่อาหาร. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- สมชาติ โสภณธฤทธิ์ (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ โสภณธฤทธิ์, อติเทพ ทวีรัตนพานิชย์, สมบูรณ์ เวชกามา, งามชื่น คงเสรี และ สุนันทา วงศ์ปิยชน (2541). ผลพลอยได้จากการอบข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิโดเซชัน. วารสารราชบัณฑิตยสถาน สำนักวิทยาศาสตร์. 24(2): 49-64.
- ศักดิ์มน เทพหัสดิน ณ อยุธยา (2555). การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ : ท้อป.

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2552ก). ผลของระยะพัก อุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ. **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5**. 29 เมษายน- 1 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์.

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2552ข). เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ : เงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมต่อคุณภาพข้าวเปลือก. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23**. 4-7 พฤศจิกายน 2552 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ (2557). การหาจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่น-หล่นหนอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อรอนงค์ นัยวิกุล (2550). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

Delazio, A., Israr, A., & Klatzky, R. (2017). Cross-modal correspondence between vibrations and colors. **IEEE World Haptics Conf.**: 219-224.

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.

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.

Jaiboon, P., Prachayawarakorn, S., Devahastin, S. and Soponronnarit, S. (2009). Effects of fluidized bed drying temperature and tempering time on quality of waxy rice, **Journal of Food Engineering**. 95(3): 517-524.

Kennedy, G., Burlingame, B. and Nguyen, N. (2002). Nutrient impact assessment of rice in major rice-consuming countries. **International Rice Commission Newsletter**. 51: 33-42.

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. (2001). A Two-region Mathematical Model for Batch Drying of Grains in a Two-dimensional Spouted Bed. **Drying Technology**. 19(6): 1045-1064.
- 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**. 23: 473-495.
- Markowski, M., Bialobrzeski, 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
- Nguyen, L.H., Driscoll, R. H. and Szrednicki, G. S. (2001). Drying of High Moisture Content Paddy in A Pilot Scale Triangular Spouted Bed Dryer. **Drying Technology**. 19(2) : 375-387.
- Poomsa-ad, N., Soponromiarit, S., Prachayawarakom, 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 Prachayawarakom, 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., Tia, W., Poopaiboon, K. and Soponronnarit, S. (2005). Comparison of performances of pulsed and conventional fluidised-bed dryers. **Journal of Stored Products Research**. 41: 479-497.
- Wachiraphansakul, S. and Devahastin, S. (2007). Drying Kinetics and Quality of Okara Dried in a Jet Spouted Bed of Sorbent Particles. **Food Science and Technology**. 40: 207-219.
- Yunus C., Michael B., and Mehmet K. (2019). **Thermodynamics: an engineering approach**. Boston: McGraw-Hill, New York.

บทที่ 3

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ

3.1 บทคัดย่อ

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 25% w.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% w.b. โดยใช้อุณหภูมิลมร้อน 60, 80, 100 และ 150°C ความเร็วลมร้อน 19, 22 และ 25 m/s มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5, 10 และ 15 kg เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลมร้อน และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพข้าวหลังการขัดสี ทั้งเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและดัชนีความขาวข้าว โดยเทียบกับข้าวควบคุมอ้างอิง นอกจากนี้ยังศึกษาผลต่อค่าพลังงานรวมจำเพาะตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกมีแนวโน้มการลดลงในลักษณะใกล้เคียงแบบเชิงเส้น การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 5 เท่า (ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง) ความเร็วลมร้อนที่เพิ่มขึ้น จาก 19 m/s เป็น 22 m/s มีแนวโน้มทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ที่ความเร็วลมร้อน 25 m/s อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มลดลง มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่สูงขึ้นมีผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นถึงประมาณ 17% การลดค่าพลังงานรวมจำเพาะสามารถทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนให้สูงขึ้นซึ่งสามารถลดพลังงานรวมจำเพาะลงได้ถึง 2 เท่า เพิ่มปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นพลังงานรวมจำเพาะลดลงถึงประมาณ 40-70% และใช้ความเร็วลมร้อนต่ำสุด ด้านคุณภาพข้าวหลังการขัดสี ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันลดลงเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น โดยเฉพาะเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่อุณหภูมิลมร้อนสูงสุด 150°C มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ำสุด (5 kg) เปอร์เซ็นต์ข้าวตันจะลดลงมากกว่า 30% ลงมาถึง 16% การเพิ่มความเร็วลมร้อนจาก 19 m/s เป็น 22 m/s มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันลดลง แต่ที่ความเร็วลมร้อนสูงสุด 25 m/s เปอร์เซ็นต์ข้าวตันใกล้เคียงหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้การเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นสูงขึ้นสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวตันจากประมาณ 18% เพิ่มเป็น 30% ค่าดัชนีความขาวข้าวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวอ้างอิงถึงแม้ว่าการอบแห้งจะใช้อุณหภูมิลมร้อนที่สูงถึง 150°C

3.2 บทนำ

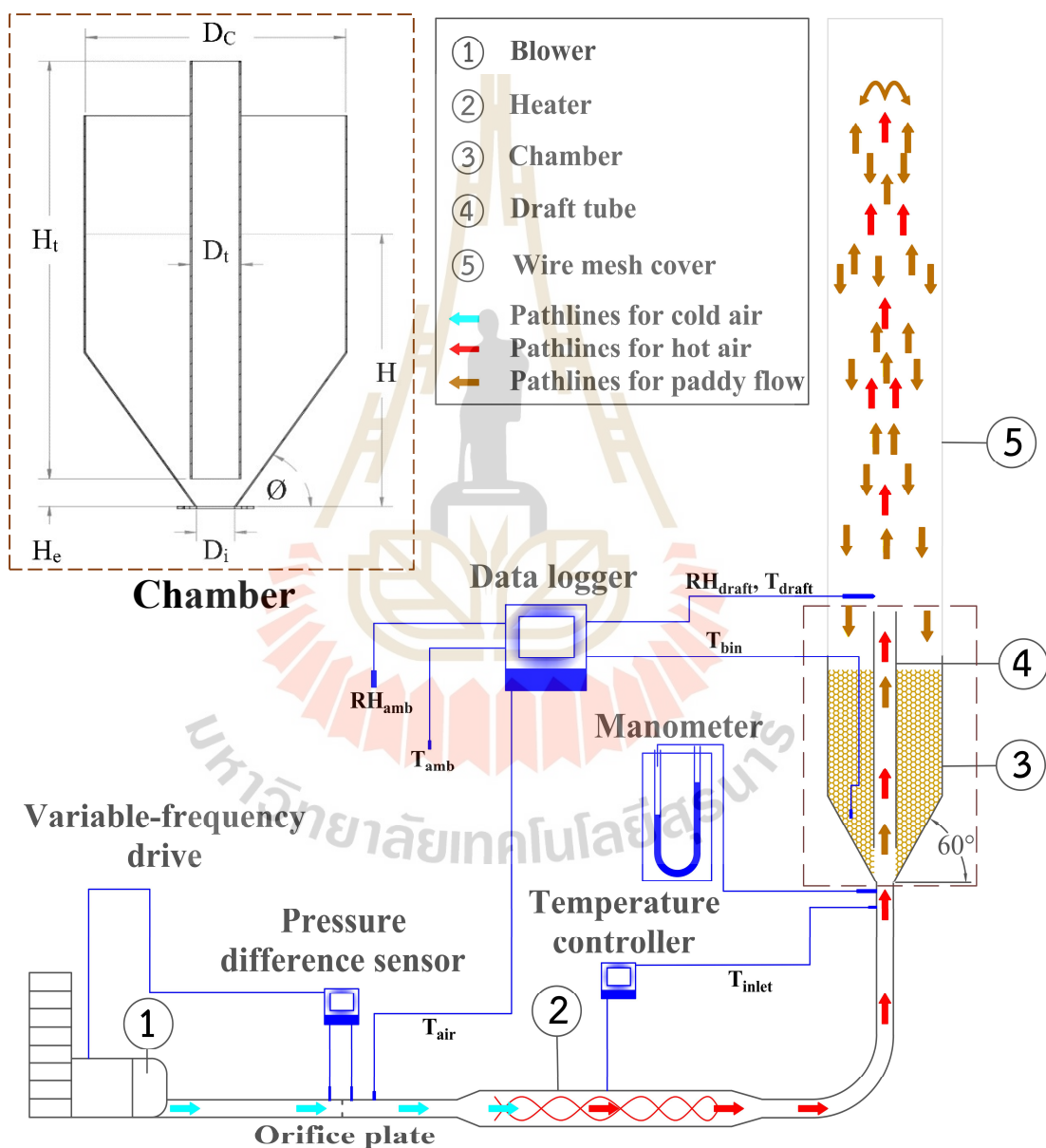
ข้าวหลังการเก็บเกี่ยวมักมีความชื้นสูง (25-30 %w.b.) จำเป็นต้องลดความชื้นลง เพื่อป้องกันการเน่าเสีย ยืดอายุการเก็บรักษา และคงคุณภาพที่ดี ความชื้นข้าวที่เหมาะสมกับการเก็บรักษาอยู่ในช่วง 13-14 %w.b. (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540) เกษตรกรมักเลือกใช้วิธีตากบนลานต่างๆ โดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อลดความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งประหยัด แต่ต้องการพื้นที่ตากมาก รวมถึงแรงงาน ระยะเวลาการตากที่นาน และขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ LSU และแบบฟลูอิดไคซ์เบด หรืออาจใช้ร่วมกันทั้ง 2 แบบ กำลังเป็นที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนางานวิจัยทางด้านอบแห้ง เพื่อสร้างเครื่องอบแห้งแบบต่างๆขึ้น โดยเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่มักใช้ลมร้อนเพื่อถ่ายเทความชื้นออกจากเมล็ด เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดมีข้อจำกัดในด้านของขนาดอนุภาคที่ใช้อบ เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งสามารถอบแห้งวัสดุทางการเกษตรที่ไวต่อความร้อนได้ดี ใช้พลังงานค่อนข้างต่ำ มีเวลาสัมผัสความร้อนสั้น วัสดุมีการพักในระหว่างการอบแห้งในแต่ละรอบการอบ ทำให้ความชื้นในวัสดุแพร่ออกมาที่ผิว จึงสามารถอบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้ (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540; โพธิ์ทอง และ กิตติ, 2560) การอบแห้งวัสดุมักต้องการความเร็ว ประหยัดพลังงานและได้คุณภาพข้าวหลังการขัดสีที่ดี เช่น ความขาวของข้าวและเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน การอบแห้งได้รวดเร็วต้องใช้อุณหภูมิลมร้อนที่สูง ส่งผลให้ข้าวแตกหักหลังการขัดสี จากงานวิจัยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระสามารถใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูง ขณะที่ยังคงคุณภาพข้าวหลังการขัดสีได้ โดยระยะเวลาการพักตัวของข้าวส่งผลให้คุณภาพข้าวดีขึ้น (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2552) การพักระหว่างการอบแห้ง (tempering) สามารถช่วยลดการแตกหักของข้าวเปลือกได้ ทำให้ได้ปริมาณข้าวตันสูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลาพักที่เหมาะสม โดยการพักเป็นการนำข้าวไปเก็บไว้ในถังที่อับลมและมีอุณหภูมิคงที่ ในระหว่างพักความชื้นจะมีระยะเวลาในการแพร่จากภายในมาสู่ผิวเมล็ด (Poomsa-ad et al., 2005)

งานวิจัยในส่วนนี้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลมร้อน และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพข้าวหลังการขัดสี ทั้งเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและดัชนีความขาวข้าว โดยเทียบกับข้าวควบคุมอ้างอิง นอกจากนี้ยังศึกษาผลต่อค่าพลังงานรวมจำเพาะตลอดระยะเวลาการอบแห้ง

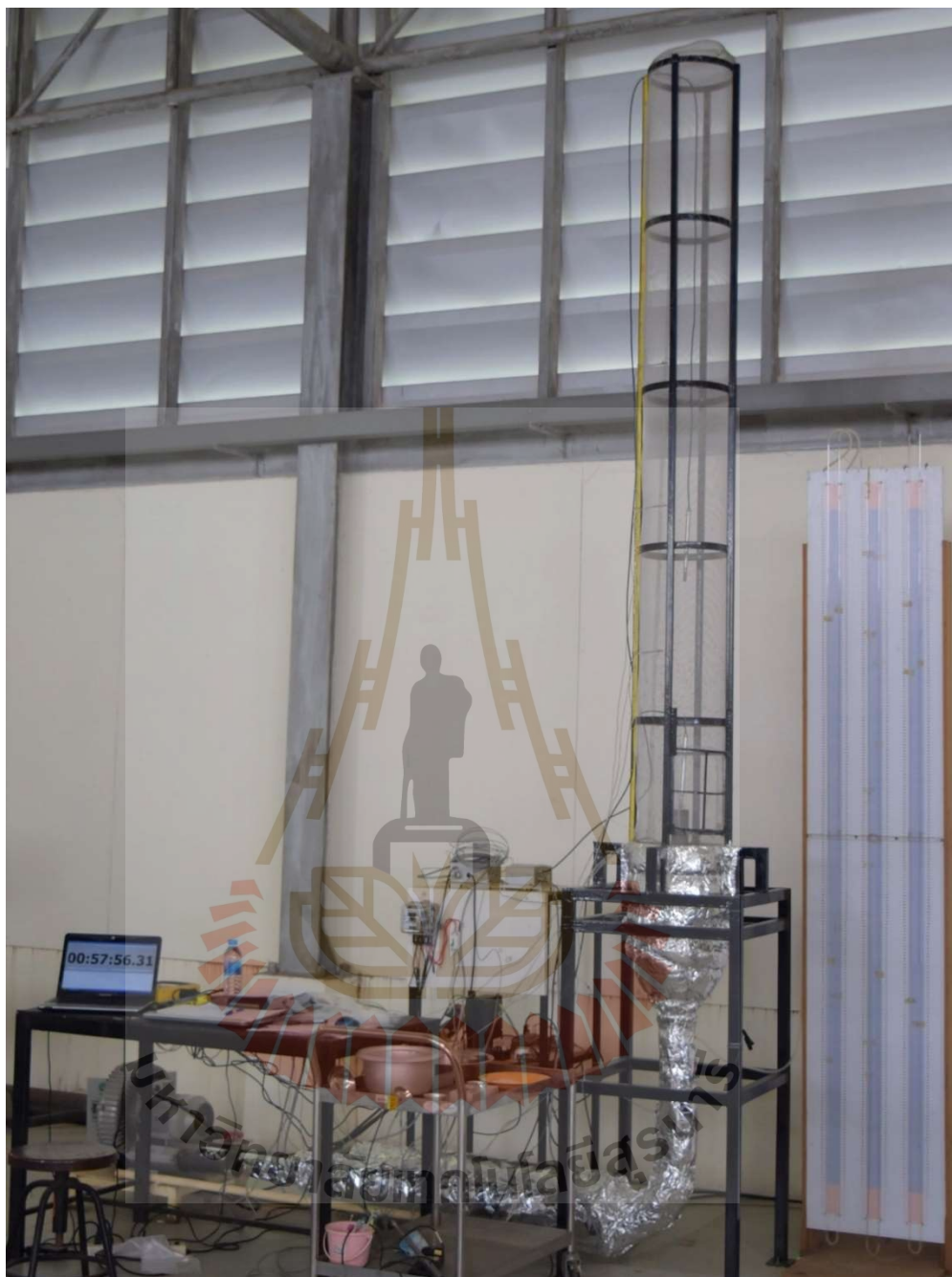
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การออกแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหล่นอิสระใช้ในงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.1 แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ และรูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหล่นอิสระที่ใช้ทดลอง ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ



รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าผ่านหล่นอิสระที่ใช้ทดลอง

- 1) เครื่องเป่าลม ขนาด 2.2 kW ยี่ห้อ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 พร้อมติดตั้งระบบควบคุมความเร็วแบบป้อนกลับ เพื่อควบคุมลมร้อนให้คงที่ วัดอัตราการไหลลมร้อนผ่านความดันอากาศตกคร่อม orifice plate ด้วยมาโนมิเตอร์และ pressure transmitter ยี่ห้อ Kimo รุ่น CP103-PO โดยส่งค่าแรงดันไฟฟ้า 0-10V ไปยัง inverter ยี่ห้อ Frecon รุ่น F003b-4 เพื่อให้ inverter เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับกับค่า setpoint และปรับแรงดันและความถี่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องเป่าลมด้วยชุดควบคุมแบบ PID
- 2) ชุด orifice plate เป็นแบบ concentric orifice plate (square edge) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice plate 20 mm จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างแบบระยะ D และ 0.5D (vena contracta taps) เป็นระยะ 44 และ 22 mm ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ISO 5167
- 3) ชุดทำความร้อน ใช้ชุดลดความร้อนขนาด 4.0 kW พร้อมติดตั้งกับ PID Temperature controller ยี่ห้อ Linking รุ่น LT400 เพื่อควบคุมการหยุดจ่ายกระแสไฟกับชุดลดความร้อน โดยวัดค่าอุณหภูมิลมร้อนที่ตำแหน่งก่อนทางเข้า 10 mm ด้วย Thermocouple type K
- 4) ท่อเป่าพ่น (draft tube) เป็นท่อเหล็กทึบหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D_i) 58 mm ยาว (H_i) 600 mm ระยะยกสูงจากช่องทางเข้า (H_e) 90 mm
- 5) มุ้งลวดตาข่าย (wire mesh) เป็นตะแกรงมุ้งลวดป้องกันข้าวออกจากถังและระบายอากาศออกจากข้าว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm สูงจากขอบถึง 2,700 mm
- 6) ถังพักข้าวเปลือก (หมายเลข (3)) ถูกออกแบบให้มีขนาดความจุข้าวเปลือก 15 kg มุมเอียง (slant angle) ด้านล่างห้องอบแห้ง (θ) 60° เส้นผ่านศูนย์กลางห้องอบแห้ง (D_o) 300 mm เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศเข้า (D_i) 43.5 mm ความสูงห้องอบแห้ง 570 mm โดย $D_o/d_p = 12$, $D_o/D_i = 6.8$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไข การเป่าพ่นที่มีเสถียรภาพและป้องกันการเกิดขอบเขตนิ่ง (dead zone) ของเมล็ด โดยใช้วัสดุเป็นเหล็ก
- 7) เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า Power Analyzer ยี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น CA-8334 ต่อวัดพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส จาก Inverter ของเครื่องเป่าลม และเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบ watt-hour meter ยี่ห้อ Mitsubishi กระแสสูงสุด 45 A สำหรับวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ชุดลดทำความร้อน
- 8) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศยี่ห้อ Vaisala รุ่น HMT335 ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-180°C ช่วงการวัดความชื้นสัมพัทธ์ 0-100% สำหรับการวัดอุณหภูมิลมร้อนที่ปลายท่อเป่าพ่น
- 9) เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Hioki รุ่น 8420-01 ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของ

ลมร้อนที่ปลายท่อเป่าพ่น อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังพักที่ระยะความสูง 15 cm จากก้นถังพัก ตลอดกระบวนการอบแห้งทุก ๆ 5 วินาที รูปภาพประกอบในภาคผนวก ข. รูปที่ ข.7

หลักการการทำงานของเครื่อง เริ่มจากอากาศถูกดูดเข้ามาผ่านเครื่องเป่าลมที่ควบคุมความเร็วด้วยชุดควบคุม PID แล้วเข้าสู่เครื่องทำความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยชุด PID temperature controller ซึ่งควบคุมการหยุด-จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน ลมร้อนจะไหลเข้าสู่ถังพักที่มีตะแกรงมุ้งลวดกั้นไม่ให้ข้าวในถังร่วงหล่นลงมาในท่อ จากนั้นลมร้อนความเร็วสูงซึ่งมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดของการเป่าพ่น เพื่อเป่าข้าวเปลือกในถังพักให้ไหลขึ้นผ่านท่อเป่าพ่น ในท่อเป่าพ่นข้าวเปลือกขึ้นจะเคลื่อนที่ขึ้นในทิศทางเดียวกันกับลมร้อน (concurrent flow) ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเป่าพ่นในท่อ จากนั้นเมื่อเคลื่อนออกจากท่อเป่าพ่นลมร้อนจะเป่าพ่นข้าวเปลือกตามลำเป่าพ่นสูงขึ้นไปจนความเร็วของเมล็ดมีค่าเป็นศูนย์ ช่วงนี้จะเรียกว่า ช่วงเป่าพ่นเหนือท่อ ซึ่งทิศทางของเมล็ดข้าวเปลือกมีทิศทางพุ่งขึ้นทิศทางเดียวกันกับลมร้อน จากนั้นข้าวเปลือกจะตกลงอิสระตามแรงโน้มถ่วงโลกไหลลงสู่ถังพัก ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงหล่นอิสระ โดยข้าวเปลือกมีทิศทางการไหลสวนทางกับลมร้อน (counter flow) สำหรับลมร้อนในช่วงเป่าพ่นเหนือท่อจะบานตัวออกเนื่องจากผลของความดันที่เปลี่ยนไป จากนั้นข้าวเปลือกในถังพักจะไหลลงสู่ด้านล่างถังพักอย่างช้าๆ ซึ่งขึ้นกับอัตราการไหลของมวลข้าวเปลือก ในช่วงนี้ข้าวเปลือกที่พึ่งจะสัมผัสกับลมร้อนจะมีช่วงระยะเวลาในการพักตัวถึงแม้จะมีลมร้อนที่เร็วไหลแทรกออกมาที่ความเร็วต่ำ ซึ่งมีทิศทางการไหลแบบสวนทางในถังพัก ช่วงนี้จะเรียกว่า ช่วงพักตัวในถัง จนในที่สุดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างถังพักจะครบรอบการทำงาน 1 รอบ การอบแห้งจะเกิดเป็นวัฏจักรแบบนี้จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% w.b.

3.3.2 การเตรียมข้าวเปลือกก่อนทดลองอบแห้ง

งานวิจัยนี้ใช้ข้าวพันธุ์สุพรรณ 60 ที่เพาะปลูกในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ที่ผ่านการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวนา ข้าวเปลือกจะถูกนำไปคัดแยกเมล็ดเต็มออกจากเศษฟางและเมล็ดลีบด้วยเครื่องทำความสะอาดข้าว จากนั้นนำข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบคลุมทับด้วยถุงพลาสติกปิดสนิท จัดเก็บรักษาในห้องแช่เย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 4-5°C เพื่อชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เชื้อรา และรักษาคุณภาพข้าวเปลือก ก่อนนำมาทดลองจะนำข้าวเปลือกแบ่งใส่ถุงพลาสติกตามปริมาณที่ทดลองในแต่ละวัน โดยนำออกจากห้องแช่เย็น และพักในสภาพอากาศแวดล้อมประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อปรับอุณหภูมิข้าวเปลือกให้เท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม

3.3.3 ขั้นตอนการทดลองอบแห้ง

ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เปิดเครื่องเป่าลม โดยตั้งค่า setpoint ตามความเร็วลมเฉลี่ยที่ทดลอง

- 2) เปิดการทำงานของชุดทำความร้อนและปรับตั้งค่าอุณหภูมิให้มีค่าตามเงื่อนไขที่ทำการทดลอง
- 3) เตรียมเก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องเก็บบันทึกข้อมูล
- 4) อุณหภูมิประมาณ 30 นาที เพื่อให้เครื่องเข้าใกล้สภาวะเงื่อนไขที่กำหนดและลดการสูญเสียความร้อนกับผนัง
- 5) เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มต้น 20 g ลงในถุงพลาสติกปิดสนิท เพื่อนำไปวัดความชื้น
- 6) เตรียมเก็บข้อมูลการตรวจวัดพลังงานแยกแยะระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดทำความร้อนและพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องเป่าลม โดยใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าวัดค่าเป็น Watt-hour ของแต่ละอุปกรณ์ โดยบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาที่กำหนด วิธีการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก.2
- 7) เริ่มทำการอบแห้งข้าวเปลือก โดยเทข้าวเปลือกขึ้นจากถุงพลาสติกลงในถังพักผ่านประตูเปิดปิด ใช้น้ำหนักมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นตามเงื่อนไขการทดลอง
- 8) เริ่มจับเวลา และเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ที่ผ่านการตรวจสอบมาแล้ว
- 9) ในระหว่างอบแห้งจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก ประมาณ 20 g ลงในถุงพลาสติกปิดสนิทเพื่อป้องกันความชื้นไหลเข้าออก โดยรีดอากาศในถุงก่อนปิดสนิท
- 10) เมื่อความชื้นลดลงเหลือประมาณ 15% w.b. โดยใช้เครื่องวัดความชื้นแบบความต้านทานไฟฟ้า (rice & paddy moisture meter) วัดความชื้นข้าวเปลือกเพื่อประมาณความชื้นให้อยู่ในช่วงที่กำหนด เริ่มทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก 250 g เพื่อวัดคุณภาพข้าวเปลือก
- 11) จนกระทั่งความชื้นข้าวเปลือกเหลือประมาณ 13-14% w.b. จึงหยุดทำการทดลอง เก็บบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้ารวมถึงข้อมูลต่างๆ ในการอบแห้ง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อนำไปทดสอบคุณภาพข้าวจำนวน 250 g ในถุงพลาสติกปิดสนิท
- 12) นำตัวอย่างข้าวที่ผ่านการเก็บพักในอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 48 h เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกลดลง คลายความเครียดที่ผิวและเกิดการกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอตลอดเมล็ดข้าว ไปวัดความชื้น และทดสอบหาคุณภาพข้าวหลังการอบแห้งต่อไป

3.3.4 ขั้นตอนการหาความชื้นข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

ขั้นตอนในการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก ใช้การหาค่าความชื้น โดยวิธีการอบในตู้อบ ใช้ตู้อบยี่ห้อ MCP HEK GmbH ด้วยวิธีการอบแบบข้าวเปลือกเต็มเมล็ด อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 h ซึ่งมีวิธีการดังนี้

- 1) ใช้กระป๋องใส่ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ทำจากอลูมิเนียม อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 1 h โดยใช้คีมคีบกระป๋อง
- 2) นำกระป๋องวางในตู้ดูดความชื้นประมาณ 30 min เพื่อให้เย็นตัวลง
- 3) ชั่งน้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกค่า แล้วกด tare ใส่ตัวอย่างข้าวเปลือกในกระป๋องประมาณ 20 g และบันทึกค่า จะได้มวลข้าวเปลือกเปียก
- 4) นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 h โดยอุณหภูมิในตู้อบต้องอยู่ในสถานะอุณหภูมิ 103°C ในช่วงเริ่มต้น
- 5) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำกระป๋องตัวอย่างใส่ในตู้ดูดความชื้นประมาณ 30 min เพื่อให้เย็นตัวลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม
- 6) จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก โดยน้ำหนักที่ได้เป็นน้ำหนักของข้าวเปลือกแห้งกับน้ำหนักกระป๋อง เมื่อนำมาลบกับน้ำหนักของกระป๋องจะได้มวลข้าวเปลือกแห้ง
- 7) คำนวณหาค่าความชื้นข้าวเปลือก ตามสมการที่ (2.1)

3.3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง

ใช้ข้าวเปลือกตัวอย่างปริมาณ 250 g นำไปขัดสี และหาปริมาณข้าวต้นและดัชนีความขาวข้าวหลังการขัดสี โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) การกะเทาะเปลือก ด้วยเครื่องกะเทาะข้าวเปลือกแบบลูกกลิ้งโลหะหุ้มด้วยยาง 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกันเพื่อแยกส่วนเปลือกออกจากเมล็ด จะได้ข้าวกล้องและแกลบ ก่อนใส่ข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลอง ทำการตั้งคาระยะห่างลูกกลิ้งไว้ที่ประมาณ 1 mm และทดสอบให้ได้ปริมาณข้าวกล้องสูงก่อน จึงทดลองใส่ข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองจริง
- 2) การขัดขาว ด้วยเครื่องขัดขาว โดยนำข้าวกล้องใส่ในเครื่องขัดขาว หลังขัดขาวเสร็จจะได้รำและข้าวสาร ซึ่งรวมทั้งปลายข้าวหรือข้าวหักและข้าวต้น
- 3) การคัดแยกปลายข้าว ด้วยเครื่องคัดแยกปลายข้าว (Westrup รุ่น LA-H) มีความจุ 200 kg/h มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง ทำงานโดยหมุนแยกข้าวต้นที่มีน้ำหนักมากกว่าเคลื่อนตัวไปด้านข้างของทรงกระบอก ส่วนปลายข้าวที่มีน้ำหนักเบาจะเคลื่อนตัวออกมาทางช่องทางออก ซึ่งจะได้ข้าวต้น และปลายข้าว
- 4) ปริมาณข้าวต้น วิเคราะห์โดยใช้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (%head rice yield, HRY) สามารถคำนวณได้ ตามภาคผนวก ก.3
- 5) ความขาวของข้าวสาร ใช้ข้าวต้นประมาณ 20 g มาวัดสีด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น Color Quest XE งานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานสี L^* , a^* และ b^* โดยวิเคราะห์ความขาวของข้าวสารด้วยค่าดัชนีความขาว (whiteness index, WI) ดังแสดงในภาคผนวก ก.3

3.3.6 ข้าวอ้างอิงควบคุม

สำหรับข้าวตัวอย่างอ้างอิงใช้เพื่อเปรียบเทียบผลของคุณภาพข้าวเปลือกทั้งเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและค่าดัชนีความขาวข้าวสาร โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบถาด (tray dryer) ทำการอบแห้งข้าวชุดเดียวกันกับที่ทดลอง โดยใช้อุณหภูมิอากาศแวดล้อมประมาณ 30°C อบแห้งด้วยความเร็วต่ำที่ 1 m/s เพื่อให้ข้าวอ้างอิงค่อยๆ ลดความชื้นลงจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 25% w.b. ถึงความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% w.b. โดยใช้การชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณความชื้นข้าวให้เป็นไปตามที่กำหนด จากนั้นนำข้าวที่ได้หลังการอบแห้งไปหาคุณภาพด้วยวิธีการเดียวกันดังหัวข้อก่อนหน้า ภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบถาดดังแสดงในรูปที่ ข.9 ในภาคผนวก ข.

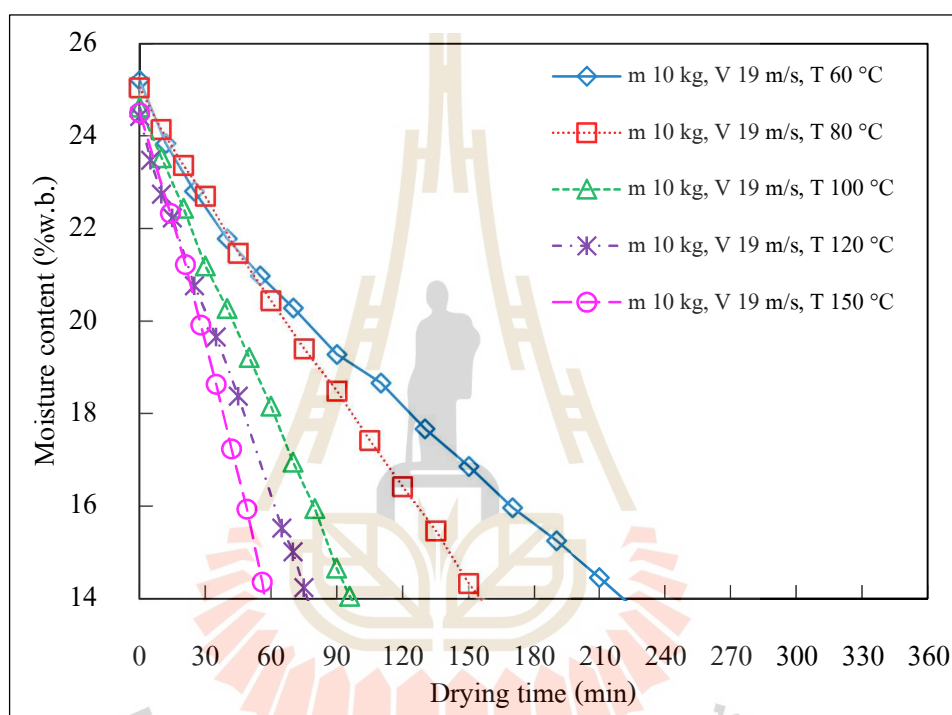
3.4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิมลร้อน ความเร็วลมร้อน และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ส่งผลต่อความชื้นข้าวเปลือก

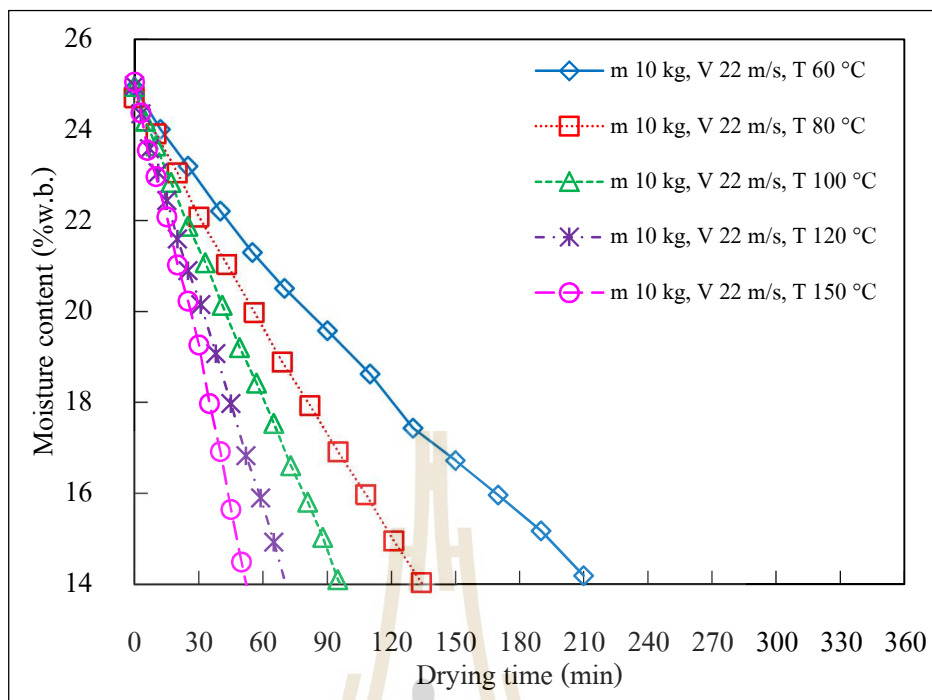
อิทธิพลของอุณหภูมิมลร้อนต่อความชื้นข้าวเปลือก การอบแห้งในช่วงความชื้นเริ่มต้น 24-25.5% w.b. จนความชื้นลดลงเหลือประมาณ 14% w.b. ดังแสดงในรูปที่ 3.3-3.5 พบว่าความชื้นข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในรูปแบบแนวโน้มแบบเชิงเส้น เพราะระหว่างกระบวนการอบแห้งในช่วงแรกที่ข้าวเปลือกอยู่ในท่อเป่าพ่น เมล็ดจะสัมผัสกับลมร้อนอุณหภูมิและความเร็วสูงในช่วงเวลาสั้น ทำให้ความชื้นที่ผิวเมล็ดระเหยออกอย่างรวดเร็ว ถัดมาในช่วงการเป่าพ่นเหนือท่อและช่วงหล่นอิสระเมล็ดข้าวเปลือกจะสัมผัสกับอุณหภูมิและความชื้นอากาศใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมและเมื่อข้าวเปลือกหล่นอิสระลงสู่ถังพัก ในช่วงพักตัวนี้เมล็ดข้าวเปลือกจะมีระยะเวลาการพักตัวจากการเคลื่อนที่ลงอย่างช้าๆ ด้วยอัตราการไหลมวลที่ต่ำ ทำให้ความชื้นภายในเมล็ดแพร่กระจายมาอย่างรอบๆ ผิวของเมล็ดจากผลของความชื้นความชื้นภายในเมล็ดที่มีค่าสูงในช่วงแรกและลดลงเมื่อมีระยะเวลาพักที่เหมาะสม ทำให้ความชื้นแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอ ก่อนเข้าช่วงการอบแห้งในรอบถัดไป ด้วยวิธีดังกล่าวจึงทำให้ลักษณะการลดลงของความชื้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับเส้นตรง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Madhiyanon and Soponronnarit (2005) และสุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และทวิช จิตรสมบุญ (2552) กรณีที่เมล็ดมีช่วงเวลาพักตัว

โดยจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิมลร้อนเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้นลง ที่อุณหภูมิมลร้อน 150 °C ใช้เวลาอบแห้งสั้นสุดที่ 29 min ดังในรูปที่ 3.6-3.10 แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิมลร้อน 60, 80, 100, 120 และ 150°C ตามลำดับ จะเห็นว่าแนวโน้มของความชื้นข้าวเปลือกลดลงแบบเชิงเส้น โดยเมื่อมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกช้าลง (ความชันกราฟลดลง) หรืออีกนัยหนึ่งคือ การเพิ่ม

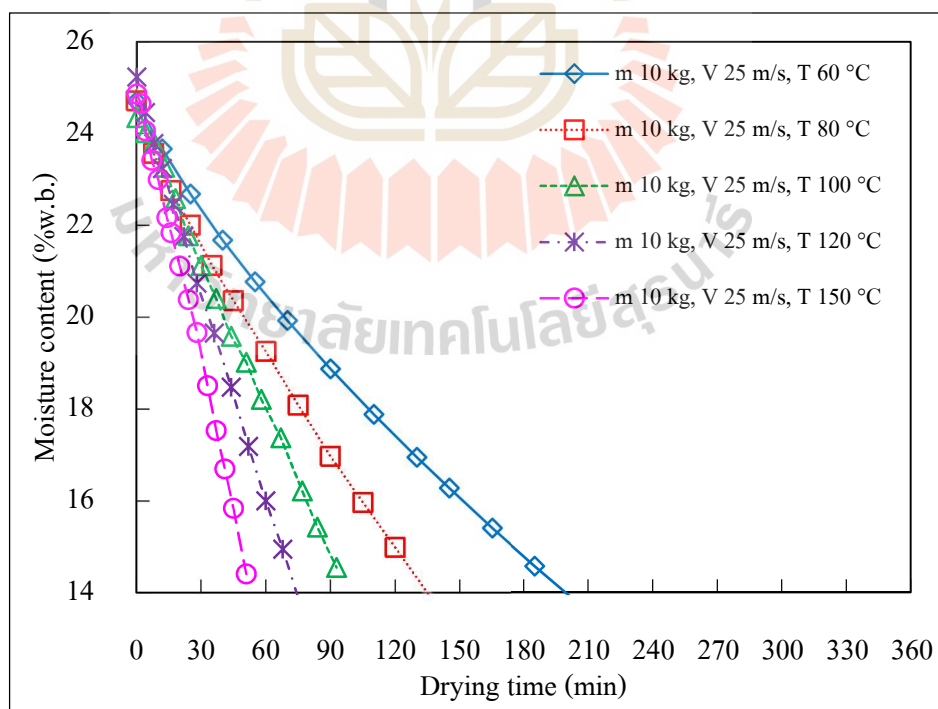
มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นส่งผลให้เวลาอบแห้งเพิ่มมากขึ้น สำหรับผลของความเร็วลมร้อนต่อความชื้นข้าวเปลือก พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลมร้อนจาก 19 m/s เป็น 22 m/s ความชื้นข้าวเปลือกลดลงเร็วขึ้น (ความชันกราฟมากขึ้น) หรือใช้เวลากอบแห้งน้อยลง ที่น่าสังเกตคือเมื่อเพิ่มความเร็วลมร้อนเป็น 25 m/s ความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือใช้เวลากอบแห้งเพิ่มมากขึ้น โดยจะอธิบายเหตุผลในหัวข้อ 3.4.2 อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่สูงจะทำให้ได้ปริมาณการอบแห้งที่สูง จึงเหมาะกับการแสดงความสัมพันธ์ในรูปอัตราการอบแห้งเฉลี่ย แสดงในหัวข้อถัดไป



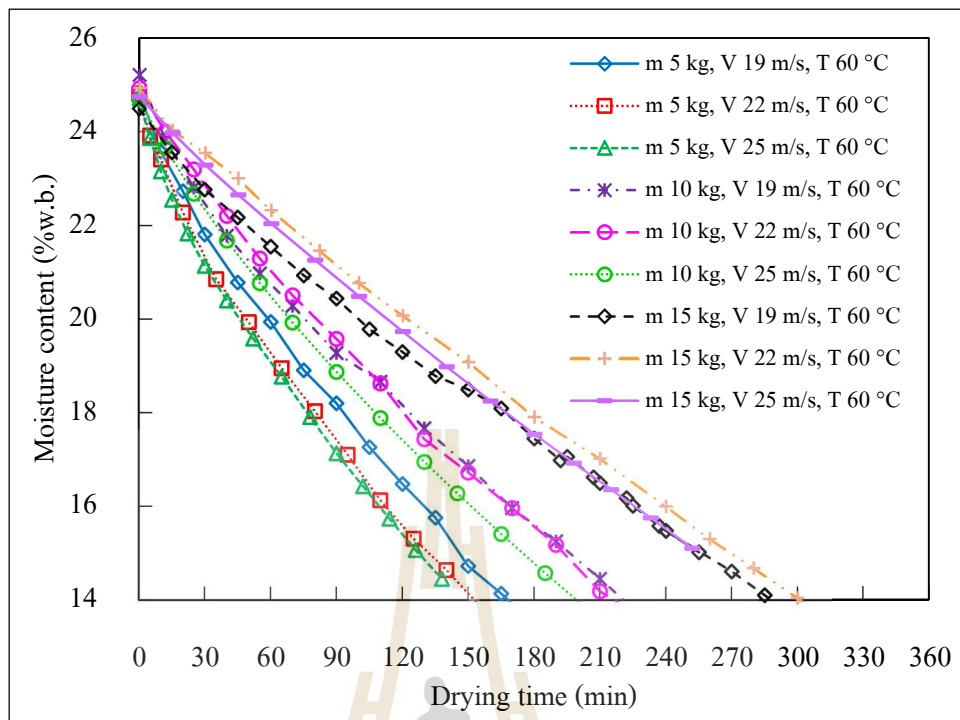
รูปที่ 3.3 ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่ความเร็วลมร้อน 19 m/s



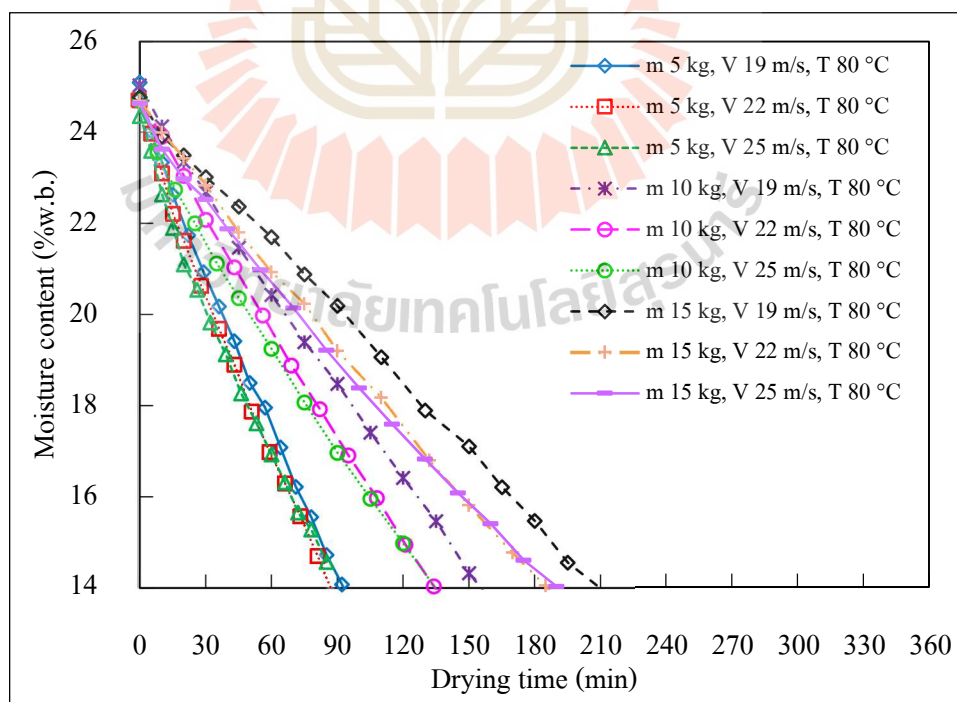
รูปที่ 3.4 ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่ความเร็วลมร้อน 22 m/s



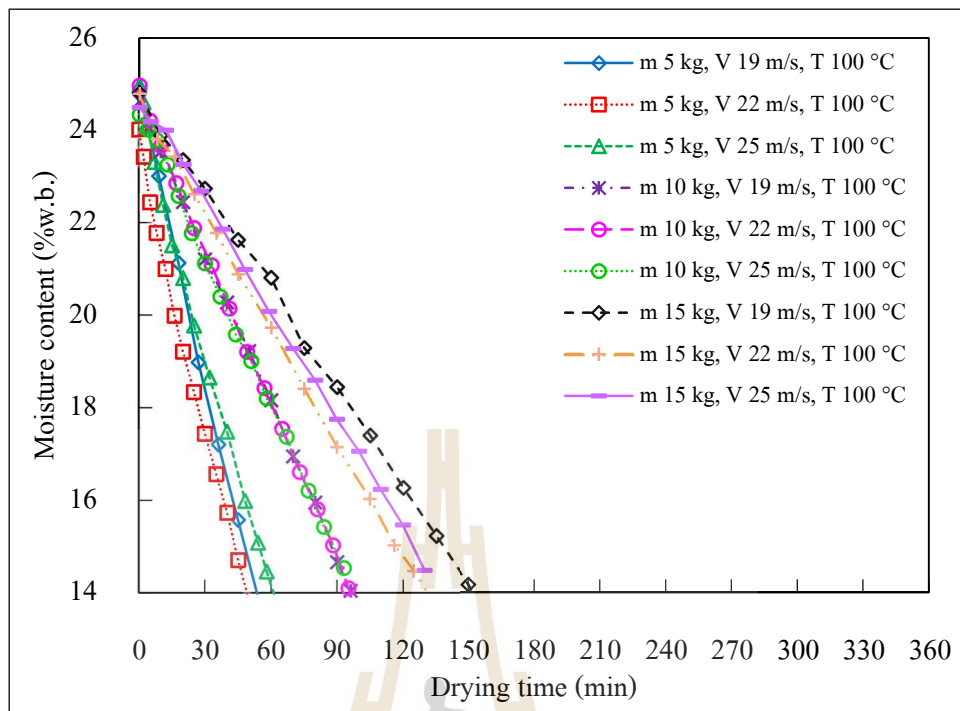
รูปที่ 3.5 ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่ความเร็วลมร้อน 25 m/s



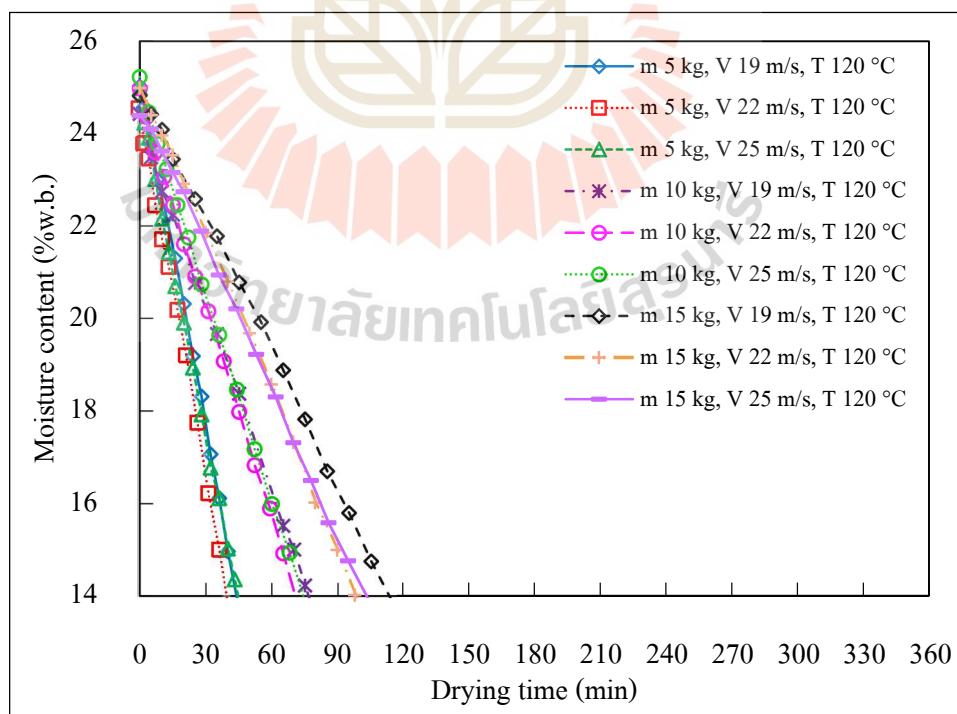
รูปที่ 3.6 ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่อุณหภูมิความร้อน 60°C



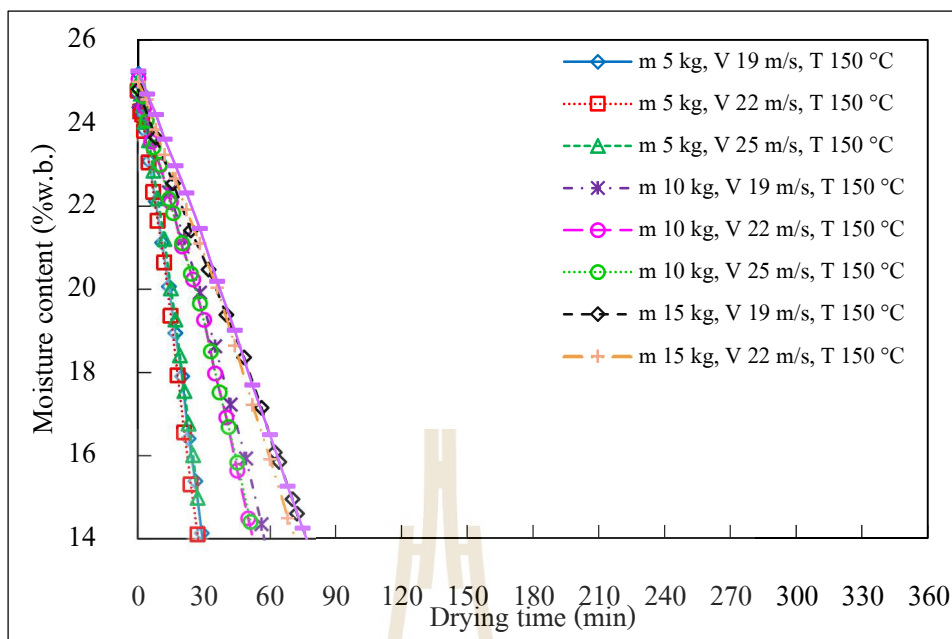
รูปที่ 3.7 ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่อุณหภูมิความร้อน 80°C



รูปที่ 3.8 ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่อุณหภูมิลมร้อน 100°C



รูปที่ 3.9 ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่อุณหภูมิลมร้อน 120°C



รูปที่ 3.10 ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาอบแห้ง ที่อุณหภูมิความร้อน 150°C

3.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อน ความเร็วลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย

1) ผลของอุณหภูมิความร้อนต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย

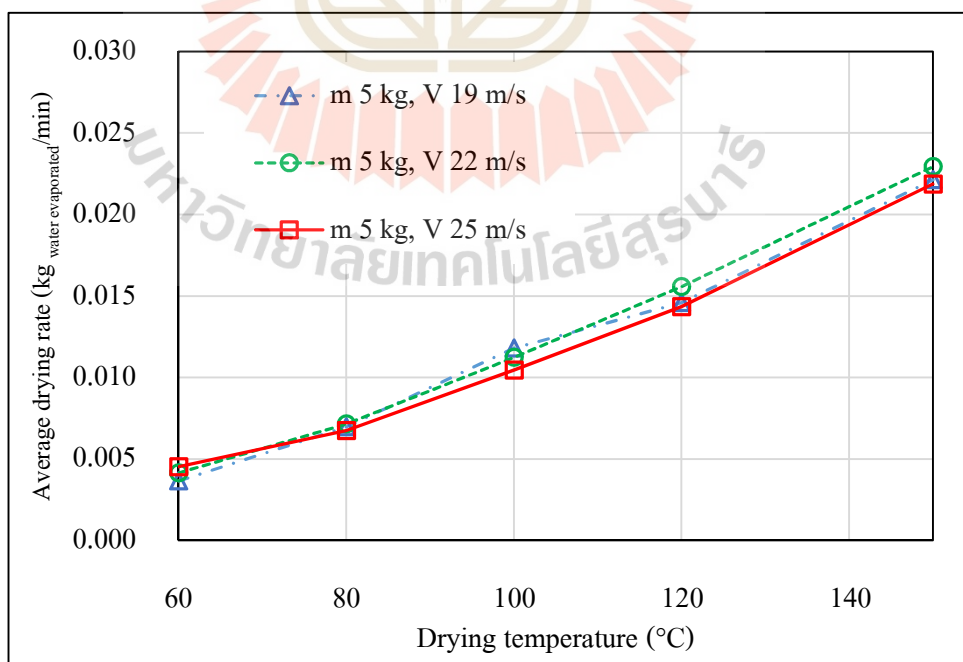
ผลของอุณหภูมิความร้อนต่ออัตราการอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.11-3.13 พบว่าเมื่ออุณหภูมิร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยจากที่อุณหภูมิร้อน 60°C เมื่อเพิ่มถึง 150°C อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นถึง 5 เท่า อุณหภูมิร้อนจึงเป็นอิทธิพลหลักในการเพิ่มอัตราการอบแห้งเฉลี่ย เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นกับอุณหภูมิเมล์ดตามกฎการแพร่ของฟิคส์ ส่งผลให้ความชื้นภายในเมล์ดแพร่มาสู่ผิวได้เร็วขึ้น อัตราการอบแห้งเฉลี่ยจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิร้อนสูงขึ้นยังส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนมีค่าลดลง ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ความชื้นที่ผิวเมล์ดอีกด้วย โดยยิ่งความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางมีค่าต่ำเท่าไรหรือการถ่ายโอนความชื้นในเมล์ดก็จะยิ่งสูงขึ้นตามไปด้วย

2) ผลของความเร็วมร้อนต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย

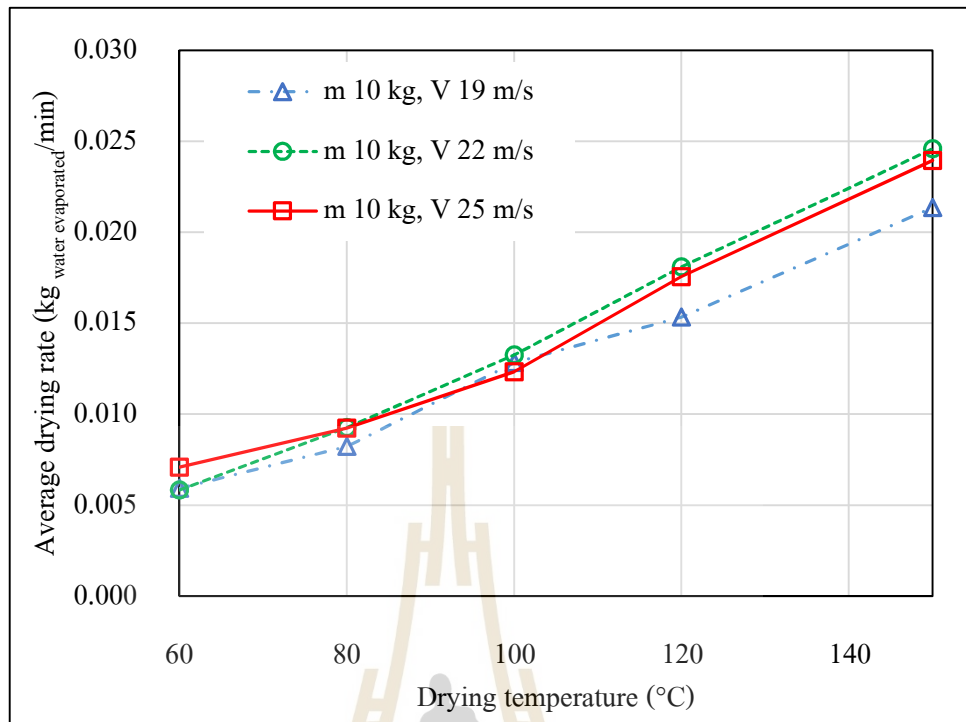
ผลกระทบของความเร็วมร้อน แสดงในรูปที่ 3.14-3.16 จะเห็นว่า การเพิ่มความเร็วมร้อนจาก 19 m/s เพิ่มเป็น 22 m/s ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งเฉลี่ยได้เล็กน้อย โดยเฉพาะที่อุณหภูมิร้อนสูง 120-150°C เนื่องจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหมุนอิสระนี้ การแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นเป็นลักษณะการพาแบบบังคับ โดยเฉพาะในส่วน

เป่าพ่นในท่อ ส่งผลให้ความหนาของชั้นซิดผิวเชิงความร้อนและชั้นซิดผิวเชิงความเร็วที่ผิวเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าลดลง ทำให้การถ่ายโอนทั้งความร้อนและมวลเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและความชื้นจึงมีค่าสูงขึ้นจึงทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 10% ที่อุณหภูมิความร้อน 150°C การเพิ่มความเร็วมร้อนยังเป็นการเพิ่มอัตราการไหลข้าวเปลือก ส่งผลให้ข้าวเปลือกไหลหมุนเวียนเร็วขึ้นทำให้จำนวนรอบการไหลที่เมล็ดไหลเข้าสู่ท่อเป่าพ่นมากขึ้น ทำให้ข้าวเปลือกมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิและความชื้นมากขึ้นอุณหภูมิข้าวเปลือกจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการแพร่ความชื้นจากภายในสู่ผิวเมล็ดเร็วขึ้น อัตราการอบแห้งเฉลี่ยจึงสูงขึ้น

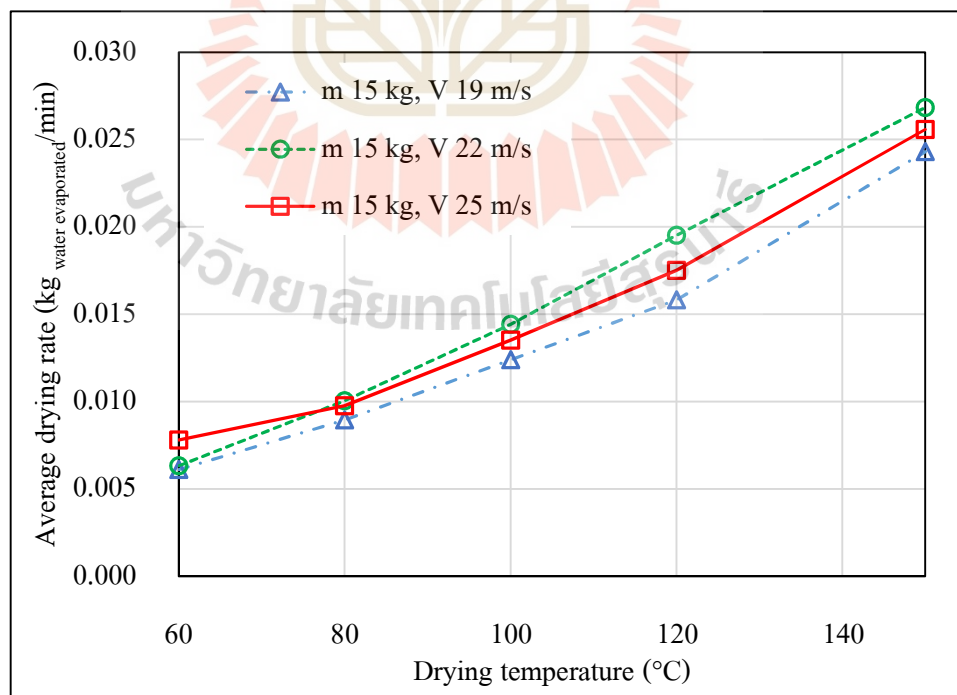
จุดที่น่าสนใจคือ กรณีการเพิ่มความเร็วมร้อนสูงสุดที่ 25 m/s อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยกรณีใช้อุณหภูมิความร้อนต่ำสุดที่ 60°C อย่างไรก็ตามกรณีที่เพิ่มความเร็วมร้อนสูงสุดอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกลับลดลงเล็กน้อยกว่ากรณีใช้ความเร็วมร้อน 22 m/s เมื่ออุณหภูมิความร้อนเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 80°C ขึ้นไป เนื่องจากการใช้ความเร็วมร้อนสูงสุดทำให้เมล็ดข้าวเปลือกถูกเป่าพ่นได้สูงมาก โดยความสูงสูงสุดที่ข้าวเปลือกเป่าพ่นได้ประมาณ 2 m จากขอบถึงพัก ดังแสดงในภาคผนวก ก.6 รูปที่ ก.5 ทำให้มีระยะเวลาสัมผัสกับอากาศภายนอกมากกว่า ทั้งในส่วนเป่าพ่นเหนือท่อและหล่นอิสระ ซึ่งเป็นสภาวะอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อม ทำให้อุณหภูมิอากาศรอบๆ เมล็ดต่ำลงและความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและความชื้นลดลง ทำให้อัตราการอบแห้งลดลงประมาณ 4%



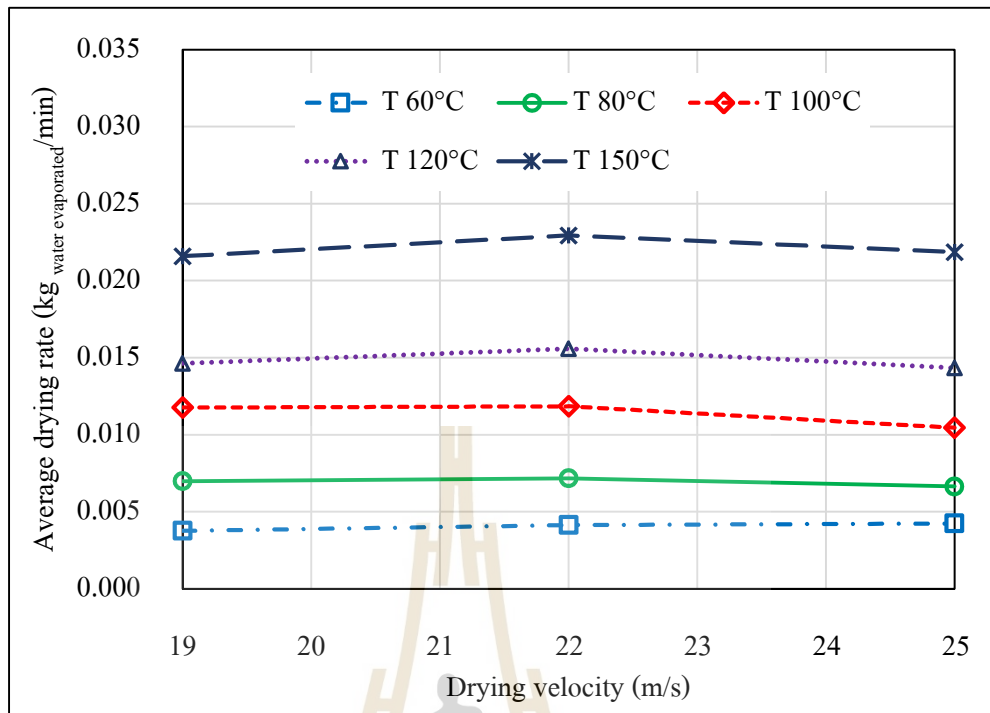
รูปที่ 3.11 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและอุณหภูมิความร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg



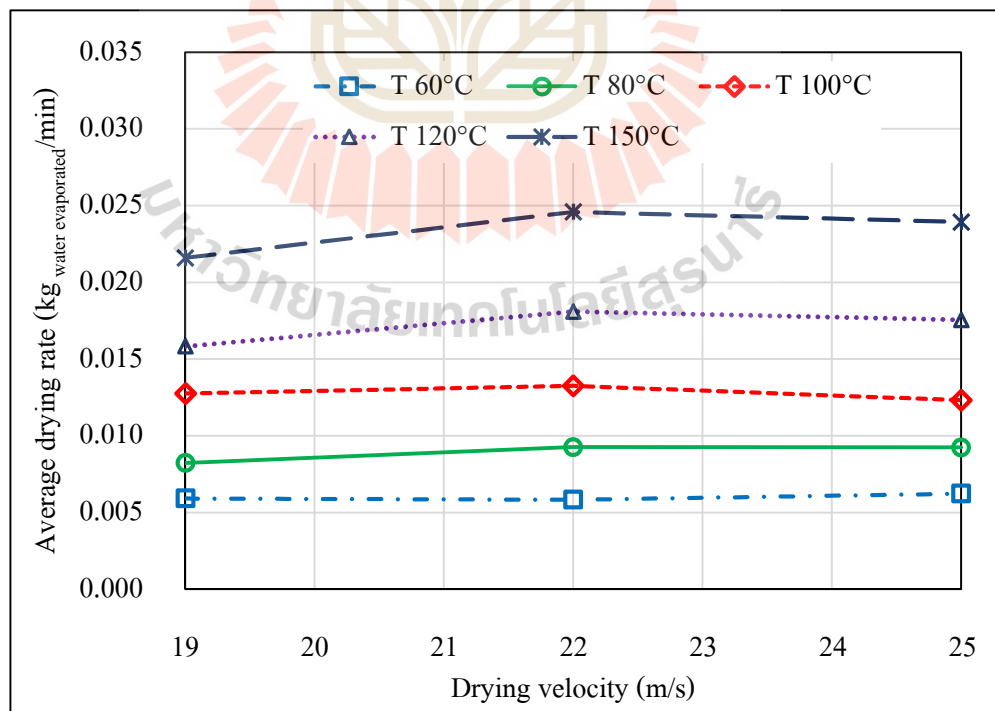
รูปที่ 3.12 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและอุณหภูมิลมร้อน ที่มีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg



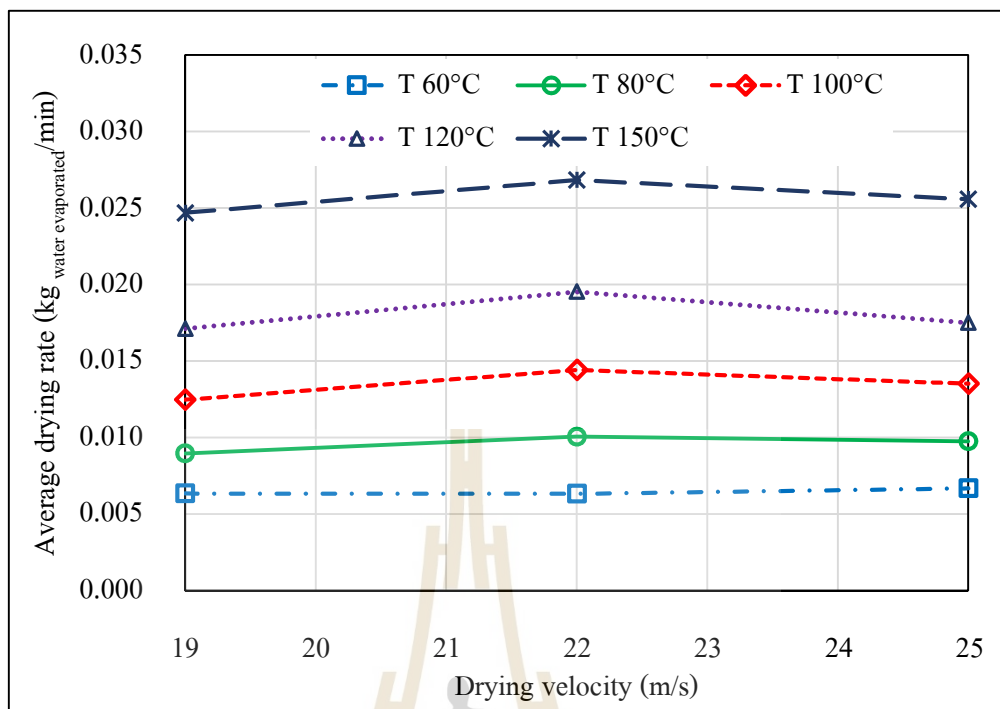
รูปที่ 3.13 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและอุณหภูมิลมร้อน ที่มีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg



รูปที่ 3.14 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความเร็วลมร้อน ที่มีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg



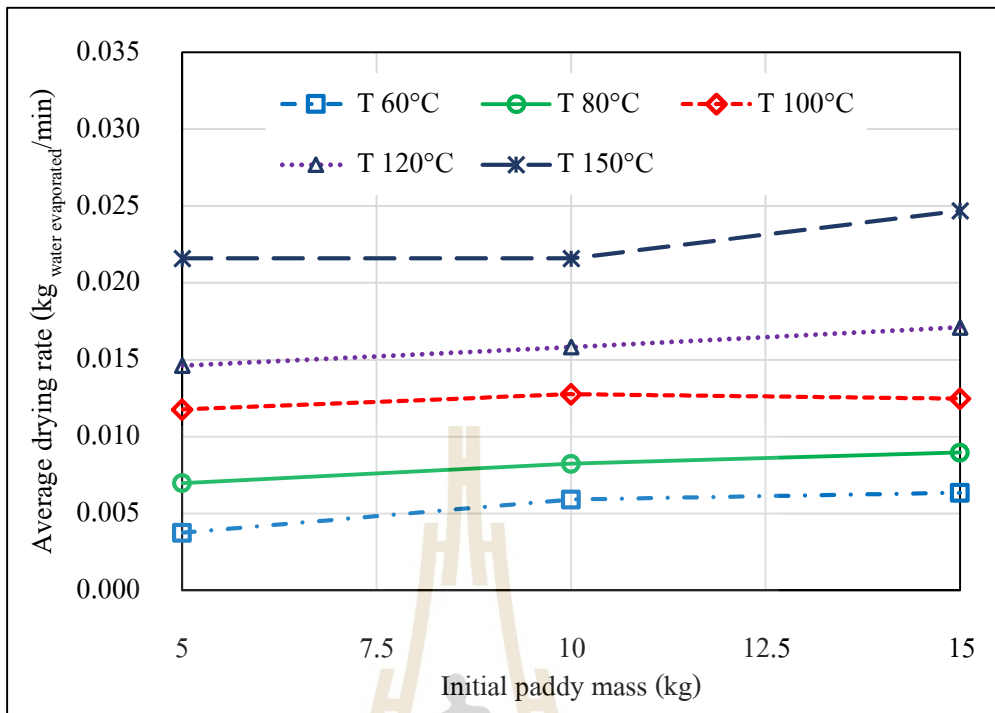
รูปที่ 3.15 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความเร็วลมร้อน ที่มีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg



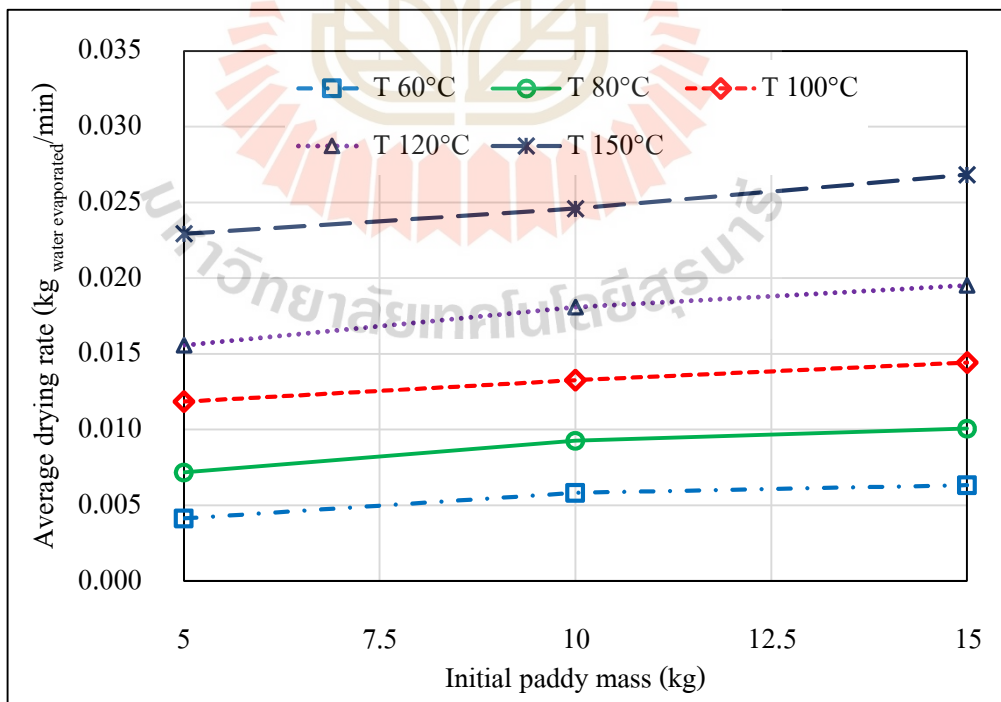
รูปที่ 3.16 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg

3) ผลของมวลข้าวเปลือกต่ออัตราการอบแห้ง

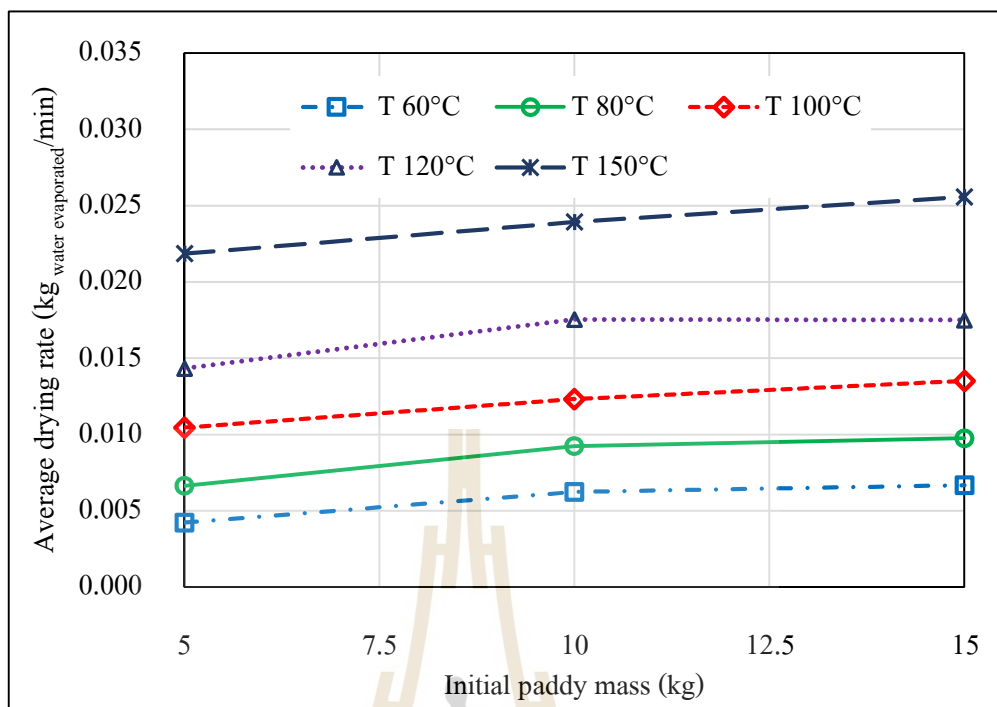
จากรูปที่ 3.17-3.19 พบว่าการเพิ่มปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น โดยที่เพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 17% จากการเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 เป็น 15 kg เนื่องจากการเพิ่มปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นทำให้มีปริมาณข้าวในถังพักมากขึ้น (ความสูงของข้าวในถังมากขึ้น) ทำให้เพิ่มระยะเวลาที่ข้าวเปลือกไหลลงสู่ด้านล่างถังหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นการเพิ่มระยะเวลาการพักตัวของข้าว ทำให้เพิ่มระยะเวลาที่ข้าวเปลือกแพร่ความชื้นออกมายังผิวได้มากขึ้น จากผลการอบแห้งในช่วงเป่าพ่นในท่อ ทำให้ความชื้นความชื้นสูงขึ้น เมื่อข้าวเปลือกได้พักตัวความชื้นภายในเมล็ดจะกระจายออกมาที่ผิว ขณะเดียวกันเนื่องจากมีลมร้อนบางส่วนที่ไหลแทรกสวนทางขึ้นมาในถังพัก โดยช่วยพาความชื้นออกจากถังพัก ทำให้ความชื้นความชื้นภายในเมล็ดลดลง และเมื่อเข้าสู่รอบการอบแห้งถัดไปปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกจึงลดลงได้อย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุผลดังกล่าวการเพิ่มมวลข้าวเปลือกจึงทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.17 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 19 m/s



รูปที่ 3.18 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 22 m/s



รูปที่ 3.19 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 25 m/s

3.4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ออัตราสิ้นเปลืองพลังงาน

พลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องอบแห้งทั้งหมดเป็นพลังงานรวมจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) คือผลรวมระหว่างพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (SEC_{prim}) ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนกับพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (SEC_{sec}) หรือพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องเป่าลม ค่าพลังงานรวมจำเพาะแสดงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เพื่อลดมวลความชื้นภายในเมล็ดของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นहनอิสระ โดยจะกล่าวถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพลังงานรวมจำเพาะดังต่อไปนี้

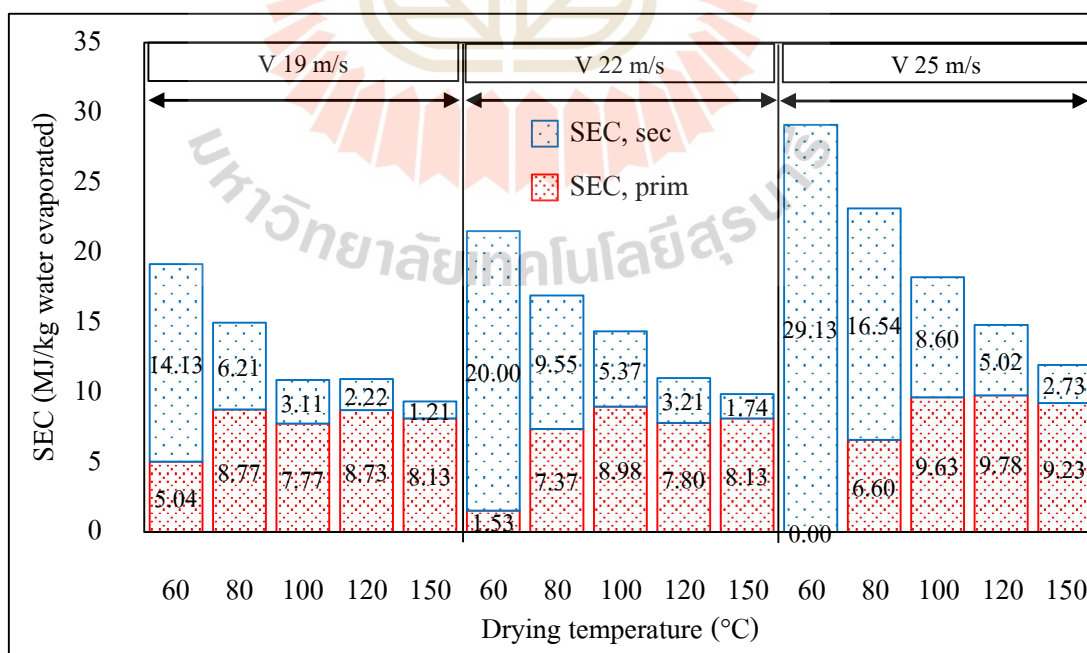
1) ผลของอุณหภูมิลมร้อนต่อพลังงานรวมจำเพาะ

การวิเคราะห์พลังงานรวมจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง โดยพิจารณาการวัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% w.b. แสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานรวมจำเพาะ แบ่งย่อยเป็นพลังงานความร้อนหรือพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ และพลังงานจากเครื่องเป่าลมหรือพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ ดังรูปที่ 3.20-3.22 ผลของอุณหภูมิลมร้อนต่ออัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น ช่วยลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะได้ ค่าพลังงานรวมจำเพาะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 60°C และเมื่อเพิ่ม

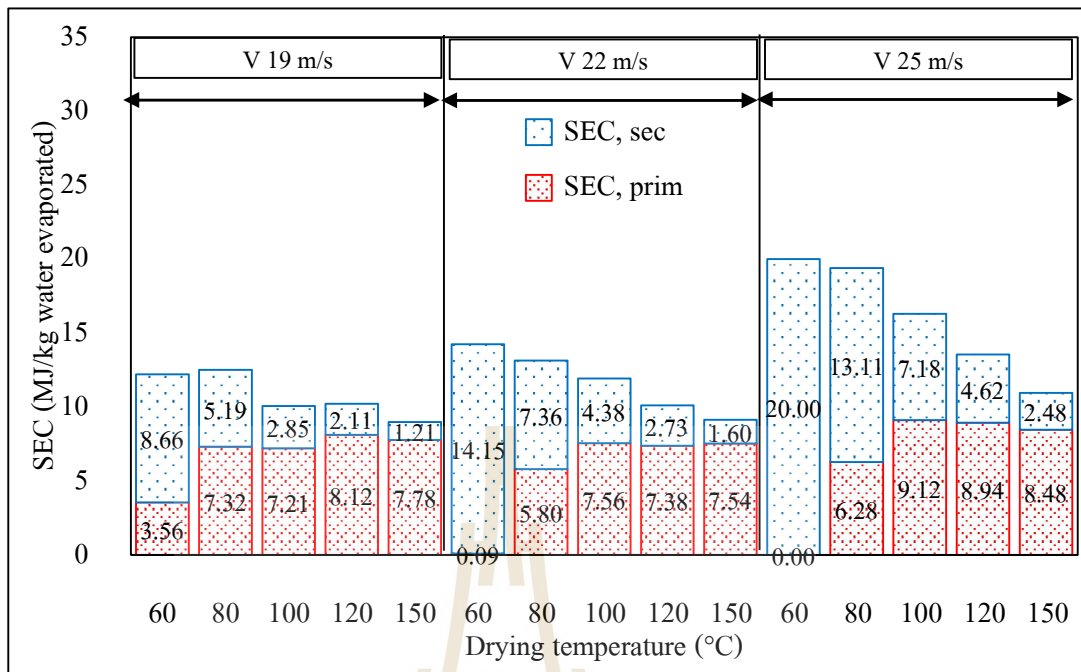
อุณหภูมิลมร้อนสูงสุด 150°C ใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำสุดเพียง 7.84 kg_{water evaporated}/min ซึ่งลดพลังงานรวมจำเพาะลงได้ถึงประมาณ 2 เท่าที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg โดยค่าพลังงานปฐมภูมิที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C มีค่าน้อยสุด แต่เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะมีแนวโน้มสูงขึ้นและใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุที่การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนมากขึ้น ส่งผลให้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะจึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งก็เพิ่มสูงขึ้น อีกนัยหนึ่งคือระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ทำให้ค่าพลังงานความร้อนใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิลมร้อนสูง แต่สำหรับค่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนช่วยลดระยะเวลาเดินเครื่องลง ทำให้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะมีค่าลดลง พบว่าช่วงอุณหภูมิลมร้อนต่ำที่ 60°C พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งหลักเป็นพลังงานจากเครื่องเป่าลมและลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยพลังงานหลักเป็นพลังงานความร้อนที่ให้กับอากาศอบแห้ง

2) ผลของความเร็วมร้อนต่อพลังงานรวมจำเพาะ

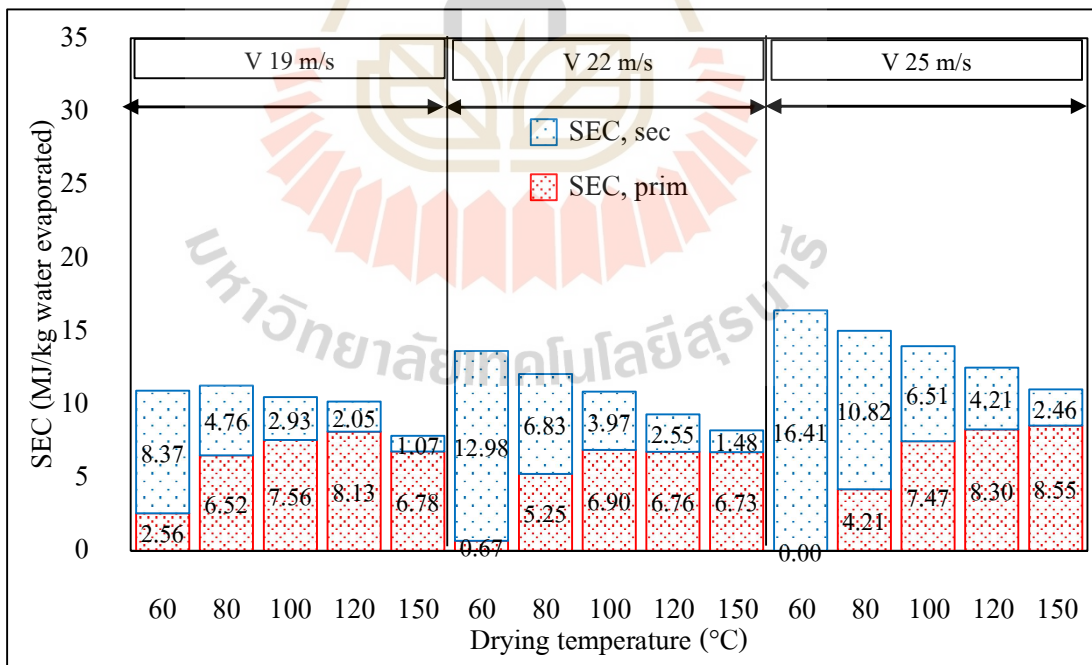
จากรูปที่ 3.23-3.25 การเพิ่มความเร็วมร้อนมีผลทำให้พลังงานรวมจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น กรณีอุณหภูมิลมร้อนมีค่าต่ำโดยเฉพาะที่ 60°C สามารถลดการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะได้จนเหลือศูนย์ เนื่องจากมีพลังงานความร้อนจากเครื่องเป่าลมถ่ายโอนออกมา ทำให้อุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าถังมีค่าสูง ทำให้การใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะลดลง พลังงานส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มความเร็วมร้อน ดังนั้นพลังงานทุติยภูมิจำเพาะจึงเพิ่มสูงขึ้น



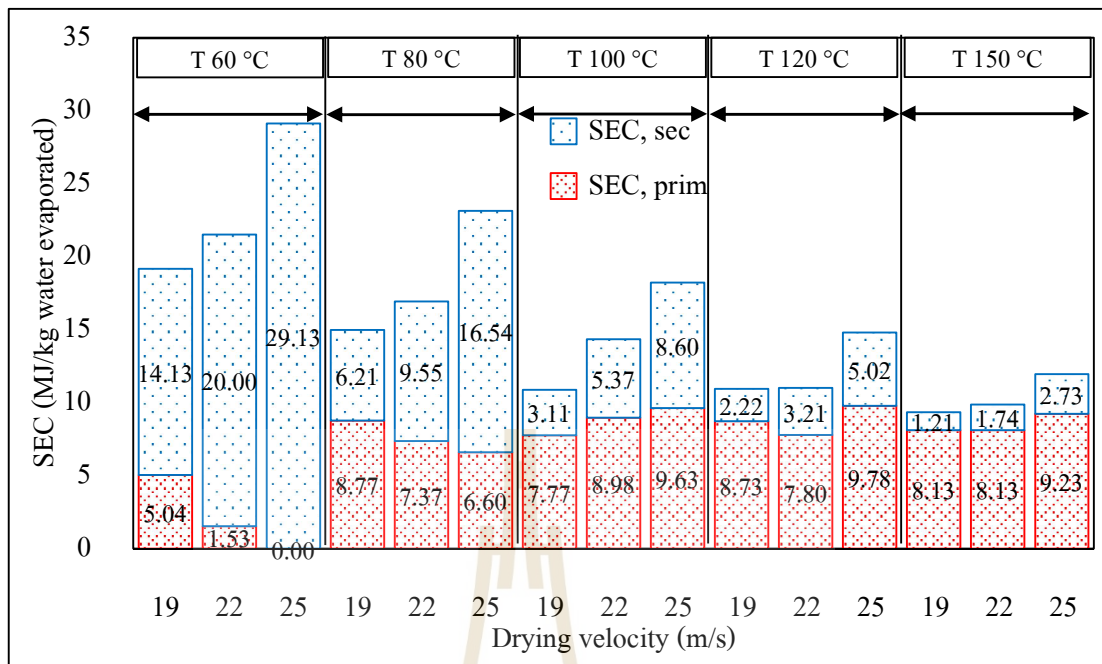
รูปที่ 3.20 พลังงานรวมจำเพาะและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg



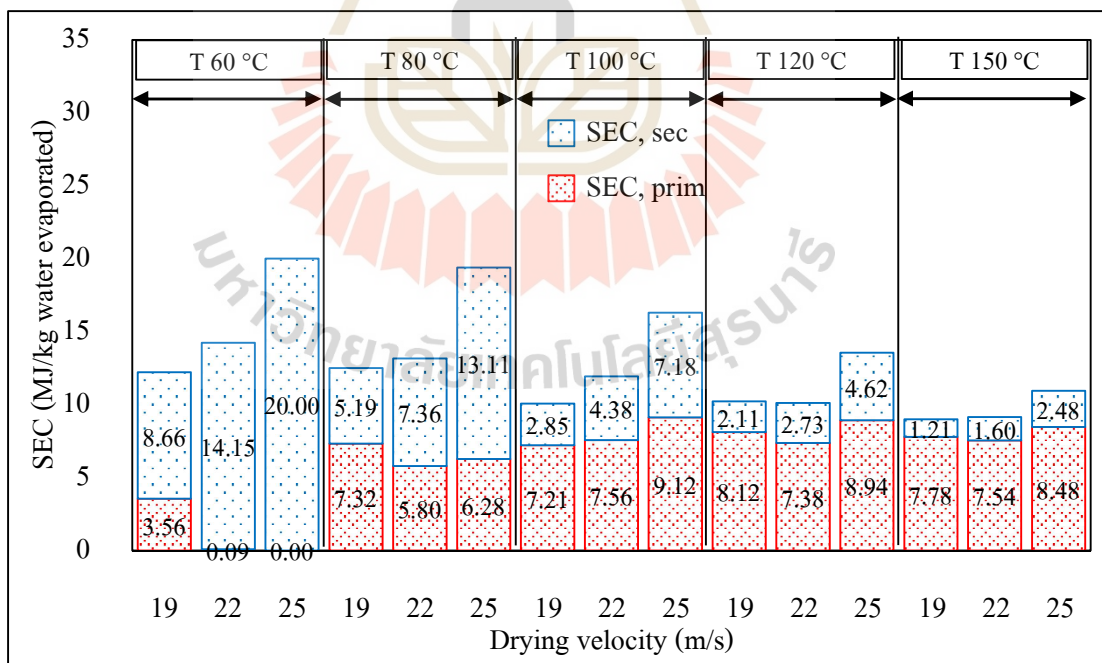
รูปที่ 3.21 พลังงานรวมจำเพาะและอุณหภูมิความร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg



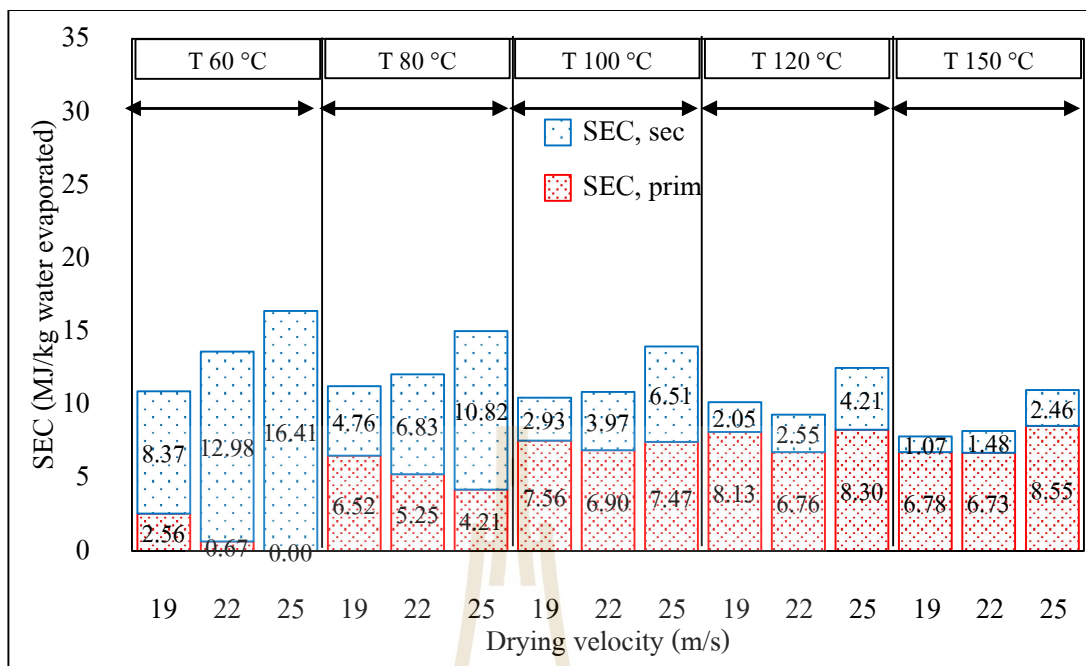
รูปที่ 3.22 พลังงานรวมจำเพาะและอุณหภูมิความร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg



รูปที่ 3.23 พลังงานรวมจำเพาะและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg



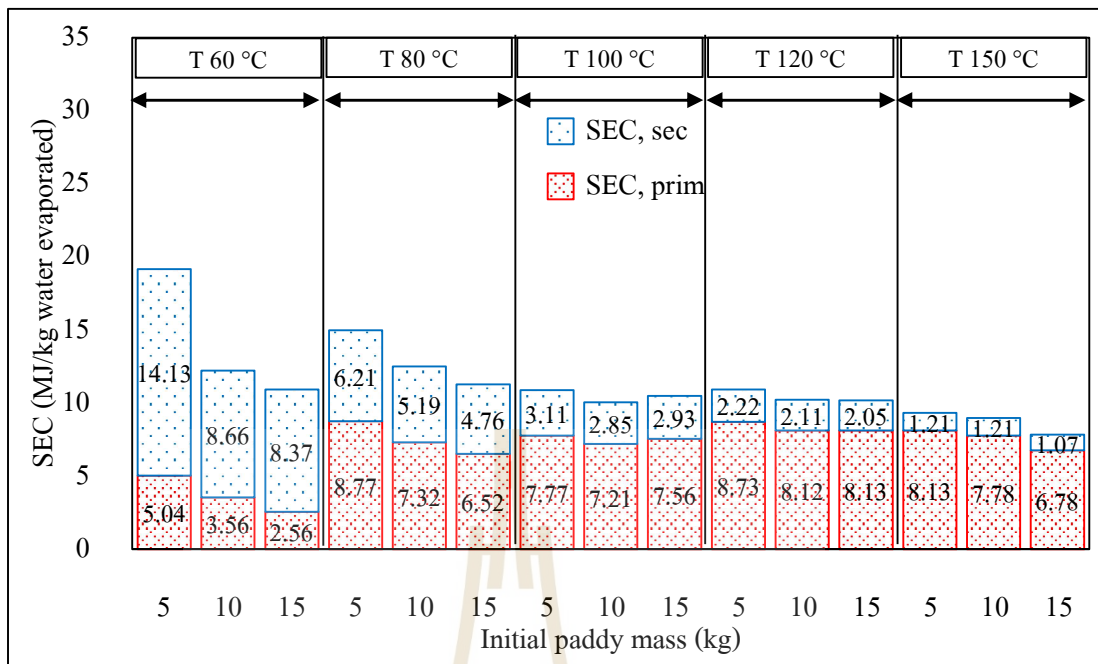
รูปที่ 3.24 พลังงานรวมจำเพาะและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg



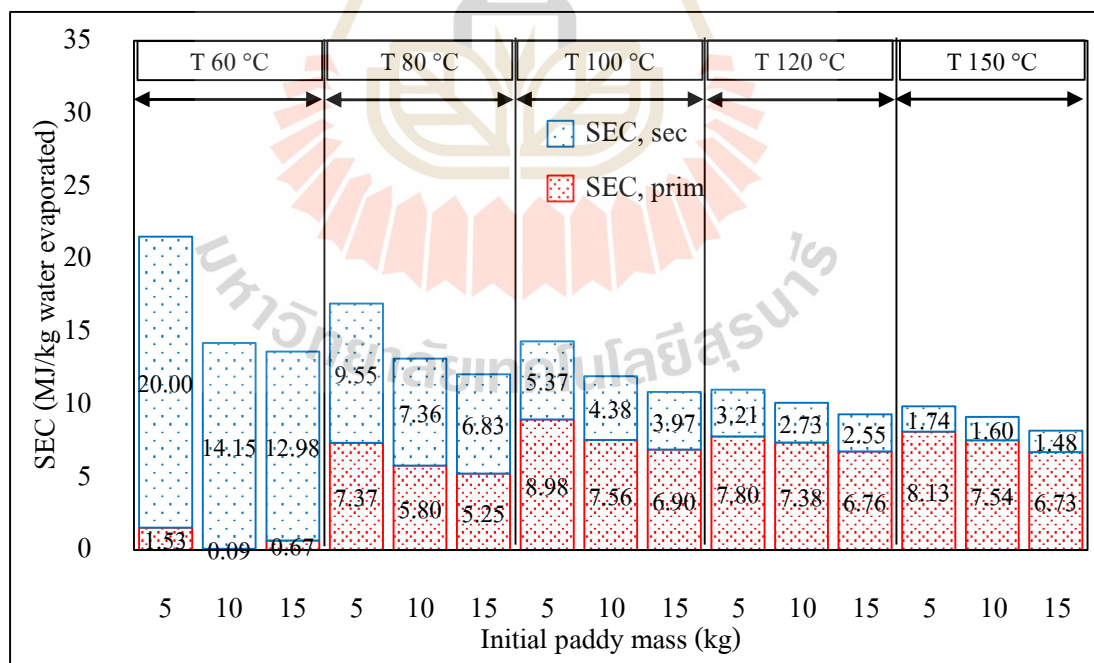
รูปที่ 3.25 พลังงานรวมจำเพาะและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg

3) ผลของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่อพลังงานรวมจำเพาะ

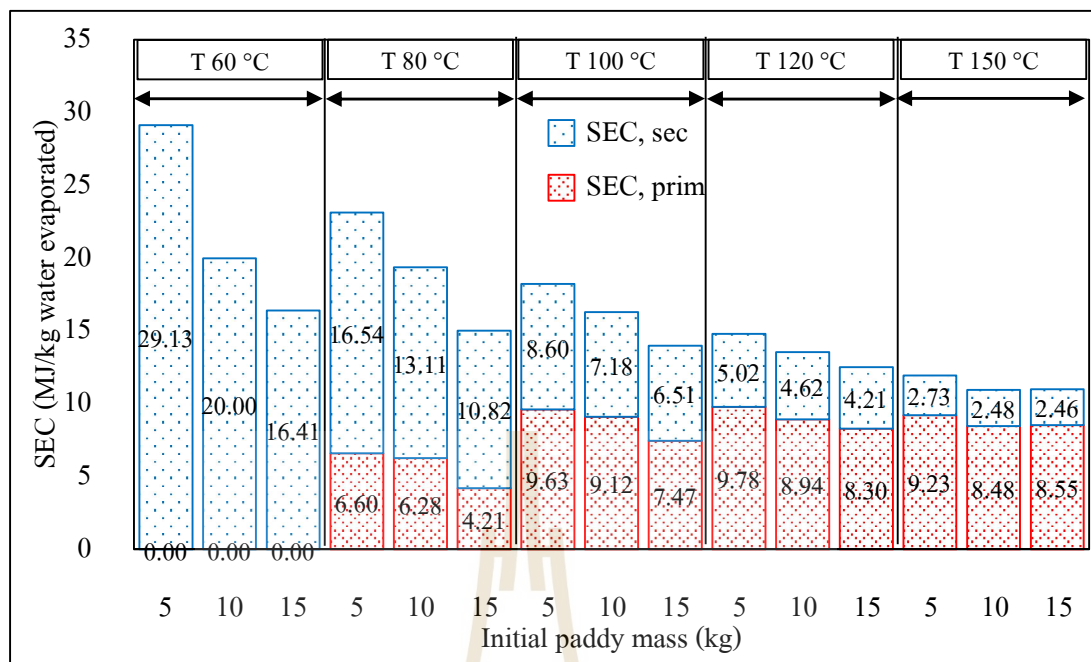
จากรูปที่ 3.26-3.28 การเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นมีผลให้พลังงานรวมจำเพาะมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะกรณีใช้อุณหภูมิลมร้อนต่ำที่ 60-80°C การเพิ่มขึ้นของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นมีผลต่อการลดลงของพลังงานรวมจำเพาะอย่างชัดเจนประมาณ 40-70% โดยการเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นมีผลเล็กน้อยต่อการลดลงของพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ แต่จะมีผลอย่างชัดเจนกับการใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะที่ลดลงที่อุณหภูมิลมร้อนต่ำ นั้นหมายความว่าที่อุณหภูมิลมร้อนต่ำการเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นจะช่วยลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลดีต่อการอบแห้งที่สามารถอบแห้งด้วยปริมาณข้าวที่มากในขณะที่ใช้พลังงานลดลง การเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น กรณีอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นมีผลช่วยลดพลังงานรวมจำเพาะน้อยลง



รูปที่ 3.26 พลังงานรวมจำเพาะและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 19 m/s



รูปที่ 3.27 พลังงานรวมจำเพาะและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 22 m/s



รูปที่ 3.28 พลังงานรวมจำเพาะและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 25 m/s

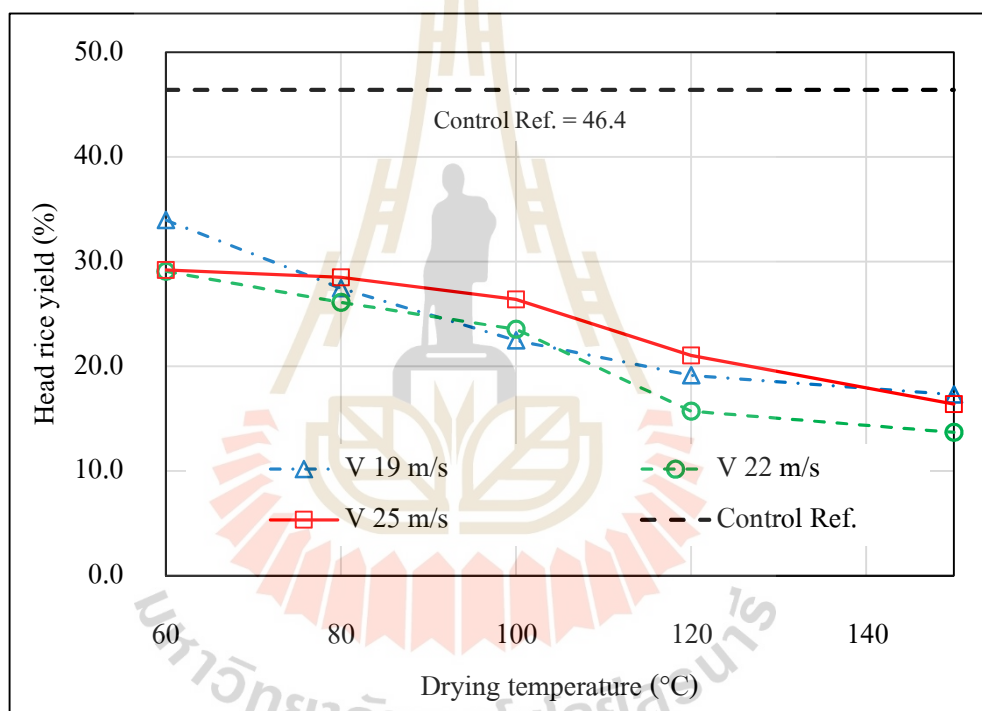
อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะหรือพลังงานจากเครื่องเป่าลมมีค่าสูงมาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 60°C โดยใช้ระยะเวลาอบแห้งมากที่สุด ซึ่งเหตุผลที่ใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะสูงเพราะประสิทธิภาพของเครื่องเป่าลมที่ต่ำมากประมาณ 13.3% เมื่อคำนวณโดยใช้ความดันตกคร่อมเบดสูงสุด ดังในภาคผนวก ก.8 แต่ในความเป็นจริงความดันตกคร่อมเบดมีค่าต่ำมากขณะเกิดการเป่าแห้งดังแสดงในรูปที่ ก.4 ในภาคผนวก ก นั้นหมายความว่าประสิทธิภาพของเครื่องเป่าลมจะต่ำมากกว่าที่กล่าวมา จึงเป็นสาเหตุให้ค่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะสูงขึ้นมากเกินไป

3.4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่อคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

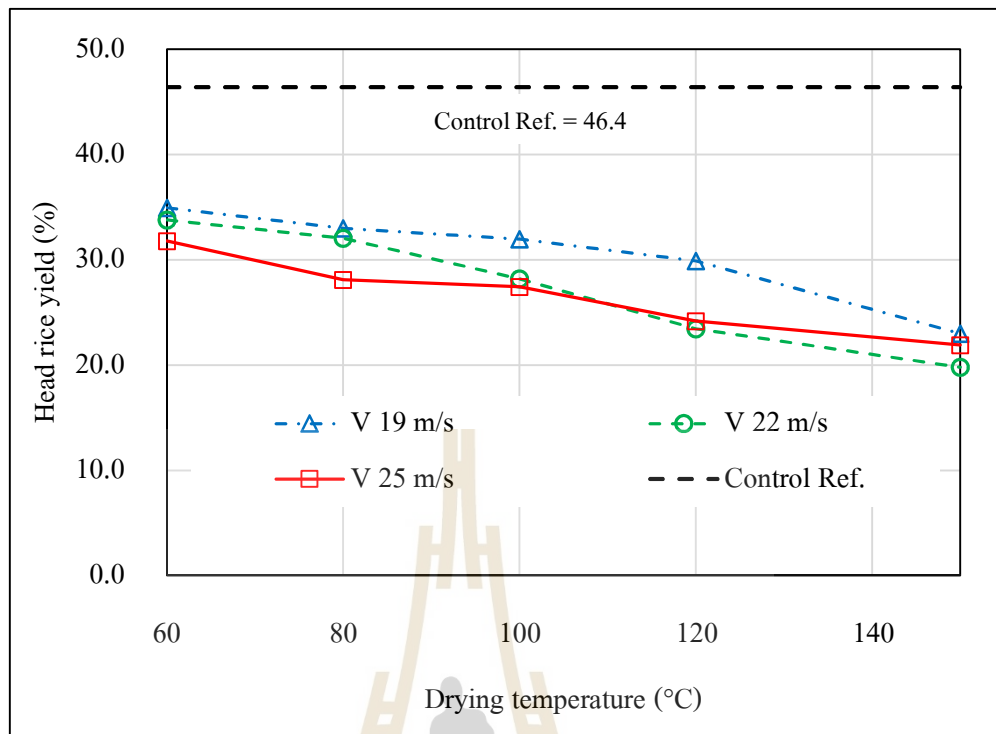
การบ่งบอกถึงคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งที่สำคัญจะพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือก คือปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (head rice yield, %HRY) และค่าดัชนีความขาว (whiteness index, WI) ของข้าวที่ได้หลังการขัดสีของข้าวเปลือก เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าแห้งหล่นอิสระ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพข้าวเปลือก มีดังต่อไปนี้

- 1) ผลของอุณหภูมิลมร้อนต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน

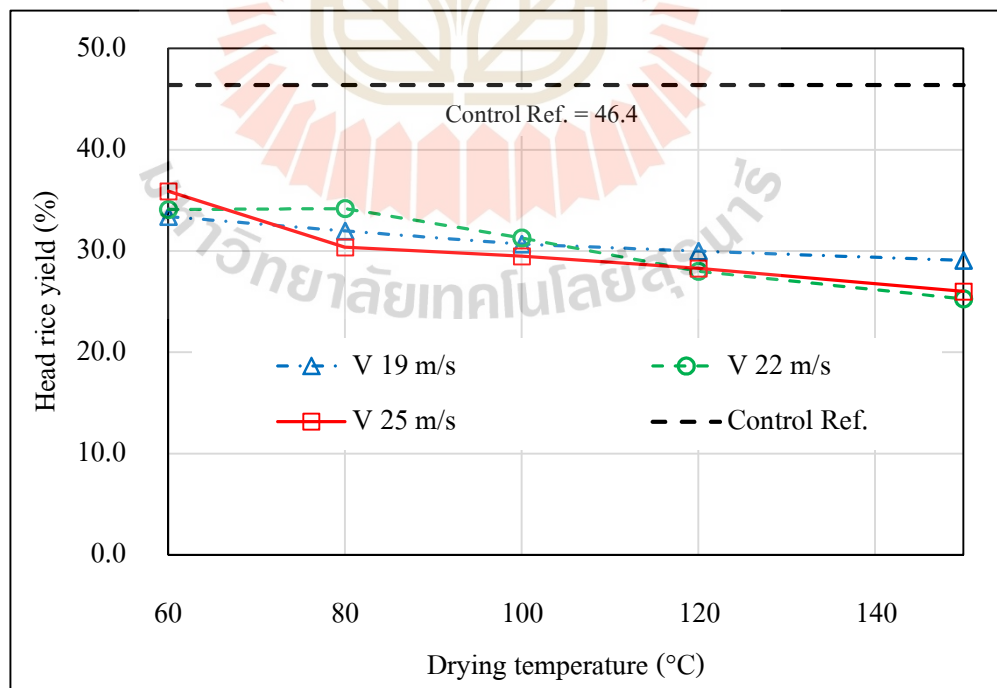
ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่ความชื้นข้าวเปลือกอยู่ในช่วงประมาณ 14%w.b. เมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อน 60-150°C แสดงในรูปที่ 3.29-3.31 จากรูปแสดงให้เห็นว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นน้อยสุดที่ 5 kg เมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 60°C ขึ้นเป็นอุณหภูมิลมร้อนสูงสุด 150°C เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลงจาก 30% ลงมาถึง 16% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณข้าวเปลือกเริ่มต้นสูงสุดที่ 15 kg การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนมีผลให้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบการลดลงของเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่อุณหภูมิลมร้อนสูงในกรณีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg โดยที่อุณหภูมิลมร้อนสูงสุดเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg มีค่าต่ำสุดเพียง 26%



รูปที่ 3.29 เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg



รูปที่ 3.30 เปอร์เซนต์ข้าวต้นและอุณหภูมิความร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg



รูปที่ 3.31 เปอร์เซนต์ข้าวต้นและอุณหภูมิความร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg

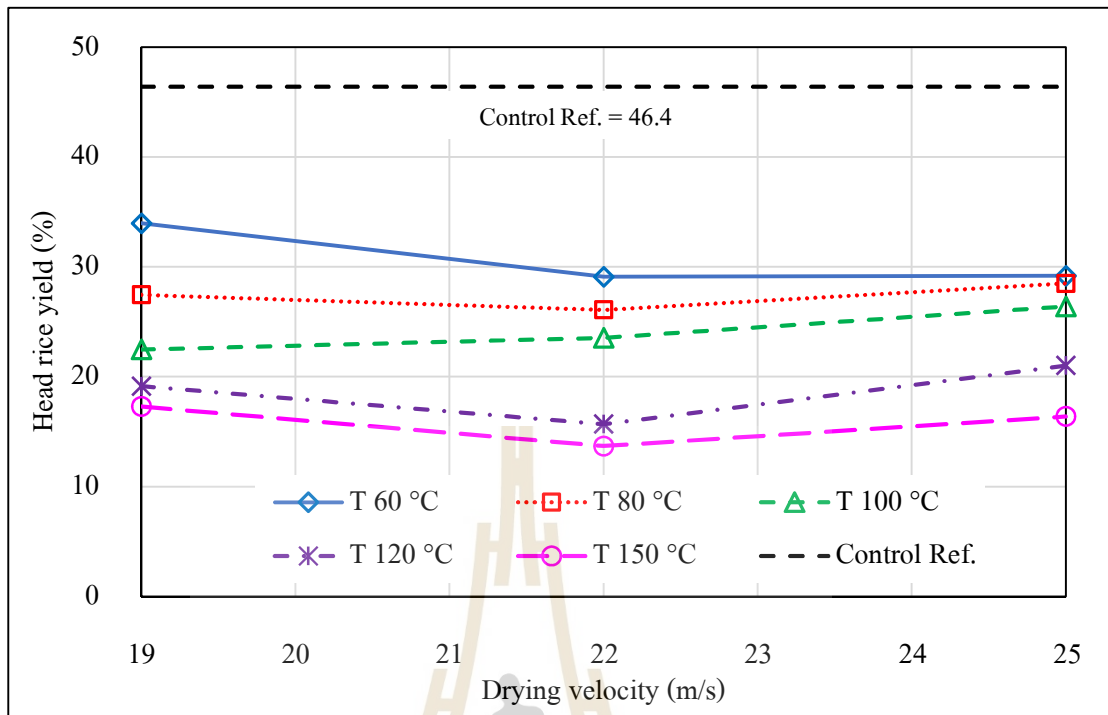
2) ผลของความเร็วมร็อนต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

จากรูป 3.32-3.34 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วมร็อนมากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน โดยแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วมร็อนจาก 19 m/s เป็น 22 m/s กรณีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg แต่เมื่อเพิ่มความเร็วมร็อนให้สูงขึ้นที่ 25 m/s พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือบางกรณีใกล้เคียงกับการอบแห้งด้วยความเร็วมร็อน 22 m/s ซึ่งสัมพันธ์กันกับอัตราการอบแห้งที่ลดลงในหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว (3.4.2)

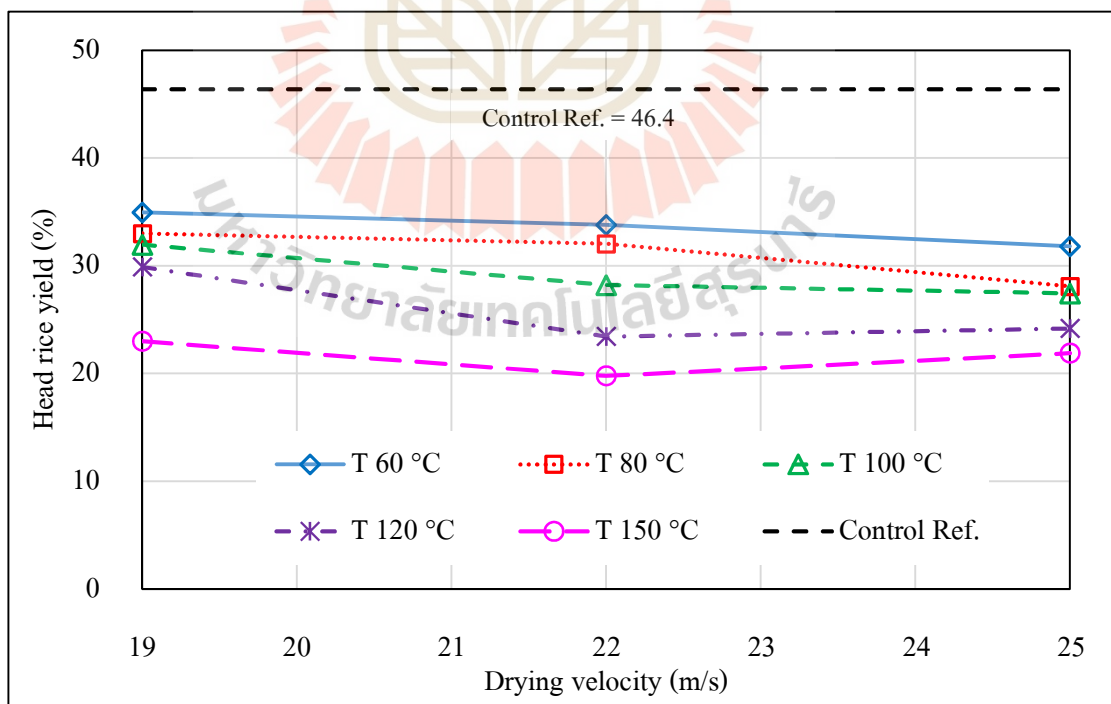
3) ผลของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

การอบแห้งเมื่อเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น จากรูปที่ 3.35-3.37 จะเห็นว่าการเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะสังเกตได้ชัดเจนเมื่อเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นจาก 5 kg เพิ่มเป็น 10 kg ที่ความเร็วมร็อน 19 m/s ซึ่งสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นจากประมาณ 18% เพิ่มเป็น 30% โดยการเพิ่มปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นมีผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งในแต่ละรอบนานขึ้น นั่นหมายความว่าข้าวเปลือกจะมีช่วงระยะเวลาการพักตัวที่นานขึ้น ทำให้มีระยะเวลาที่ความชื้นภายในเมล็ดจะสามารถแพร่ออกมาที่ผิวเมล็ดได้มากขึ้น ทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นความชื้นที่น้อยกว่ากรณีการอบแห้งโดยใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นน้อย จึงทำให้ความชื้นความชื้นภายในเมล็ดมีค่าสูง ค่าความเค้นแรงกดที่แกนเมล็ดและค่าความเค้นแรงดึงที่ผิวเมล็ดจึงมากขึ้น ทำให้เกิดรอยร้าวและการแตกหักของเมล็ดข้าวเปลือกได้ (Poomsa-ad et al., 2002; Dong et al., 2009)

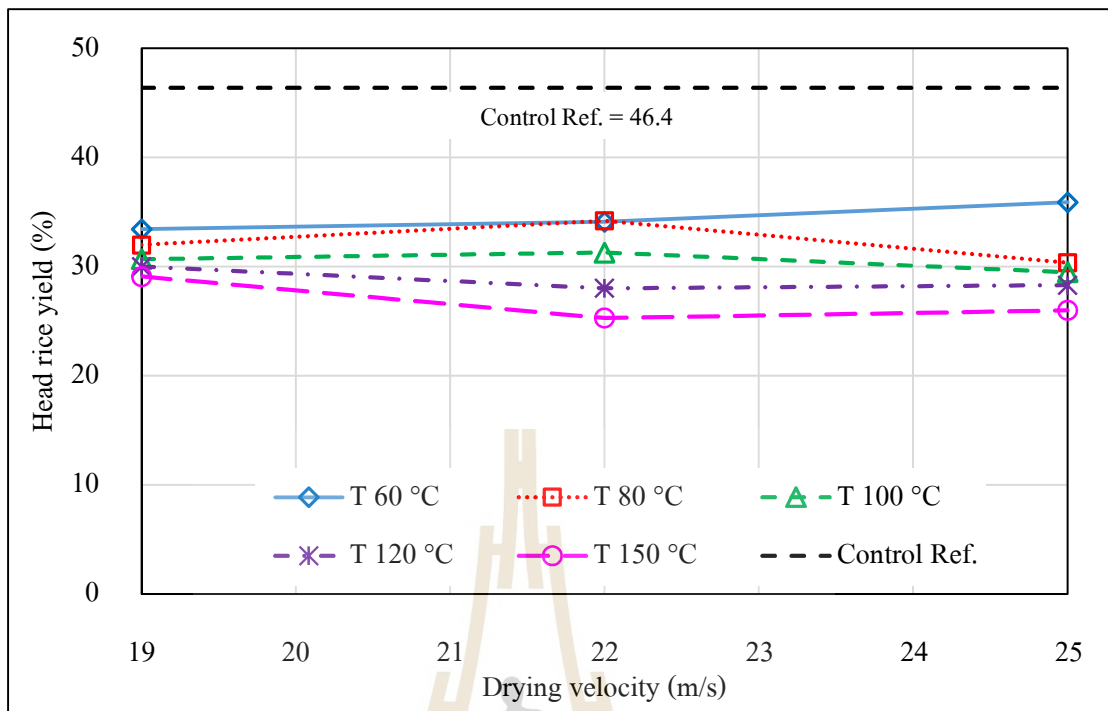
สำหรับข้าวอ้างอิงที่ควบคุมการอบแห้งโดยใช้การอบแห้งแบบถาด อุณหภูมิอากาศที่ใช้เป็นอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 30°C และใช้ความเร็วมร็อนประมาณ 1 m/s เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวภายในเมล็ด เพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงสุด โดยลดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกจาก 25% w.b. ถึง 14% w.b. ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น 46.4% ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นอิสระมีค่าสูงสุดที่ 35.9% ซึ่งเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่ได้นี้มีค่าน้อยกว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นจากตัวอย่างอ้างอิง เพราะการอบแห้งแบบเป่าพ่น-หล่นอิสระใช้อุณหภูมิมร็อนความเร็วมร็อนที่สูงรวมถึงมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่น้อยทำให้ข้าวเปลือกมีเวลาพักตัวน้อยกว่า ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลง



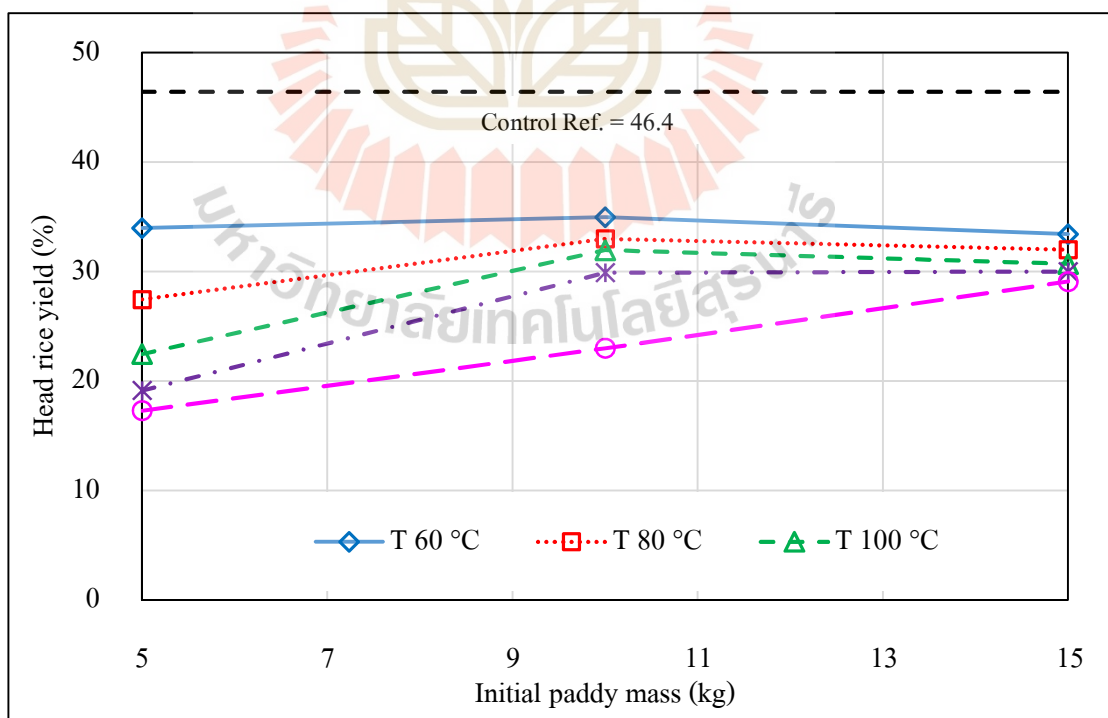
รูปที่ 3.32 เปอร์เซนต์ข้าวต้นและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg



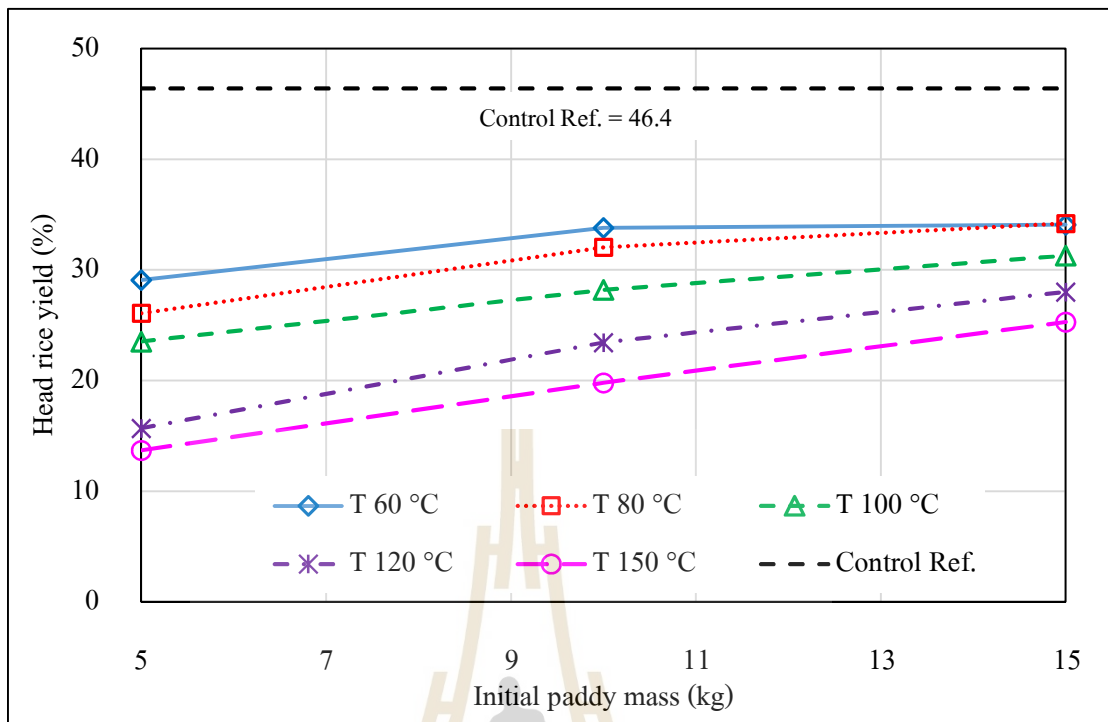
รูปที่ 3.33 เปอร์เซนต์ข้าวต้นและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg



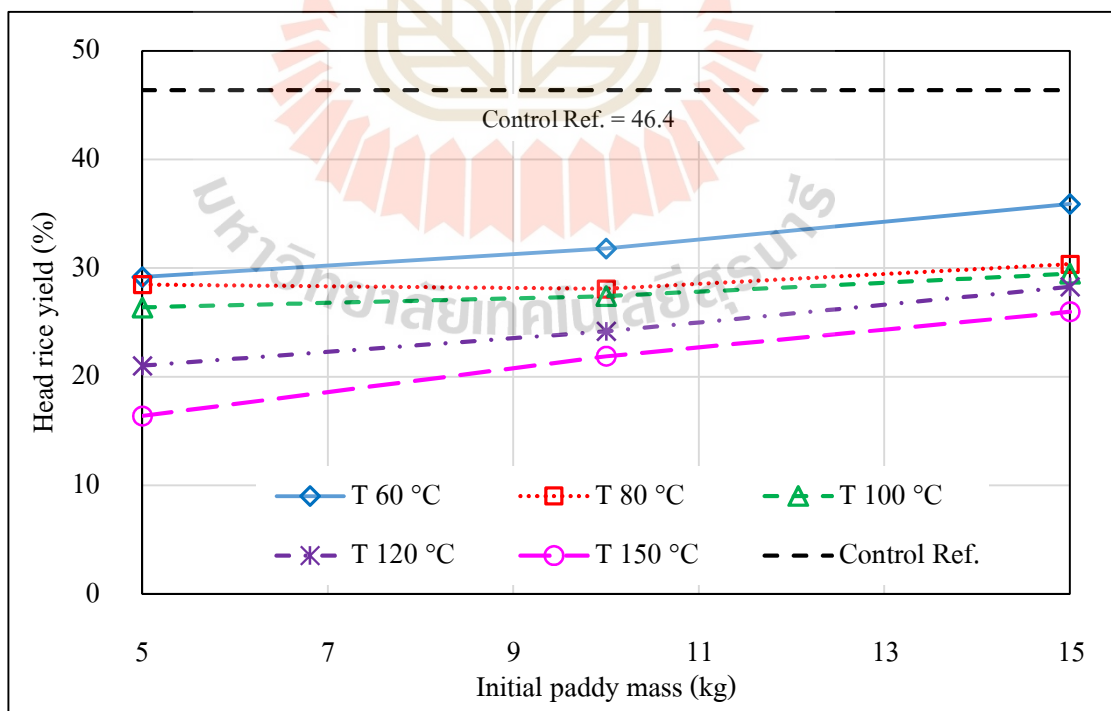
รูปที่ 3.34 เปอร์เซนต์ข้าวตันและความเร็วลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg



รูปที่ 3.35 เปอร์เซนต์ข้าวตันและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 19 m/s



รูปที่ 3.36 เปอร์เซนต์ข้าวตันและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 22 m/s

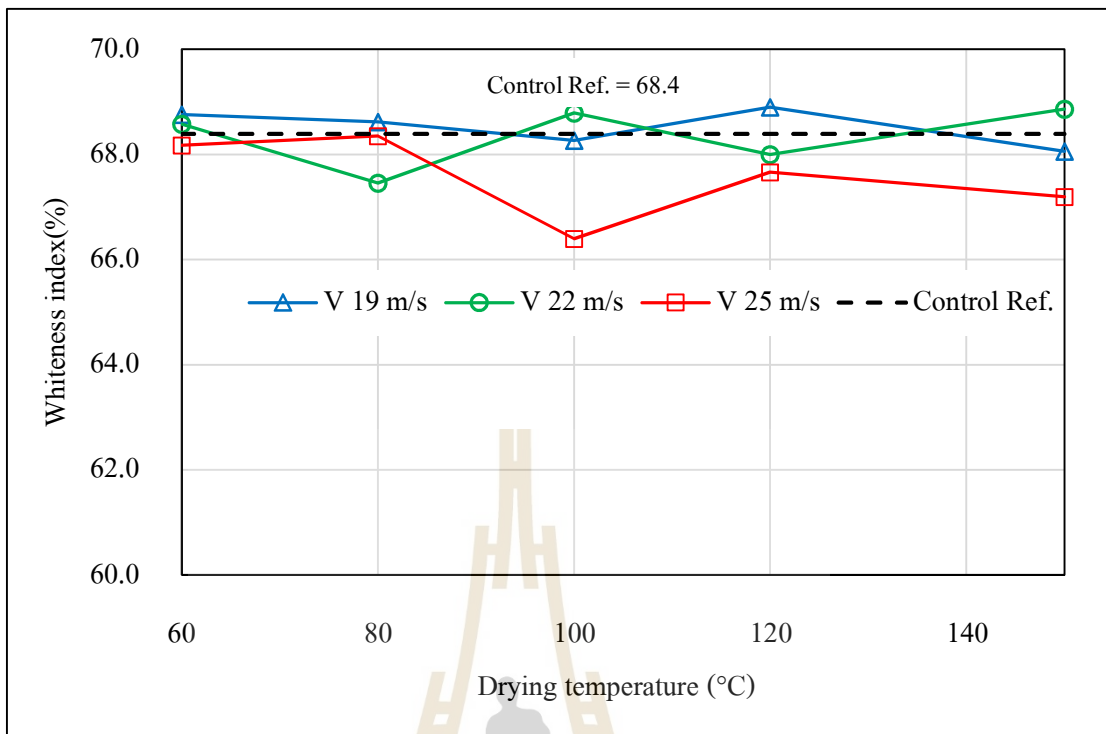


รูปที่ 3.37 เปอร์เซนต์ข้าวตันและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ที่ความเร็วลมร้อน 25 m/s

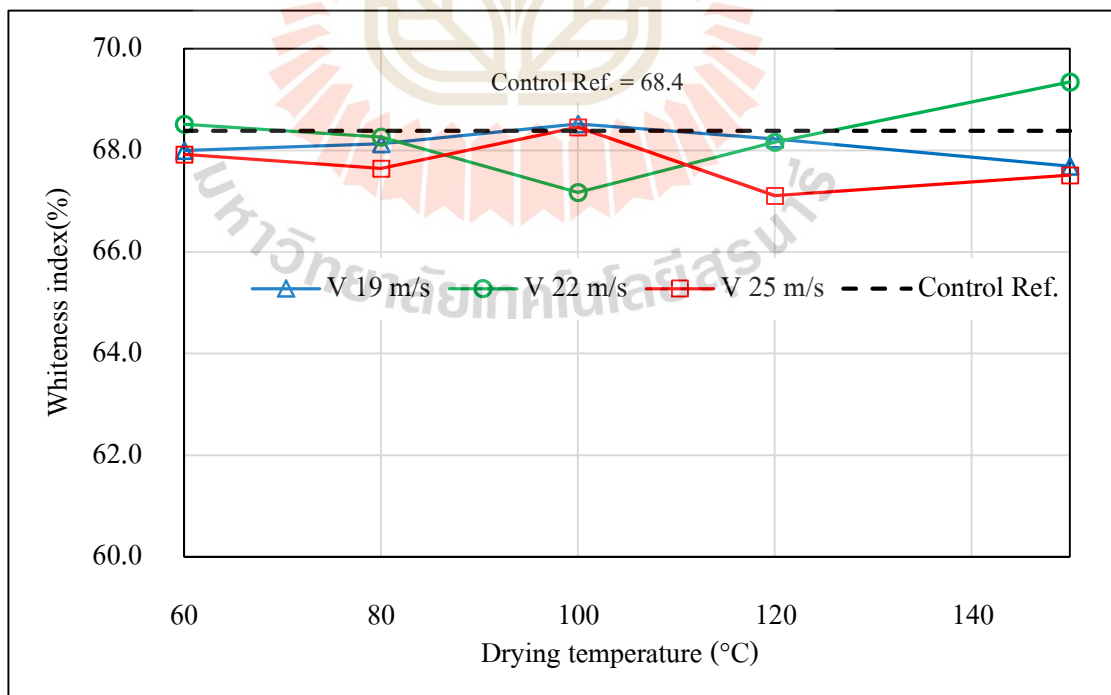
4) ผลต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร

การวัดคุณภาพข้าวอีกอย่างหนึ่งคือการวัดสีของข้าวหลังการขัดสี ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ค่าดัชนีความขาวในการพิจารณา ค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการขัดสี เมื่อใช้อุณหภูมิความร้อน 60-150°C แสดงในรูปที่ 4.38-4.40 พบว่าค่าดัชนีความขาวต่ำสุดมีค่า 66.4% และสูงสุดที่ได้คือ 69.3% โดยค่าดัชนีความขาวของข้าวสารมีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าดัชนีความขาวของข้าวอ้างอิง ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 68.4% ภาพรวมของค่าดัชนีความขาวของข้าว เมื่ออุณหภูมิความร้อนสูงขึ้นจะมีค่าต่ำลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าดัชนีความขาวของข้าวในกรณีที่ใช้อุณหภูมิความร้อนสูงสุดเทียบกับค่าดัชนีความขาวของข้าวอ้างอิงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายความว่าถึงแม้จะอบแห้งด้วยอุณหภูมิและความเร็วที่สูง ค่าดัชนีความขาวก็ยังไม่ลดลงมาก ทั้งนี้เนื่องจากข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ มีช่วงระยะเวลาสัมผัสลมร้อนอุณหภูมิสูงในช่วงเป่าพ่นในท่อนสั้นมาก ถึงแม้ในถังพักข้าวจะมีลมร้อนบางส่วนที่ไหลแทรกผ่านออกมาก็ตาม ทำให้อุณหภูมิมเฉลี่ยมีค่าไม่สูงมาก โดยสาเหตุที่ทำให้ข้าวมีความขาวลดลงเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง โดยปฏิกิริยาดังกล่าวต้องการความร้อนเพื่อทำให้พันธะ hydroxyl group ระหว่างโมเลกุลภายในน้ำตาลหลุดออกจากกันกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลต่ำ เกิดเป็นสารประกอบคีโตนทำให้ข้าวสารมีสีเหลือง ซึ่งการใช้อุณหภูมิความร้อนสูงเป็นเวลานานจะทำให้ค่าความขาวของข้าวลดลง (สมชาติ โสภณธณฤทธิ, 2540)

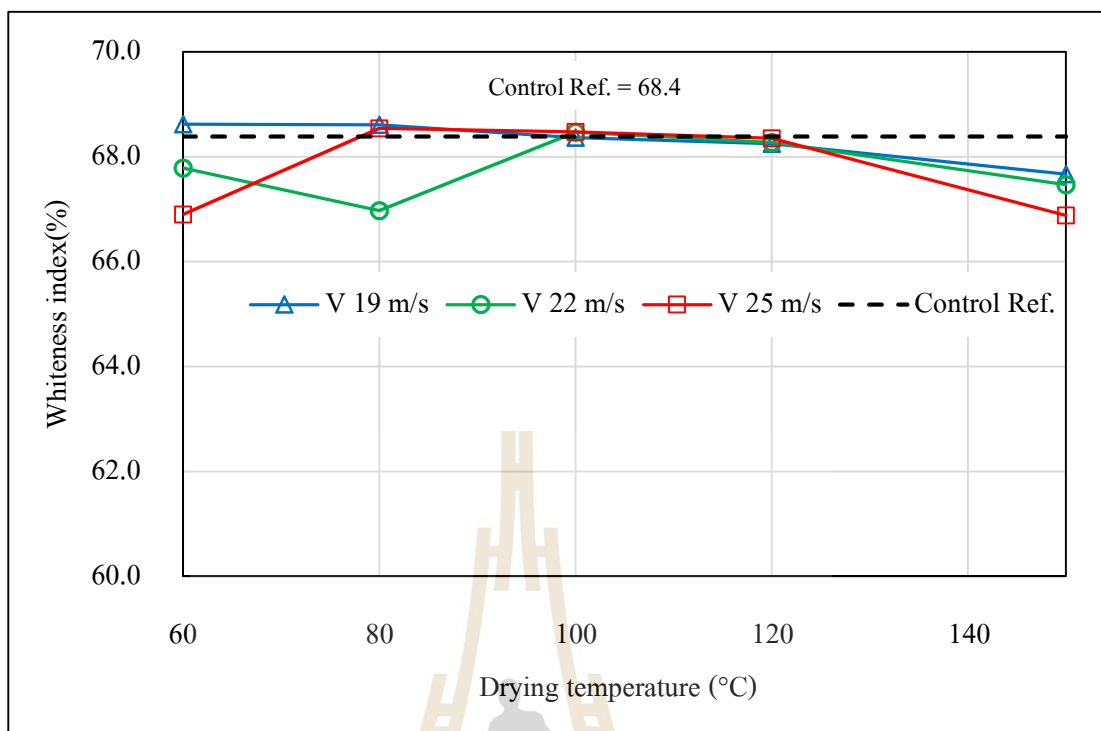
จากที่กล่าวมาแล้วนั้นจะเห็นว่าการลดการใช้พลังงานสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิความร้อนที่ใช้อบแห้ง ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการลดพลังงาน โดยใช้ความเร็วลมร้อนที่ต่ำ และใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่สูง นอกจากนี้การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นเป็นปัจจัยที่สำคัญ โดยการเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นปริมาณสูงช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวตันถึงแม้จะอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง นั่นหมายความว่าสามารถใช้เงื่อนไขอุณหภูมิความร้อนสูงในการอบแห้งได้ โดยใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่สูง และใช้ความเร็วลมร้อนต่ำ จะทำให้อบแห้งได้รวดเร็วและประหยัดพลังงาน ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวตันลดลงน้อยมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งเงื่อนไขอื่น รวมถึงค่าดัชนีความขาวไม่ต่างกับตัวอย่างอ้างอิง เช่นในกรณีเงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิความร้อนสูงสุดที่ 150°C ใช้ความเร็วลมร้อนต่ำสุด 19 m/s มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นสูงสุด 15 kg ซึ่งมีอัตราการอบแห้งสูง ใช้พลังงานรวมจำเพาะต่ำสุดที่ 7.84 MJ/kg_{water evaporated} เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน 29.1% และค่าดัชนีความขาวข้าวอยู่ที่ 67.7% ซึ่งใกล้เคียงกับข้าวอ้างอิงที่มีค่า 68.4%



รูปที่ 3.38 ดัชนีความขาวข้าวหลังขัดสีและอุณหภูมิลมร้อน ที่มีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg



รูปที่ 3.39 ดัชนีความขาวข้าวหลังขัดสีและอุณหภูมิลมร้อน ที่มีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg



รูปที่ 3.40 ดัชนีความขาวข้าวหลังขัดสีและอุณหภูมิลมร้อน ที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg

3.5 สรุปผลการวิจัย

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกจากช่วงความชื้นประมาณ 25% w.b. ถึงความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาที่ 14% w.b. ด้วยเครื่องอบแห้งแบบวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนช่วง 60-150°C มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5-15 kg และความเร็วมร้อน 19-25 m/s

การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาการอบแห้งมากขึ้น โดยมีแนวโน้มการลดลงในลักษณะใกล้เคียงกับแบบเชิงเส้น เนื่องจากลักษณะการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีการพัดตัวในถังพัก ทำให้มีระยะเวลาที่ความชื้นภายในเมล็ดข้าวจะแพร่มาสู่ผิวเมล็ดได้มากกว่า ซึ่งช่วยให้ถ่ายเทความชื้นออกจากเมล็ดง่ายกว่าก่อนเข้าสู่การอบแห้งในท่อเป่าพ่น การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 60°C ถึง 150°C อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มถึง 5 เท่า ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับความเร็วมร้อนที่เพิ่มขึ้นจาก 19 m/s เป็น 22 m/s มีแนวโน้มทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 10% ที่อุณหภูมิลมร้อนมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วมร้อนขึ้นอีกเป็น 25 m/s กลับทำให้อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงถึง 4% ซึ่งเป็นผลจากช่วงการอบแห้งแบบเป่าพ่นเหนือท่อและหล่นอิสระ ที่เมล็ดข้าวถูกเป่าพ่นเหนือท่อขึ้นที่ความสูงที่สุดประมาณ 2 m ไป

แล้วตกลงสู่ถังพักแบบหล่นอิสระ ซึ่งทำให้มีระยะเวลาสัมผัสกับอากาศแวดล้อมที่นานขึ้นรวมถึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลความชื้นกับอากาศแวดล้อม ทำให้อัตราการอบแห้งจึงลดลง

มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่สูงขึ้น มีผลทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงขึ้น โดยเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 17% เนื่องจากการเพิ่มทั้งระยะทางและเวลาที่ทำให้เมล็ดข้าวมีระยะเวลาอยู่ในถังพักนานขึ้น ส่งผลให้มีระยะเวลาในการแพร่ความชื้นออกมามากขึ้น รวมถึงเนื่องจากมีลมร้อนบางส่วนไหลแทรกเข้ามาในถังพักจึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น

ค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะเพิ่มสูงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้อุณหภูมิความร้อนมากกว่า 60°C โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ค่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้อุณหภูมิความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นส่งผลให้พลังงานทุติยภูมิลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิความร้อน 60-80°C สำหรับการลดค่าพลังงานรวมจำเพาะสามารถทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิความร้อนสูงขึ้นซึ่งสามารถลดพลังงานรวมจำเพาะลงได้ถึง 2 เท่า เพิ่มปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นลดพลังงานรวมจำเพาะลงได้ถึงประมาณ 40-70% และใช้ความเร็วลมร้อนต่ำสุด

คุณภาพข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งที่ความชื้นประมาณ 14% w.b. มีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิความร้อนสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิความร้อนสูงสุด 150°C เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นจะลดลง โดยจะลดลงมากอย่างมีนัยสำคัญจาก 30% ลงมาถึง 16% เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ำสุด (5 kg) นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วจาก 19 m/s ขึ้นเป็น 22 m/s มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลงเพิ่มขึ้นอีก แต่ในทางกลับกันการเพิ่มความเร็วลมร้อนสูงสุด 25 m/s ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นใกล้เคียงหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งที่ต่ำลงเมื่อใช้ความเร็วลมร้อนสูงสุด สำหรับการเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ซึ่งที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นได้อย่างมีนัยสำคัญจากประมาณ 18% เพิ่มขึ้น 30% เป็นผลจากข้าวมีระยะเวลาการพักตัวที่นานขึ้นทำให้ความแตกต่างของความชื้นความชื้นลดลง ส่งผลให้ความชื้นที่เกิดขึ้นลดลงถึงแม้จะใช้อุณหภูมิความร้อนที่สูง ในส่วนค่าดัชนีความขาวข้าวเปลือกหลังการขัดสี พบว่ามีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวอ้างอิงถึงแม้ว่าการอบแห้งจะใช้อุณหภูมิความร้อนที่สูงถึง 150°C

รายการอ้างอิง

- พิธีสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโชนาค, มุस्ताฟา ยะกา และ ประชา บุญขวานิชกุล. (2557). การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**. 9(1): 68-74.
- โพธิ์ทอง ปราณิณฑกรัง และ กิตติ สถาพรประสาธน์ (2560). การประยุกต์ใช้เทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบคร่วมกับคลื่นอัลตราซาวด์สำหรับอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**. 12 (1).
- สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552). ผลของระยะพัก อุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ. **การประชุมวิชาการเครื่องข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5**. 29 เมษายน- 1 พฤษภาคม 2552. มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- 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.
- 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**. 23: 473-495.
- Poomsa-ad, N., Soponromiarit, S., Prachayawarakom, 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 Prachayawarakom, 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.

บทที่ 4

การทำนายผลการทดลองอบแห้งชั้นบางและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

4.1 บทคัดย่อ

งานวิจัยในบทนี้ศึกษาแบบจำลองเอมพิริคัลชั้นบางและแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ เพื่อทำนายผลจนผลศาสตร์การอบแห้ง ภายใต้เงื่อนไขอิทธิพลอุณหภูมิร้อนในช่วง 60 - 150°C มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 - 15 kg และความเร็วมร้อน 19 m/s ผลการทดลองถูกนำไปใช้สอบเทียบแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย 12 แบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เมื่อพิจารณาทั้งอิทธิพลอุณหภูมิร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ในรูปแบบเชิงเส้นพบว่าแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่นิยมใช้สามารถทำนายผลของอัตราส่วนความชื้นได้แม่นยำ โดยให้ความแม่นยำสูงสุดที่ RMSE= 0.0279, χ^2 = 0.00084 และ r= 0.9938 นอกจากนี้ผลการทดลองยังถูกนำไปใช้สังเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในรูปแบบใหม่ที่เป็นฟังก์ชันของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น อุณหภูมิร้อน และเวลาอบแห้ง แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นอยู่ในรูปฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลที่ประกอบด้วยค่าคงที่แบบจำลองเพียงจำนวน 7 ตัว เมื่อนำไปใช้จำลองผลอัตราส่วนความชื้น พบว่าให้ความแม่นยำเทียบเท่าแบบจำลองที่นิยมใช้ที่แม่นยำสูงสุด ซึ่งใช้ค่าคงที่แบบจำลองถึง 24 ตัว โดยให้ค่าความแตกต่างของผลจำลองเพียง 1.8%

4.2 บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย การบริโภคข้าวมีความต้องการเพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากร ด้วยการเก็บเกี่ยวข้าวในปัจจุบัน ข้าวมักมีความชื้นสูงในช่วงร้อยละ 25-30% w.b. ดังนั้นการอบแห้งหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีความสำคัญมาก เพื่อคงคุณภาพที่ดีป้องกันการเน่าเสีย ยืดอายุการเก็บรักษา โดยอบลดความชื้นลง ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 13-14% w.b. (พรศักดิ์ ทองมา, 2542) ซึ่งสภาพความชื้นต่ำช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเชื้อรา การลดความชื้นข้าวเปลือกที่นิยมใช้คือ การตากบนลานปูนซึ่งประหยัดแต่มีข้อเสีย เช่น ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ ใช้เวลา แรงงาน และพื้นที่มาก รวมถึงการปนเปื้อนและเสียหายปริมาณสูง ดังนั้น การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเชิงกลจึงช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งหลายรูปแบบที่นิยมในเชิงพาณิชย์ โดยใช้

อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากไม่ซับซ้อนและต้นทุนต่ำ เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบไหลคลุกเคล้า (LSU) เป็นต้น เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดระบบฟลูอิดเซชันในด้านขนาดอนุภาคที่ใช้ออบ สามารถอบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อนสูงได้ดี โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เวลาสัมผัสความร้อนสั้นทำให้อบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้ มีการพักตัวในห้องอบแห้งทำให้ความชื้นภายในแพร่ออกมาที่ผิว มีความสม่ำเสมอของคุณภาพหลังการอบ และใช้พลังงานค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ดังนั้นเทคนิคแบบเป่าพ่นจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท (พรศักดิ์ ทองมา, 2542; โพธิ์ทอง ปรานิตพลกรัง และ กิตติ สถาพรประสาธน์, 2560) โดยเฉพาะการอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งพบว่าให้อัตราการอบแห้งสูงอบแห้งได้เร็ว ประหยัดพลังงาน และให้ข้าวมีคุณภาพดีในด้านคุณภาพการขัดสีและความขาวของข้าว (Meesukchaosumran and Chitsomboon, 2018; Khaengkarn et al., 2011)

การทดลองเพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม นั้นค่อนข้างใช้เวลาและค่าใช้จ่ายมาก นอกจากนี้วัสดุทางชีวภาพอย่างเช่น ข้าว มีกระบวนการแพร่และการระเหยน้ำภายในเมล็ดที่ซับซ้อน เช่น การไหลแบบโมเลกุลอิสระ (Knudsen flow) การดูดซึมด้วยระบบคาปีลารี การแพร่ของน้ำในสภาพของเหลวและไอ เป็นต้น ดังนั้นการสร้างสมการทำนายความชื้นโดยใช้แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางจึงนิยมกันอย่างแพร่หลาย (Khaengkarn et al., 2011) งานวิจัยที่ศึกษาการจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางกับวัสดุที่หลากหลาย เช่น การอบแห้งหญาปักกิ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด (ศักชัย จงจำ และ อำไพศักดิ์ ทิบุญญา, 2553) การอบแห้งถั่วและเมล็ด (Aregbesola et al., 2015) การอบแห้งพริกเทคนิคสุญญากาศ (Alibas, 2012) การอบแห้งแป้งมันเทศ THAO and NOOMHORM, 2011) กากแคโรท (Kumar et al., 2012) การอบแห้งข้าวโดยการวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิตemperatur (Zhang et al., 2018) การอบแห้งใบตะไคร้ (Mujaffar and John, 2018). การอบแห้งโกโก้ และเฮเซลนัท โดยจำลองวัสดุเป็นวงกลมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Hii et al, 2009; Özdemir and Devres, 1999) งานวิจัยในบทนี้ศึกษาแบบจำลองอิมพิริคัลชั้นบางและแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหมุนอิสระ เพื่อทำนายผลจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ภายใต้เงื่อนไขอิทธิพลอุณหภูมิลมร้อนในช่วง 60 - 150°C มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 - 15 kg และความเร็วลมร้อน 19 m/s ผลการทดลองที่นำเสนอในบทที่ 3 ถูกนำไปใช้สอบเทียบแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่นิยมใช้แพร่หลาย 12 แบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เมื่อพิจารณาทั้งอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น นอกจากนี้ผลการทดลองยังถูกนำไปใช้สังเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในรูปแบบใหม่ที่เป็นฟังก์ชันของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น อุณหภูมิลมร้อน และเวลาอบแห้ง

4.3 วิธีดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 4.1 แบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งข้าวเปลือก (Khaengkarn et al., 2011)

No.	Model Name	Equation
1	Newton (1921)	$MR = \exp(-kt)$
2	Page (1943)	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis (1961)	$MR = a \exp(-kt)$
4	Two-term (1974)	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$
5	Wang and Singh (1978)	$MR = 1 + at + bt^2$
6	Logarithmic (1984)	$MR = a \exp(-kt) + c$
7	Verma et al. (1985)	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
8	Modified Page equation II (1993)	$MR = \exp(-k(t/L^2)^n)$
9	Diffusion approach (1998)	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
10	Modified Henderson and Pabis (1999)	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
11	Midilli et al. (2002)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
12	Jena and Das (2007)	$MR = a \exp(-kt + bt^{1/2}) + c$

4.3.1 แบบจำลองเอมพิริคัลสำหรับการอบแห้งชั้นบาง

แบบจำลองที่ใช้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกมักนิยามในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย (MR) กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t) รูปแบบความสัมพันธ์จัดรูปใหม่มักอยู่ในรูปสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่มีค่าคงที่ต่างๆ ประกอบในสมการ ตัวอย่างแบบจำลองที่นิยมใช้แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ถูกนำไปใช้ในการสอบเทียบผลการทดลองต่อไป อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้สนใจแบบจำลองการอบแห้งของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น โดยพิจารณาจากกฎการแพร่ความชื้นข้อที่ 2 ของฟิคส์ ที่ใช้กันแพร่หลายในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเมล็ด บนสมมติฐานเมล็ดข้าวเป็นทรงกลม การแพร่ความชื้นสม่ำเสมอในทุกทิศทาง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นคงที่ ไม่มีการหดตัว (Hii et al., 2009) ดังสมการที่ (4.1)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (4.1)$$

โดยที่	M	คือ ความชื้น (d.b.)
	r	คือ รัศมี (m)
	t	คือ เวลาอบแห้ง (s)
	D_{eff}	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)

ภายใต้สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต $M(r,0)=M_i$, $M(r_o,t)=M_e$ และ $dM(0,t)/dt=0$ ผลเฉลยรูปทั่วไปเป็นค่าเฉลี่ยบนปริมาตรเมล็ดข้าวแบบทรงกลม แสดงในสมการที่ (4.2) โดยใช้ความสัมพันธ์ของ Arrhenius ซึ่งได้นำเสนอรูปแบบสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ดังสมการที่ (4.3) (Onwude et al., 2016)

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r_o^2}\right) \quad (4.2)$$

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{abs}}\right) \quad (4.3)$$

อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย เป็นสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในเมล็ดเทียบกับความชื้นเริ่มต้น ดังสมการที่ (4.4) ค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกใช้รูปแบบจำลอง Henderson (Khaengkarn et al., 2011) ดังสมการที่ (4.5)

$$MR = \frac{\bar{M} - M_e}{M_i - M_e} \quad (4.4)$$

$$M_e = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1 - RH)}{C_1 - T_{abs}} \right]^{C_2} \quad (4.5)$$

โดยที่	MR	คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย
	r_o	คือ รัศมีของเมล็ดข้าว (0.00375) (m)
	D_o	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (m^2/s)
	E_a	คือ พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)

R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (kJ/mol-K)
T _{abs}	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของลมร้อน (K)
\bar{M}	คือ ความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ (d.b.)
M _i	คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)
M _e	คือ ความชื้นสมดุล (d.b.)
RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์

$C_1=3.146 \times 10^{-6}$ และ $C_2=2.464$ เป็นค่าคงที่สำหรับข้าวเปลือก (ขึ้นกับเมล็ดพืชที่ใช้อบแห้ง) (ชอบลาทอง, 2530)

การวิเคราะห์พิจารณาจากค่าตัวแปรทางสถิติดังนี้ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ไคกำลังสอง (χ^2) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ดังสมการที่ (4.6) – (4.10) ตามลำดับ (Erbay and Icier, 2010) เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำในการทำนายผล

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (4.6)$$

$$\chi^2 = RMSE^2 \left(\frac{N}{N-z} \right) \quad (4.7)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} MR_{exp,i} - \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{\Delta MR_{pre} \Delta MR_{exp}} \quad (4.8)$$

$$\Delta MR_{pre} = \sqrt{N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \right)^2} \quad (4.9)$$

$$\Delta MR_{exp} = \sqrt{N \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i} \right)^2} \quad (4.10)$$

โดยที่	MR_{exp}	คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง
	MR_{pre}	คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนาย
	N	คือ จำนวนข้อมูล
	z	คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

4.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.4.1 การสอบเทียบผลการทดลองด้วยแบบจำลองการอบแห้ง

ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น (สมการที่ (4.4)) กับเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 60, 80, 100, 120 และ 150°C มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5, 10 และ 15 kg ความเร็วอากาศ 19 m/s (จุดข้อมูลในรูปที่ 4.2-4.4) พบว่าเมื่ออุณหภูมิร้อนสูงขึ้นอัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เวลาการอบแห้งลดลง เพราะอุณหภูมิร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความชื้นที่ผิวเมล็ดแห้งเร็วขึ้น จึงเกิดความแตกต่างของความชื้นความชื้นระหว่างผิวและภายในเมล็ดข้าว ทำให้ความชื้นภายในแพร่ออกมาได้เร็วมากขึ้น การเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นส่งผลให้เวลาการอบแห้งนานขึ้นเพราะมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่มากขึ้นส่งผลต่อระยะเวลาของวงรอบการอบแห้งที่นานขึ้น ทำให้ระยะเวลาการสัมผัสระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกกับลมร้อนน้อยลงในแต่ละรอบการอบแห้ง (เวลาพักมากขึ้น) โดยอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงเร็วสุดที่อุณหภูมิอบแห้งสูงสุดคือ 150 °C และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นน้อยสุดที่ 5 kg

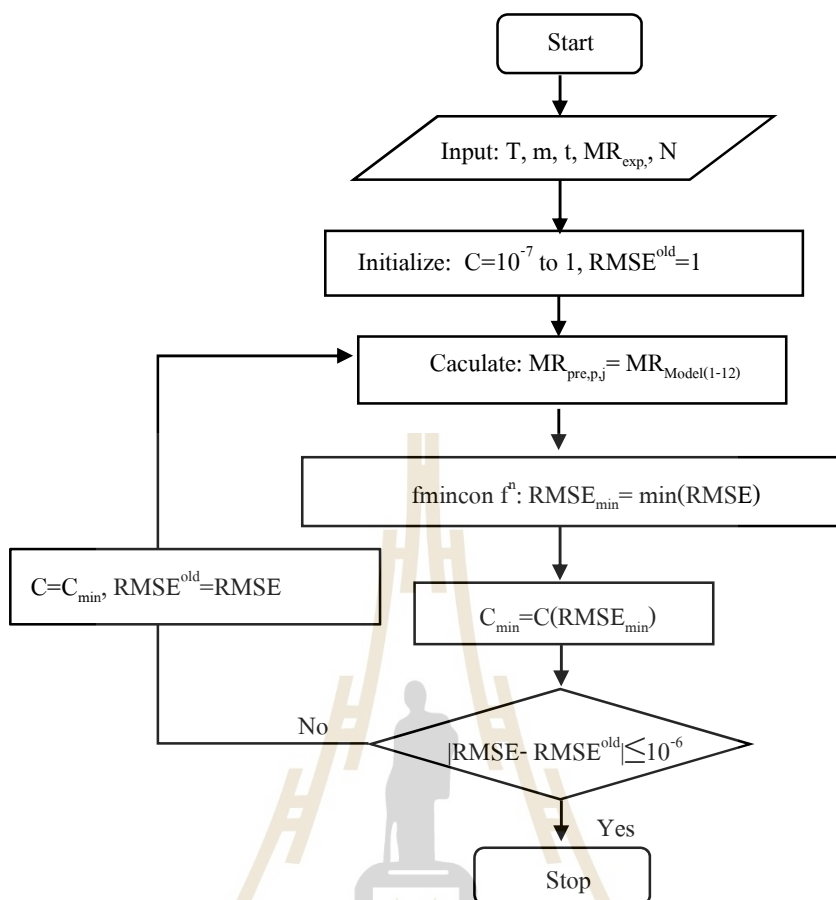
ผลการทดลองถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลสอบเทียบ แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางทั้ง 12 แบบจำลอง (ตารางที่ 4.1) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยพิจารณาแบบจำลองที่ให้ค่า r เข้าใกล้ 1 และให้ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุด ผลที่อุณหภูมิร้อน 60-150 °C มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5, 10 และ 15 kg แสดงในตารางที่ 4.1-4.5 ในภาคผนวก ง เมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับอิทธิพลของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น (m) และอุณหภูมิร้อน (T) พบว่าแบบจำลอง Midilli et al. (2002) มีความแม่นยำที่สุด โดยมีค่า r สูงสุดระหว่าง 0.99960-0.99993 ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุดระหว่าง 0.00300-0.00941 และ 0.00001-0.00012 ตามลำดับ แบบจำลองที่มีความแม่นยำลำดับถัดมาคือ Jena and Das (2007) และ Modified Handerson and Pabis (1999) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถทำนายผลกระทบของทั้งอุณหภูมิร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ค่าพารามิเตอร์ของทั้ง 12 แบบจำลองถูกนำไปจัดรูปตามสมการที่ (4.11) เมื่อ C เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลอง อาทิ k, a, b, c (ดูตารางที่ 4.1)

$$C = C_1 + C_2T + C_3m + C_4mT \quad (4.11)$$

โดย C_1 , C_2 , C_3 และ C_4 เรียกว่าค่าคงที่ของแบบจำลอง ด้วยรูปแบบการหาค่าพารามิเตอร์ตามสมการที่ (4.11) พารามิเตอร์แต่ละตัวประกอบด้วยค่าคงที่แบบจำลอง 4 ตัว ดังนั้นจำนวนค่าคงที่ในแบบจำลองมีทั้งหมดเท่ากับ $4(z)$ ตัว เช่นแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) มีพารามิเตอร์แบบจำลอง 6 ตัว (a, k, b, g, c, h) จึงทำให้มีค่าคงที่แบบจำลองทั้งหมด 24 ตัว เป็นต้น

การหาค่าคงที่แบบจำลองนำไปสู่การได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมด้วยโปรแกรมเมทแลบผ่านฟังก์ชัน *fmincon* โดยฟังก์ชันการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.1 ผลการคำนวณให้ค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) มีความแม่นยำสุด โดยให้ค่า RMSE และค่า χ^2 ต่ำสุดที่ 0.01860 และ 0.00039 ตามลำดับ ค่า r เท่ากับ 0.99719 ส่วนแบบจำลอง Midilli et al. (2002) ให้ความแม่นยำรองลงมา จากรูปที่ 4.2-4.4 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) และ Midilli et al. (2002) พบว่าทั้งสองแบบจำลองให้ผลการทำนายสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) มีความแม่นยำสูงกว่าโดยเฉลี่ย 2.6 เปอร์เซ็นต์





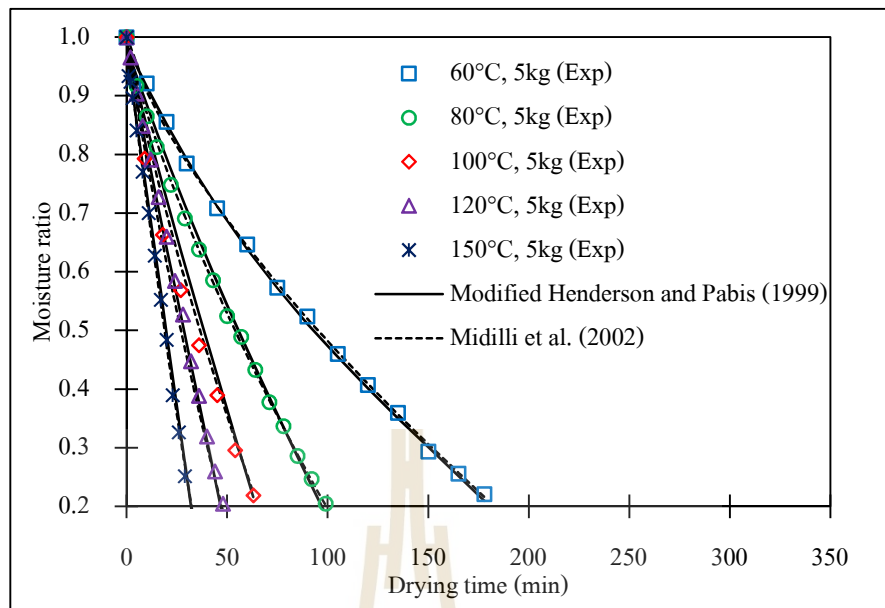
รูปที่ 4.1 ฟังก์ชันที่ใช้คำนวณหาค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่แบบจำลองและผลวิเคราะห์ความแม่นยำในการใช้งาน

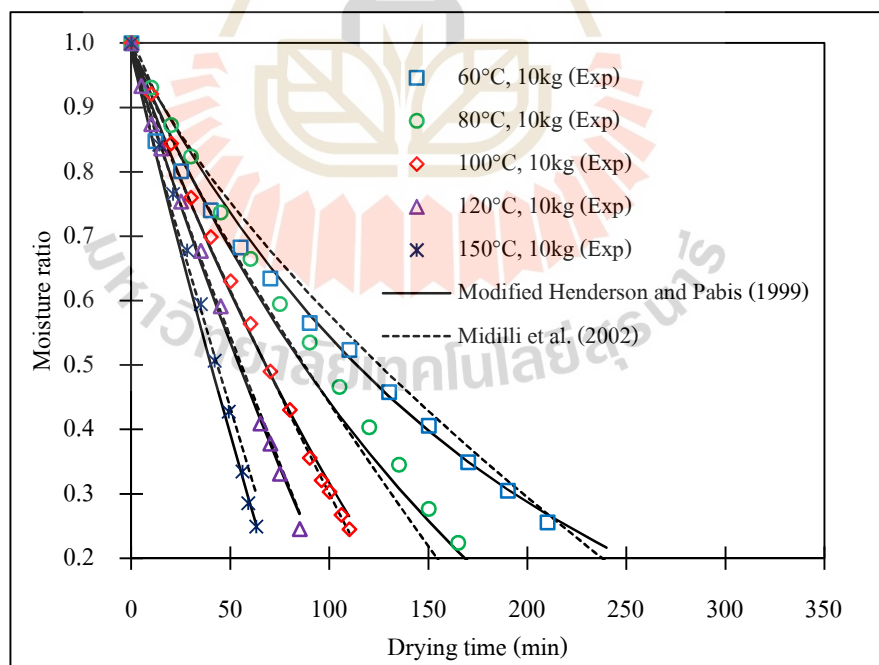
Model No.	C	Model constants				RMSE	χ^2	r
		C_1	C_2	C_3	C_4			
1	k	-0.01056	0.00034	0.00059	-0.00002	0.05261	0.00282	0.97804
2	k	0.00729	0.00003	-0.00045	0.00000	0.04353	0.00197	0.98457
	n	0.65398	0.00608	0.02146	-0.00032			
3	a	1.05768	-0.00104	-0.00429	0.00010	0.05121	0.00272	0.97874
	k	-0.00791	0.00030	0.00039	-0.00001			
4	a	0.40824	0.01067	0.13148	-0.00106	0.02790	0.00084	0.99380
	k	-0.00505	0.00015	0.00009	0.00000			
	b	0.54817	-0.01030	-0.13173	0.00106			
	g	0.00507	-0.00015	-0.00122	0.00003			

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่แบบจำลองและผลวิเคราะห์ความแม่นยำในการใช้งาน (ต่อ)

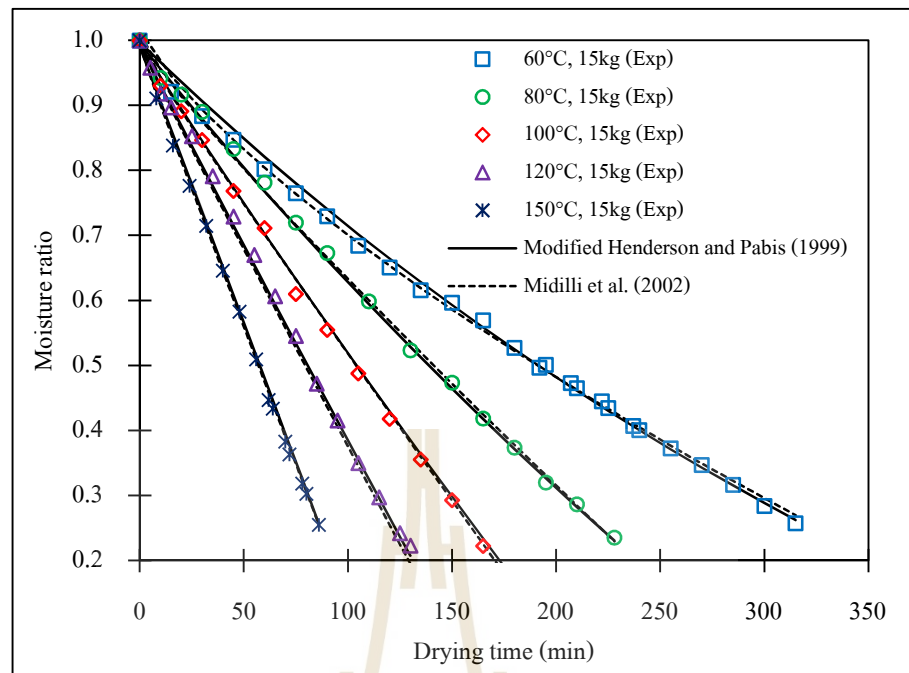
Model No.	C	Model constants				RMSE	χ^2	r
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄			
5	a	0.00378	-0.00020	-0.00023	0.00001	0.06693	0.00465	0.96503
	b	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000			
6	a	-0.20787	0.02231	0.06771	-0.00105	0.04019	0.00171	0.98690
	k	0.00540	0.00004	-0.00032	0.00000			
	c	1.20662	-0.02276	-0.06965	0.00111			
7	a	0.30065	-0.00571	-0.08384	0.00064	0.02819	0.00084	0.99352
	k	0.01662	-0.00034	-0.00227	0.00005			
	g	-0.00253	0.00014	-0.00005	0.00000			
8	k	-0.00526	0.00001	0.00098	0.00000	0.02586	0.00071	0.99482
	l	-0.55484	0.00067	0.16700	-0.00003			
	n	1.09021	-0.00019	-0.02029	0.00035			
9	a	3.94726	-0.06902	-0.23008	0.00394	0.02764	0.00081	0.99378
	k	-0.02940	0.00060	0.00201	-0.00002			
	b	1.13633	-0.00001	-0.07070	0.00023			
10	a	0.37246	0.00072	0.04667	-0.00003	0.01860	0.00039	0.99719
	k	0.00661	0.00004	-0.00040	0.00000			
	b	0.02526	-0.00107	-0.00471	0.00009			
	g	0.03146	-0.00059	-0.00188	0.00003			
	c	0.58548	0.00028	-0.04171	-0.00004			
	h	-0.03960	0.00078	0.00378	-0.00007			
11	a	1.00081	-0.00018	0.00192	0.00000	0.02119	0.00048	0.99636
	k	0.01828	0.00000	-0.00072	0.00000			
	n	0.08719	0.01009	0.07547	-0.00118			
	b	0.00272	-0.00009	0.00010	0.00000			
12	a	2.40392	0.01557	-0.13147	-0.00020	0.03353	0.00121	0.99091
	k	-0.00167	0.00003	0.00023	0.00000			
	b	-0.01949	-0.00013	0.00186	0.00001			
	c	-1.36762	-0.01506	0.12540	0.00018			



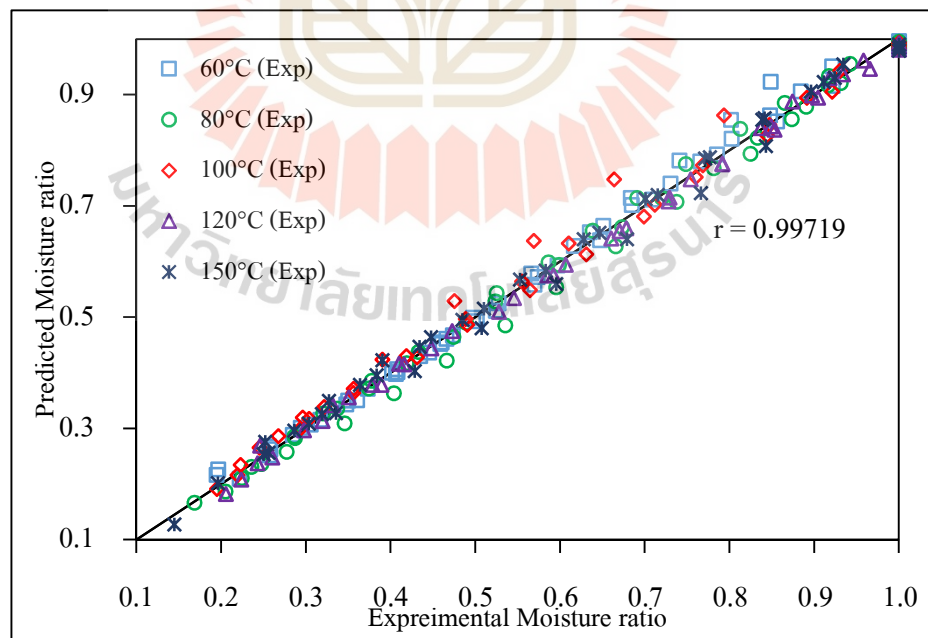
รูปที่ 4.2 อัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง ที่มีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg



รูปที่ 4.3 อัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง ที่มีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg



รูปที่ 4.4 อัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง ที่มีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg



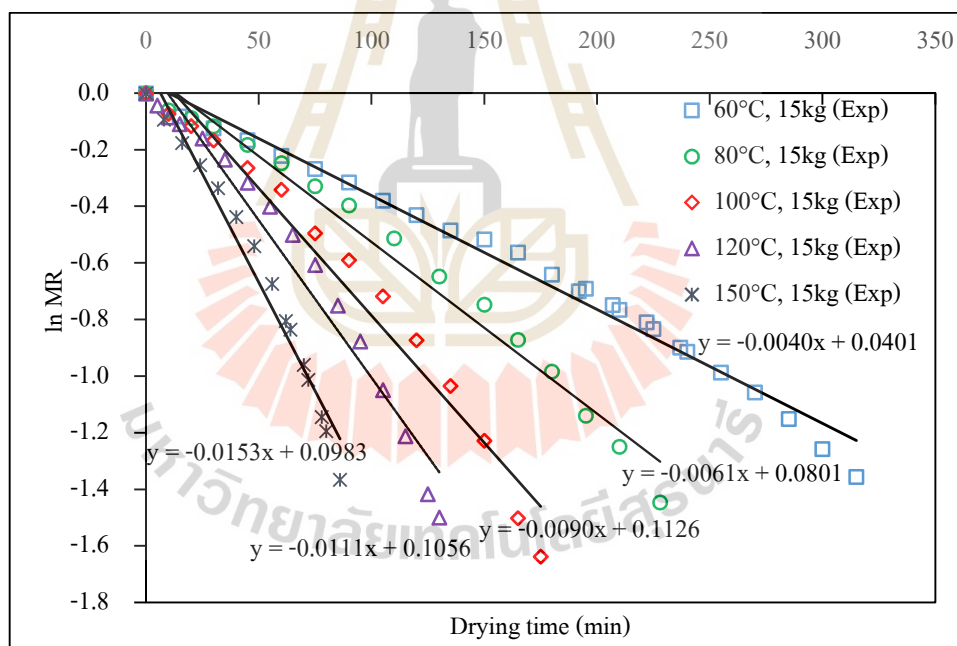
รูปที่ 4.5 อัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง

4.4.2 การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง ดังสมการที่ (4.12) โดยใช้พจน์แรกในสมการที่ (4.2) เนื่องจากพจน์ที่เหลือเข้าใกล้ศูนย์ นำค่าความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แทนค่าลงในสมการที่ (4.13) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

$$\ln MR = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \frac{D_{eff} \pi^2 t}{r_o^2} \quad (4.12)$$

$$D_{eff_{linear}} = \left(\frac{r_o^2}{\pi^2}\right) \text{Slope} \quad (4.13)$$



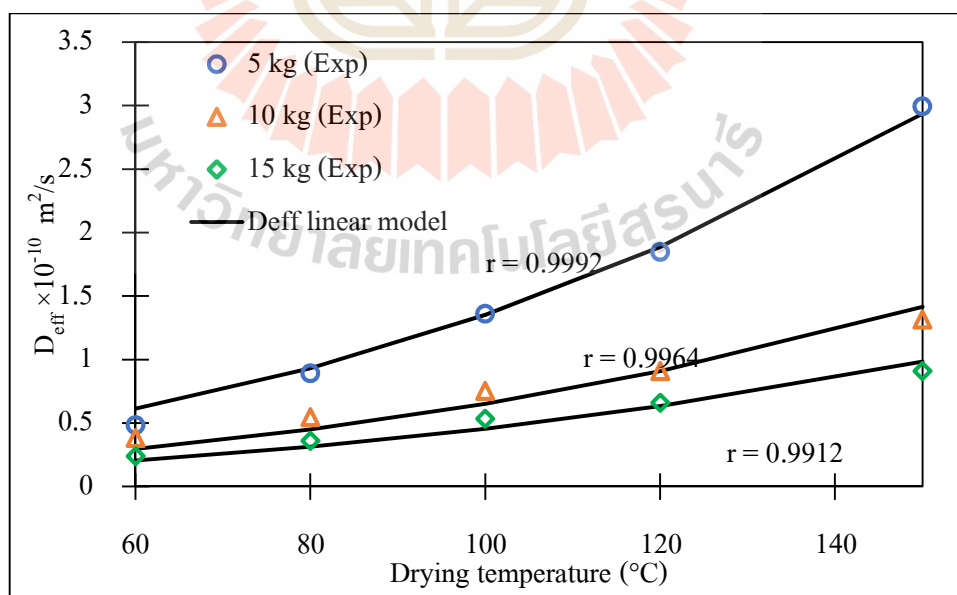
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง

การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ใช้รูปแบบจากสมการอริเนียสในสมการที่ (4.3) จัดรูปดังสมการที่ (4.14) เพื่อให้ครอบคลุมกับปัจจัยด้านอุณหภูมิความร้อนในช่วง 60-150°C และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นระหว่าง 5-15 kg โดยหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่า RMSE ต่ำสุด ผลสมการทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ดังสมการที่ (4.15) ให้ค่า r เท่ากับ 0.9950 เทียบกับผลค่า

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่หาได้ข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น โดยเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกลับลดลง เป็นที่น่าสังเกตว่าที่อุณหภูมิสูงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิลมร้อน 150°C และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่ 5 kg โดยที่อุณหภูมิลมร้อนสูงมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นลดลงเล็กน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิลมร้อนลดต่ำลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งข้าวเปลือกอยู่ระหว่าง $0.24 \times 10^{-10} - 3.00 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 17.45-23.25 kJ/mol

$$D_{eff\text{ model linear}} = d_1 \exp(d_2 m^2 - d_3 m) \exp\left(-\frac{d_4}{(T + 273.15)}\right) \quad (4.14)$$

$$D_{eff\text{ model linear}} = 2.8704 \times 10^{-7} \exp(0.0074 m^2 - 0.2566 m) \exp\left(-\frac{2448.8315}{(T + 273.15)}\right) \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

4.4.3 การจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

โดยทั่วไปการวิเคราะห์หาค่า D_{eff} มักพิจารณาจากสมการที่ (4.2) โดยใช้เพียงพจน์แรก ($n=1$) ด้วยลดความซับซ้อนในการดำเนินการ (ผลของการตัดพจน์ที่ $n \geq 2$ ออกไปทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์) จากนั้นจึงจัดรูปอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยในรูปแบบลอการิทึมดังสมการที่ (4.12) หาอนุพันธ์เทียบกับเวลา ($d(\ln MR)/dt$) แล้วจัดรูปเพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ตามสมการที่ (4.13) ในทางปฏิบัติความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และเวลาอบแห้ง (t) มาจากการทดลอง หากนำทั้งสองตัวแปรไปแสดงผลกราฟในรูปแบบ $\ln MR$ เทียบกับ t จะได้ว่า $d(\ln MR)/dt$ ก็คือความชันของกราฟนั่นเอง

งานวิจัยทั่วไปมักกำหนดสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเป็นค่าคงที่ หมายความว่า $d(\ln MR)/dt$ เป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามมวล อุณหภูมิ และเวลาอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.10 งานวิจัยนี้จึงนำเสนอสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในรูปแบบใหม่ที่ไม่ใช่ค่าคงที่ ซึ่งจากการสืบค้นยังพบงานวิจัยที่นำเสนอในรูปแบบนี้น้อยมาก จากรูปที่ 4.8-4.10 พบว่าลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเหมาะกับการฟิตด้วยฟังก์ชันโพลิโนเมียล ดังนั้นในที่นี้จึงเลือกฟิตข้อมูลดังกล่าวด้วยรูปแบบโพลิโนเมียลอันดับสอง ดังสมการที่ (4.16)

$$\ln MR_{\text{model}} = At^2 + Bt \quad (4.16)$$

ค่า A และ B ที่ได้จากการฟิตข้อมูลในสมการที่ (4.16) เป็นดังตารางที่ 4.3 พบว่า A และ B เป็นฟังก์ชันของมวล (kg) กับอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) เมื่อนำข้อมูล A และ B ในตารางที่ 4.3 ได้แสดงกราฟความสัมพันธ์เทียบกับมวลและอุณหภูมิพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวที่เหมาะสมต่อการฟิตได้ด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นพารามิเตอร์ A และ B จึงถูกจำลองในรูปความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.17)-(4.18)

$$A = (a_1 \exp(a_2 m) + a_3) \exp\left(-\frac{a_4}{T}\right) \quad (4.17)$$

$$B = (b_1 \exp(b_2 m)) \exp\left(\frac{-b_3}{T}\right) \quad (4.18)$$

โดยค่าคงที่แบบจำลองในสมการที่ (4.17)- (4.18) เป็นดังนี้

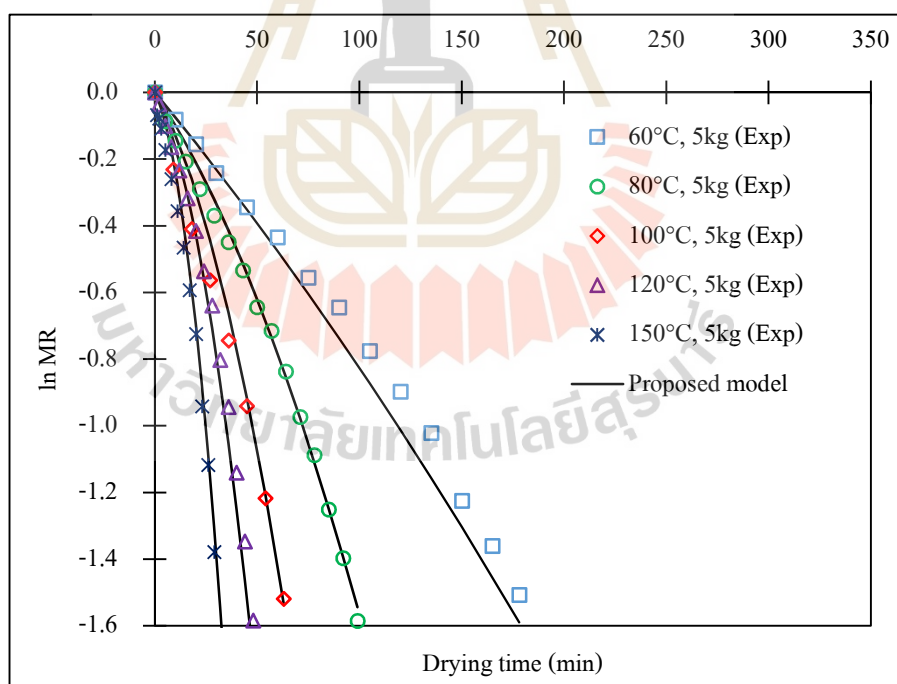
$a_1 = -0.2285$, $a_2 = -0.4291$, $a_3 = -0.0024$, $a_4 = 488.2244$, $b_1 = -0.0244$, $b_2 = -0.0696$ และ $b_3 = 50.4989$

จากสมการที่ (4.12) จัดรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ (4.19) ดังนี้

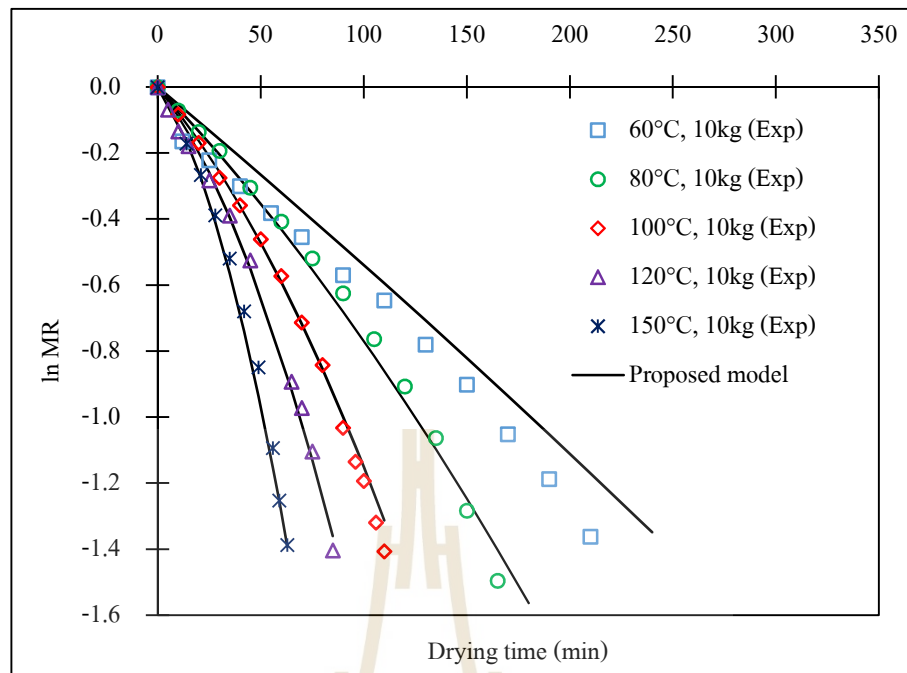
$$D_{eff} = \left(\ln \left(\frac{6}{\pi^2} \right) - \ln MR \right) \left(\frac{r_o^2}{\pi^2 t} \right) \quad (4.19)$$

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ A และ B ในสมการที่ (4.16)

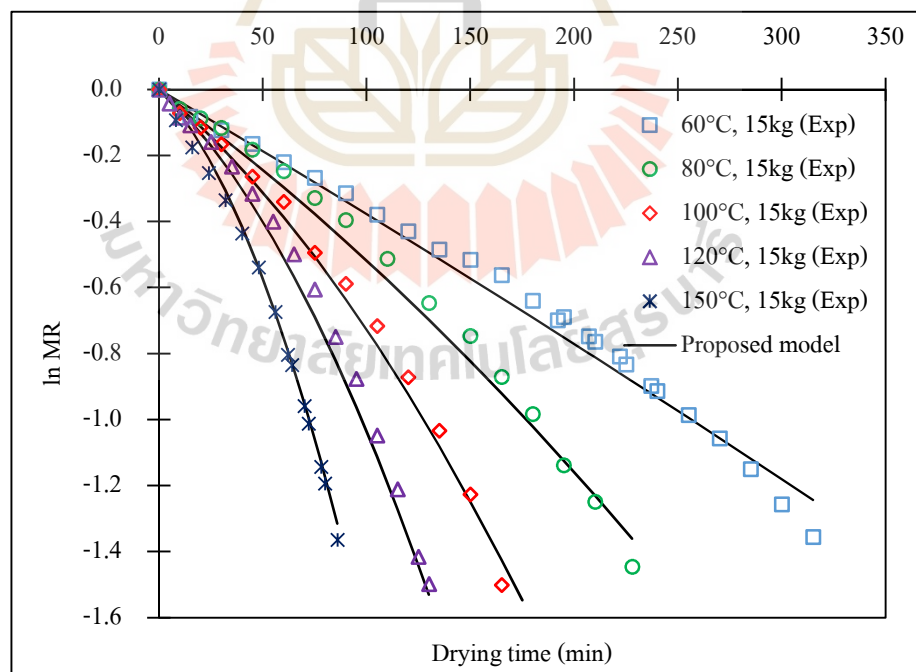
T(°C)	m= 5 kg		m= 10 kg		m= 15 kg	
	A	B	A	B	A	B
60	-8.52×10^{-6}	-7.41×10^{-3}	-1.62×10^{-6}	-5.23×10^{-3}	-8.08×10^{-7}	-3.69×10^{-3}
80	-6.52×10^{-5}	-9.15×10^{-3}	-1.24×10^{-5}	-6.46×10^{-3}	-6.18×10^{-6}	-4.56×10^{-3}
100	-2.21×10^{-4}	-1.04×10^{-2}	-4.19×10^{-5}	-7.33×10^{-3}	-2.09×10^{-5}	-5.17×10^{-3}
120	-4.98×10^{-4}	-1.13×10^{-2}	-9.45×10^{-5}	-7.97×10^{-3}	-4.73×10^{-5}	-5.63×10^{-3}
150	-1.12×10^{-3}	-1.23×10^{-2}	-2.13×10^{-4}	-8.67×10^{-3}	-1.07×10^{-4}	-6.12×10^{-3}



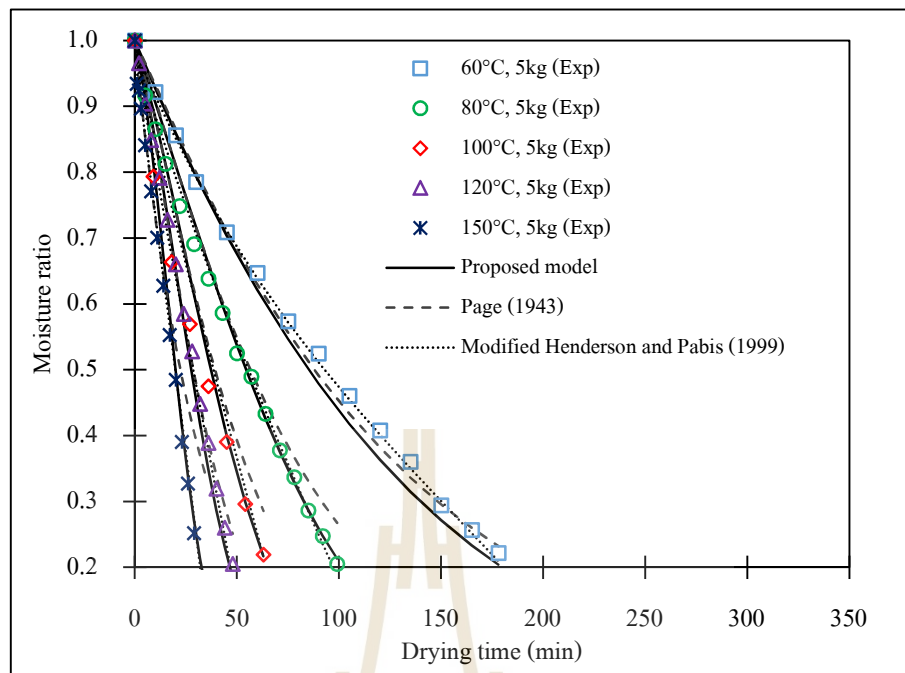
รูปที่ 4.8 ลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg



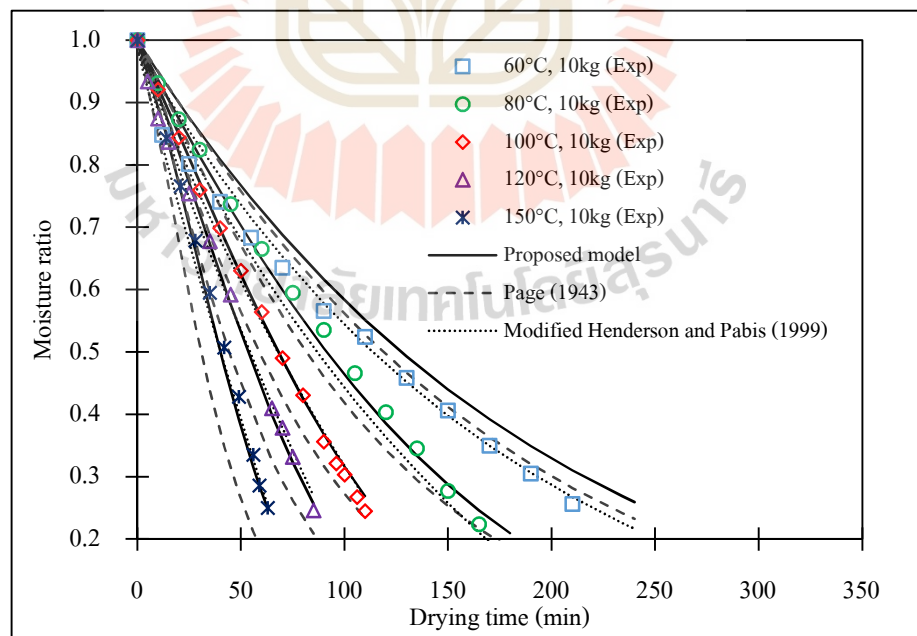
รูปที่ 4.9 ลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg



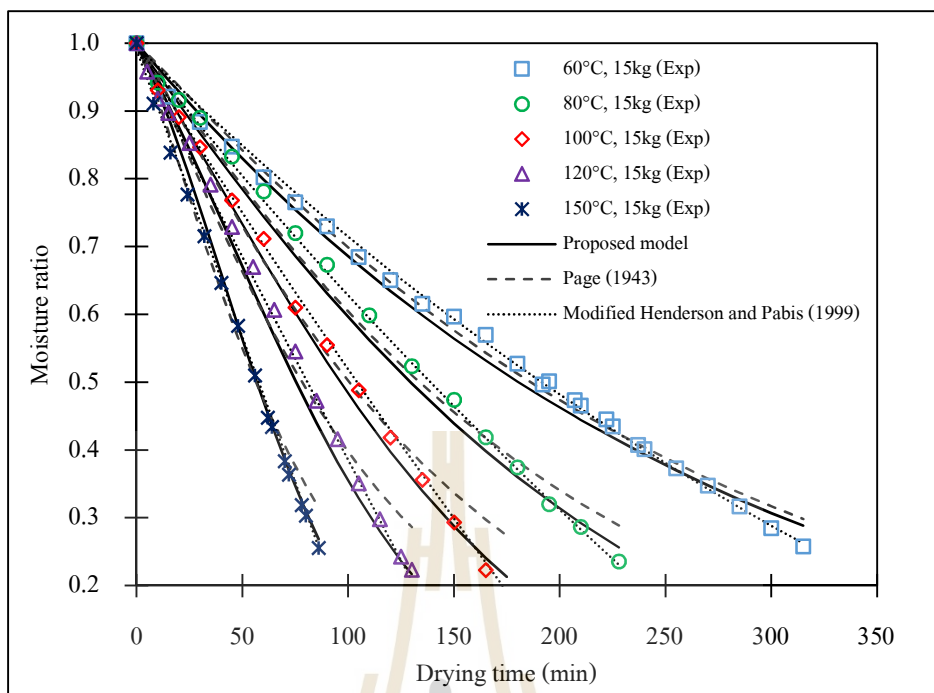
รูปที่ 4.10 ลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่นและผลการทดลอง เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 kg



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่นและผลการทดลอง เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่นและผลการทดลองเมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg

เมื่อกำหนดค่าของ m , T , และ t ในสมการที่ (4.16) – (4.18) สามารถหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่ $T = 60, 80, 100, 120$ และ 150°C ที่ $m = 5, 10$ และ 15 kg ตามลำดับดังรูปที่ (4.11)-(4.13) ผลการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ (สมการที่ (4.16)-(4.18)) ใช้ค่าคงที่แบบจำลองเพียง 7 ตัว พบว่าให้ค่า RMSE และค่า χ^2 ต่ำสุดที่ 0.02935 และ 0.00089 ตามลำดับ ค่า r เท่ากับ 0.99421 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้จำนวนค่าคงที่แบบจำลองใกล้เคียงกันคือ Page (1943) (ตารางที่ 4.1) ซึ่งใช้ 8 ตัว พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอ ให้ความแม่นยำมากกว่า โดยให้ค่าแม่นยำเทียบเท่าแบบจำลอง Verma et al. (1985) ที่ใช้ค่าคงที่แบบจำลองถึง 12 ตัว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) ซึ่งถือว่ามีความแม่นยำสูงสุดในจำนวน 12 แบบจำลอง แต่มีการใช้ค่าคงที่แบบจำลองถึง 24 ตัว พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอ (ที่ใช้เพียง 7 ตัว) ให้ค่าการทำนายผลที่เทียบเท่ากัน โดยให้ผลแตกต่างกันเฉลี่ยเพียง 1.8 เปอร์เซ็นต์

4.5 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางที่นิยมใช้ 12 แบบจำลอง เพื่อทำนายผลทดลองการอบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิลมร้อน 60-150 °C มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5-15 kg และความเร็วลมร้อน 19 m/s โดยการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวแปรในแต่ละกรณี เมื่อพิจารณาทั้งอิทธิพลอุณหภูมิลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น พบว่าแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) เหมาะสมที่สุด

แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ใช้ได้ครอบคลุมทั้งปัจจัยผลกระทบอุณหภูมิลมร้อน มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น และเวลาอบแห้ง ผลการจำลองพบว่ามีความแม่นยำสูง โดยให้ค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.02935 และค่า r เท่ากับ 0.99421 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้จำนวนค่าคงที่แบบจำลองใกล้เคียงกัน พบว่าให้ความแม่นยำในการทำนายผลสูงกว่าและเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงสุดในจำนวน 12 แบบจำลองที่นำมาศึกษา พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอให้ผลที่แตกต่างเฉลี่ยเพียง 1.8 เปอร์เซ็นต์



รายการอ้างอิง

- ชอบ ลายทอง (2530). การศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ความร้อนของข้าวเปลือก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พรศักดิ์ ทองมา (2542). การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาตัดเบดขนาดอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- โพธิ์ทอง ปราณิผลกรัง และ กิตติ สถาพรประสาธน์ (2560). การประยุกต์ใช้เทคนิคเจ็ดสเปาตัดเบดร่วมกับคลื่นอัลตราซาวด์สำหรับอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**. 12(1): 163-175.
- ศักดิ์ชัย จงจำ และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา (2553). การอบแห้งหญาปักกิ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**. 12(3).
- สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Aregbesola, O.A., Ogunsina, B.S., Sofolahan, A.E., and Chime, N.N. (2015). Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (*Irvingia gabonensis*) nuts and kernels. **Nigerian Food Journal**. 33(1): 83-89.
- Alibas, I. (2012). Selection of a the Best Suitable Thin-Layer Drying Mathematical Model for Vacuum Dried Red Chili Pepper. **Journal of Biological and Environmental Sciences**. 6: 161-170.
- Erbay, Z. and Icier, F. (2010). A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 50: 441-464.
- Hii, C.L., Law, C. L., and Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. **Journal of Food Engineering**. 90(2): 191-198.
- Khaengkarn, S., Meesukchaosumran, S. and Chitsomboon, T. (2011). Genetic algorithm for the selection of rough rice drying model for the free-fall paddy dryer. **Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering**. 1(1): 63-75.

- Kumar, N., Sarkar, B.C., and Sharma, H.K. (2012). Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. **Journal of food science and technology**. 49(1): 33-41.
- Meesukchaosumran, S. and Chitsomboon, T. (2018). Effects of resting periods, air temperatures and air velocities on free-fall paddy dryer performances. **Suranaree Journal of Science and Technology**. 25(1): 11-26.
- Mujaffar, S., and John, S. (2018) . Thin-layer drying behavior of West Indian lemongrass (*Cymbopogon citratus*) leaves. **Food Science & Nutrition**. 6(4): 1085–1099.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M. and Abdan, K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 15(3): 599-618.
- Özdemir, M., and Devres, Y. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**. 42(4): 225-233.
- THAO, H.M. and NOOMHORM, A. (2011). Modeling and effects of various drying methods on sweet potato starch properties. **Walailak Journal of Science and Technology**. 8: 139-158.
- Zhang, J., Ma, P., Zhang, X., Wang, B., Wu, J., and Xing, X. (2018). Isothermal drying kinetics of paddy using thermogravimetric analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. 134(3): 2359-2365.

บทที่ 5

แบบจำลองเชิงทฤษฎีสำหรับการอบแห้งชั้นบาง

5.1 บทคัดย่อ

การจำลองกระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญต่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้ง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ จะใช้แบบจำลองแบบไม่สมดุลของ Brooker et al. (1974) ทำนายการสูญเสียพลังงานและมวลในกระบวนการอบแห้ง โดยใช้วิธีการจำลองผลด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลข โดยงานวิจัยในส่วนนี้การถ่ายเทความร้อนจะใช้แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางทางทฤษฎี เพื่อทำนายการลดลงของความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นำมาจากงานวิจัยในอดีต แล้วพัฒนาแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาคำตอบ โดยผลการจำลองสำหรับเงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60-150°C มีความแม่นยำในการทำนายผลของความชื้นข้าวเปลือกในระดับที่พอใจที่ r ต่ำสุด 0.996 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง 2.1-8.4% รวมถึงสามารถทำนายอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนที่ออกจากท่อเป่าพ่นได้ผลใกล้เคียงกับการทดลองในช่วง $r = 0.943-0.999$ และ $r = 0.914-0.999$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำนายผลของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกได้ดี (ในช่วง $r = 0.958-0.999$) การทำนายผลที่อุณหภูมิลมร้อนสูง 120-150°C ค่าอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำนายได้สูงกว่าการทดลอง ดังนั้นการจำลองที่อุณหภูมิลมร้อนสูงอาจมีความคลาดเคลื่อนจากผลที่ได้จากการทดลองแต่อย่างไรก็ตาม การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งทางทฤษฎีสามารถให้ผลข้อมูลของปัจจัยอื่นๆ เพื่อให้ข้อมูลในการศึกษาถึงแนวโน้มค่าต่างๆ ได้

5.2 บทนำ

ในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก เป็นขั้นตอนการวิจัยที่ใช้เวลานานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เนื่องจากมีหลายขั้นตอน ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือก การตั้งค่าเครื่องมือการอบแห้ง ตลอดจนการหาความชื้นและวัดคุณภาพหลังการอบแห้ง เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายดังกล่าว การวิจัยโดยส่วนมากจะประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายผลการอบแห้งแทนการทำการทดลอง โดยจะทำการทดลองเพียงบางเงื่อนไข เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นในบทนี้จึงได้ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ โดย

ใช้ผลการทดลองอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ ดังที่ปรากฏในบทที่ 3 จำนวน 6 การทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การถ่ายโอนความชื้นภายในเมล็ดระหว่างการอบแห้ง เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและเกิดขึ้นจากหลายกลไก เช่น เกิดการเคลื่อนที่ของของเหลวในหลอดเล็ก (capillary flow) การเคลื่อนที่ของของเหลวในรูปของการแพร่จากความแตกต่างของความชื้นภายในเมล็ด (liquid diffusion) การเคลื่อนที่ของของเหลวจากการแพร่ของของเหลวบนผิวรูพรุนภายในเมล็ด (surface diffusion) การเคลื่อนที่ของไอในรูปของการแพร่จากความแตกต่างของความดันไอ (vapor diffusion) และการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือไอจากผลต่างของความดันภายในเมล็ด (hydrodynamic flow) ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีอัตราการระเหยของความชื้นกลายเป็นไอบนผิวเมล็ดมีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของไอบนผิวเมล็ด ในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง ความชื้นอาจเคลื่อนที่โดยกลไกหนึ่ง เช่น กลไกการเคลื่อนที่ของของเหลวในหลอดเล็กหรือโดยการแพร่ของของเหลว และเปลี่ยนไปอีกกลไกหนึ่ง เช่น โดยการแพร่ของไอ ในช่วงท้ายของกระบวนการอบแห้ง (สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555) ในกรณีของแบบจำลองการแพร่ของของเหลวนั้น สามารถเขียนสมการแบบจำลองได้โดยจากกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ (5.1)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (5.1)$$

5.3 วิธีดำเนินการวิจัย

5.3.1 การพัฒนาแบบจำลองเชิงทฤษฎีของการอบแห้ง

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ โดยทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเทียบจากข้อมูลผลการทดลอง โดยมุ่งหมายเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อน ปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น และความเร็วลมร้อนที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยมีสมมติฐานของแบบจำลองดังนี้

- 1) เมล็ดข้าวเปลือกมีความสม่ำเสมอ ต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งเมล็ด
- 2) การแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดเป็นกลไกหลักในการอบแห้ง โดยเป็นการแพร่ของเหลวอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความชื้น (moisture gradient)
- 3) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเท่ากันในทุกทิศทางและมีค่าคงที่

- 4) เมื่อเมล็ดสัมผัสกับลมร้อน ความชื้นที่ผิวของเมล็ดจะเท่ากับความชื้นสมดุลทันที
- 5) ไม่คิดผลของความชื้นของอุณหภูมิภายในเมล็ด
- 6) เมล็ดเป็นวัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic Material)
- 7) การนำความร้อนและการส่งผ่านความชื้นระหว่างเมล็ด และความร้อนสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมมีค่าน้อย
- 8) เมล็ดไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (การหดหรือพองตัว)
- 9) การไหลของอากาศและเมล็ดเป็นแบบ 1 มิติ (plug type)

สำหรับการจำลองการอบแห้งแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3 คือ 1. ส่วนเป่าพ่นในท่อ เป็นแบบจำลองในช่วงท่อเป่าพ่น รูปแบบการไหลของเมล็ดและลมร้อนเป็นแบบไหลตามกัน 2. ส่วนเป่าพ่นเหนือท่อ รูปแบบการไหลของเมล็ดและลมร้อนเป็นแบบไหลตามกัน แต่ความเร็วลมร้อนในช่วงนี้จะมีค่าน้อยมาก และสมมติให้มีอุณหภูมิและความชื้นมีค่าประมาณเท่ากับสภาพแวดล้อม 3. ส่วนหล่นอิสระ เป็นแบบไหลสวนทางกันกับลมร้อน สมมติให้อุณหภูมิและความชื้นมีค่าเท่ากับสภาพแวดล้อมเช่นเดียวกันกับส่วนเป่าพ่นเหนือท่อ 4. ส่วนพักตัวในถัง เป็นแบบจำลองในช่วงถังพัก ซึ่งเป็นแบบไหลสวนทางกัน เพราะมีลมร้อนบางส่วนไหลแทรกขึ้นด้านบนสวนทางกับการไหลลงด้านล่างของชั้นเมล็ดในถังพัก โดยในส่วนหลักต่างๆ นี้ จะมีส่วนย่อยแต่ละชั้นบางที่มีความหนาคงที่ ต่อกันเป็นแบบอนุกรมกัน

5.3.2 สมการควบคุมสมดุลมวลและพลังงาน

สมการอนุพันธ์ควบคุมสร้างจากความรู้อิงพื้นฐานของสมดุลมวลและพลังงาน โดยพิจารณาเป็นการถ่ายโอนความร้อนด้วยการพาแบบบังคับระหว่างอากาศกับเมล็ดและการถ่ายโอนมวลด้วยการแพร่ภายในเมล็ด ซึ่งการอบแห้งเกิดขึ้นภายในชั้นบางที่กำหนด โดย Brooker et al. (1992) ได้นำเสนอชุดของสมการอนุพันธ์ดังนี้

- 1) สมดุลมวลระหว่างวัฏภาคของแข็งและแก๊ส

$$G_p \frac{dM}{dy} = \pm G_a \frac{dW}{dy} \quad (5.2)$$

- 2) สมดุลพลังงานของเมล็ด

$$\delta Q = (G_p C_p + G_p C_w M) \frac{dT_p}{dy} - G_p h_{fg} \frac{dM}{dy} - G_p C_v (T_a - T_p) \frac{dM}{dy} \quad (5.3)$$

3) สมดุลพลังงานของอากาศ

$$\delta Q = \pm(G_a C_a + G_a C_w W) \frac{dT_a}{dy} \quad (5.4)$$

4) สมการอัตราถ่ายโอนความร้อนจากอากาศสู่เมล็ด

$$\delta Q = ha_p (T_a - T_p) \quad (5.5)$$

แทนสมการที่ (5.5) ในสมการ (5.3) และ (5.4) จะได้สมการที่ (5.6)-(5.7)

$$\frac{dT_a}{dy} = \pm ha_p \frac{(T_a - T_p)}{G_a C_a + G_a C_w W} \quad (5.6)$$

$$\frac{dT_p}{dy} = \frac{ha_p (T_a - T_p)}{G_p C_p + G_p C_w M} + \frac{h_{fg} + C_v (T_a - T_p)}{C_p + C_w M} \frac{dM}{dy} \quad (5.7)$$

เครื่องหมายลบในสมการที่ (5.2), (5.4) และ (5.6) สำหรับการไหลแบบตามกันใน ส่วนเป่าพ่นในท่อและเป่าพ่นเหนือท่อ สำหรับส่วนหล่นอิสระและส่วนพักตัวในถังใช้เครื่องหมาย บวกสำหรับการไหลแบบสวนทางกัน เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตสำหรับสมการที่ (5.6) และ (5.7) สมมติให้ค่าเงื่อนไขที่ทางออกของชั้นบางก่อนหน้าเป็นค่าเงื่อนไขทางเข้าของชั้นบางถัด มา ดังนี้

ส่วนเป่าพ่นในท่อ (IS):

$$\begin{aligned} \text{ที่ } y=0, t=0 : \quad & T_p = T_{p,in} , \quad M = M_{in} \\ & T_a = T_{a,in} , \quad W = W_{amb} \\ t>0: \quad & T_p = T_{p,D,ex} , \quad M = M_{D,ex} \\ & T_a = T_{a,in} , \quad W = W_{amb} \end{aligned}$$

ส่วนเป่าพ่นเหนือท่อ (OS):

$$\text{ที่ } y=0, t \geq 0 : \quad T_p = T_{p,IS,ex} , \quad M = M_{IS,ex}$$

$$T_a = T_{a,IS,ex}, \quad W = W_{a,IS,ex}$$

ส่วนหล่นอิสระ (F):

$$\text{ที่ } y=0, t \geq 0: \quad T_p = T_{p,OS,ex}, \quad M = M_{OS,ex}$$

$$T_a = T_{amb}, \quad W = W_{amb}$$

ส่วนพักตัวในถัง (D):

$$\text{ที่ } y=0, t \geq 0: \quad T_p = T_{p,F,ex}, \quad M = M_{F,ex}$$

$$T_a = T_{amb}, \quad W = W_{amb}$$

5.3.3 สมการอัตราการอบแห้ง

ใช้สมการการแพร่ใน 1 มิติ สำหรับรูปทรงกลม (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540) โดยสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ และมีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบ ดังที่แสดงในสมการที่ (4.1) ดังนี้

$$\text{ที่ } t=0, \quad 0 \leq r \leq r_0: \quad M = M_{in}$$

$$\text{ที่ } t=0, \quad r=r_0: \quad M = M_{eq}, \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \text{ (ช่วงพัก)}$$

$$r=0: \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0$$

5.3.4 สมการที่เกี่ยวข้อง

1) สัมประสิทธิ์การแพร่

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น จากการพิจารณาข้าวเปลือกเป็นรูปทรงกลม และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4.2 ถึงสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ดังสมการที่ (4.15)

2) การคำนวณความเร็วพัด

ในส่วนเป่าพ่นในท่อ เป่าพ่นนอกท่อและส่วนหล่นอิสระ ความเร็วข้าวเปลือกจะเปลี่ยนแปลงตลอดตามความเร็วอากาศ อัตราการไหลข้าวเปลือก และแรงโน้มถ่วง ในแบบจำลองจึงใช้สมการสมดุลแรงของอนุภาค (The FLUENT user's guide, 2001) ดังแสดงในสมการที่ (5.8) เพื่อทำนายความเร็วของข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ด้วย อิทธิพลของแรงต้านอากาศและแรงโน้มถ่วง

$$\frac{dV_p}{dt} = F_D(V_a - V_p) \pm g \frac{(\rho_p - \rho_a)}{\rho_p} \quad (5.8)$$

$$F_D = \left(\frac{18\mu_a}{\rho_p D_p^2} \right) \left(\frac{C_D \text{Re}}{24} \right) \quad (5.9)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_a D_p |V_p - V_a|}{\mu_a} \quad (5.10)$$

สมการที่ (5.8) เครื่องหมายลบสำหรับส่วนเป่าฟันในท่อและเป่าฟันเหนือท่อ เครื่องหมายบวกสำหรับส่วนหล่นอิสระ กำหนดให้ความเร็วช้าวนเปลือกเริ่มต้นที่ส่วนหล่นอิสระเท่ากับศูนย์ โดยเลือกใช้สัมประสิทธิ์แรงต้านทานอากาศของอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลม (Haider and Levenspiel, 1989) ที่ $0.1 < \text{Re} < 5 \times 10^5$ ดังสมการที่ (5.11) และค่าความเป็นทรงกลมของช้าวน (ϕ) มีค่าเท่ากับ 0.7186 (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, 2557)

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + b_1 \text{Re}^{b_2} \right) + \left(\frac{b_3 \text{Re}}{b_4 + \text{Re}} \right) \quad (5.11)$$

$$\text{โดยที่ } b_1 = e^{2.3288 - 6.4581\phi + 2.44868\phi^2}$$

$$b_2 = e^{0.0964 + 0.5565\phi}$$

$$b_3 = e^{4.905 - 13.8944\phi + 18.422262\phi^2 - 10.259968\phi^3}$$

$$b_4 = e^{1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3}$$

3) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

ในส่วนเป่าฟันในท่อ เป่าฟันเหนือท่อและส่วนหล่นอิสระใช้สมการความสัมพัทธ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านเม็ดทรงกลมของ (Whitaker, 1972) สำหรับการถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากการไหลผ่านรูปทรงกลมที่ $3.5 < \text{Re} < 80,000$ และ $0.7 < \text{Pr} < 380$ โดยสมบัติของของไหลประมาณจากอุณหภูมิก๊าซ ยกเว้น μ_s ซึ่งประมาณจากอุณหภูมิจากผิวของเม็ด

$$Nu = 2 + (0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{2/3}) Pr^{0.4} \left(\frac{\mu_a}{\mu_s} \right)^{0.25} \quad (5.12)$$

ในส่วนพิกัดในถังใช้สมการความสัมพันธ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านเบดแน่น (packed bed) ซึ่งมีค่า Re ของเมล็ดต่ำกว่า 100 ของ Mathur and Epstein (1974)

$$Nu = 0.42 + 0.35 Re^{0.8} \quad (5.13)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนได้จาก $h = \frac{Nuk_a}{D_p}$

พื้นที่การถ่ายโอนความร้อนของอนุภาคต่อปริมาตรของชั้นบาง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.14) โดยค่าความพรุน (ε) ในส่วนเป่าพ่นในท่อ เป่าพ่นเหนือท่อและส่วนหล่นอิสระคำนวณจากความเร็วข้าวเปลือกในแต่ละชั้นบางที่ได้จากหัวข้อที่ (2) โดยใช้สมการที่ (5.8) ในส่วนพิกัดในถังใช้ค่าความพรุนในกองข้าวเปลือกเฉลี่ยตลอดช่วงความชื้น 14-25% w.b. มีค่าเท่ากับ 0.57

$$a_p = \frac{6(1-\varepsilon)}{D_p} \quad (5.14)$$

$$\text{เมื่อ } \varepsilon = 1 - \frac{\dot{m}_p}{\rho_p AV_p}$$

4) ความชื้นภายในเมล็ดเฉลี่ย

ความชื้นภายในเมล็ดเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ $\bar{M}(t)$ ของเมล็ดข้าวเปลือกหาได้จาก การหาปริพันธ์ของความชื้น $M(r,t)$ โดยตลอดปริมาตรทรงกลม ดังนี้

$$\bar{M}(t) = \frac{4\pi}{V} \int_0^R r^2 \bar{M}(r,t) dr \quad (5.15)$$

5) ข้อจำกัดการระเหย

เมื่อสัดส่วนระหว่างมวลของเมฆต่ออากาศมีค่าสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน ส่วนพักตัวในถัง จะนำไปสู่การประมาณอัตราการอบแห้งที่สูงเกินไป และอาจทำให้อัตราการ ระเหยมากกว่าความจุที่อากาศสามารถรับได้ โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็นตัวบ่งบอกถึงศักยภาพใน การรับความชื้น ซึ่งหากมีค่าเกิน 100% ความชื้นที่มากเกินไปต้องถูกควบแน่นออกจากอากาศสู่ เมฆืด โดยอุณหภูมิจึงและความชื้นอากาศที่ถูกต้องสามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลพลังงาน นำเสนอโดย Soponronnarit (1988) ดังนี้

$$\begin{aligned} C_a T_i + W_i(2502 + C_v T_i) + (G_p / G_a) C_{pw} T_i = \\ C_a T_j + W_j(2502 + C_v T_j) + (G_p / G_a) C_{pw} T_j \end{aligned} \quad (5.16)$$

โดย i และ j หมายถึงเงื่อนไขที่เป็นไปไม่ได้และเงื่อนไขที่เป็นไปได้ ตามลำดับ ด้วยการแทนค่า ความชื้นสัมบูรณ์อากาศ W_j เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_j ในสมการที่ (5.16) แล้วใช้เทคนิค Newton Raphson เพื่อหาค่า T_j และ W_j แล้วคำนวณหาค่าความชื้นเฉลี่ยที่ถูกต้องด้วยสมการที่ (5.16)

$$\bar{M}_j = \bar{M}_i + (W_j - W_i) \frac{G_a}{G_p} \quad (5.17)$$

เมื่อได้ความชื้นเฉลี่ยที่ถูกต้อง จึงหาปริมาณความชื้นส่วนที่เกิน เพื่อ ป้อนกลับสู่ภายในเมฆืด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\bar{M}_i - \bar{M}_j$ วิธีการคำนวณความชื้นแต่ละโนดภายในเมฆืด ขึ้นกับวิธีการอิมตัวของความชื้นอากาศซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี 1. เนื่องจากการอบแห้ง ซึ่งมีการ ถ่ายโอนมวลความชื้นจากเมฆืดสู่อากาศและมีการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอากาศกับเมฆืด และ 2. เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนเพียงอย่างเดียวทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงจึงทำให้ความชื้น สัมพัทธ์อิมตัว ในกรณีที่ 1 แบ่งความชื้นส่วนที่เกินตามน้ำหนักของเมฆืดที่สัมพันธ์กับแต่ละ โนด ในกรณีที่ 2 ความชื้นส่วนที่เกินจะถูกป้อนกลับไปยังโนดที่ผิวของเมฆืดเท่านั้น

6) สมการค่าสมบัติของเมฆืดข้าวเปลือกและอากาศ

สมการที่ใช้ในการคำนวณสมบัติของเมฆืดข้าวเปลือกและอากาศที่ใช้ใน การจำลองมีดังนี้

สมบัติของข้าวเปลือกที่ใช้ในการจำลอง (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, 2557)

$$h_{fg} = (2502.2 - 2.39T)(1 + 2.0692 \exp(-21.739M_d)) \times 10^3 \quad (5.18)$$

$$C_{pw} = 1110 + 44.8(100M_d / (1 + M_d)) \quad (5.19)$$

$$\rho_b = (552 + 282M_d) \quad (5.20)$$

$$\varepsilon_b = (62.3 - 25M_d) / 100 \quad (5.21)$$

สมบัติของอากาศอบแห้งที่ใช้ในการจำลอง (Madhiyanon et al., 2001b)

$$RH = 101.3 W / (0.62189P_{vs} + WP_{vs}) \quad (5.22)$$

$$P_{vs} = \exp(27.0214 - 6887 / T_{abs} - 5.3 \ln(T_{abs} / 273.16)) \quad (5.23)$$

$$C_a = 1.00926 \times 10^3 - 4.0403 \times 10^{-2} T + 6.1759 \times 10^{-4} T^2 - 4.097 \times 10^{-7} T^3 \quad (5.24)$$

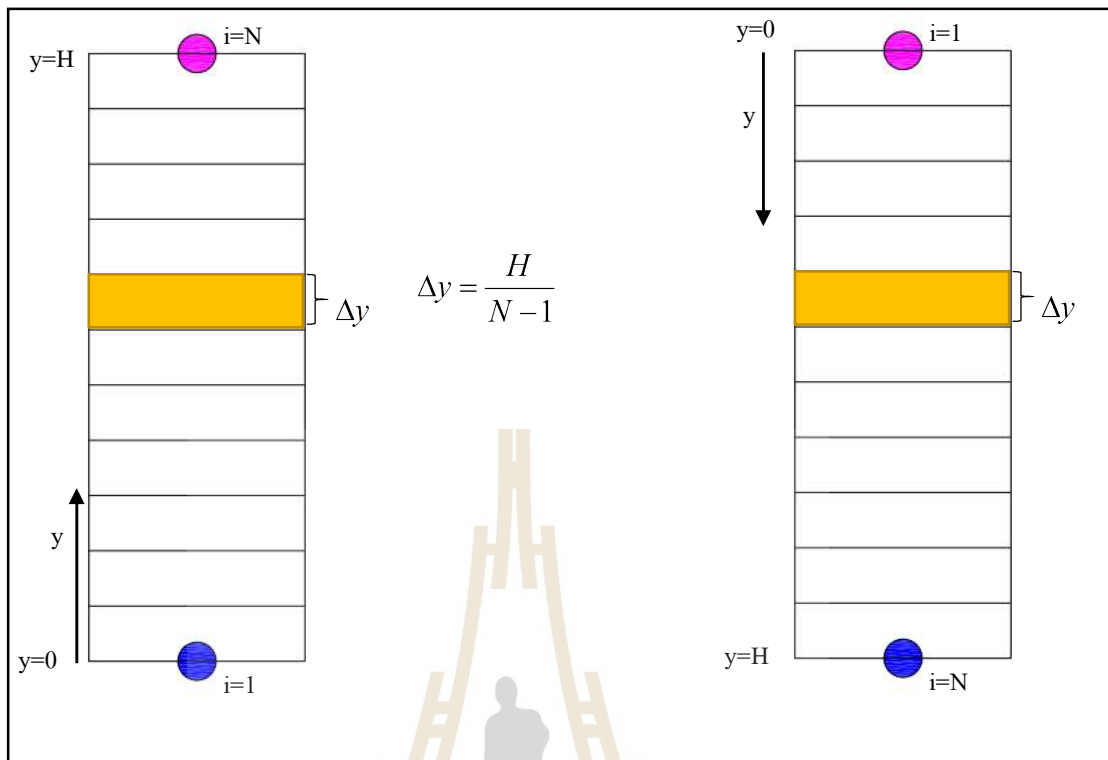
$$k_a = 2.425 \times 10^{-2} + 7.889 \times 10^{-5} T - 1.790 \times 10^{-8} T^2 - 8.570 \times 10^{-12} T^3 \quad (5.25)$$

$$\rho_a = 101.325 / (0.287 T_{abs}) \quad (5.26)$$

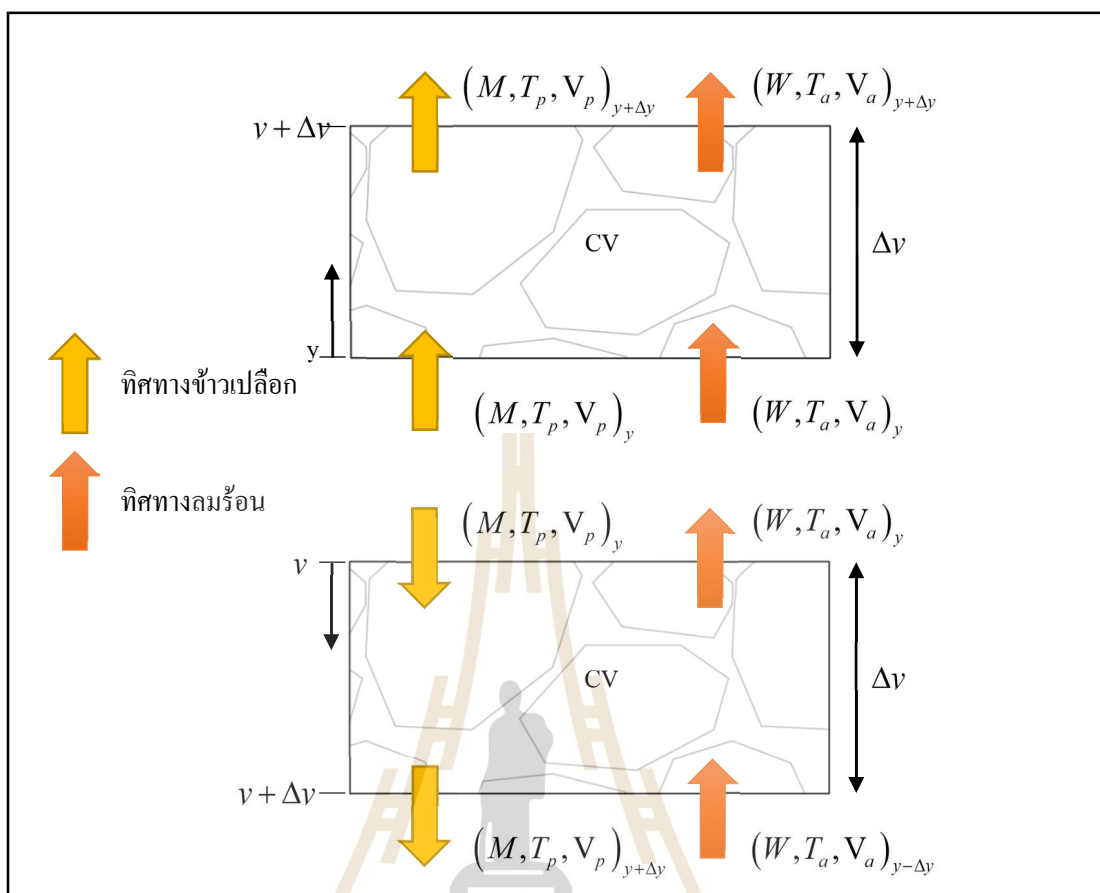
$$\mu_a = 1.691 \times 10^{-5} + 4.984 \times 10^{-8} T - 3.187 \times 10^{-11} T^2 + 1.319 \times 10^{-14} T^3 \quad (5.27)$$

$$C_v = 1.883 \times 10^3 - 1.6737 \times 10^{-1} T + 8.4386 \times 10^{-4} T^2 - 2.6966 \times 10^{-7} T^3 \quad (5.28)$$

$$C_w = 2.8223 \times 10^3 + 11.823 T - 3.5043 \times 10^{-2} T^2 + 3.601 \times 10^{-5} T^3 \quad (5.29)$$



รูปที่ 5.1 แสดงการกำหนดในชั้นบางแต่ละชั้น ในทุกช่วงการอบแห้ง



รูปที่ 5.2 การกำหนดชั้นบางในกรณีการไหลแบบสวนทางและแบบไหลตามกัน

5.3.5 ขั้นตอนการจำลองผลการอบแห้ง

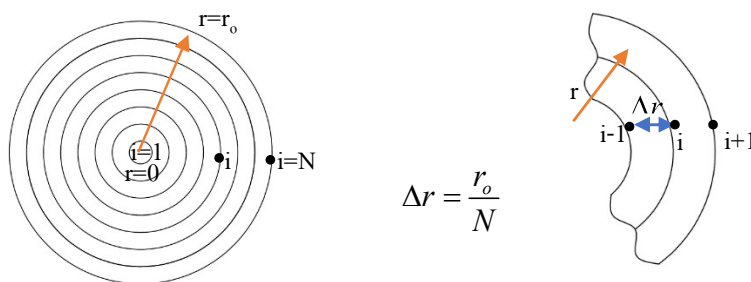
จำลองการอบแห้ง โดยแบ่งส่วนอบแห้งเป็น 4 ส่วน คือส่วนเป่าพ่นในท่อ, ส่วนเป่าพ่นเหนือท่อ, ส่วนหล่นอิสระ และส่วนพักตัวในถัง โดยในแต่ละส่วนแบ่งเป็นชั้นบางที่มีความหนาตามที่ตามแนวการเคลื่อนที่ของข้าวเปลือก ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 พิจารณาการอบแห้งตามการเคลื่อนที่ของเมล็ด โดยเริ่มจากส่วนเป่าพ่นในท่อออกจากท่อและเข้าสู่ช่วงเป่าพ่นเหนือท่อ จากนั้นเมื่อเมล็ดเคลื่อนที่ขึ้นถึงจุดสูงสุดจะเป็นช่วงส่วนหล่นอิสระ และส่วนพักตัวในถังซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายหลังจากนั้นข้าวเปลือกจะไหลเข้าสู่ส่วนเป่าพ่นในท่ออีกครั้งเป็นการเริ่มการอบแห้งในรอบถัดไป โดยหมุนเวียนเช่นนี้จนกระทั่งครบจำนวนรอบการอบแห้งตามที่กำหนด ดังนั้นเงื่อนไขของเมล็ดที่ออกจากส่วนอบแห้งที่พิจารณาจะถูกใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของส่วนอบแห้งถัดไป ดังผังแสดงการคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง ในรูปที่ 5.5 และผังแสดงการคำนวณในแต่ละช่วงการอบแห้ง ดังรูปที่ 5.6-5.9 โดยกระบวนการหาผลเฉลยของสมการควบคุม แสดงดังต่อไปนี้

1. ส่วนเป่าพ่นในท่อประกอบด้วยชั้นบางที่เรียงต่อกันในแนวแกนตั้งตามทิศทางท่อเป่าพ่น โดยกำหนดความหนา Δy ของชั้นบางในแต่ละช่วง ดังนั้นจำนวนโนดแต่ละส่วนหาได้จากระยะความสูงของแฉะส่วนต่อด้วยความหนาของชั้นบาง การคำนวณการถ่ายโอนมวลและความร้อนระหว่างอากาศ และเมล็ดในชั้นบาง เริ่มจากการคำนวณหาความเร็วชั่วพลือกและเวลาอบแห้งในชั้นบางที่ตำแหน่งนั้นๆ ด้วยสมการสมดุลแรงของอนุภาค ดังสมการที่ (5.8) โดยกำหนดให้มีแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง โลกและแรงต้านอากาศ การคำนวณหาความเร็วทำได้โดยใช้ระบบแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ordinary differential equation) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) วิธีของรุงเงอ-คุททาคอันดับ 4 (Runge-Kutta order 4) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่ได้รับความนิยมและประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในการคำนวณที่ต้องการให้ผลมีความเที่ยงตรงสูง ซึ่งจะได้ความเร็วของเมล็ดที่ตำแหน่งนั้นๆ และระยะเวลาการเคลื่อนที่ของเมล็ด จากนั้นคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างความชื้น (moisture profile) ภายในเมล็ด ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ด้วยสมการการแพร่ตามสมการที่ (4.1) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของแครงก์-นิโคลสัน (Crank-Nicholson) เพื่อใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) โดยจัดรูปดังนี้

$$-\alpha(1-1/i)M_{i-1}^{n+1} + 2(1+\alpha)M_i^{n+1} - \alpha(1+1/i)M_{i+1}^{n+1} = \alpha(1-1/i)M_{i-1}^n + 2(1-\alpha)M_i^n + \alpha(1+1/i)M_{i+1}^n \quad (5.30)$$

โดยที่ $\alpha = \frac{D\Delta t}{(\Delta r)^2}$

จะได้เมทริกซ์แบบสามแถวทแยง โดยใส่เงื่อนไขขอบเขตที่จุด $i=1$ และ จุด $i=N$ ซึ่งสามารถแก้ระบบสมการได้โดยใช้ระเบียบวิธีการแก้สมการแบบสามแถวทแยง (tridiagonal system) โดยประยุกต์วิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gauss elimination method) เพื่อหาค่าความชื้นภายในเมล็ด ดังแสดงในสมการที่ (5.31)



รูปที่ 5.3 การกำหนดโนดภายในเมช

$$\begin{bmatrix}
 2(1+\alpha) & -\alpha(1+\frac{1}{i}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\alpha(1-\frac{1}{i}) & 2(1+\alpha) & -\alpha(1+\frac{1}{i}) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -\alpha(1-\frac{1}{i}) & 2(1+\alpha) & -\alpha(1+\frac{1}{i}) \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha(1-\frac{1}{i}) & 2(1+\alpha)
 \end{bmatrix}
 \begin{pmatrix}
 M_2 \\
 M_3 \\
 \dots \\
 \dots \\
 M_{N-2} \\
 M_{N-1}
 \end{pmatrix}^n =$$

$$\begin{bmatrix}
 2(1-\alpha) & \alpha(1+\frac{1}{i}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \alpha(1-\frac{1}{i}) & 2(1-\alpha) & -\alpha(1+\frac{1}{i}) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \alpha(1-\frac{1}{i}) & 2(1-\alpha) & \alpha(1+\frac{1}{i}) \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha(1-\frac{1}{i}) & 2(1-\alpha)
 \end{bmatrix}
 \begin{pmatrix}
 M_2 \\
 M_3 \\
 \dots \\
 \dots \\
 M_{N-2} \\
 M_{N-1}
 \end{pmatrix}^{n+1} \quad (5.31)$$

ถัดมาคำนวณหาความชันเฉลี่ยของเมชหลังจากออกจากชั้นบางตามสมการที่ (5.15) ด้วยกฎของซิมป์สัน (Simpson's rule) เพื่อหาค่าอินทิกรัล และคำนวณความชันอากาศที่ไหลออกจากชั้นบางด้วยสมการสมดุลมวล ตามสมการที่ (5.2)

2. เนื่องจากทราบเงื่อนไขของเมล็ดและอากาศที่เข้าสู่ชั้นบาง อีกทั้งได้คำนวณเวลาอบแห้งในชั้นบางและปริมาณความชื้นที่เมล็ดระเหยได้ในชั้นบางแล้ว ลำดับถัดไปจึงคำนวณเงื่อนไขของเมล็ดและอากาศที่ออกจากชั้นบางด้วยสมการสมดุลพลังงาน ดังสมการที่ (5.5) และ (5.6) โดยใช้เทคนิค วิธีของรุ่งเอาจ-คุททออันดับ 4 หลายตัวแปรโดยใช้เงื่อนไขของเมล็ดและอากาศที่ออกจากชั้นบางก่อนหน้า เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของชั้นบางถัดไป เพื่อทำซ้ำกระบวนการที่ 1 กับชั้นบางถัดไปจนครบจำนวนโนดของชั้นบาง ($i = N$) ของส่วนเป่าพ่นในท่อ

3. เงื่อนไขเมล็ดและอากาศที่ทางออกของส่วนเป่าพ่นในท่อถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขทางเข้าส่วนเป่าพ่นเหนือท่อ การคำนวณเริ่มจากชั้นบางที่ออกจากชั้นเป่าพ่นในท่อ โดยใช้กระบวนการและระเบียบวิธีเช่นเดียวกับส่วนเป่าพ่นในท่อตามกระบวนการที่ 1. และ 2. ตามลำดับจนกระทั่งได้เงื่อนไขเมล็ดและอากาศที่ออกจากส่วนเป่าพ่นเหนือท่อ

4. เงื่อนไขเมล็ดที่ทางออกส่วนเป่าพ่นเหนือท่อถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขทางเข้าส่วนหล่อลื่นอิสระ เมื่อจบรอบส่วนหล่อลื่นอิสระ เงื่อนไขเมล็ดที่ทางออกส่วนหล่อลื่นอิสระก็จะถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขทางเข้าส่วนพักตัวในถัง การคำนวณเริ่มจากชั้นบางบนสุดของส่วนพักตัวในถัง เนื่องจากลักษณะการไหลระหว่างอากาศและเมล็ดเป็นแบบสวนทางกัน ซึ่งทราบเฉพาะเงื่อนไขเมล็ดที่ชั้นบนสุดของส่วนพักตัวในถังและทราบเฉพาะเงื่อนไขอากาศที่ชั้นล่างสุดของส่วนพักตัวในถัง ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้วิธีการคำนวณซ้ำในรอบแรกของการคำนวณซ้ำ ใช้ค่าเงื่อนไขอากาศที่เข้าด้านล่างของส่วนพักตัวในถัง (เงื่อนไขลมร้อนทางเข้า) โดยกำหนดให้เป็นเงื่อนไขอากาศที่เข้าแต่ละชั้นบางตลอดส่วนพักตัวในถังด้วยกระบวนการคำนวณเช่นเดียวกับส่วนเป่าพ่น สมการเชิงอนุพันธ์ทั้ง 4 สมการ คือ สมการที่ (4.1), (5.2), (5.6) และ (5.7) ถูกคำนวณพร้อมกันด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยเงื่อนไขอากาศที่ทางออกของแต่ละชั้นบางจะถูกใช้เป็นเงื่อนไขอากาศของการคำนวณซ้ำในรอบถัดไป กระบวนการทั้งหมดจะถูกคำนวณซ้ำจนกระทั่งคำตอบคู่เข้าโดยตลอดส่วนพักตัวในถัง

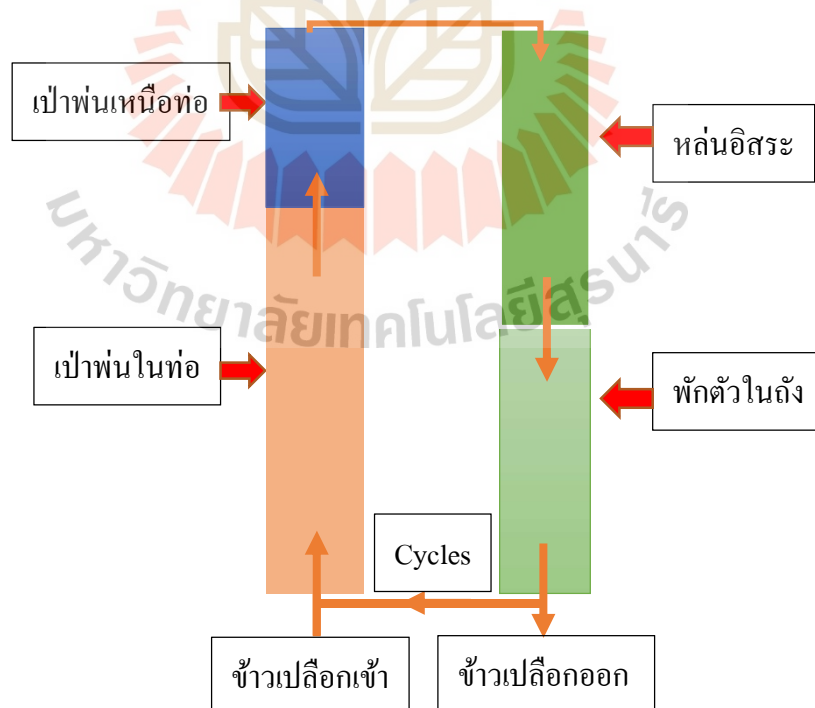
5. ในส่วนพักตัวในถังเนื่องจากกองเมล็ดมีความพรุนค่อนข้างคงที่ตลอดการอบแห้ง อีกทั้งอัตราการไหลเมล็ดขึ้นกับแรงโน้มถ่วงเป็นหลัก จึงใช้ความเร็วเมล็ดคงที่ในส่วนนี้ นอกจากนี้ลักษณะของกันถังพักที่เป็นรูปทรงกรวย ทำให้อากาศและเมล็ดมีความเร็วเปลี่ยนไปแบบจำลองจึงได้คำนวณความเร็วอากาศและเมล็ดในส่วนถังพักรูปกรวยตามกฎอนุรักษ์มวล

6. ในแต่ละชั้นบาง แบบจำลองจะตรวจสอบความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ได้จากการคำนวณอุณหภูมิและความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศอบแห้ง หากมีค่ามากกว่า 100% จะทำการคำนวณย้อนกลับด้วยสมการที่ (5.16) และ (5.17) เพื่อหาปริมาณความชื้นและอุณหภูมิอากาศที่ถูกต้อง

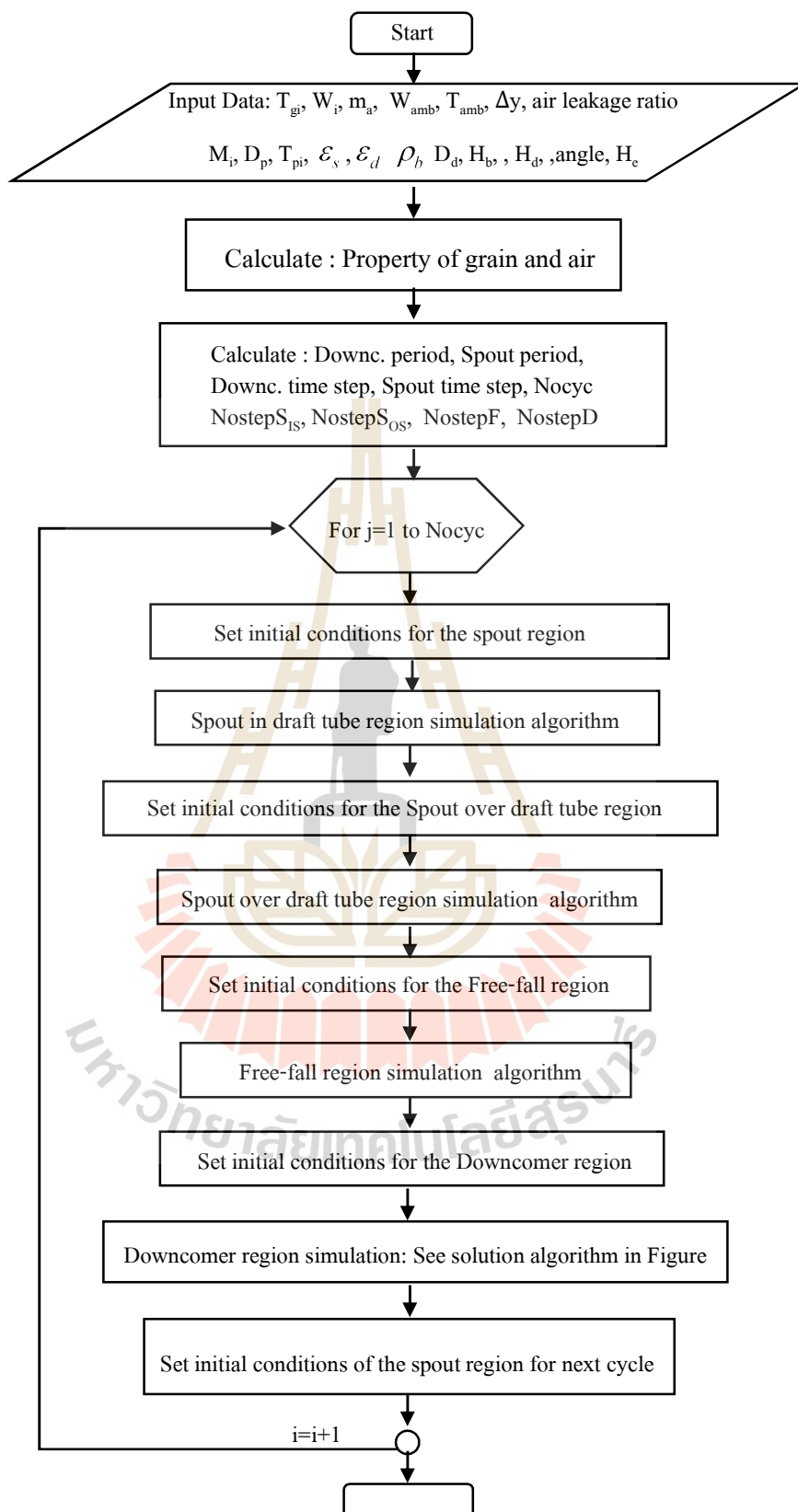
การคำนวณในรอบอบแห้งถัดไปจะเริ่มจากกระบวนการที่ 1. โดยใช้เงื่อนไขเมล็ดที่ออกจากชั้นล่างสุดของส่วนพักตัวในถังและเงื่อนไขอากาศทางเข้าท่อเป่าพ่น เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในส่วนเป่าพ่นในท่อ สำหรับการคำนวณในรอบถัดไป การคำนวณจะทำซ้ำเป็นวงรอบจนกระทั่งได้จำนวนรอบอบแห้งที่ต้องการ ขนาดของเครื่องอบแห้งดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 สรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ขนาดเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหมุนอิสระ

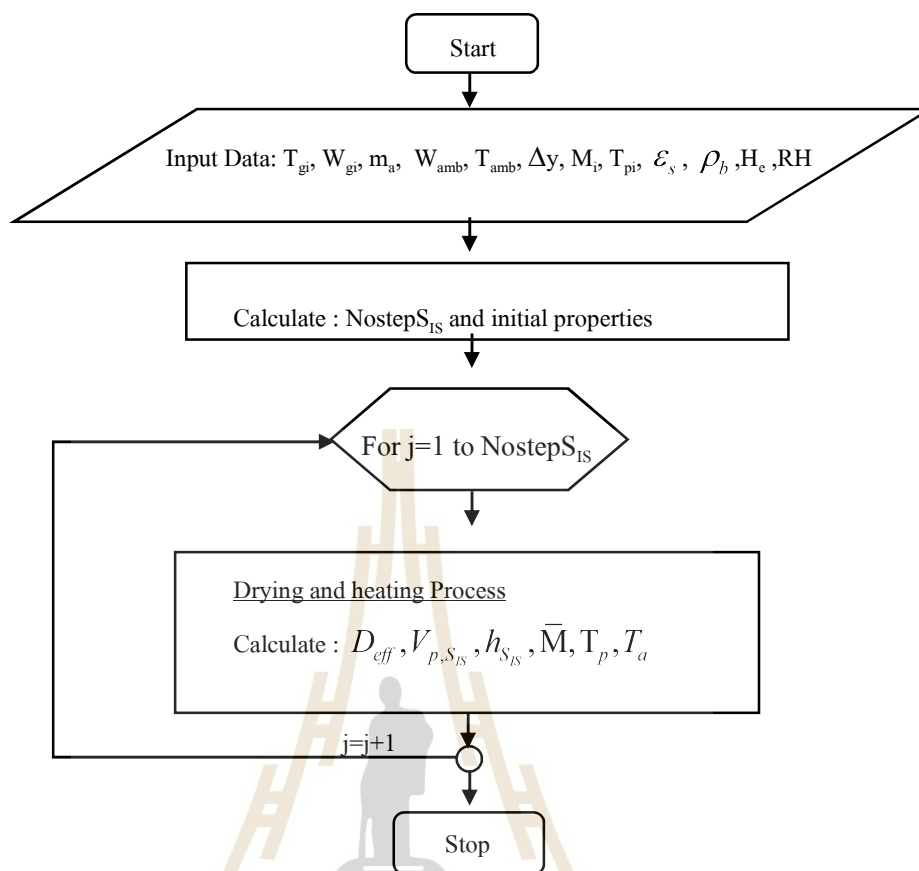
ขนาดเครื่องอบแห้ง	ค่า
ความยาวท่อลมเป่า, m	0.6
ความสูงถังพัก, m	0.57
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อลมเข้า, m	0.0435
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อลมเป่า, m	0.058
เส้นผ่านศูนย์กลางถังพัก, m	0.3
มุมเอียงถังพัก (slant angle), °	60



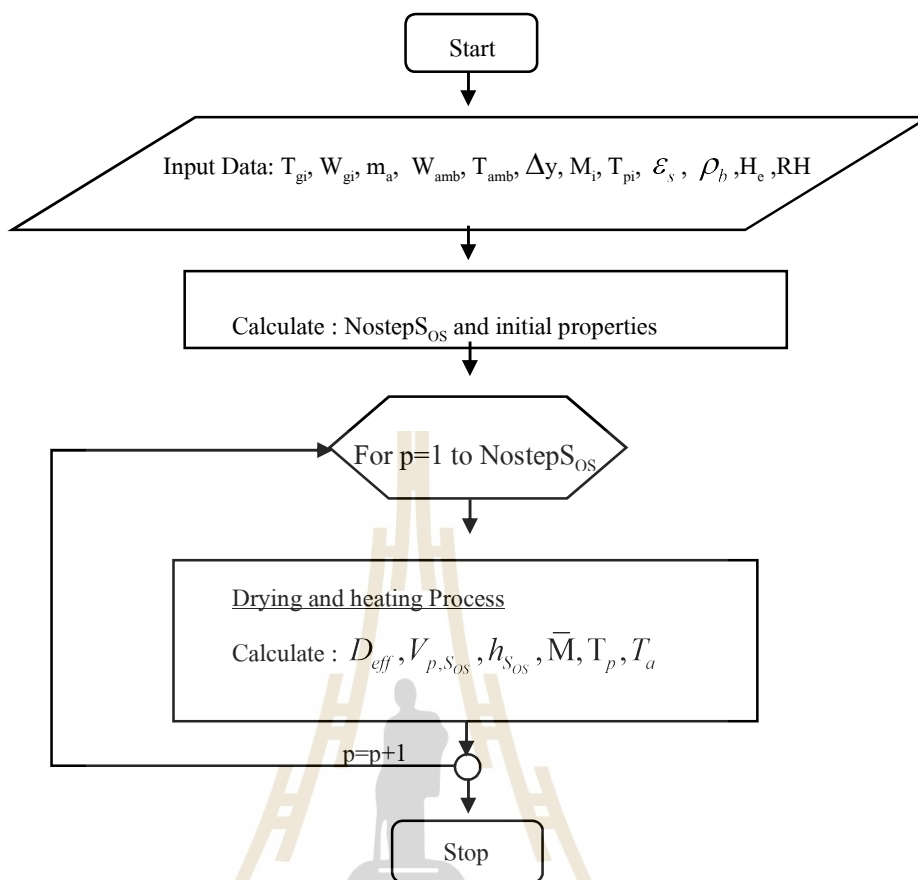
รูปที่ 5.4 การเคลื่อนตัวของเมล็ดข้าวเปลือกในแต่ละส่วนการอบแห้ง



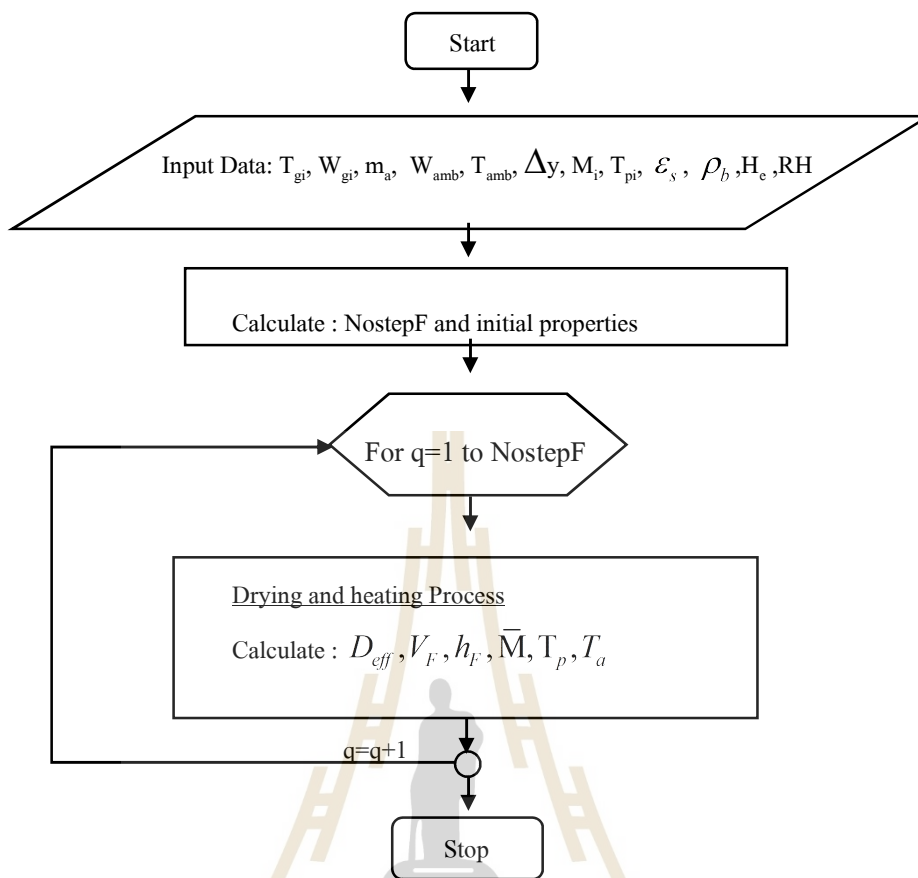
รูปที่ 5.5 ฟังก์ชันการคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง



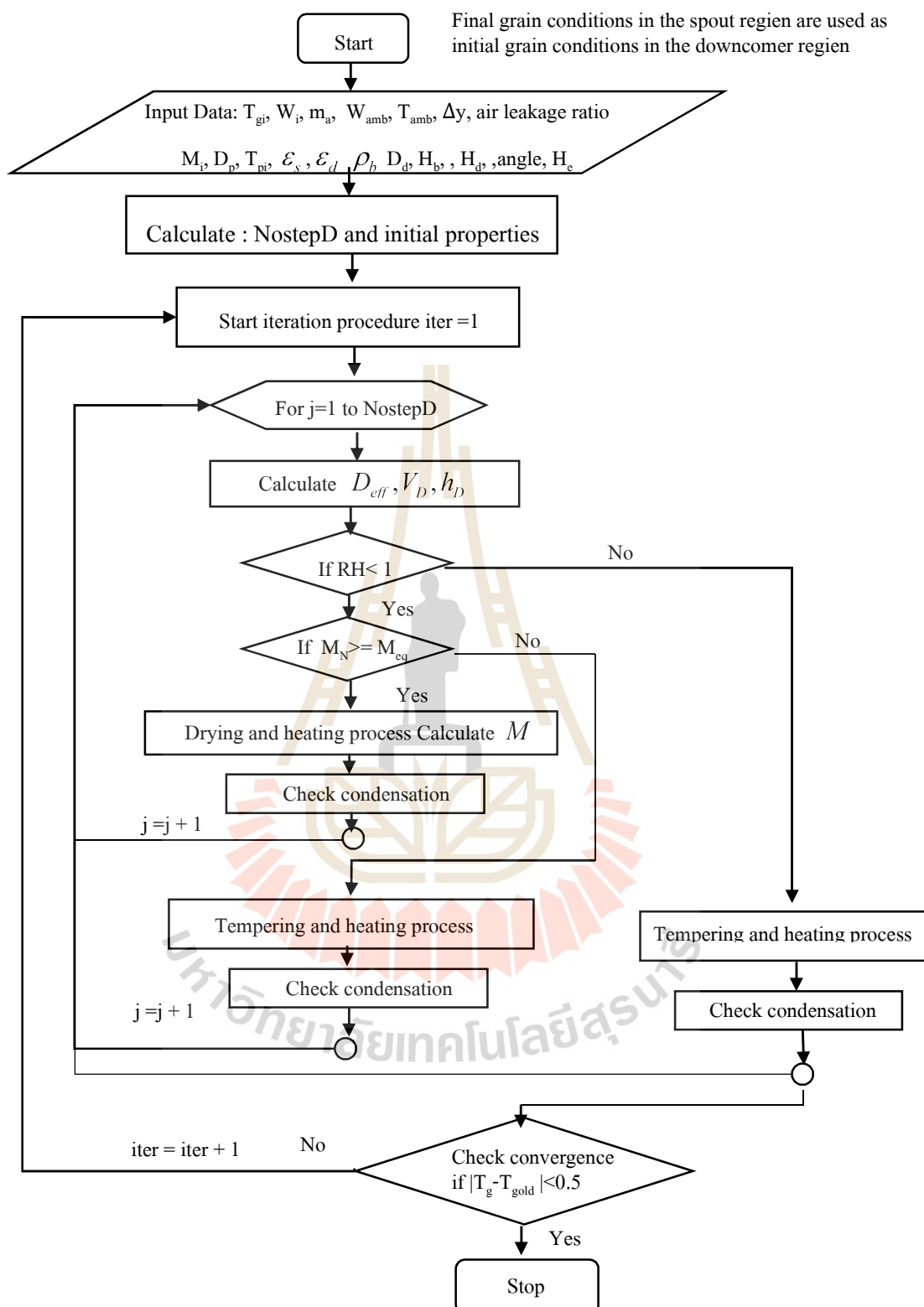
รูปที่ 5.6 ฟังก์ชันคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง ส่วนเป่าพ่นในท่อ



รูปที่ 5.7 ผังการคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง ส่วนเป่าพ่นเหนือท่อ



รูปที่ 5.8 ผังการคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง ส่วนหล่นอิสระ



รูปที่ 5.9 ฟังก์ชันคำนวณแบบจำลองการอบแห้ง ส่วนพักตัวในถัง

5.4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ผลของแบบจำลองเทียบกับการทดลอง ดังตารางที่ 5.2 แสดงเงื่อนไขการทดลองจำนวน 6 การทดลอง ผลการจำลองทั้งค่าความชื้นข้าวเปลือก อุณหภูมิข้าวเปลือกในถัง อุณหภูมิลมร้อนและความชื้นสัมพัทธ์ที่ปลายท่อเป่าพ่นทั้ง 6 การทดลอง แสดงในรูปที่ 5.10-5.13 ตามลำดับ โดยแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยดังตารางที่ 5.3 สำหรับผลการจำลองค่าความชื้นข้าวเปลือกในรูปที่ 5.10 โดยข้าวเปลือกมีความชื้นในช่วง 24.1-25.2% w.b. ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ได้จากการทำนายมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ r ต่ำสุด 0.996 โดยลักษณะการจำลองในช่วงกลางของเวลาอบแห้ง เส้นความชื้นมีลักษณะโค้งออกมามากกว่าหมายความว่าความชื้นจะลดลงเร็วกว่าการทดลอง เมื่อเวลาผ่านไปความชื้นในเมล็ดจะมีอัตราการลดที่น้อยลง ช่วงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองทั้ง 6 การทดลองอยู่ที่ 2.8-5.3%

สำหรับผลการจำลองอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกในถังพัก โดยเทียบกับข้อมูลการทดลองที่วัดอุณหภูมิในถังพักที่ตำแหน่งความสูงจากกันถังพักเท่ากับ 15 cm ผลการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 พบว่า มีผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง (r อยู่ในช่วง 0.958-0.999) โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทั้ง 6 การทดลองอยู่ในช่วง 11.0-21.6% ซึ่งผลจากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง ทำให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจึงสูงในช่วงแรกและให้ใกล้เคียงกับผลการทดลองเมื่อเวลาผ่านไปโดยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนลดลงเหลือเพียง 0.95-3.85% ในช่วงอุณหภูมิ 60-100°C (No.1-No.3) แต่เมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงที่ 120°C (No.4) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ 150°C (No.5) จะเห็นว่าผลการจำลองอุณหภูมิเมล็ดจะมีค่าสูงกว่าการทดลองชัดเจน ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยถึง 21.6%

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขข้อมูลการทดลองที่ใช้จำลอง

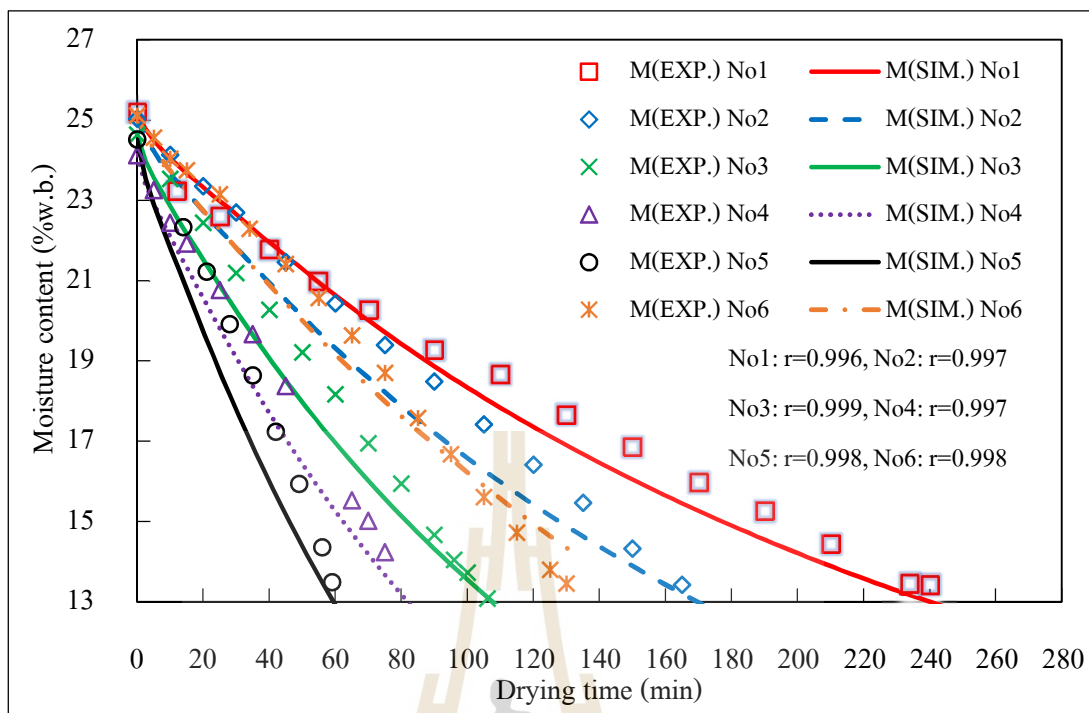
เงื่อนไขการทดลอง	การทดลองที่ (No)					
	1	2	3	4	5	6
อุณหภูมิลมร้อน, °C	60	80	100	120	150	120
ความเร็วลมร้อน, m/s	19	19	19	19	19	19
มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น, kg	10	10	10	10	10	15
ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น, % w.b.	25.2	25.0	24.6	24.1	24.5	25.1
เวลาอบแห้ง, min	240	193	120	105	70	130

ตารางที่ 5.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการจำลอง

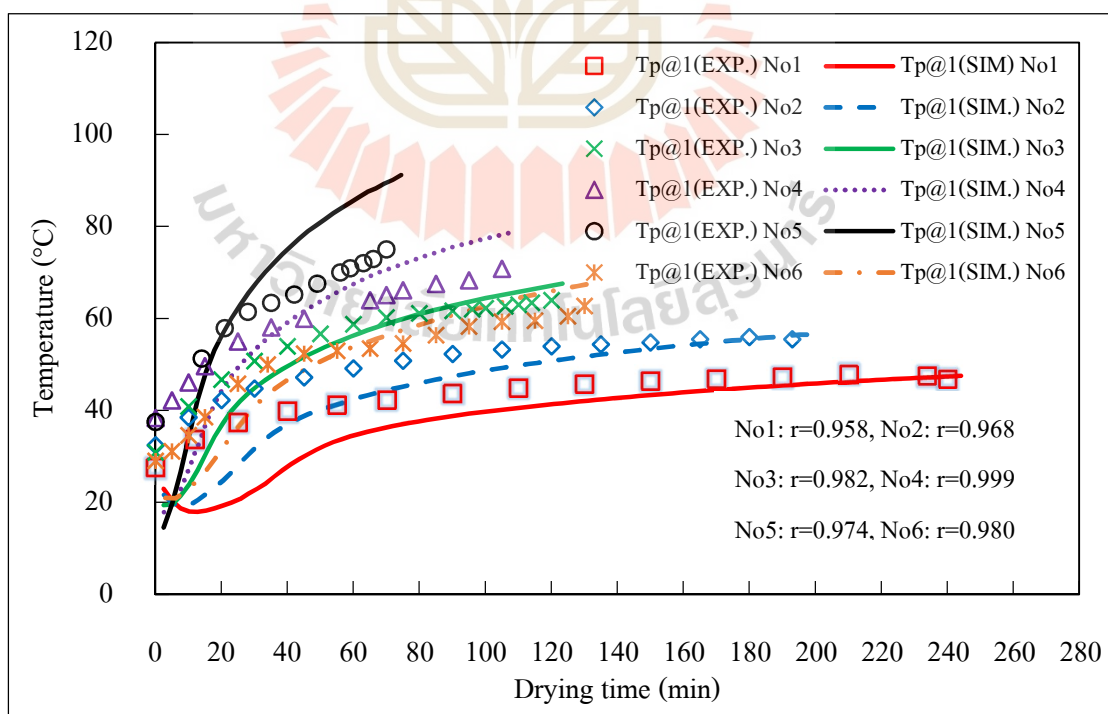
Case No	Average %error			
	MC(%)	T _{paddy}	T _{draft}	RH _{draft}
1	2.8	15.9	2.1	13.6
2	3.8	15.6	2.9	14.8
3	3.3	11.0	3.4	36.0
4	3.6	21.6	6.0	28.4
5	5.3	20.9	4.1	36.0
6	2.9	14.2	8.4	17.5

นอกจากนี้ผลการจำลองอุณหภูมิลมร้อนที่ออกจากท่อเป่าพ่นเมื่อเทียบกับผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.12 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันกับการทดลอง (r อยู่ในช่วง 0.943-0.999) มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง 2.1-8.4% โดยเฉพาะที่อุณหภูมิลมร้อนต่ำ 60-100°C (No.1-No.3) แต่เมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนสูง ผลการจำลองจะมีค่ามากกว่าการทดลอง ซึ่งสาเหตุหลักมาจากเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงมากขึ้นจะมีการสูญเสียความร้อนให้กับผนังท่อและปลายท่อได้มากขึ้น อีกกรณีหนึ่งคือเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงมากขึ้น การกระจายตัวของลมร้อนที่ปลายท่อก็จะรวดเร็วยิ่งขึ้น นั่นหมายถึงความร้อนจะถูกถ่ายโอนไปยังสิ่งแวดล้อมได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น จึงทำให้วัดค่าได้น้อยกว่าแบบจำลอง ซึ่งไม่คิดผลของปัจจัยเหล่านี้

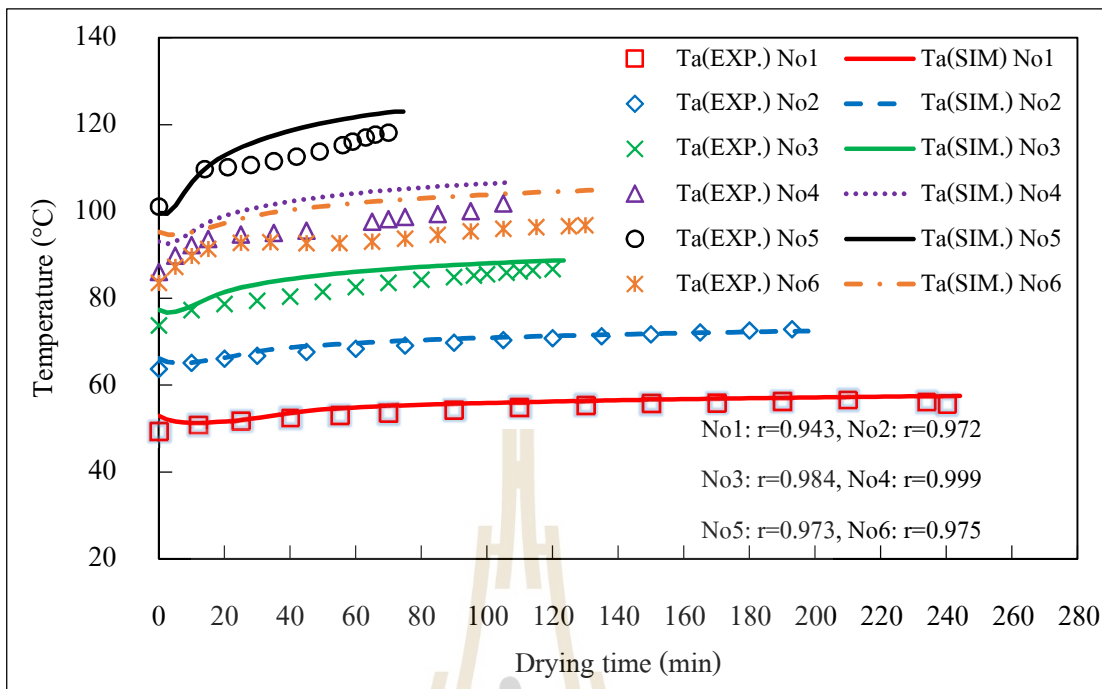
กรณีผลการจำลองค่าความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนที่ออกจากท่อเป่าพ่นเมื่อเทียบกับแบบจำลอง (r อยู่ในช่วง 0.914-0.999) พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง 13.6-36.0% ดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดยในช่วงแรกค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแบบจำลองจะมีค่าสูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูง และถ่วงเข้าใกล้ผลการทดลองเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสาเหตุที่ความชื้นสัมพัทธ์จากการทดลองต่ำกว่าในช่วงแรก มาจากปัจจัยของการอุ่นเครื่องก่อนเริ่มทดลองเป็นเวลา 30 min โดยใช้อุณหภูมิลมร้อนและความเร็วลมตามเงื่อนไขทดลองเพื่อป้องกันการสูญเสียต่างๆ แต่ผลที่ได้คือ ทำให้ผลของการวัดในช่วงแรกเป็นช่วงที่ทั้งอุณหภูมิลมร้อนสูงกว่าปกติ ส่วนความชื้นสัมพัทธ์จะต่ำกว่าปกติ



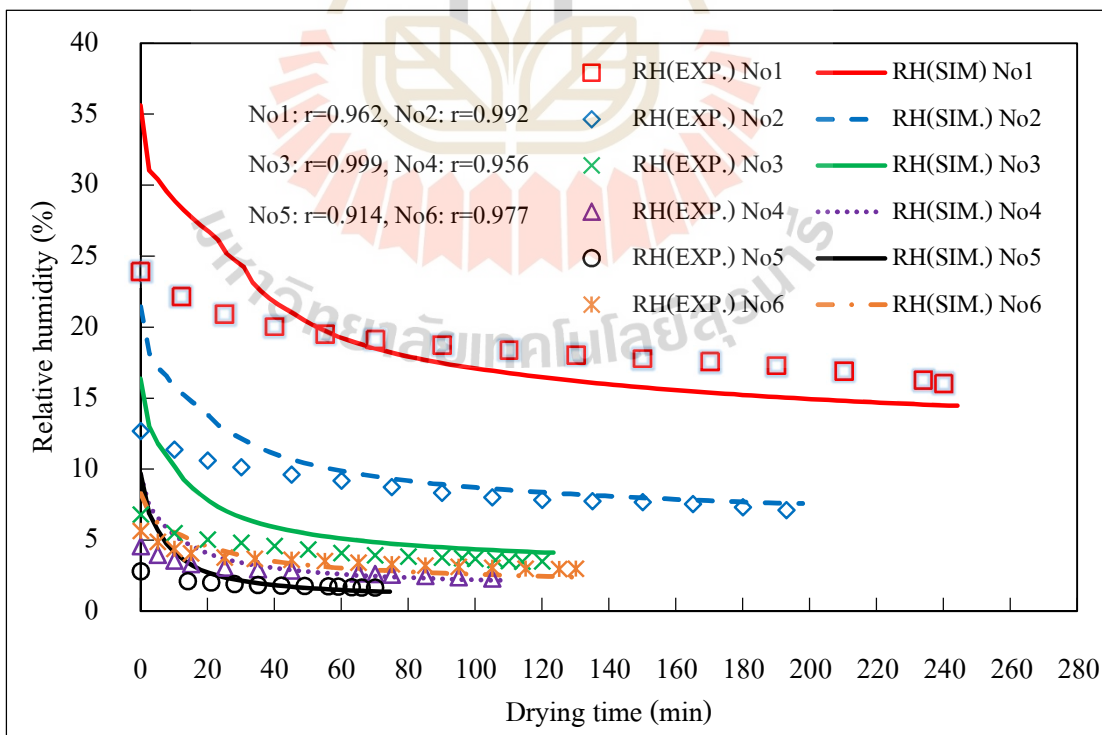
รูปที่ 5.10 ผลการจำลองความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 5.11 ผลการจำลองอุณหภูมิเมล็ดเทียบกับอุณหภูมิในถังพักที่ความสูง 15 cm



รูปที่ 5.12 ผลการจำลองอุณหภูมิความร้อนที่ปลายท่อเป่าพ่นเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 5.13 ผลการจำลองความชื้นสัมพัทธ์ที่ปลายท่อเป่าพ่นเทียบกับผลการทดลอง

5.5 สรุปผลการวิจัย

ผลการจำลองการอบแห้งเชิงทฤษฎีโดยทดสอบความถูกต้องเทียบกับผลการทดลองจำนวน 6 การทดลองของค่าความชื้นข้าวเปลือก อุณหภูมิข้าวเปลือกในถัง อุณหภูมิลมร้อนและความชื้นสัมพัทธ์ที่ปลายท่อเป่าพ่น พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำในการทำนายผลของความชื้นข้าวเปลือกในระดับที่พอใจที่ r ต่ำสุด 0.996 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง 2.1-8.4% รวมถึงสามารถทำนายอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนที่ออกจากท่อเป่าพ่นได้ผลใกล้เคียงกับการทดลองที่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง 2.1-8.4% และ 13.6-36.0% รวมถึงค่า $r = 0.943-0.999$ และ $r = 0.914-0.999$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำนายผลของอุณหภูมิมес็ดข้าวเปลือกได้ดีอีกด้วย (ในช่วง $r = 0.958-0.999$) ที่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง 11.0-21.6% แต่เนื่องจากเวลาช่วงแรกของการทดลองมีการอุ่นเครื่องก่อนทำการทดลอง จึงทำให้ผลในช่วงแรกมีความคลาดเคลื่อนไป การทำนายผลที่อุณหภูมิลมร้อนสูง 120-150°C ค่าอุณหภูมิมес็ดข้าวเปลือกที่ทำนายได้สูงกว่าการทดลอง ดังนั้นการจำลองที่อุณหภูมิลมร้อนสูงอาจมีความคลาดเคลื่อนจากผลที่ได้จากการทดลองไปบ้าง แต่อย่างไรก็ตาม การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งทางทฤษฎีสามารถให้ผลข้อมูลของปัจจัยอื่นๆ ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของอิทธิพลจากผลของตัวแปรต่างๆได้

รายการอ้างอิง

- ชอบ ลายทอง (2530). การศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ความร้อนของข้าวเปลือก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา (2555). การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ : ท็อป.
- สุชาติ สุทธิเจริญพานิชย์ (2541). การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาต์เบดสองมิติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ (2557). การหาจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าفن-หล่นหน่วง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- 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.
- Haider, A. and Levenspiel, O. (1989). Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. **Powder Technology**, 58: 63-70.
- Mathur, K. B. and Epstein, N. (1974). **Spouted Bed**. Academic Press, New York.
- 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.
- Soponronnarit, S. (1988). Energy Model of Grain Drying System. **ASEAN Journal on Science and Technology for Development**, 5(2): 43-68.
- The FLUENT user's guide, Chapter 19: discrete phase models, Fluent Inc., December 3, 2001.
- 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**, 18(2): 361-371.

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกจากช่วงความชื้นประมาณ 25% w.b. ถึงความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาที่ 14% w.b. ด้วยเครื่องอบแห้งแบบวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนช่วง 60-150°C มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5-15 kg และความเร็วลมร้อน 19-25 m/s รวมถึงมีการศึกษาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางทั้งแบบแอมพิริคัลและแบบเชิงทฤษฎี เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง โดยสรุปได้ดังนี้

การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาการอบแห้งมากขึ้น โดยมีแนวโน้มการลดลงในลักษณะใกล้เคียงแบบเชิงเส้น เนื่องจากลักษณะการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีการพักตัวในถังพัก ทำให้มีระยะเวลาที่ความชื้นภายในเมล็ดข้าวจะแพร่มาสู่ผิวเมล็ดได้มากกว่า ซึ่งช่วยให้ถ่ายเทความชื้นออกจากเมล็ดง่ายกว่าก่อนเข้าสู่การอบแห้งในท่อเป่าพ่น การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 60°C ถึง 150°C อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มถึง 5 เท่า ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับความเร็วลมร้อนที่เพิ่มขึ้น จาก 19 m/s เป็น 22 m/s มีแนวโน้มทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 10% ที่อุณหภูมิลมร้อนมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วลมร้อนขึ้นอีกเป็น 25 m/s กลับทำให้อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงถึง 4% ซึ่งเป็นผลจากช่วงการอบแห้งแบบเป่าพ่นเหนือท่อและหล่นอิสระ ที่เมล็ดข้าวถูกเป่าพ่นเหนือท่อขึ้นที่ความสูงที่สุดประมาณ 2 m แล้วตกลงสู่ถังพักแบบหล่นอิสระ ซึ่งทำให้มีระยะเวลาสัมผัสกับอากาศแวดล้อมที่นานขึ้นรวมถึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลความชื้นกับอากาศแวดล้อม ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง

มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่สูงขึ้น มีผลทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงขึ้นโดยเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 17% เนื่องจากเป็นการเพิ่มทั้งระยะทางและเวลาที่ทำให้เมล็ดข้าวมีระยะเวลาอยู่ในถังพักนานขึ้น ส่งผลให้มีระยะเวลาในการแพร่ความชื้นออกมามากขึ้น รวมถึงเนื่องจากมีลมร้อนบางส่วนไหลแทรกเข้ามาในถังพักจึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น

ค่าพลังงานปฐมภูมิจำเพาะเพิ่มสูงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนมากกว่า 60°C โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ค่าพลังงานทุติยภูมิจำเพาะมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นส่งผล

ให้พลังงานทุติยภูมิลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิร้อน 60-80°C สำหรับการลดค่าพลังงานรวม จำเพาะสามารถทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิร้อนสูงขึ้นซึ่งสามารถลดพลังงานรวมจำเพาะลงได้ถึง 2 เท่า เพิ่มปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นลดพลังงานรวมจำเพาะลงได้ถึงประมาณ 40-70% และใช้ความเร็วลมร้อนต่ำสุด

คุณภาพข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งที่ความชื้นประมาณ 14% w.b. มีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิร้อนสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิร้อนสูงสุด 150°C เปอร์เซนต์ข้าวต้นจะลดลง โดยจะลดลงมากอย่างมีนัยสำคัญจาก 30% ลงมาถึง 16% เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ำสุด (5 kg) นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วจาก 19 m/s ขึ้นเป็น 22 m/s มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลงเพิ่มขึ้นอีก แต่ในทางกลับกันการเพิ่มความเร็วลมร้อนสูงสุด 25 m/s ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นใกล้เคียงหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งที่ต่ำลงเมื่อใช้ความเร็วลมร้อนสูงสุด สำหรับการเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ซึ่งที่มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นได้อย่างมีนัยสำคัญจากประมาณ 18% เพิ่มขึ้น 30% เป็นผลจากข้าวมีระยะเวลาการพักตัวที่นานขึ้นทำให้ความแตกต่างของความชื้นความชื้นลดลง ส่งผลให้ความเค็มที่เกิดขึ้นลดลงถึงแม้จะใช้อุณหภูมิมร้อนที่สูง ในส่วนค่าดัชนีความขาวข้าวเปลือกหลังการขัดสี พบว่ามีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวอ้างอิงถึงแม้ว่าการอบแห้งจะใช้อุณหภูมิร้อนที่สูงถึง 150°C

สำหรับเงื่อนไขที่ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูง ดัชนีความขาวใกล้เคียงกับข้าวอ้างอิง มีอัตราการอบแห้งสูง และใช้พลังงานต่ำ ทำได้โดยเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นเพื่อเพิ่มระยะเวลาการพักข้าว อบแห้งที่อุณหภูมิร้อนสูงและใช้ความเร็วลมร้อนที่ต่ำเพื่อลดพลังงานรวมจำเพาะ ซึ่งจะให้มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่สูง

ผลการจำลองการอบแห้งเชิงทฤษฎีสามารถสรุปได้คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำในการทำนายผลของความชื้นข้าวเปลือกในระดับที่พอใจที่ r ต่ำสุด 0.996 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง 2.1-8.4% รวมถึงสามารถทำนายอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนที่ออกจากท่อเป่าพ่นได้ผลใกล้เคียงกับการทดลองที่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง 2.1-8.4% และ 13.6-36.0% รวมถึงค่า $r = 0.943-0.999$ และ $r = 0.914-0.999$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำนายผลของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วง 11.0-21.6% ในช่วง $r = 0.958-0.999$ แต่เนื่องจากเวลาช่วงแรกของการทดลองมีการอุ่นเครื่องก่อนทำการทดลอง จึงทำให้ผลในช่วงแรกมีความคลาดเคลื่อนไป การทำนายผลที่อุณหภูมิร้อนสูง 120-150°C ค่าอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำนายได้สูงกว่าการทดลอง ดังนั้นการจำลองที่อุณหภูมิร้อนสูงอาจมีความคลาดเคลื่อนจากผลที่ได้จากการทดลองไปบ้าง แต่อย่างไรก็ตาม การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งทางทฤษฎีสามารถให้ผลข้อมูลของปัจจัยอื่นๆ ได้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป

1. เนื่องจากรูปแบบลักษณะการเป่าพ่นหล่นอิสระ โดยคลุมด้วยมุ้งลวดแบบนี้อาจทำให้มีการใช้พลังงานได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพมากพอ ดังนั้นควรศึกษาต่อถึงกรณีการลดการใช้พลังงาน เช่น การเพิ่มขนาดความยาวท่อโดยจะช่วยให้ข้าวมีระยะเวลาที่สัมผัสกับลมร้อนได้นานขึ้น และศึกษาถึงลักษณะการคลุมห้องอบแห้งที่ให้ผลดี

2. ควรมีการศึกษาถึงการใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นมากขึ้น เพื่อให้ข้าวมีระยะเวลาพักตัวที่นานขึ้น ซึ่งส่งผลดีในหลายด้าน ทั้งด้านพลังงานที่ใช้คุ้มค่า และได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ดี





ตัวอย่างพิสูจน์สมการและการคำนวณที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์ แสดงได้ดังนี้

ก.1 การคำนวณค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ย

อัตราการอบแห้งเฉลี่ยคือ มวลความชื้นในเมล็ดที่ระเหยออกหรือผลต่างของมวลความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นกับมวลความชื้นสุดท้ายต่อด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% w.b. ซึ่งแสดงตามสมการดังนี้

$$\bar{M} = \left[\frac{(w_i - w_f)}{t_T} \right] \quad (ก.1)$$

โดยเมื่อจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น และความชื้นข้าวเปลือกสุดท้ายจะได้ดังสมการดังนี้

$$w_i - w_f = w_i \left[\frac{(M_i - M_f)}{1 - M_f} \right] \quad (ก.2)$$

แทนค่าเพื่อหาอัตราการอบแห้งเฉลี่ย ดังสมการ (ก.3)

$$\bar{M} = \left[\frac{(w_i)}{t_T} \right] \left[\frac{(M_i - M_f)}{1 - M_f} \right] \quad (ก.3)$$

โดยที่	\bar{M}	คือ อัตราการอบแห้งเฉลี่ย, $\text{kg}_{\text{water evaporated}}/\text{min}$
	w_i	คือ มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น, kg
	w_f	คือ มวลข้าวเปลือกสุดท้าย, kg
	M_i	คือ ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น, decimal w.b.
	M_f	คือ ความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย, decimal w.b.
	t_T	คือ ระยะเวลาอบแห้ง, min

ตัวอย่างเมื่อกำหนดอัตราการอบแห้งเฉลี่ย ที่ความชื้นเริ่มต้น 25% w.b. อบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้าย 14% w.b. ใช้เวลาการอบแห้ง 60 min โดยใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 10 kg ดังนั้นอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสามารถคำนวณได้คือ

$$\bar{M} = \left[\frac{(10)}{60} \right] \left[\frac{(0.25 - 0.14)}{1 - 0.14} \right]$$

$$\bar{M} = 0.0213 \text{ kg}_{\text{water evaporated}}/\text{min}$$

ก.2 สมการคำนวณหาค่าพลังงานรวมจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก

ค่าพลังงานรวมจำเพาะเป็นผลรวมของพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะและพลังงานทฤษฎีจำเพาะพิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานรวมที่ใช้ในการอบแห้งกับปริมาณน้ำที่ระเหยจากเมล็ดข้าวเปลือก ดังสมการนี้

$$SEC = \frac{E_T}{w_i - w_f} \quad (\text{ก.4})$$

โดยที่ SEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะ, $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water evaporated}}$
 E_T คือ พลังงานรวมที่ใช้ในการอบแห้ง, MJ

ก.3 สมการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (head rice yield, HRY) สามารถคำนวณได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$HRY = \left(\frac{w_{HRV}}{w_{RH}} \right) \times 100\% \quad (ก.5)$$

โดยที่ w_{HRV} คือ มวลข้าวต้นหลังขัดสี, g
 w_{RH} คือ มวลข้าวเปลือกก่อนขัดสี, g

การคำนวณค่าดัชนีความขาวของข้าว ใช้ข้าวต้นประมาณ 20 g มาวัดสีด้วยเครื่องวัดสี ของ Hunter Lab รุ่น Color Quest XE ดังแสดงในรูป ข.8 โดยในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานสี L^* , a^* และ b^* โดยวิเคราะห์ความขาวของข้าวสารด้วยค่าดัชนีความขาว ดังแสดงในสมการที่ (ก.6) โดย L^* ใช้กำหนดค่าความสว่าง โดยที่ $L^* = 0$ ความสว่างจะมีค่ามืดที่สุด และเมื่อ $L^* = 100$ ความสว่างจะมีค่าสว่างที่สุด ส่วน a^* ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว โดยที่ a^* อยู่ฝั่งทาง + แสดงความเป็นสีแดง และเมื่อ a^* เป็น - เป็นการแสดงความเป็นสีเขียว และ b^* ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน เมื่อ b^* อยู่ฝั่งทาง + แสดงความเป็นสีเหลืองและเมื่อ b^* เป็น - เป็นการแสดงความเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 และใช้มุมผู้สังเกต 10°

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (ก.6)$$

โดยที่ WI, L^* , a^* และ b^* มีหน่วยเป็นร้อยละ

ก.4 การวัดความเร็วลมโดยใช้แผ่นออริฟิส

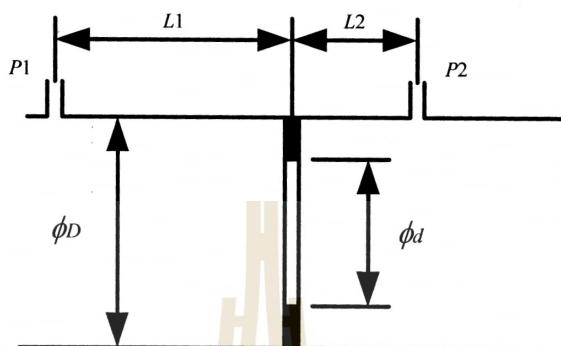
งานวิจัยนี้วัดความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ผ่านเข้าสู่เครื่องอบแห้งด้วยแผ่นออริฟิส ที่เกรียงไกร (2551) ออกแบบและสร้างตามมาตรฐาน ISO 5167 มีลักษณะเป็นแบบ concentric orifice plate (square edge) จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างแบบระยะ D และ 0.5D แสดงดังนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	D	=	44	mm
เส้นผ่านศูนย์กลาง orifice plate	d	=	20	mm
อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ($0.2 < \beta < 0.75$)	$\beta = (d/D)$	=	0.4545	

กรณี $\beta < 0.6$ จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างกันมีค่าเป็นระยะด้านเหนือน้ำ

$D \pm 0.1D$ ในงานวิจัยเลือกใช้ระยะ = 44 mm

ระยะด้านปลายน้ำ $0.5D \pm 0.02D$ ในงานวิจัยเลือกใช้ระยะ = 22 mm



รูปที่ ก.1 การติดตั้ง orifice plate

ใช้สมการแบร์นูลลีภายใต้สมมติฐานคือ ไม่มีการส่งผ่านงานและความร้อน กำหนดให้ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งของท่อขนาดใหญ่ และตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง orifice plate ดังรูปที่ ก.1 สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{\bar{V}_2^2}{2g} \quad (\text{ก.7})$$

$$\bar{V}_1 = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \bar{V}_2 \quad (\text{ก.8})$$

$$\bar{V}_2 = \frac{\sqrt{2g \frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + z_1 - z_2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \quad (\text{ก.9})$$

$$Q_2 = A_2 \frac{\sqrt{2g \frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + z_1 - z_2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} = A_2 \frac{\sqrt{2g \frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + z_1 - z_2}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (\text{ก.10})$$

สมการที่ได้มาเป็นอัตราไหลปริมาตรโดยทางทฤษฎี ซึ่งมีค่าสูงกว่าเนื่องจากไม่ได้คิดความฝืด ดังนั้นต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) และสัมประสิทธิ์การขยายตัว (ε) เพื่อนำไปใช้ได้กับการวัดค่าจริง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$Q_2 = A_2 \varepsilon C_d \frac{\sqrt{2g \frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + z_1 - z_2}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (\text{ก.11})$$

$$\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta P}{kP_1} \quad (\text{ก.12})$$

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

จากการคำนวณตามสมการ (ก.12) จะได้ $\varepsilon = 0.940088$

สัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) หาได้จากสมการ Reader-Harris/ Gallagher ดังนี้

$$C_d = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{\text{Re}_D} \right)^{0.7} \\ + \left(0.0188 + 0.0063 \left(\frac{19000\beta}{\text{Re}_D} \right)^{0.8} \right) \beta^{3.5} \left(\frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{0.3} + (0.043 + 0.08e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1}) \\ \left(1 - 0.11 \left(\frac{19000\beta}{\text{Re}_D} \right)^{0.8} \right) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.031 \left(\frac{2L_2}{1 - \beta} \right)^{1.1} \beta^{1.3} + 0.011(0.75 - \beta) \left(2.8 - \frac{D}{25.4} \right) \quad (\text{ก.13})$$

ดังนั้นสามารถหาค่าอัตราไหลปริมาตรที่ตำแหน่ง orifice plate

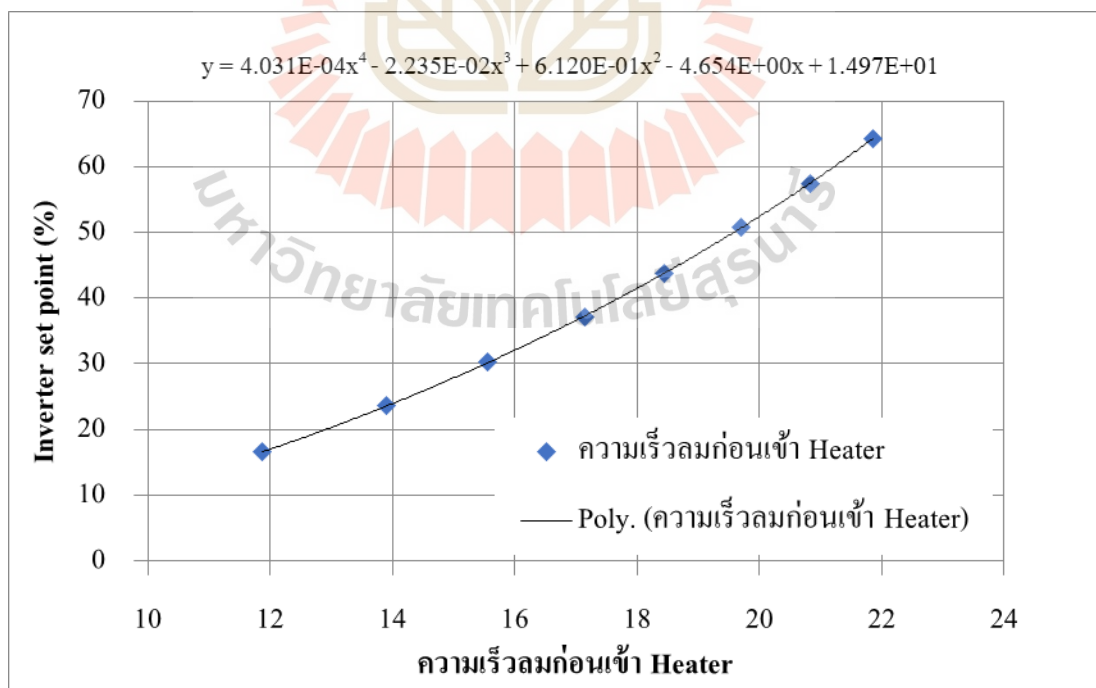
โดยที่ L_1 มีค่าเท่ากับ 1

L_2 มีค่าเท่ากับ 0.47

(กรณีจุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่าแบบระยะ D และ 0.5D (vena contracta taps))

ตารางที่ ก.1 ค่า Inverter set point และความดันตกคร่อมแผ่น orifice plate

h_2 (cm)	h_1 (cm)	h_2-h_1 (cm)	P_1 (kPa)	P_2 (kPa)	P_2/P_1	P_1-P_2 (kPa)	SP
154.50	109.45	45.05	105.73	100.67	0.95	5.061	16.6
163.60	100.60	63.00	107.48	100.41	0.93	7.074	23.6
172.35	92.00	80.35	109.18	100.19	0.92	8.984	30.2
181.70	83.00	98.70	110.97	99.89	0.90	11.080	37.2
190.50	74.60	115.90	112.65	99.63	0.88	13.015	43.8
199.80	65.70	134.10	114.43	99.35	0.87	15.081	50.7
208.70	57.00	151.70	116.15	99.07	0.85	17.079	57.4
218.30	47.90	170.40	117.97	98.83	0.84	19.141	64.3



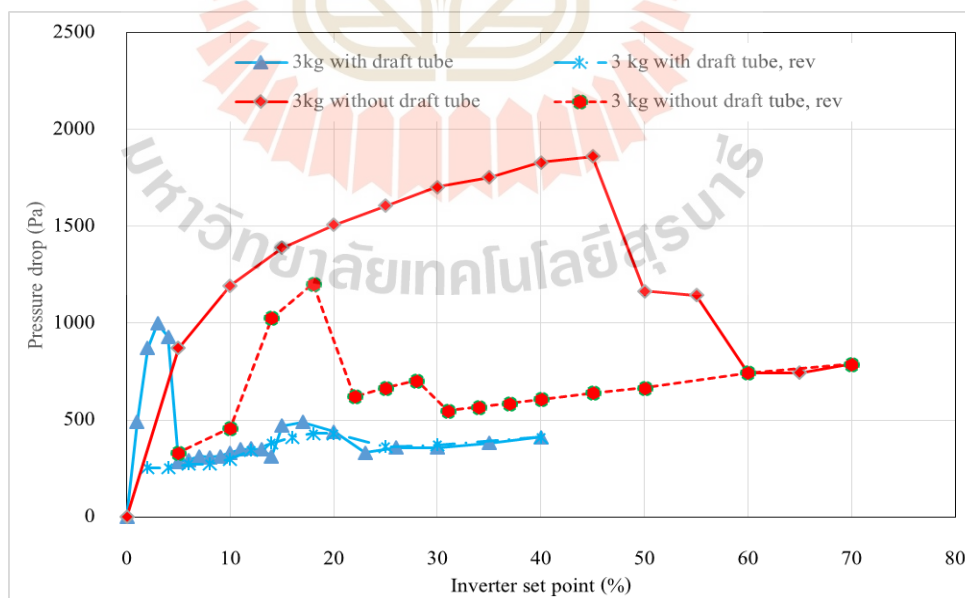
รูปที่ ก.2 Inverter set point ความเร็วอากาศก่อนเข้า Heater

ตารางที่ ก.2 ค่า Inverter set point ที่อุณหภูมิลมร้อน 60-150°C เพื่อให้ได้ความเร็วลมร้อน 19-25 m/s

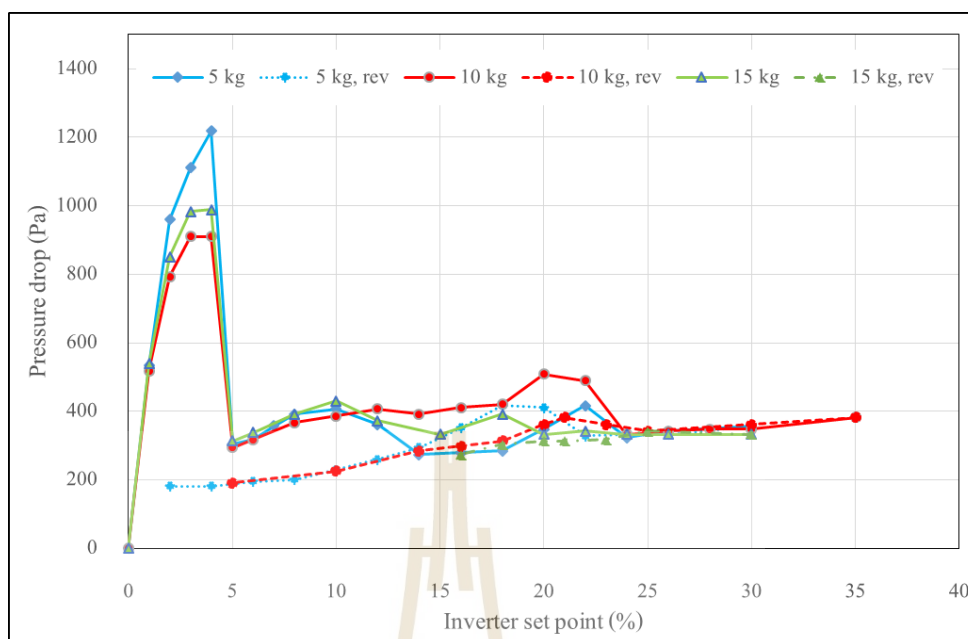
V_{inlet} (m/s)	Inverter set point (%) at T(°C)				
	60	80	100	120	150
19	35.0	31.0	27.6	24.8	21.2
22	47.3	42.0	37.4	33.6	28.8
25	61.4	54.5	48.7	43.7	37.6

ก.5 ความเร็วต่ำสุดของการเป่าฟันและความดันตกคร่อมเบดสูงสุด

ค่าความเร็วต่ำสุดของการเป่าฟันกรณีติดตั้งท่อเป่าฟัน และไม่ติดตั้งท่อเป่าฟัน จะพบว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการเป่าฟันจะลดลงเมื่อมีการติดตั้งท่อเป่าฟันอย่างมีนัยสำคัญมาก กรณีไม่มีการติดตั้งท่อเป่าฟัน ได้ค่า Inverter set point 60 % หรือที่ความเร็วลมต่ำสุด 22 m/s ในขณะที่กรณีติดตั้งท่อเป่าฟันสามารถลดค่าความเร็วต่ำสุดลงได้มากถึง Inverter set point 5 % หรือที่ความเร็วลมต่ำสุด 6.3 m/s รวมถึงค่าความดันตกคร่อมเบดสูงสุดลดลงจาก 1860 Pa ลงมาที่ 998 Pa ประมาณเกือบ 2 เท่า ดังแสดงในรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 Inverter set point กับ Pressure drop เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 3 kg เทียบกับการติดตั้งท่อเป่าฟันและไม่ติดตั้งท่อเป่าฟัน

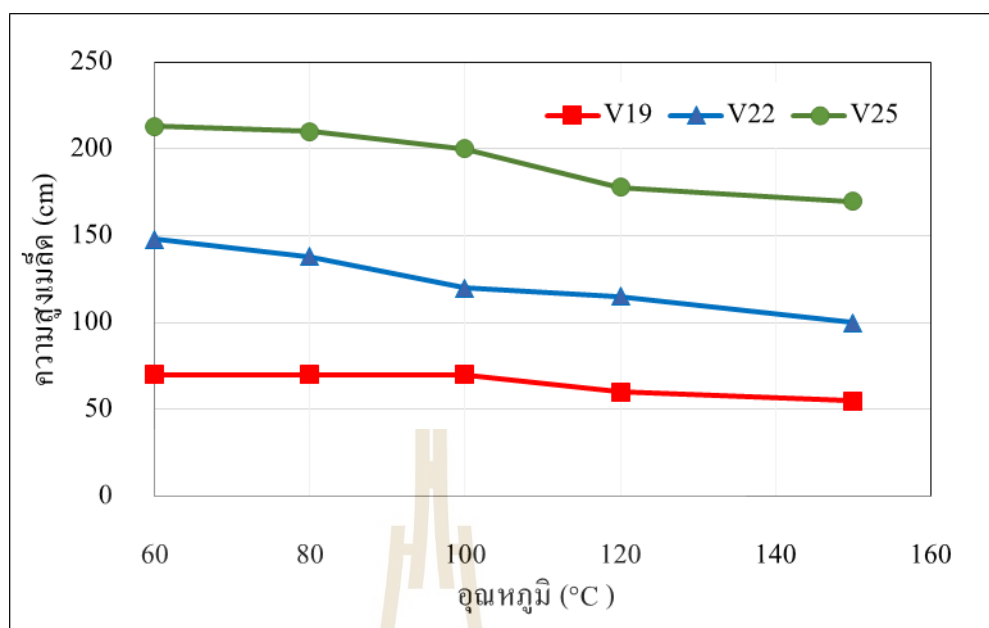


รูปที่ ก.4 Inverter set point กับ Pressure drop เมื่อใช้มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5-15 kg โดยมีการติดตั้งท่อเป่าพ่น

จากรูปที่ ก.4 ค่าความเร็วต่ำสุดของการเป่าพ่นกรณีติดตั้งท่อเป่าพ่นกรณีมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5-15 kg จะพบว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการเป่าพ่นไม่แตกต่างกันมากอยู่ที่ ค่า Inverter set point 5 % หรือที่ความเร็วลม 6.3 m/s

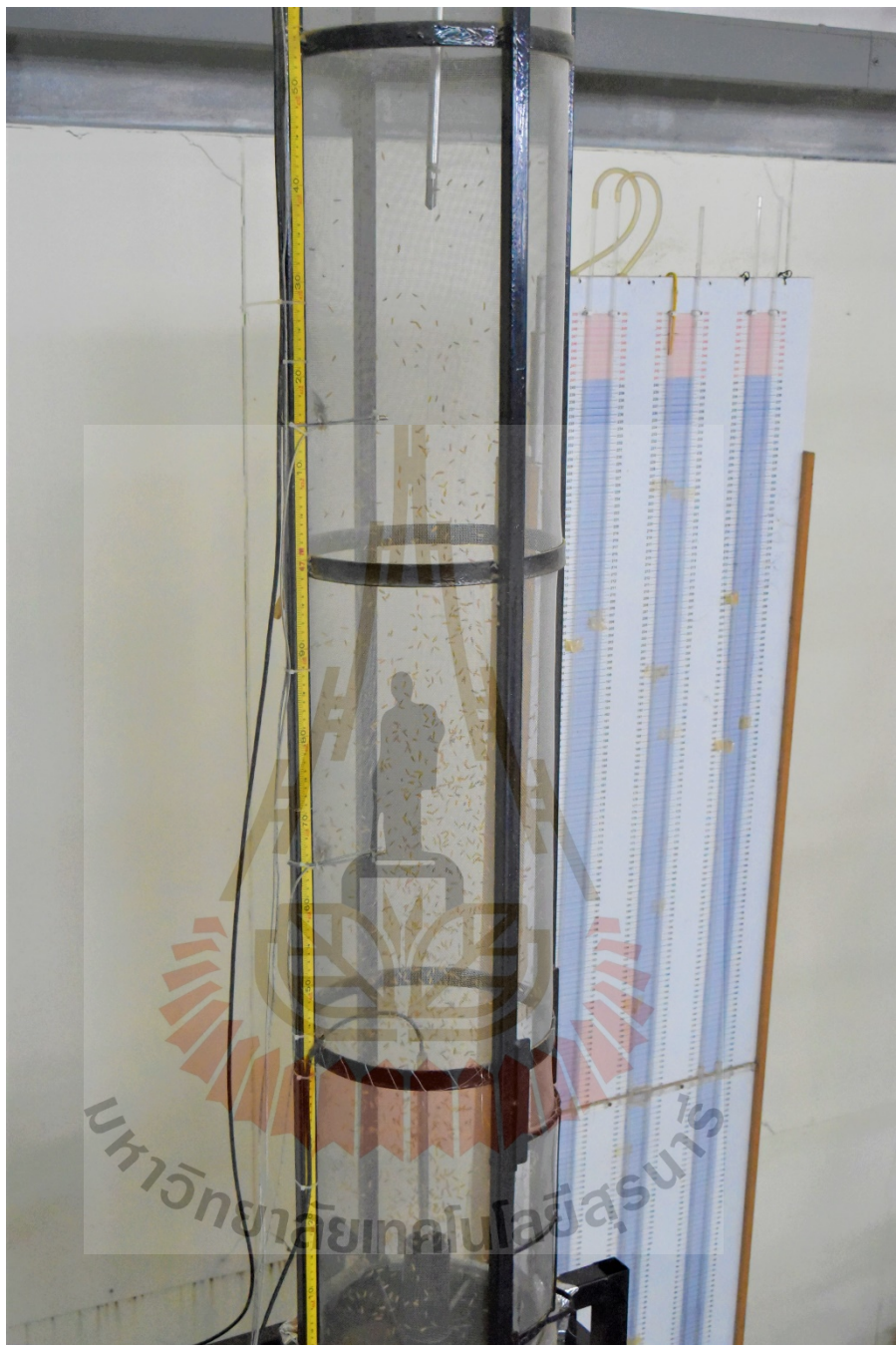
ก.6 ความสูงของเมล็ดเฉลี่ยจากถังขณะเป่าพ่น

ความสูงของเมล็ดขณะเป่าพ่น โดยวัดด้วยการอ่านค่าระดับความสูงโดยผู้วิจัยแล้วนำมาเฉลี่ย ซึ่งเป็นความสูงจากถังอบแห้ง โดยความเร็วลมร้อนสูงสุดที่ 25 m/s วัดค่าระดับความสูงของการเป่าพ่นได้ที่ 200 cm โดยค่าความสูงของการเป่าพ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงมากขึ้น โดยความสูงของเมล็ดข้าวเปลือกถูกเป่าพ่นด้วยความเร็วลมร้อน 19 m/s มีค่าความสูงอยู่ที่ 70 cm ดังแสดงในรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 ความสูงของเมล็ดช่วงเป่าพ่นเหนือท่อ





รูปที่ ก.6 การลอยตัวของเมล็ดในช่องเป่าพ่นเหนือท่อ

ก.7 อัตราการไหลข้าวเปลือก

การวัดอัตราการไหลข้าวเปลือก วัดโดยใช้ถุงมุ้งตาข่ายที่จัดทำขึ้นเพื่อวัดอัตราการไหลข้าวเปลือก ซึ่งวัดโดยครอบท่อเป่าพ่นแล้วทำการจับเวลา 20 วินาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดจะนำข้าวที่ได้มาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาอัตราการไหลข้าวเปลือก โดยมีการทำซ้ำและหาค่าเฉลี่ยในแต่ละกรณี โดยอัตราการไหลของข้าวที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่แตกต่างกันมาก จึงนำมาหาค่าเฉลี่ยอีกครั้งเพื่อไม่คิดถึงผลของอุณหภูมิต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ ก.3 นอกจากนี้ปริมาณมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออัตราการไหลของข้าวเปลือกเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความเร็วลมร้อนที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ ก.3 แสดงอัตราการไหลของข้าวเปลือก

m (kg)	V (m/s)	Mass Flow rate (kg/min) at T(°C)					
		60	80	100	120	150	เฉลี่ย
5	19	3.03	3.08	2.76	3.23	3.31	3.1
	22	3.80	4.14	3.91	3.75	3.88	3.9
	25	5.29	4.77	4.84	4.91	4.82	4.9
10	19	3.40	3.10	3.30	3.31	3.01	3.2
	22	4.11	4.09	4.10	4.10	3.78	4.0
	25	4.93	4.65	5.07	4.80	4.71	4.8
15	19	3.57	3.63	3.46	3.32	3.38	3.5
	22	4.47	4.29	4.11	4.22	4.08	4.2
	25	5.35	5.07	5.17	5.20	4.97	5.2

ก.8 ค่าพลังงานและประสิทธิภาพของเครื่องเป่าลม

1. ความดันลดสูงสุดดังสมการที่ ก.14 (สุชาติ สุทธิเจริญพาณิชย์, 2541) ที่อุณหภูมิอากาศ 60°C ความชื้นความเปลือกเริ่มต้น 30% d.b. $\rho_p = 1408.4 \text{ kg/m}^3$, $\rho_a = 1.06 \text{ kg/m}^3$, $H_b = 0.57 \text{ m}$, $\varepsilon = 0.548$

$$\Delta P_{\max} = H_b (\rho_p - \rho_a) (1 - \varepsilon) g \quad (\text{ก.14})$$

$$\Delta P_{\max} = 0.57(1408.4 - 1.06)(1 - 0.548)9.81$$

$$\Delta P_{\max} = 3557.0 \text{ Pa}$$

2. ค่าความดันลดในท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.0435 m ยาว 1.86 m

$$h_{f1} = \frac{fLV^2}{2gD} \quad (\text{ก.15})$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0.005977, \text{ Re} = 60194.89, f = 0.033$$

$$h_{f2} = \frac{0.033(1.86)22^2}{2(9.81)(0.0435)} = 34.81 \text{ m}$$

$$P_{\text{major1}} = \rho_a gh = 1.06(9.81)34.81 = 361.9 \text{ Pa}$$

3. ค่าความดันลดในท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.09 m ยาว 0.67 m

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0.002889, \text{ Re} = 14062.19, f = 0.034$$

$$h_{f2} = \frac{0.034(0.67)5.14^2}{2(9.81)(0.09)} = 0.34 \text{ m}$$

$$P_{f2} = 1.06(9.81)0.34 = 3.54 \text{ Pa}$$

4. ค่าความดันย่อยในระบบ

ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย่อยมีดังนี้

- จาก Gate valve fully open, $K_{\text{gate valve}} = 0.24$

- จาก Orifice Plate, $K_{\text{orifice}} = 1 - (22 / 44)^2 = 0.75$

- จากการขยายพื้นที่หน้าตัดฉับพลัน, $K_{\text{expand}} = 1 - (43.5 / 90)^2 = 0.77$

- จากการลดพื้นที่หน้าตัดฉับพลัน $K_{\text{contraction}} = (0.42(1 - (43.5 / 90)^2)) = 0.32$

- จากข้องอรัศมียาว 90° , $K_{\text{elbow90}} = 0.72$

ความดันสูญเสียย่อยทั้งหมด

$$h_m = \frac{V^2 \sum K}{2g} \quad (\text{ก.16})$$

$$h_m = \frac{22^2 (0.24 + 0.75 + 0.77 + 0.32 + 0.72)}{2(9.81)} = 69.03 \text{ m}$$

$$P_m = 1.06(9.81)69.03 = 717.63 \text{ Pa}$$

5. ความดันสูญเสียรวม

$$P_{total} = \Delta P_{max} + P_{f1} + P_{f2} + P_m = 3557.0 + 361.9 + 3.54 + 717.63 = 4,640.04 \text{ Pa}$$

6. ความดันสูญเสียอื่นๆ เช่น จากขดลวดความร้อน ตาข่ายกันข้าวหล่น เป็นต้น คิดเป็น 20% ของความดันรวมทั้งหมด

$$P_{other} = 4,640.04(0.2) = 928.0 \text{ Pa}$$

7. ความดันสูญเสียในระบบทั้งหมด $P_{system} = 5,568.04 \text{ Pa}$

8. พลังงานที่ต้องใช้

$$Power_{Fluid} = QP_{system} = \frac{\pi}{4} 0.0435^2 (22)(5,568.04) = 182.05 \text{ W}$$

9. พลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องเป่าลมที่วัดได้

$$Power_{Input} = 1,371.6 \text{ W}$$

10. ประสิทธิภาพเครื่องเป่าลม

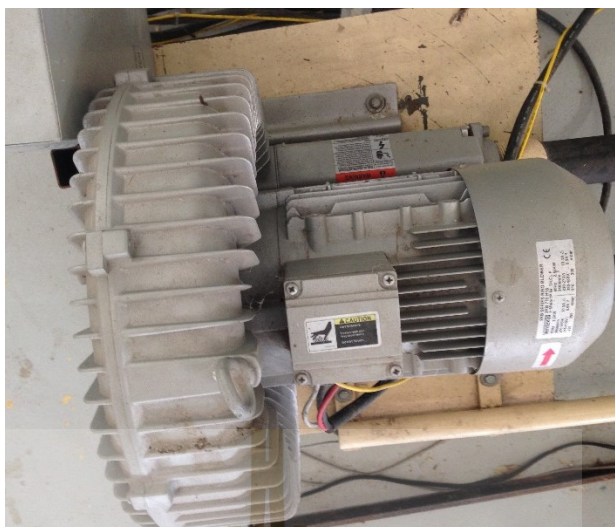
$$\eta_{blower} = \frac{Power_{Fluid}}{Power_{Input}} \times 100 = 13.3\%$$



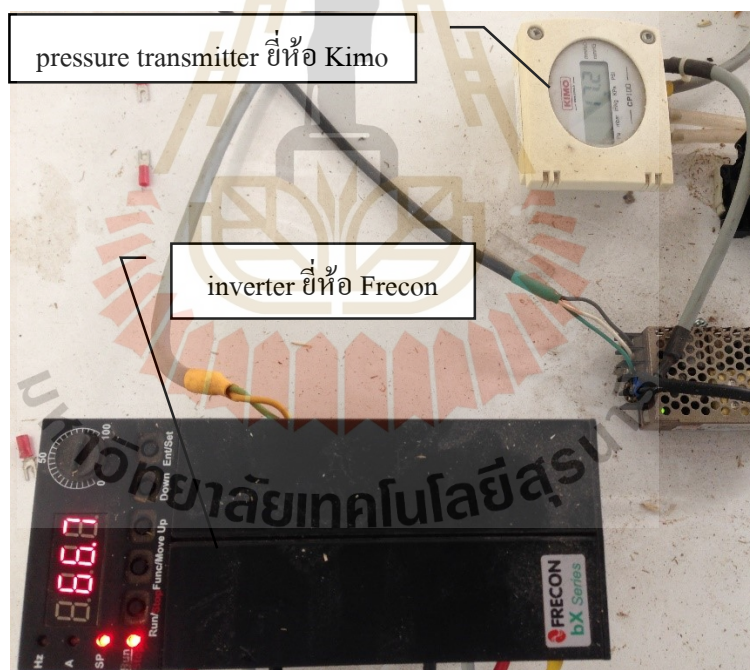
ตัวอย่างรูปภาพอุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย มีดังนี้



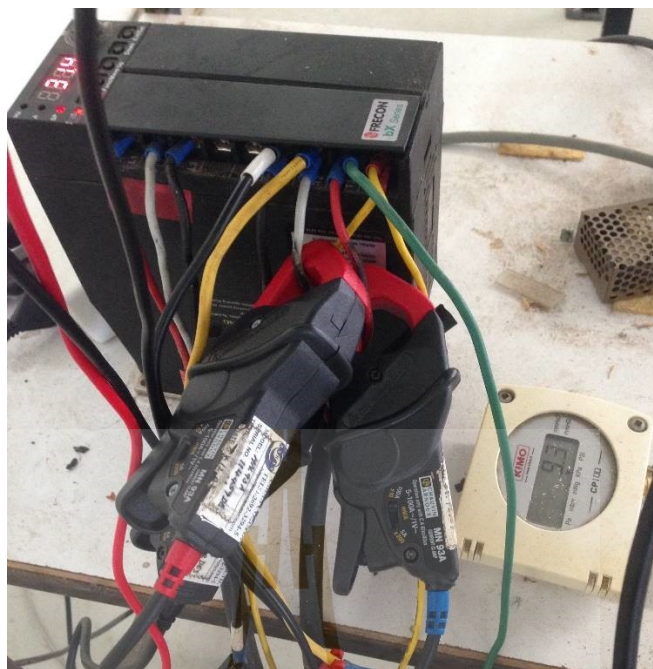
รูปที่ ข.1 โครงเครื่องอบแห้งที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น



รูปที่ ข.2 เครื่องเป่าลมที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ข.3 ชุด PID ควบคุมความเร็วเครื่องเป่าลมที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ข.4 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ข.5 เครื่องมือวัดพลังงานความร้อนแบบ watt-hour meter ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ข.6 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ข.7 เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล



รูปที่ ข.8 เครื่องวัดสี



รูปที่ ข.9 เครื่องอบแห้งแบบถาดที่ใช้อบแห้งตัวอย่างข้าวควบคุม



ภาคผนวก ค

ระเบียบวิธีการคำนวณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

ระเบียบวิธีรุงเงอ-คุททาอันดับสี่ (fourth-order Runge-Kutta method) ถูกจัดว่าเป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้กันโดยแพร่หลาย อยู่ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้ $n=4$ ก่อให้เกิดสมการรุงเงอ-คุททาอันดับสี่ ซึ่งให้ความผิดพลาดในรูปแบบของความกว้างช่วงอันดับสี่ $O(h^4)$ ลักษณะของผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงทำให้ระเบียบวิธีนี้ถูกนำไปประยุกต์กับงานคำนวณในหลายๆ ด้านในงานวิจัยที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง รูปแบบของสมการรุงเงอ-คุททาอันดับสี่ มีลักษณะดังนี้

$$y_{i+1} = y_i + \left[\frac{1}{6}(k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \right] h \quad (\text{ค.1})$$

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (\text{ค.2})$$

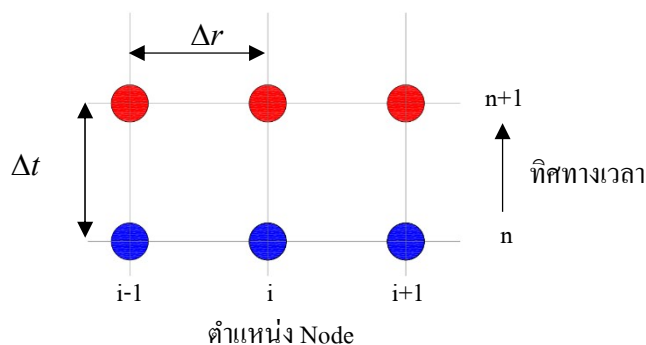
$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_1\right) \quad (\text{ค.3})$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_2\right) \quad (\text{ค.4})$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3) \quad (\text{ค.5})$$

ระเบียบวิธีแบบปริยาย (implicit method) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการลู่ออกของผลลัพธ์จากระเบียบวิธีแบบชัดเจน ข้อแตกต่างระหว่างวิธีทั้ง 2 อยู่ที่การประมาณค่าอนุพันธ์อันดับสองที่แปรผันกับระยะรัศมี (r) โดยเดิมประมาณค่าอนุพันธ์ดังกล่าวที่ตำแหน่งของเวลาครั้งที่ n ที่ทราบค่าของความชื้น แต่ในระเบียบวิธีแบบปริยายจะประมาณค่าอนุพันธ์ที่ตำแหน่งของเวลาครั้งที่ $n+1$ ดังรูปที่ ค.1 ซึ่งไม่ทราบค่าของอนุหภูมิใดๆ เลย ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} = \frac{M_{i+1}^{n+1} - 2M_i^{n+1} + M_{i-1}^{n+1}}{(\Delta r)^2} \quad (\text{ค.6})$$



รูปที่ ค.1 ตำแหน่ง โหนดในระเบียบวิธีของแครงก์-นิโคลสัน

ระเบียบวิธีของแครงก์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson method) เป็นระเบียบวิธีแบบปริยายอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งให้ค่าความผิดพลาดอันดับสองทั้งกับเวลาและระยะรัศมีจะให้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรงกว่าวิธีแบบปริยาย โดยการประมาณพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่งกับเวลาที่กึ่งกลางระหว่างช่วงเวลาของการคำนวณครั้งที่ n และ $n+1$ คือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_i^{n+1} - M_i^n}{\Delta t} \quad (\text{ค.7})$$

และทำเช่นเดียวกันกับพจน์อนุพันธ์อันดับสองที่แปรผันกับระยะรัศมี ดังนี้

$$\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{M_{i+1}^{n+1} - 2M_i^{n+1} + M_{i-1}^{n+1} + M_{i+1}^n - 2M_i^n + M_{i-1}^n}{(\Delta r)^2} \right) \quad (\text{ค.8})$$

$$\frac{\partial M}{\partial r} = \frac{1}{4} \left(\frac{M_{i+1}^{n+1} - M_{i-1}^{n+1} + M_{i+1}^n - M_{i-1}^n}{(\Delta r)} \right) \quad (\text{ค.9})$$

ค.2 พิสูจน์สมการ การแพร่ 1 มิติ บนพิกัดทรงกลม

จากสมการ (ค.10) สามารถพิสูจน์ โดยใช้วิธี Separation of variables ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น ดังแสดงในสมการที่ (ค.11)-(ค.12)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial M}{\partial r} r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (\text{ค.10})$$

$$\text{B.C.: } \left. \frac{\partial M}{\partial r} \right|_{r=0,t} = 0, \quad M(r_o, t) = M_{eq} \quad (\text{ค.11})$$

$$\text{I.C.: } M(r, 0) = M_{in} \quad (\text{ค.12})$$

ใช้วิธี Separation of variables ในการแยกตัวแปร ดังนี้

$$\text{กำหนดให้ } M(r, t) = v(r, t) + M_{in} \quad (\text{ค.13})$$

$$\left. \frac{\partial v(0, t)}{\partial r} \right| = 0, \quad v(r_o, t) = 0 \quad (\text{ค.14})$$

$$v(r, t) = P(r)T(t) \quad (\text{ค.15})$$

นำ (ค.15), (ค.13) แทนใน (ค.10) จะได้

$$\frac{\partial [P(r)T(t)]}{\partial t} = P(r) \frac{\partial T(t)}{\partial t} = D_{eff} \frac{1}{r^2} \frac{\partial r^2}{\partial r} \frac{\partial P(r)T(t)}{\partial r} \quad (\text{ค.16})$$

$$P(r) \frac{\partial T(t)}{\partial t} = D_{eff} T(t) \frac{1}{r^2} \frac{\partial r^2}{\partial r} \frac{\partial P(r)}{\partial r} \quad (\text{ค.17})$$

$$\frac{\frac{\partial T(t)}{\partial t}}{D_{\text{eff}} P(r) T(t)} = \frac{1}{P(r) r^2} \frac{\partial r^2}{\partial r} \frac{\partial P(r)}{\partial r} = -\lambda^2 \quad (\text{ก.18})$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\lambda^2 D_{\text{eff}} T(t), \quad \frac{dr^2}{dr} \frac{dP(r)}{dr} = -\lambda^2 r^2 P(r) \quad (\text{ก.19})$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\lambda^2 D_{\text{eff}} T(t) \quad (\text{ก.20})$$

$$\int \frac{dT(t)}{T(t) dt} = \int -\lambda^2 D_{\text{eff}} dt \quad (\text{ก.21})$$

$$\ln T(t) = -\lambda^2 D_{\text{eff}} t + C \quad (\text{ก.22})$$

$$T(t) = C e^{-\lambda^2 D_{\text{eff}} t} \quad (\text{ก.23})$$

$$\frac{dr^2}{dr} \frac{dP(r)}{dr} = -\lambda^2 r^2 P(r) \quad (\text{ก.24})$$

$$P(r) = \frac{A \sin \lambda r}{r} + \frac{B \cos \lambda r}{r} \quad (\text{ก.25})$$

$$\frac{dP(r)}{dr} = \frac{\lambda A \cos \lambda r}{r} - \frac{\lambda B \sin \lambda r}{r} - \frac{A \sin \lambda r}{r^2} - \frac{B \cos \lambda r}{r^2} \quad (\text{ก.26})$$

$$\frac{dr^2}{dr} \frac{dP(r)}{dr} = \frac{dr^2}{dr} \left[\frac{\lambda A \cos \lambda r}{r} - \frac{\lambda B \sin \lambda r}{r} - \frac{A \sin \lambda r}{r^2} - \frac{B \cos \lambda r}{r^2} \right] \quad (\text{ก.27})$$

$$\frac{dr^2}{dr} \frac{dP(r)}{dr} = \frac{d}{dr} [\lambda A r \cos \lambda r - \lambda r B \sin \lambda r - A \sin \lambda r - B \cos \lambda r] \quad (\text{ก.28})$$

$$\begin{aligned}
&= \lambda Ar \cos \lambda r - \lambda^2 r A \sin \lambda r - \lambda r B \sin \lambda r - \lambda B^2 r \cos \lambda r - A \cos \lambda r \\
&+ \lambda B \cos \lambda r
\end{aligned} \tag{ก. 29}$$

$$\frac{dr^2}{dr} \frac{dP(r)}{dr} = -\lambda^2 r A \sin \lambda r - \lambda^2 r B \cos \lambda r \tag{ก.30}$$

$$\lambda^2 r^2 P(r) = \lambda^2 r^2 \left(\frac{A \sin \lambda r}{r} + \frac{B \cos \lambda r}{r} \right) = \lambda^2 r A \sin \lambda r + \lambda^2 r B \cos \lambda r \tag{ก.31}$$

$$\text{ที่ } r=0 \quad \frac{\cos \lambda r}{r} = \infty, \text{ ดังนั้น } B = 0 \tag{ก.32}$$

$$A C e^{-\lambda^2 D_{eff} t} \frac{\sin(\lambda r)}{r} = Y e^{-\lambda^2 D_{eff} t} \frac{\sin(\lambda r)}{r} \tag{ก.33}$$

$$\text{ที่ } r=r_o, \quad v(r_o, t) = 0 = Y e^{-\lambda^2 D_{eff} t} \frac{\sin(\lambda r_o)}{r_o}; \quad \sin \lambda r_o = 0, \quad \lambda r_o = n\pi, \quad \lambda = \frac{n\pi}{r_o} \tag{ก.34}$$

$$\text{ดังนั้น } M(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n e^{-\lambda_n^2 D_{eff} t} \frac{\sin(\lambda r)}{r} + M_{eq}, \quad \lambda = \frac{n\pi}{r_o} \tag{ก.35}$$

$$M(r, 0) = M_{in} = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \frac{\sin(n \lambda r)}{r_o} + M_{eq} \tag{ก.36}$$

$$r(M_{in} - M_{eq}) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sin\left(\frac{n \lambda r}{r_o}\right) \tag{ก.37}$$

$$\text{ใช้สมบัติของ orthogonal จะได้ } Y_m = \frac{2}{r_o} \int_0^{r_o} r(M_{in} - M_{eq}) \sin\left(\frac{m \lambda r}{r_o}\right) dr \tag{ก.38}$$

$$Y_m = \frac{2}{r_o} (M_{in} - M_{eq}) \int_0^{r_o} r \sin\left(\frac{m \lambda r}{r_o}\right) dr \quad (ก.39)$$

$$Y_m = \frac{2}{r_o} (M_{in} - M_{eq}) \left[r \left(\frac{-r_o}{m\pi}\right) \cos \frac{m\pi r}{r_o} \Big|_0^{r_o} - \int_0^{r_o} \left(\frac{-r_o}{m\pi}\right) \cos\left(\frac{m \lambda r}{r_o}\right) dr \right] \quad (ก.40)$$

$$Y_m = \frac{2}{r_o} (M_{in} - M_{eq}) \left[\frac{-r_o^2}{m\pi} \cos(m\pi) + \frac{r_o^2}{(m\pi)^2} \sin(m\pi) - \sin(0\pi) \right] \quad (ก.41)$$

$$Y_m = \frac{-2r_o}{m\pi} (M_{in} - M_{eq}) \cos(m\pi) = \frac{-2r_o}{m\pi} (M_{in} - M_{eq}) (-1)^m \quad (ก.42)$$

$$Y_m = \frac{2r_o}{m\pi} (M_{in} - M_{eq}) (-1)^{m+1} \quad (ก.43)$$

$$\text{ดังนั้น } M(r, t) = \frac{2r_o}{\pi} (M_{in} - M_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n\pi} e^{-\lambda_n^2 D_{eff} t} \frac{\sin(\lambda_n r)}{r} + M_{eq} \quad (ก.44)$$

$$\frac{M(r, t) - M_{eq}}{(M_{in} - M_{eq})} = MR(r, t) = \frac{2r_o}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-\lambda_n^2 D_{eff} t} \frac{\sin(\lambda_n r)}{r} \quad (ก.45)$$

$$\text{หาค่าเฉลี่ย: } \overline{MR}(r, t) = \frac{\int_{\forall} MR(r, t) ds}{\forall} = \frac{1}{\forall} \int_0^{r_o} MR(r, t) (4\pi r^2) dr \quad (ก.46)$$

$$\overline{MR}(r, t) = \frac{1}{\forall} \frac{2r_o}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-\lambda_n^2 D_{eff} t} \int_0^{r_o} \frac{\sin(\lambda_n r) (4\pi r^2)}{r} dr \quad (ก.47)$$

$$\overline{MR}(r, t) = \frac{18r_o}{\forall} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-\lambda_n^2 D_{eff} t} \left(\frac{r}{\lambda_n} \cos(\lambda_n r) \Big|_0^{r_o} + \int_0^{r_o} \frac{r_o \cos(\lambda_n r) dr}{\lambda_n} \right) \quad (ก.48)$$

$$\overline{MR}(r,t) = \frac{18r_o}{\nabla} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-\lambda_n^2 D_{eff} t} \left(\frac{r_o}{\lambda_n} \cos(\lambda_n r) + \frac{r_o}{\lambda_n^2} \cos(\lambda_n r_o) \right) \quad (\text{ก.49})$$

$$\overline{MR}(r,t) = \frac{18r_o}{4/3\pi r_o^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{\frac{-n^2 \pi^2}{r_o^2} D_{eff} t} \left(\frac{r_o^2}{\lambda_n} (-1)^{n+1} \right) \quad (\text{ก.50})$$

$$\overline{MR}(r,t) = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{\frac{-n^2 \pi^2}{r_o^2} D_{eff} t} \quad (\text{ก.51})$$





ภาคผนวก ง

ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล

ตารางที่ ง.1 ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C

Model No.	V19 m/s, m 5 kg			V19 m/s, m 10 kg			V19 m/s, m 15 kg		
	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r
1	0.01602	0.00028	0.99799	0.03001	0.00096	0.99457	0.01920	0.00038	0.99581
2	0.01438	0.00024	0.99833	0.02709	0.00085	0.99404	0.01629	0.00029	0.99701
3	0.01593	0.00030	0.99794	0.02400	0.00066	0.99512	0.01905	0.00039	0.99569
4	0.00728	0.00007	0.99956	0.01907	0.00050	0.99689	0.00637	0.00005	0.99951
5	0.01399	0.00023	0.99880	0.03620	0.00151	0.99347	0.01284	0.00018	0.99869
6	0.00909	0.00011	0.99931	0.02107	0.00055	0.99620	0.00806	0.00007	0.99922
7	0.00820	0.00009	0.99952	0.02014	0.00051	0.99663	0.00831	0.00008	0.99935
8	0.01438	0.00026	0.99833	0.02709	0.00092	0.99404	0.01629	0.00030	0.99701
9	0.00820	0.00009	0.99952	0.02014	0.00051	0.99663	0.01014	0.00012	0.99923
10	0.00640	0.00007	0.99966	0.00888	0.00013	0.99933	0.00652	0.00006	0.99949
11	0.00552	0.00004	0.99975	0.00572	0.00004	0.99972	0.00469	0.00003	0.99973
12	0.00612	0.00005	0.99969	0.00644	0.00006	0.99965	0.00466	0.00003	0.99974

ตารางที่ ง.2 ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ที่อุณหภูมิลมร้อน 80°C

Model No.	V19 m/s, m 5 kg			V19 m/s, m 10 kg			V19 m/s, m 15 kg		
	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r
1	0.02371	0.00060	0.99556	0.03542	0.00135	0.99365	0.03601	0.00138	0.99295
2	0.01989	0.00045	0.99685	0.01968	0.00045	0.99737	0.01506	0.00026	0.99839
3	0.02352	0.00063	0.99542	0.03224	0.00121	0.99275	0.03170	0.00115	0.99195
4	0.00751	0.00008	0.99952	0.00346	0.00002	0.99991	0.00674	0.00006	0.99963
5	0.01510	0.00026	0.99874	0.00715	0.00006	0.99972	0.00676	0.00005	0.99964
6	0.00930	0.00011	0.99926	0.00489	0.00003	0.99983	0.00655	0.00005	0.99965
7	0.00988	0.00012	0.99937	0.00375	0.00002	0.99990	0.00682	0.00006	0.99963
8	0.01989	0.00049	0.99685	0.01968	0.00049	0.99737	0.01506	0.00028	0.99839
9	0.00988	0.00012	0.99937	0.00375	0.00002	0.99990	0.00681	0.00006	0.99964
10	0.00552	0.00005	0.99974	0.00966	0.00016	0.99934	0.00667	0.00007	0.99963
11	0.00372	0.00002	0.99988	0.00300	0.00001	0.99993	0.00633	0.00005	0.99967
12	0.00368	0.00002	0.99988	0.00321	0.00001	0.99993	0.00654	0.00006	0.99965

ตารางที่ ง.3 ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ที่อุณหภูมิความร้อน 100°C

Model No.	V19 m/s, m 5 kg			V19 m/s, m 10 kg			V19 m/s, m 15 kg		
	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r
1	0.01932	0.00043	0.99694	0.03721	0.00149	0.99298	0.04407	0.00209	0.99056
2	0.01932	0.00050	0.99693	0.01425	0.00024	0.99840	0.01983	0.00046	0.99744
3	0.01902	0.00048	0.99701	0.03186	0.00118	0.99176	0.03928	0.00180	0.98913
4	0.01271	0.00032	0.99865	0.00429	0.00003	0.99985	0.00744	0.00008	0.99960
5	0.02257	0.00068	0.99659	0.00435	0.00002	0.99984	0.00776	0.00007	0.99959
6	0.01455	0.00027	0.99832	0.00429	0.00002	0.99985	0.00741	0.00007	0.99960
7	0.01455	0.00034	0.99859	0.00430	0.00002	0.99985	0.00774	0.00008	0.99958
8	0.01932	0.00060	0.99693	0.01425	0.00026	0.99840	0.01983	0.00050	0.99743
9	0.01456	0.00034	0.99861	0.00430	0.00002	0.99985	0.00775	0.00008	0.99958
10	0.00545	0.00012	0.99975	0.00655	0.00007	0.99964	0.00980	0.00017	0.99931
11	0.00369	0.00003	0.99989	0.00426	0.00003	0.99985	0.00745	0.00008	0.99960
12	0.00380	0.00003	0.99988	0.00424	0.00003	0.99985	0.00737	0.00008	0.99960

ตารางที่ ง.4 ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ที่อุณหภูมิความร้อน 120°C

Model No.	V19 m/s, m 5 kg			V19 m/s, m 10 kg			V19 m/s, m 15 kg		
	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r
1	0.04599	0.00228	0.98936	0.03502	0.00135	0.99204	0.04853	0.00251	0.98743
2	0.01940	0.00044	0.99742	0.02316	0.00066	0.99613	0.02069	0.00049	0.99738
3	0.04070	0.00193	0.98779	0.03322	0.00135	0.99147	0.04391	0.00220	0.98588
4	0.00556	0.00004	0.99977	0.00806	0.00010	0.99949	0.00813	0.00009	0.99950
5	0.00554	0.00004	0.99977	0.01247	0.00019	0.99911	0.00870	0.00009	0.99948
6	0.00544	0.00004	0.99978	0.00919	0.00012	0.99934	0.00825	0.00008	0.99949
7	0.00554	0.00004	0.99977	0.00971	0.00013	0.99937	0.00870	0.00009	0.99948
8	0.01940	0.00048	0.99742	0.02316	0.00074	0.99613	0.02069	0.00053	0.99738
9	0.00555	0.00004	0.99977	0.00971	0.00013	0.99937	0.00955	0.00011	0.99950
10	0.00766	0.00010	0.99956	0.00694	0.00011	0.99963	0.00521	0.00004	0.99980
11	0.00544	0.00004	0.99978	0.00528	0.00004	0.99978	0.00788	0.00008	0.99953
12	0.00539	0.00004	0.99978	0.00697	0.00008	0.99962	0.00817	0.00009	0.99950

ตารางที่ ง.5 ผลการจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ที่อุณหภูมิลมร้อน 150°C

Model	V19 m/s, m 5 kg			V19 m/s, m 10 kg			V19 m/s, m 15 kg		
	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r
1	0.04785	0.00245	0.98787	0.05493	0.00335	0.98284	0.03846	0.00158	0.99012
2	0.02950	0.00100	0.99551	0.01622	0.00033	0.99776	0.01857	0.00040	0.99698
3	0.04620	0.00246	0.98699	0.04834	0.00292	0.98003	0.03450	0.00137	0.98891
4	0.01066	0.00016	0.99928	0.01867	0.00058	0.99700	0.00617	0.00005	0.99964
5	0.01425	0.00023	0.99911	0.00427	0.00002	0.99984	0.00725	0.00006	0.99957
6	0.01048	0.00014	0.99931	0.00791	0.00009	0.99945	0.00622	0.00005	0.99963
7	0.01394	0.00024	0.99905	0.00429	0.00003	0.99984	0.00679	0.00006	0.99959
8	0.02950	0.00109	0.99551	0.01622	0.00038	0.99776	0.01857	0.00043	0.99698
9	0.01394	0.00024	0.99906	0.00429	0.00003	0.99984	0.00679	0.00006	0.99959
10	0.01013	0.00017	0.99936	0.00945	0.00022	0.99922	0.00520	0.00005	0.99975
11	0.00941	0.00012	0.99944	0.00448	0.00003	0.99982	0.00485	0.00003	0.99978
12	0.00982	0.00013	0.99939	0.00488	0.00004	0.99979	0.00577	0.00005	0.99968

ประวัติผู้เขียน

นายสิวกกร ศรีชัยญากร เกิดเมื่อวันที่ 15 เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2534 จังหวัดราชบุรี ในปีการศึกษา 2552 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมัธยมฐานบินกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม หลังจากนั้นปี พ.ศ. 2553 ได้เข้าศึกษาในระดับอุดมศึกษา ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (เกียรตินิยมอันดับ 1) ในปี พ.ศ. 2557

ปี พ.ศ. 2557 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีผลการเรียนดีเด่นจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และในขณะที่ศึกษาอยู่ได้เป็นผู้ช่วยสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 2 รายวิชา ดังนี้ (1) รายวิชา Engineering Graphics I และ (2) รายวิชา Mechanical Engineering Drawing

ผลงานนำเสนอในการประชุมวิชาการ

- สิวกกร ศรีชัยญากร, กิรติ สุลักษณ์ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2563). ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34. 15-17 กรกฎาคม 2563. จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. (รางวัลบทความดีเด่น)

ผลงานการตีพิมพ์วารสารวิชาการ

- Sritunyakorn, S., Suluksna, S. and Chitsomboon, T. (2020). Diffusion Coefficient Modelling of Thin-layer Drying of Paddy Using Spouted Free Fall Bed Dryer. **RMUTP Research Journal**. 14(2).