



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

ปริญญา

วิศวกรรมเกษตร

วิศวกรรมเกษตร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดโดยใช้ปั๊มความร้อน

Design and Test of Corn Seeds Dryer Using Heat Pump

นามผู้วิจัย นางสาวจุฑาศินี พรพุทธศรี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภรต กุญชร ณ อยุธยา, M.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดโดยใช้ปั๊มความร้อน

Design and Test of Corn Seed Dryer Using Heat Pump

โดย

นางสาวจุฑาศินี พรพุทธศรี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จุฑาศินี พรพุทศรี 2555: การออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดโดยใช้บ่มความร้อน ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D. 66 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์โดยใช้ระบบบ่มความร้อนขนาด 24,000 ปีทึยู ทดสอบอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดครั้งละ 200 กิโลกรัม แบบระบบปิด จากความชื้นเริ่มต้น 15 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ความชื้นสุดท้าย 8 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที โดยใช้สภาวะอากาศอบแห้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ 38 องศาเซลเซียส, 60.7 เปอร์เซ็นต์, 43 องศาเซลเซียส, 50.2 เปอร์เซ็นต์, 48 องศาเซลเซียส, 48.9 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลา 28, 18, 12 ชั่วโมงตามลำดับ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ(SMER) มีค่า 0.35, 0.49 และ 0.67 กิโลกรัม ต่อ กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานของพลังงานจำเพาะ (SEC) มีค่า 2.86, 2.04 และ 1.49 กิโลวัตต์ ต่อ กิโลกรัม ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความแตกต่างคุณภาพด้านการงอกของเมล็ดพันธุ์ด้วยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT) พบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 38 องศาเซลเซียส ให้เปอร์เซ็นต์ความงอกเฉลี่ย 97.6 เปอร์เซ็นต์ มีความแตกต่างกันในทางสถิติกับอุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส และ 48 องศาเซลเซียส ที่มีความงอกเฉลี่ย 97.3 เปอร์เซ็นต์ และ 96.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาช่วยแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณศักดา จันทร์ทอง, คุณ คุณสนธยา จันทร์ละออ และคุณสัมพันธ์ โสหนูช ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ขอขอบคุณ คณะบัณฑิตวิทยาลัย ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ความเป็นเลิศด้านเครื่องจักรกลและอาหารหน่วยงานร่วมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ ความรักและความห่วงใย ตลอดจนการสนับสนุนให้โอกาสในการศึกษาเล่าเรียนด้วยดีตลอดมา

จุฑาศินี พรพุทศศรี
พฤษภาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	51
สรุป	51
ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	52
ภาคผนวก	55
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	66

สารบัญตาราง

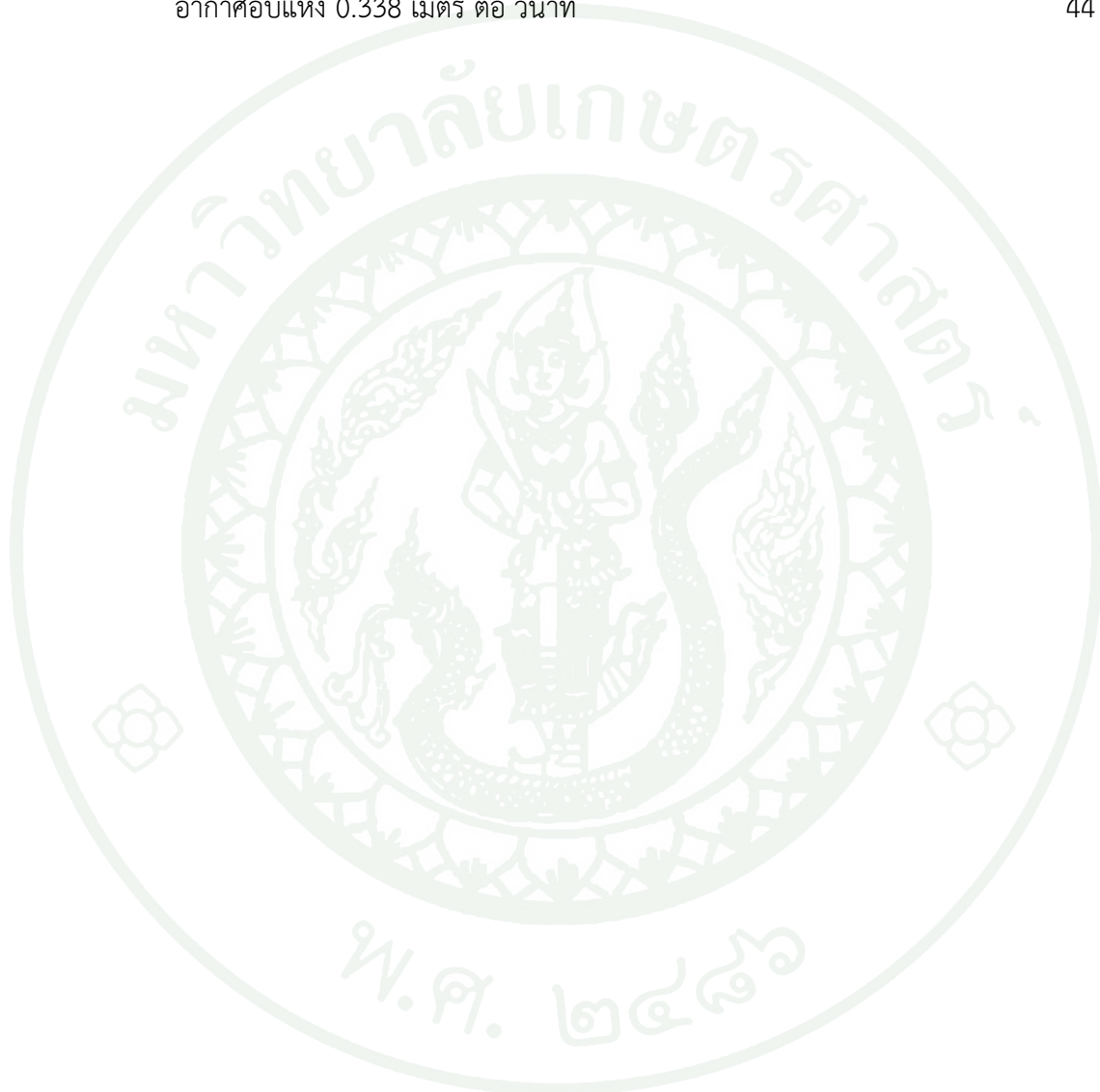
ตารางที่		หน้า
1	ค่าพารามิเตอร์สำหรับเมล็ดพันธุ์บางชนิด	11
2	การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้ง	18
3	ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบป้อนความร้อนที่ความเร็วอากาศ อบแห้ง 0.217 เมตร ต่อ วินาที	45
4	ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบป้อนความร้อนที่ความเร็วอากาศ อบแห้ง 0.254 เมตร ต่อ วินาที	46
5	ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบป้อนความร้อนที่ความเร็วอากาศ อบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที	47
6	อัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดที่สภาวะต่างๆ	47

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างเมล็ดข้าวโพด	4
2	ลักษณะของเมล็ดข้าวโพดชนิดต่างๆ	7
3	ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข้าวโพดที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	10
4	การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง	13
5	Schematic of the food drying phenomenon	13
6	ตู้อบแห้ง (Cabinet drier)	16
7	เครื่องอบแห้งแบบถัง (bin drier)	17
8	ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบป้อนความร้อน	19
9	แสดงหลักการการทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบป้อนความร้อน	20
10	แสดงวัฏจักรย้อนกลับของคาร์โนต์	21
11	ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้ง	30
12	เครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดระบบป้อนความร้อน	30
13	แผนภาพไซโคเมตริกแสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นของการอบแห้งระบบป้อนความร้อน	33
14	ผลการจำลองสถานการณ์หาอัตราการไหลของอากาศต่อเวลาในการอบแห้ง	34
15	วงจรตำแหน่งการวัดอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้ง	37
16	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.217 เมตร ต่อ วินาที	40
17	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.254 เมตร ต่อ วินาที	40
18	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที	41
19	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้งข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.217 เมตร ต่อ วินาที	42
20	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้งข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.254 เมตร ต่อ วินาที	42
21	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้งข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที	43
22	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดในระหว่างการอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.217 เมตร ต่อ วินาที	43
23	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดในระหว่างการอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.254 เมตร ต่อ วินาที	44

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดในระหว่างการอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที	44



การออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดโดยใช้ปั๊มความร้อน

Design and Test of Corn Seed Dryer Using Heat Pump

คำนำ

เมล็ดพันธุ์ที่ได้จากการเก็บเกี่ยวมักมีความชื้นในเมล็ดสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการเก็บรักษา อัตราการเสื่อมคุณภาพ การเข้าทำลายของแมลงศัตรูและเชื้อรา ดังนั้นจึงต้องลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ให้แห้งเร็วที่สุด เพื่อลดอัตราการหายใจ และการเกิดเชื้อรา โดยความชื้นเมล็ดพันธุ์ที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาอยู่ในช่วง 11-8 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียกปัจจุบันการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ด้วยเครื่องอบแห้งมีการใช้งานอย่างกว้างขวางมากกว่าในอดีต เนื่องจากสามารถควบคุมการอบแห้งได้โดยไม่ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศแต่มีข้อเสียคือค่าใช้จ่ายสูง

การอบแห้งเมล็ดพันธุ์นิยมอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนแต่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูงมีข้อเสียคือ ทำให้เมล็ดพันธุ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำ อัตราการงอกต่ำ แต่หากอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเกินไปจะใช้เวลาในการอบแห้งนานอีกทั้งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานปัจจุบันจึงมีการนำเทคนิคการอบแห้งแบบต่างๆ มาใช้ในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ เช่น เครื่องลดความชื้นแบบถังหมุนเวียนและเครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไดซ์-เบด แต่พบว่าไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากปัญหาเรื่องฝุ่นละอองฟุ้งกระจายและการใช้ปริมาณลมและความร้อนสูงมากในการอบแห้ง

การอบแห้งเมล็ดพันธุ์ด้วยระบบปั๊มความร้อนเป็นเทคนิคการอบแห้งที่มีศักยภาพ เนื่องจากอากาศที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมีความชื้นต่ำทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิในการอบแห้งเท่ากันอีกทั้งใช้ปริมาณลมน้อย จึงใช้พลังงานในการอบแห้งต่ำ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ด้วยระบบปั๊มความร้อน เพื่อให้ได้เครื่องอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งสูง ใช้พลังงานน้อย โดยที่คุณภาพเมล็ดพันธุ์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดด้วยระบบปั๊มความร้อน
2. เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนต้นแบบโดยพิจารณาจากการใช้พลังงาน, อัตราการอบแห้งและเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวโพด



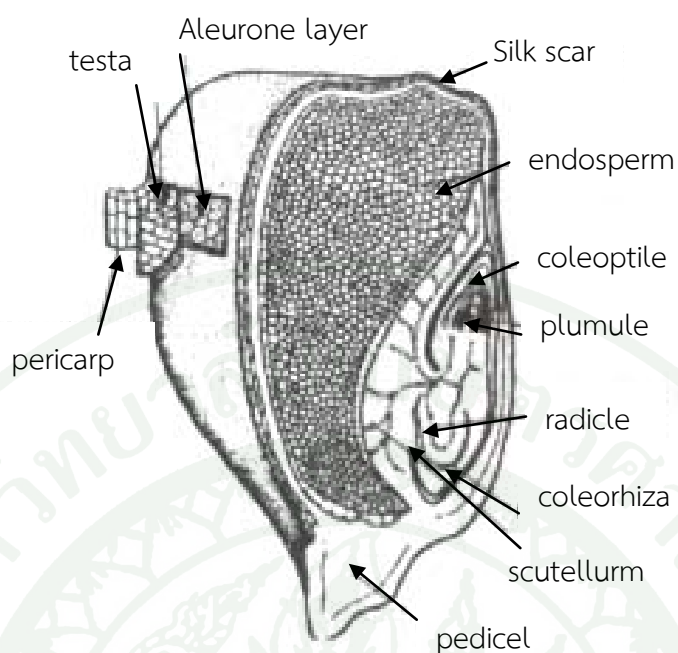
ตรวจเอกสาร

ความหมายและลักษณะทางกายภาพของเมล็ดพันธุ์

เมล็ดพันธุ์ คือเมล็ดพืชที่มีชีวิตและความชื้นที่เหมาะสมในการนำไปปลูกเพื่อขยายพันธุ์ โดยมีการเจริญเติบโตตรงตามพันธุกรรม เมล็ดพันธุ์มีความแตกต่างกับเมล็ดพืช เนื่องจากเมล็ดพันธุ์ใช้ในการขยายพันธุ์พืช ส่วนเมล็ดพืชใช้ในการบริโภค ซึ่งการขยายพันธุ์ด้วยเมล็ดเป็นที่นิยมเพราะเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวกและรวดเร็ว (ธานีรินทร์, 2540) การเจริญเติบโตของเมล็ดพันธุ์แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงที่1 เป็นการถ่ายเทปริมาณสารอาหารจากลำต้นไปสู่เมล็ดพืช เพื่อสร้าง แป้ง น้ำตาล และโปรตีน ทำให้เมล็ดพืชเริ่มการเจริญเติบโต ช่วงที่2 เป็นช่วงของการสุกแก่ของเมล็ดพืช ในช่วงนี้เมล็ดพืชจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (วรพงศ์, 2537) ความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บเกี่ยวอยู่ในช่วง 14-20 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก เพราะเมล็ดจะทนต่อความเสียหายจากแรงงานคนและเครื่องจักร (Copeland, 1976)

คุณภาพทางกายภาพของเมล็ดพืชหมายถึงคุณสมบัติภายนอกที่สามารถมองเห็น เช่น ขนาด รูปร่าง ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการคัดขนาด ทำความสะอาดและยังมีอิทธิพลต่อกระบวนการอบแห้ง (Bala, 1997)

โครงสร้างของเมล็ดประกอบด้วยเปลือกหุ้มเมล็ด ในเมล็ดจะมีการผลิตสารอาหารประเภทแป้งเพื่อให้ต้นอ่อน ใช้ในการเจริญเติบโต ระหว่างการอบแห้งน้ำที่อยู่ในเมล็ดจะแพร่ความชื้นออกมา ยังบริเวณผิวด้านนอกของเมล็ด ทำให้ปริมาณน้ำที่อยู่ในเมล็ดลดลง แสดงดังภาพที่1



ภาพที่ 1 โครงสร้างเมล็ดข้าวโพด

ที่มา: (Bala, 1997)

การขยายพันธุ์พืชด้วยเมล็ด เป็นเรื่องที่สำคัญมาก เมล็ดที่ตาย หรือเสื่อม ความงอกจะมีความแข็งแรงน้อยลง ความมีชีวิตของเมล็ดประเมินได้จาก เปอร์เซ็นต์ความงอก (Germination) เมล็ดที่มีคุณภาพดีจะสามารถงอกได้เร็ว ได้ต้นกล้าแข็งแรง มีลักษณะตรงตามพันธุ์

เมล็ดพันธุ์ที่มีคุณภาพดี ต้องมีลักษณะถูกต้องตามพันธุ์กรรม มีความบริสุทธิ์ ไม่มีพันธุ์อื่นเจือปนรูปร่าง ขนาด น้ำหนัก และสี ตรงตามสายพันธุ์ มีความงอกและความแข็งแรงสูง ความงอกไม่ต่ำกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นในเมล็ดต่ำ มีความชื้นในเมล็ดต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (สำนักวิจัยและพัฒนาพันธุ์ข้าว 2532)

เมล็ดพันธุ์แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. เมล็ดพันธุ์คัด (Breeder Seed) เป็นเมล็ดพันธุ์ที่เก็บจากรวง ได้รับการดูแลและปรับปรุงจากนักปรับปรุงพันธุ์ มีความชื้น 12-14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ปราศจากโรคและแมลง
2. เมล็ดพันธุ์หลัก (Foundation Seed) เป็นเมล็ดพันธุ์ที่ได้จากการปลูกเมล็ดพันธุ์คัด
3. เมล็ดพันธุ์ขยาย (Stock Seed) เป็นเมล็ดที่ได้จากการปลูกเมล็ดพันธุ์หลัก จำหน่ายให้แก่เกษตรกรปลูกใช้ทำเมล็ดพันธุ์ต่อไป
4. เมล็ดพันธุ์จำหน่าย (Multiplication Seed) เป็นเมล็ดพันธุ์ที่ปลูกจากเมล็ดพันธุ์ขยายตามวิธีการของเจ้าหน้าที่ส่งเสริมการเกษตร

ปัจจัยที่มีผลต่อการงอกของเมล็ด คือ ความมีชีวิต เอ็มบริโอภายในจะต้องไม่ตายและพร้อมที่จะงอกได้ สภาพแวดล้อมเหมาะสม เช่น มีความชื้นเพียงพอ แสงแดดเหมาะสม

การเสื่อมคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ คือการเปลี่ยนแปลงหรือสูญเสียศักยภาพในการเจริญเติบโตของเมล็ดพันธุ์ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ และไม่สามารถให้กลับคืนสู่สภาพเดิมได้ แต่สามารถชะลอการเสื่อมได้โดยการเก็บเมล็ดพันธุ์ไว้ที่สภาพแวดล้อมเหมาะสม ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพ เช่น ความชื้น อุณหภูมิและศัตรูพืช (ประนอม, 2547)

การพักตัวของเมล็ด (Seed dormancy) หมายถึงการที่เมล็ดพืชมีชีวิตแต่ไม่งอกในสภาพแวดล้อมต่างๆ ในขณะที่เมล็ดพืชชนิดเดียวกันที่ไม่มีการพักตัวสามารถงอกได้ เมล็ดที่มีการพักตัวเรียกว่า dormant seed

การตรวจสอบเมล็ดพันธุ์เป็นสิ่งสำคัญในการผลิตเมล็ดพันธุ์เพื่อจำหน่ายจึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือตรวจสอบที่ได้มาตรฐานเหมาะสมกับเมล็ดพันธุ์แต่ละชนิด เช่น อุปกรณ์สุ่มตัวอย่าง อุปกรณ์แบ่งตัวอย่าง อุปกรณ์วิเคราะห์หาสิ่งเจือปน อุปกรณ์ทดสอบความงอก อุปกรณ์วัดความชื้น อุปกรณ์ตรวจสอบความมีชีวิต และอุปกรณ์ตรวจสอบโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ (ณัฐหทัย, 2547)

พืชที่นิยมปลูกเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์

1. ข้าวโพด (Corn)

เรวัต (2541) กล่าวว่า ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก รองจากข้าวสาลี และข้าว โดยนำไปใช้เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต และ โปรตีน สำหรับมนุษย์ และ สัตว์ ข้าวโพดยังใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น แป้ง น้ำมัน น้ำตาล เป็นต้น เมล็ดเป็นแบบ Caryosis คือมีเยื่อหุ้มผลติดอยู่กับเยื่อหุ้มเมล็ดมีลักษณะเป็นเยื่อบางใสๆ ไม่มีสี ภายในประกอบด้วย embryo และ ส่วนของการสะสมอาหาร รูปร่างของเมล็ดขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นของเมล็ดบนฝัก ดังภาพที่ 2 สามารถจำแนกข้าวโพดได้ดังนี้

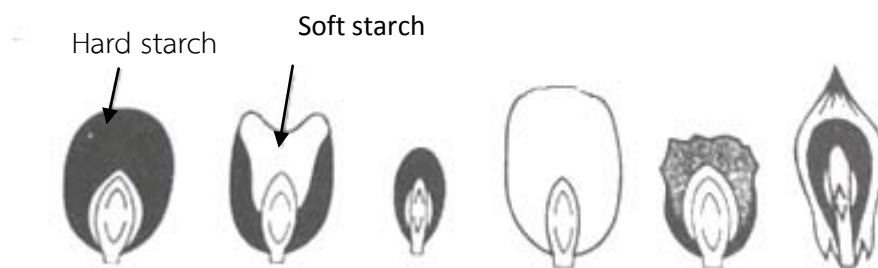
1.1 Flint corn ข้าวโพดชนิดนี้มีปริมาณแป้งแข็งมาก โดยอยู่รอบเมล็ดเมื่อทำให้แห้งจะมีลักษณะแข็ง เมล็ดเรียบ กลม ไม่มีส่วนบวมบนเมล็ด

1.2 Dent corn ข้าวโพดชนิดนี้มีแป้งอ่อนอยู่ที่ส่วนบนของเมล็ด และมีแป้งแข็งอยู่ด้านข้างของเมล็ด เมื่อเมล็ดแห้ง ส่วนบนจะมีรอยบวม

1.3 Pop corn เมล็ดข้าวโพดชนิดนี้มีลักษณะเหมือน Flint corn แต่มีขนาดเล็กกว่า และมีลักษณะพิเศษ คือ เมื่อเมล็ดได้รับความร้อนจะเกิดความดันขึ้นภายในเมล็ดทำให้เมล็ดระเบิด

1.4 Flour corn เมล็ดข้าวโพดชนิดนี้ประกอบด้วยแป้งอ่อนเกือบทั้งหมด นิยมนำไปผลิตแป้งในการประกอบอาหาร

1.5 Sweet corn ข้าวโพดชนิดนี้คือ ข้าวโพดหวาน ลักษณะที่สำคัญของข้าวโพดชนิดนี้คือเมื่อเมล็ดแก่จะเหี่ยวยุ่น (Wrinkle)



ภาพที่ 2 ลักษณะของเมล็ดข้าวโพดชนิดต่างๆ

ที่มา:เรวัต (2541)

2. พริก (Chilli)

พิทยา (2551) กล่าวว่า พริกเป็นพืชที่มีแหล่งกำเนิดในอเมริกาใต้มนุษย์ใช้ประโยชน์จากพริกในด้านการเป็นเครื่องเทศมานานกว่า 9,000 ปี พริกเป็นพืชที่มีการผสมข้ามพันธุ์ได้ง่าย จึงมีความหลากหลายทางสายพันธุ์ เช่นพริกยักษ์ที่นำมารับประทานเป็นผักมีผลขนาดใหญ่สีฉูดฉาดไม่เน้นรสชาติเผ็ดในขณะที่พริกขนาดเล็กมีสาร Capsaicin ให้รสชาติเผ็ดนิยมนำไปสกัดเพื่อทำเป็นยาสำหรับการผลิตพริกแห้งปกติพริกสดจะมีความชื้นประมาณ 65-80เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกทำแห้งจนเหลือ 7-10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกโดยปกติใช้วิธีตากแดด แต่บางพื้นที่ใช้การอบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส อบนาน 24-30ชั่วโมงในการขยายพันธุ์ขยายพันธุ์โดยเมล็ดซึ่งอาจนำไปปลูกโดยตรงในแปลงปลูกหรือนำไปเพาะก่อนย้ายกล้าปลูกในแปลงจริง

3. แตงโม (Watermelon)

เป็นผลไม้ที่มีน้ำประกอบอยู่เป็นจำนวนมากปลูกได้ทุกฤดูกาลมักปลูกในดินร่วนปนทรายมีทั้งพันธุ์กินเมล็ดพันธุ์กินเนื้อในแง่ของการค้าเมล็ดพันธุ์แตงโมติดอันดับ1ใน5เมล็ดพันธุ์ฝัก ในตระกูลแตง

4. มะเขือเทศ (Tomato)

เป็นพืชล้มลุกลำต้นตรงมีลักษณะเป็นพุ่มอูมไปด้วยคุณค่าทางอาหาร ผลมีรูปร่างกลมผลดิบมีสีเขียวเมื่อสุกจะมีสีแดงภายในผลมีเมล็ดเป็นจำนวนมากความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการทำเมล็ดพันธุ์จำหน่ายคือ 10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (สำนักงานเมล็ดพันธุ์ข้าวกรมการข้าว, 2555)

5. ฟักทอง (Pumpkin)

เป็นผักในตระกูลแตงชอบดินร่วนปนทรายอากาศแห้งขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ดและการตอนกิ่ง นิยมปลูกเป็นการค้าส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ลูกผสม เพราะมีราคาแพง ให้ผลผลิตสูง

6. ผักบุงจีน (Cabbage)

เป็นผักที่ปลูกง่ายเจริญเติบโตดีปลูกได้ตลอดปีนิยมขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด อายุที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวเพื่อทำพันธุ์อยู่ในช่วง 41-61 วันหลังดอกบานโดยมีความชื้นเมล็ดพันธุ์อยู่ที่ 10-13 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (อรพรรณ, 2534)

7. ถั่วฝักยาว (Yardlongbean)

ปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทยชอบอากาศร้อนต้องการแสงแดดตลอดวัน ขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ด ความชื้นที่เหมาะสมกับการเก็บรักษา คือ 9 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก อุณหภูมิอบแห้งไม่เกิน 43 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการงอกสูง (ปนิดา, 2553)

8. กะหล่ำปลี (Cabbage)

ปลูกได้ดีในทางภาคเหนือและอีสานเป็นพืชทนร้อนจึงเหมาะกับสภาพอากาศประเทศไทย เมล็ดพันธุ์นิยมสั่งซื้อจากต่างประเทศเพราะในประเทศไทยผลิตได้ปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการ เมล็ดมีลักษณะกลม ผิวเรียบ สีเมล็ดระยะแรกเป็นน้ำตาลอ่อน และจะเปลี่ยนสีเป็นน้ำตาลเข้มตามระยะเวลาการสุกแก่ (พิทักษ์, 2550)

9. แตงกวา (Cucumber)

เป็นพืชเถาเลื้อย ปลูกง่ายให้ผลผลิตเร็ว ชอบดินร่วนปนทราย แบ่งออกได้ 2 พันธุ์ คือพันธุ์สำหรับกินสด และพันธุ์สำหรับอุตสาหกรรม ขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ด

10. กระเจี๊ยบเขียว (Okra)

เป็นผักยืนต้นเมล็ดมีลักษณะคล้ายเมล็ดถั่วเจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อนจึงสามารถปลูกได้ตลอดปี ขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด ความชื้นที่เหมาะสมจะให้เป็นเมล็ดพันธุ์คือ 10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก(สำนักเมล็ดพันธุ์ข้าว, 2555)

การลดความชื้น

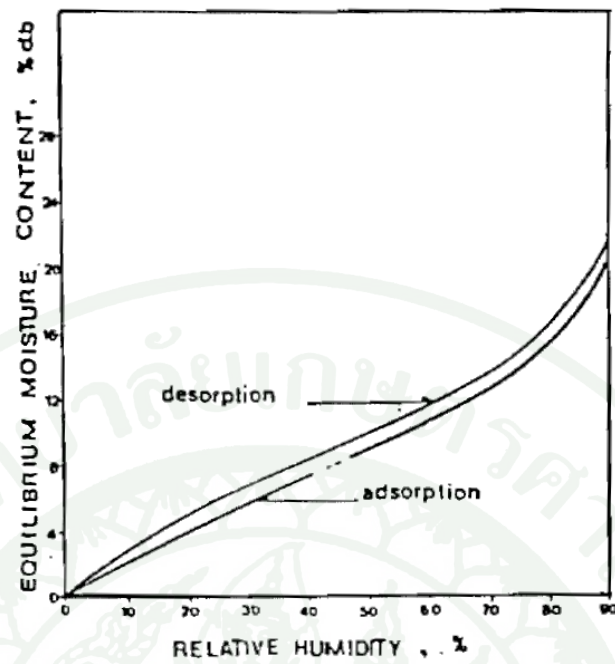
หลักการลดความชื้นของเมล็ดพืช

ความชื้นเมล็ดพืชหมายถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในเมล็ดพืชคิดเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำในเมล็ดพืชต่อน้ำหนักรวมของเมล็ดพืชเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ในเมล็ดพันธุ์จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่สูงมากเมื่อขบวนการสร้างเมล็ดดำเนินไปจะมีการสะสมน้ำหนักแห้งมากขึ้นปริมาณน้ำในเมล็ดพืชจะค่อยๆ ลดลง จนถึงจุดสิ้นสุดของการพัฒนาเมล็ดพืช เมล็ดพืชจะมีความชื้นสูงประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก แล้วแต่ชนิดพืช

Copeland (1976) กล่าวว่า ความชื้นของเมล็ดพืชถูกกำหนดด้วยความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศ การเปลี่ยนแปลงระหว่างไอน้ำของเมล็ดพืชกับอากาศจะดำเนินไปจนกระทั่งความดันไอของเมล็ดพืชและอากาศเท่ากันความชื้นในจุดนี้เรียกว่าความชื้นสมดุลซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศเมล็ดพืชจะแห้งเร็วเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำอุณหภูมิของอากาศสูงในขณะที่ความชื้นเมล็ดเกิดการระเหยน้ำจากเมล็ดสู่อากาศทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงอุณหภูมิอากาศลดลงแล้วจึงอาศัยลมเพื่อนำเอาความชื้นออกจากบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์

ความชื้นสมดุล

สมชาติ (2540) กล่าวว่าความชื้นสมดุลมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งเพราะเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆและอุณหภูมิของวัสดุเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆด้วยเรียกความชื้นสภาวะนี้ว่าความชื้นสมดุลความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอม (Equilibrium moisture isotherm) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข้าวโพดที่อุณหภูมิ 45 °C

ที่มา: อรุณี และคณะ (2533)

สมการแสดงความชื้นสมดุลของเมล็ดพันธุ์บางชนิด

$$1-RH = \exp \left[c(1.8T+491.7) \left(100M_{eq} \right)^n \right] \quad (1)$$

เมื่อ RH = ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ, เปอร์เซ็นต์

T = อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส

M_{eq} = ความชื้นสมดุลเมล็ดพันธุ์

c และ n = พารามิเตอร์ของเมล็ดพันธุ์

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับเมล็ดพันธุ์บางชนิด

	c	n
ข้าวโพด	1.10×10^{-5}	1.90
ข้าวฟ่าง	3.40×10^{-6}	2.31
ถั่วเหลือง	3.20×10^{-5}	1.52
ข้าวสาลี	5.59×10^{-7}	3.03
ข้าวเปลือก	7.87×10^{-6}	2.08

ที่มา: สมชาติ (2540)

การลดความชื้นทำได้ 2 วิธี คือ

1. การลดความชื้นโดยวิธีธรรมชาติ วิธีนี้อาศัยความร้อนจากแสงอาทิตย์และลม เหมาะสำหรับผลิตเมล็ดพันธุ์ในปริมาณน้อยๆ เนื่องจากเป็นการลดความชื้นโดยอาศัยธรรมชาติ การแผ่เมล็ดพันธุ์เป็นชั้นบางๆกลับเมล็ดข้างเป็นครั้งคราวจะช่วยให้การลดความชื้นเร็วขึ้นและสม่ำเสมอ ลานตากควรเป็นพื้นซีเมนต์ สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างถาวรและมีประสิทธิภาพ (จวงจันท์, 2529)

2. การลดความชื้นโดยวิธีกลเป็นการอบเมล็ดพันธุ์โดยอาศัยความร้อนจากเครื่องยนต์และแรงลมจากพัดลมเป็นตัวช่วยพาความชื้นออกจากเมล็ดถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเพราะสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ออบเมล็ดได้สามารถอบได้ปริมาณมากแต่วิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงจึงเหมาะสำหรับการผลิตเมล็ดพันธุ์ในระดับอุตสาหกรรม (วันชัย, 2542)

จวงจันท์ (2529) กล่าวว่าปัจจัยที่ต้องคำนึงในการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์คือ

1. ความชื้นของเมล็ดพันธุ์ การลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ให้ได้คุณภาพต้องรู้ว่าเมล็ดพันธุ์นั้นมีความชื้นเท่าไร ถ้าเมล็ดพันธุ์มีความชื้นสูงและนำมาลดความชื้นที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เมล็ดพันธุ์ได้รับความเสียหาย ควรลดความชื้นด้วยอุณหภูมิต่ำก่อนแล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

2. อุณหภูมิที่ช่วยลดความชื้น อุณหภูมิที่ช่วยลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ไม่ควรเกิน 43 องศาเซลเซียส ถ้าใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้เมล็ดตาย

3. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ควรใช้อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไม่เกิน 60 เปอร์เซ็นต์

การอบแห้ง

ความสำคัญและความหมาย

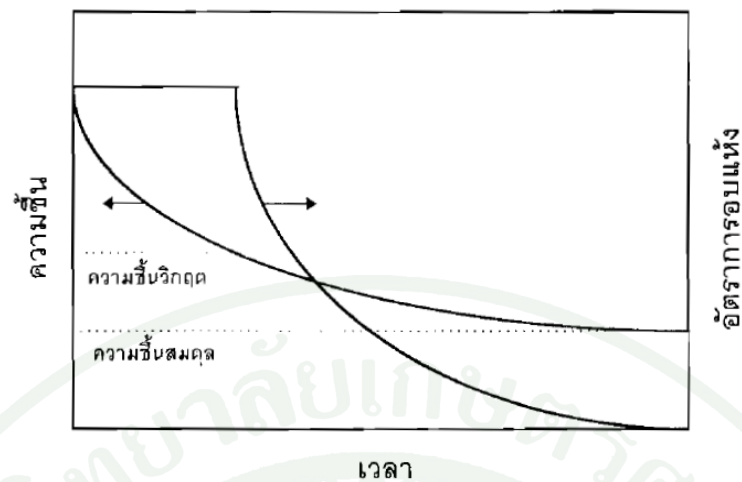
สมชาติ (2540) กล่าวว่า การอบแห้งคือกระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนมากใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหยโดยใช้ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ ประโยชน์ของการอบแห้งมีดังนี้

1. เพื่อการถนอมรักษา คุณภาพ วัสดุที่แห้งจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน โดยไม่เสีย เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีน้อยลง
2. เพื่อลดปริมาตรและน้ำหนักวัสดุที่แห้งจะมีปริมาตรและน้ำหนักน้อยลงสามารถลดต้นทุนในการเก็บรักษา และการขนส่งได้

ในกรณีของเมล็ดพืชการอบแห้งที่ถูกหลักยังสามารถช่วยให้เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดสูง ทำให้การนำไปเพาะปลูกมีประสิทธิภาพ เมล็ดพืชที่แห้งจะมีคุณภาพสูงสามารถเก็บไว้ได้นาน

เจียมจิต (2537) กล่าวว่า กลไกของการอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

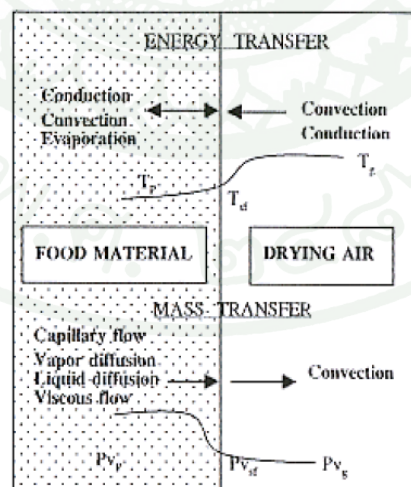
1. ช่วงอัตราคงที่ (Constant rate period) เป็นการทำให้แห้งโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางที่อุณหภูมิและความชื้นคงที่เมื่ออากาศร้อนสัมผัสกับผลิตภัณฑ์จะเกิดการระเหยน้ำกลายเป็นไอและถ่ายเทไปยังอากาศช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่ และการอบแห้งจะดำเนินไปเรื่อยๆจนน้ำที่บริเวณผิวไม่เพียงพอจะเกิดการระเหยลดลงทำให้อัตราการอบแห้งไม่คงที่ นั่นคือ ช่วงการอบแห้งคงที่สิ้นสุดลงความชื้นในช่วงนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)
2. ช่วงอัตราลดลง (Falling rate period) เมื่ออัตราอบแห้งคงที่สิ้นสุด อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้นน้ำที่อยู่บริเวณผิวผลิตภัณฑ์จะหมดไปทำให้อัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสัมพันธ์กับการลดลงของความชื้น เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง การทำให้แห้งจึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆลักษณะการทำแห้งในช่วงนี้ยากต่อการทำนายขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและโครงสร้างของตัวผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง

ที่มา: เจียมจิต (2537)

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง โดยมีจุดมุ่งหมายหลักคือยืดอายุและเวลาในการเก็บรักษาในระหว่างการอบแห้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และชีวภาพขึ้นที่วัสดุ ดังนั้นการอบแห้งที่ดีคือหลังการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ได้ ต้องมีคุณภาพที่ดี ปริมาณความชื้นต่ำตรงตามมาตรฐาน (เทวรัตน์, 2551) ระหว่างการอบแห้งมีการถ่ายเทความร้อนจากอากาศแวดล้อมภายนอกไปยังผิวของผลิตภัณฑ์และผลิตภัณฑ์มีการถ่ายเทความชื้นจากภายในออกมาสู่อากาศแวดล้อมภายนอกดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 Schematic of the food drying phenomenon

ที่มา: Guillermo *et al.*(1997)

การอบแห้งแบบการพาความร้อน

$$\text{Heat transfer} \quad q_c = h_g (T_{sf} - T_g) \quad (2)$$

$$\text{Mass transfer} \quad n_w = k_g (P_{vsf} - P_{vg}) \quad (3)$$

เมื่อ	h_g	คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
	k_g	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
	T	คืออุณหภูมิ
	P_v	คือ water vapor partial pressure
	q_c	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน
	n_w	คือ อัตราการระเหย

การสมดุลความร้อนอย่างง่ายของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน Brooker *et al.* (1992) ได้แนะนำสมการซึ่งทำการสมดุลพลังงานของอากาศกับความชื้นของวัสดุโดยสมมติให้ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากวัสดุซึ่งมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของอากาศซึ่งมีรูปสมการคือ

$$m_w h_{fg} = m_c c_a (T_{ai} - T_{af}) t \quad (4)$$

เมื่อ	m_w	คือมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ, กิโลกรัม
	h_{fg}	คือความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม
	m_a	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, กิโลกรัม ต่อ วินาที
	c_a	คือความร้อนจำเพาะของอากาศ, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม องศาเซลเซียส
	T_{ai}	คืออุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง, องศาเซลเซียส
	T_{af}	คืออุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้ง, องศาเซลเซียส
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, วินาที

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเริ่มต้น ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุตั้งสมการคือ

$$m_w = m_{pi} \frac{(M_f + 1)}{(M_i + 1)} \quad (5)$$

เมื่อ	m_{pi}	คือน้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ, กิโลกรัม
	M_i	คือความชื้นเริ่มต้นของวัสดุฐานแห้ง, เศษส่วน
	M_f	คือความชื้นสุดท้ายของวัสดุฐานแห้ง, เศษส่วน

ความชื้นของวัสดุจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความชื้นซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือความชื้นฐานเปียกและความชื้นฐานแห้ง

ความชื้นฐานเปียกจะแสดงน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุนิยมใช้ในวงการค้า โดยปกติจะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_w = \frac{m_w}{(m_w + m_d)} \quad (6)$$

ความชื้นฐานแห้งซึ่งจะใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง จึงง่ายในการวิเคราะห์การถ่ายเทความชื้น ความชื้นฐานแห้งหาได้จาก

$$M_d = \frac{m_w}{m_d} \quad (7)$$

เมื่อ	M_w	คือความชื้นฐานเปียก, เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก
	M_d	คือความชื้นฐานแห้ง, เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง
	m_w	คือมวลของความชื้น, กิโลกรัม
	m_d	คือ มวลของวัสดุแห้ง, กิโลกรัม

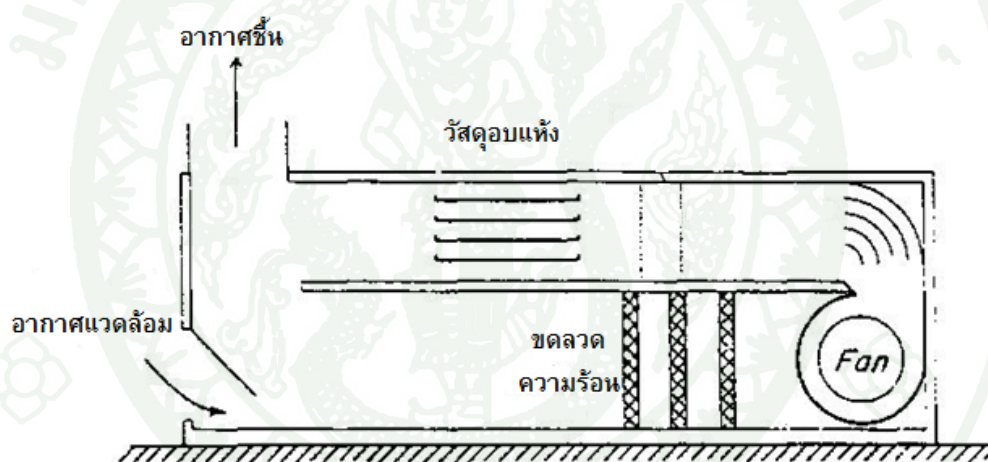
Chandran *et al.* (1990) ได้แบ่งเครื่องอบแห้งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดอยู่กับที่ (Fixed-bed dryer) เช่น เครื่องอบแห้งแบบถังเก็บ เครื่องอบแห้งแบบชั้น เป็นต้น
2. เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดที่ขยับได้ (Moveing-bed drying) เช่น เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม เครื่องอบแห้งแบบไหลสวน

(สมชาติ, 2540) เครื่องอบแห้งแบบต่างๆ

1. การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (Sun Drying) เป็นการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์หรือการอบแห้งด้วยการตากแดดเป็นวิธีการถนอมอาหารที่เก่าแก่ที่สุดวิธีหนึ่งเป็นการทำให้อาหารแห้งโดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นการทำแห้งอย่างง่ายที่ไม่ต้องใช้เครื่องอบแห้งโดยการนำอาหารวางเรียงหรือเกลี่ยบนตระแกรงหรือถาด แล้วนำไปตากแดด การทำแห้งด้วยการตากแดดข้อจำกัดหลายประการเนื่องจากประสิทธิภาพการทำแห้งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศซึ่งไม่สามารถควบคุมระดับความร้อน อุณหภูมิได้ ทำให้การควบคุมคุณภาพอาหารแห้งทำได้ยาก

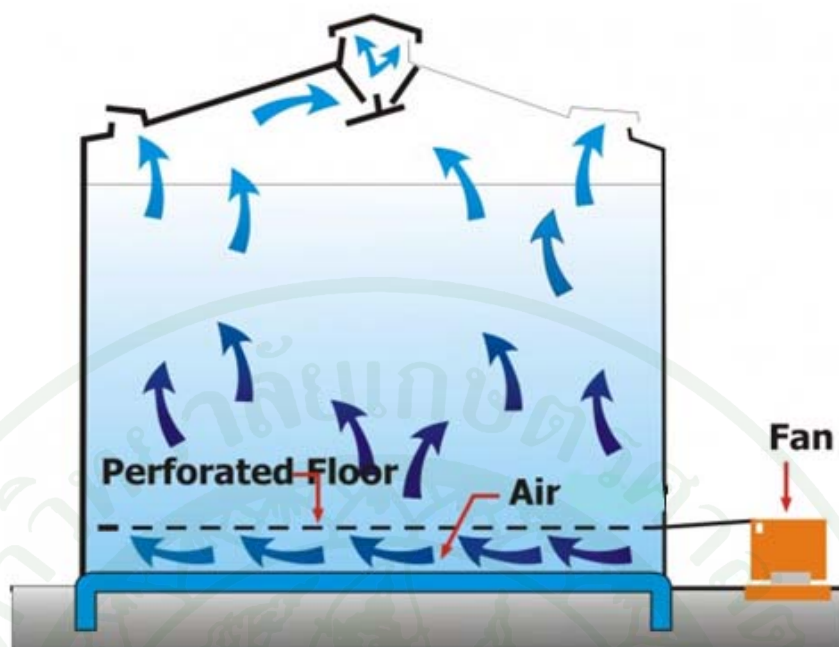
2. ตู้อบแห้ง (Cabinet drier) คือ เครื่องอบแห้งที่มีลักษณะเป็นตู้ทำงานแบบ batch เหมาะสำหรับโรงงานขนาดเล็ก ที่ไม่ต้องการกำลังการผลิตสูงมากเช่น การอบแห้งผักผลไม้สมุนไพรเป็นต้น ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ตู้อบแห้ง (Cabinet drier)

ที่มา: (สมชาติ, 2540)

3. เครื่องอบแห้งแบบถัง (Bin drier) เป็นเครื่องอบแห้งที่มีลักษณะเป็นถังใช้ลดความชื้นวัสดุปริมาณมวลเช่น เมล็ดธัญพืชโดยใช้ลมร้อนเป่าผ่านกองวัสดุมักใช้กับวัสดุที่มีความชื้นต่ำ หรือใช้ลดความชื้นที่ยังเหลืออยู่หลังจากผ่านการอบแห้งด้วยวิธีอื่นมาแล้ว ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เครื่องอบแห้งแบบถัง (Bin drier)

ที่มา: (สมชาติ, 2540)

4. เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed drier) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการอบแห้ง โดยใช้ลมร้อนเป่าผ่านชั้นวัสดุ ทำให้วัสดุลอยตัวเป็นอิสระเกิดการคลุกเคล้าและสัมผัสกับลมร้อนอย่างสม่ำเสมอสามารถ ลดความชื้นของวัสดุลงได้อย่างรวดเร็วเหมาะกับวัสดุที่เป็นเม็ดเล็กที่มีรูปร่างและขนาดสม่ำเสมอ เช่น เมล็ดธัญพืช

5. เครื่องอบแห้งแบบสายพาน (belt-drier) เป็นเครื่องอบแห้งที่ทำงานโดยใช้สายพานลำเลียง(belt-conveyor)เป็นตัวลำเลียงเพื่อลดการใช้แรงงานอาหารจะถูกเกลี่ยให้กระจายสม่ำเสมอบนสายพานที่มีลักษณะเป็นตระแกรงโปร่งให้อากาศผ่านได้บริเวณอบแห้งอาจมีลักษณะเป็นอุโมงค์ที่มีลมร้อนเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนออกจากวัสดุแหล่งกำเนิดความร้อนอาจเป็นแก๊สหรือไอน้ำร้อน นิยมใช้กับวัสดุในรูปของเหลวซึ่งต้องการความคงตัวเช่นในอุตสาหกรรมผลิตโพน

6. เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drier) คือเครื่องอบแห้งอาหารที่มีลักษณะเป็นของเหลวชั้นหนืดเช่นน้ำแป้งสุกผลไม้สดเครื่องทำแห้งประกอบด้วยลูกกลิ้งทรงกระบอกลูกกลิ้งมักทำด้วยเหล็กปลอดสนิมผิวเรียบได้รับความร้อนจากด้านในด้วยไอน้ำหรือไฟฟ้ามีระบบป้อนอาหารทำให้อาหารเหลวชั้นเคลือบผิวลูกกลิ้งเป็นฟิล์มบางเกิดการถ่ายเทความร้อนจากผิวของลูกกลิ้งไปยังฟิล์มอาหารด้วยการนำความร้อนเมื่อลูกกลิ้งหมุนเคลื่อนที่ไปครบรอบอาหารจะแห้งอาหารแห้งมีลักษณะเป็นแผ่นบางข้อเสียของการอบแห้งแบบลูกกลิ้งคือมีความร้อนในการอบแห้งสูงทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่ำ ข้อดีคือมีค่าใช้จ่ายต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งอาหารเหลว แบบอื่นๆ

7. เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน (Heat Pump drier) เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนอุณหภูมิต่ำโดยทำให้ร้อนขึ้นแล้วส่งไปยังแหล่งที่ต้องการอุณหภูมิสูง โดยใช้อุปกรณ์แบบเดียวกับเครื่องปรับอากาศแต่ใช้ประโยชน์ด้านความร้อนในการอบแห้ง ส่วนความเย็นที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นผลพลอยได้ อาจกล่าวได้ว่า Heat Pump ทำงานโดยการถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วส่งไปถ่ายเทความร้อนให้วัสดุอบแห้งอุณหภูมิของลมร้อนที่ได้ไม่สูงมากนักเหมาะกับวัสดุที่ต้องการอุณหภูมิกอบแห้งต่ำ มีค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องสูงแต่ คุ่มทุนในระยะยาว

เครื่องอบแห้งจำแนกได้ตามวิธีการให้ความร้อน ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการอบแห้ง วิธีการป้อน และสภาวะการทำงาน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้ง

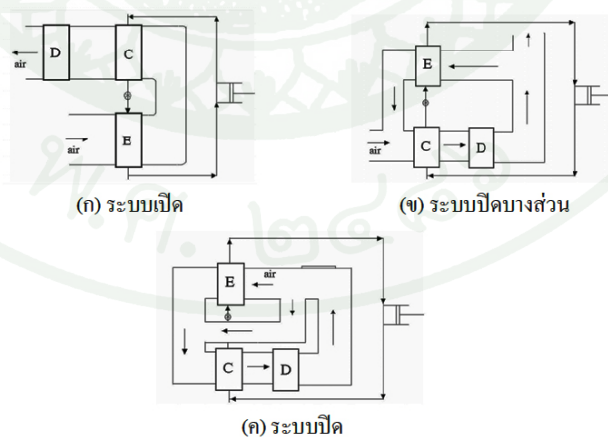
Mode of Heat Transfer	Dryers	
	Batch operation	Continuous operation
Convection	Kiln dryer	Tunnel dryer
	Cabinet dryer	Conveyor dryer
	Heat pump dryer	Spray dryer
		Fluidized bed dryer
		Heat pump dryer
Conduction	Heat-shelf dryer	Drum dryer
	Agitated pan dryer	
Radiation	Infrared dryer	
Internal generation of heat	Microwave oven	Dielectric continuous dryer
		Microwave tune
Mixed	Shelf dryer	Rotary dryer

ที่มา: สมบัติ (2529)

การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน

เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ระบบคือระบบเปิด (Open system) ระบบปิดบางส่วน (Partial closed system) และระบบปิด (Closed system) แสดงดังภาพที่ 8

1. การอบแห้งระบบเปิด (Open system) อากาศร้อนที่มีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้ง ทำให้มีความชื้นสูงขึ้นจะถูกปล่อยทิ้งออกสู่อากาศภายนอกทั้งหมดซึ่งการอบแห้งระบบนี้จะมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนในการอุ่นอากาศเพียงอย่างเดียวหรืออาจมีการลดความชื้นอากาศก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศก็ได้
2. การอบแห้งระบบปิดบางส่วน (Partial closed system) อากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้วจะถูกปล่อยทิ้งออกสู่อากาศภายนอกบางส่วนอากาศที่ปล่อยทิ้งออกสู่ภายนอกกับอากาศร้อนที่นำกลับมาผสมกับอากาศใหม่สำหรับใช้อบแห้งต่อไปซึ่งการอบแห้งระบบปิดบางส่วนจะมีการใช้ประโยชน์จากปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและการลดความชื้น
3. การอบแห้งระบบปิด (Closed system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้วจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมดซึ่งอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนแรกจะถูกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหยอีกส่วนหนึ่งจะนำมาผสมกับอากาศส่วนแรกที่ผ่านมา การลดความชื้นที่เครื่องทำระเหยแล้วใช้อบแห้งต่อการอบแห้งระบบปิดจะมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนทั้งในการอุ่นอากาศและการลดความชื้น



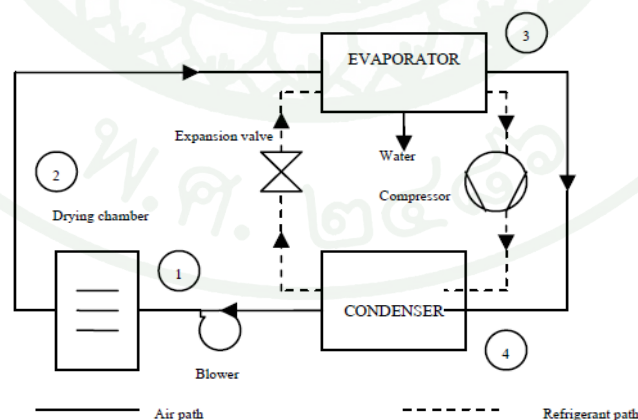
ภาพที่ 8 ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา: Chua *et al.* (2000)

จากการอบแห้งทั้ง 3 ระบบจะพบว่าในระบบปิดมีการใช้ประโยชน์จากปั๊มความร้อนทั้งในการอุ่นอากาศและการลดความชื้นจึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอื่นเนื่องจากสามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งสองส่วนส่วนการอบแห้งระบบเปิดนั้นจะมีข้อดีคือสามารถทำอุณหภูมิอากาศอบแห้งได้สูงกว่าระบบปิดเนื่องจากอากาศภายนอกทั้งหมดจะถูกทำให้ร้อนขึ้นที่เครื่องควบแน่นโดยไม่ถูกลดความชื้นที่เครื่องทำระเหยก่อนการอบแห้ง แต่มีข้อเสียคือมีการนำอากาศภายนอกมาใช้ดังนั้นสถานะของอากาศความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนโดยเฉพาะในกรณีที่อากาศภายนอกมีความชื้นสูงจะทำให้ความสามารถในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนลดลงได้แต่อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนไม่ว่าจะเป็นแบบใดก็ตามยังคงมีความสามารถในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งลมร้อนโดยทั่วไปที่ใช้ขดลวดไฟฟ้า น้ำมันหรือก๊าซเป็นเชื้อเพลิง (Prasertsan and Sean-saby, 1998)

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

การทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแสดงในภาพที่ 9 โดยอากาศอบแห้งจะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง 1 อากาศได้รับความชื้นจากวัตถุเป็นอากาศร้อนและชื้นออกจากห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง 2 และเข้าสู่เครื่องทำระเหย(Evaporator) เพื่อทำการลดความชื้นโดยการควบแน่นน้ำออกจากอากาศกระบวนการจาก 2-3 ความร้อนแฝงของการระเหยจะถูกใช้ในการระเหยสารทำความเย็นภายในเครื่องทำระเหยสารทำความเย็นจะถูกอัดด้วยเครื่องอัดไอ(Compressor)ทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงแล้วส่งต่อไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) อากาศเย็นที่ผ่านการลดความชื้นจะได้รับความร้อนคืนกลับเมื่อผ่านเครื่องควบแน่นจากตำแหน่ง 4-1 ส่วนสารทำความเย็นก็จะไหลจากเครื่องควบแน่นสู่เครื่องทำระเหยโดยผ่านวาล์วขยายเพื่อทำการลดความดันให้ต่ำลง

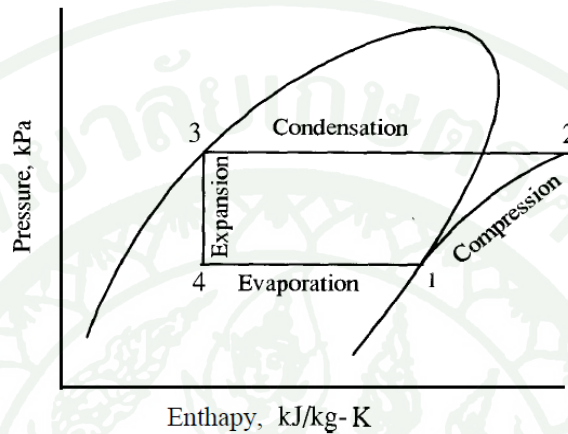


ภาพที่ 9 แสดงหลักการทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา: Chua et al. (2000)

วัฏจักรของปั๊มความร้อน

การทำงานของระบบปั๊มความร้อน คือ วัฏจักรย้อนกลับของคาร์โนต์ (Revered Carnot cycle) เนื่องจากเป็นวัฏจักรที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด ประกอบด้วยกระบวนการอะเดียแบติก 2 กระบวนการ และกระบวนการอุณหภูมิคงที่ 2 กระบวนการ แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงวัฏจักรย้อนกลับของคาร์โนต์

1. เครื่องอัดไอ (Compressor) เป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ งานที่ใช้หาได้จาก

$$W_{12} = m_a (h_2 - h_1) \quad (8)$$

- โดย
- W_{12} = งานที่ให้แก่เครื่องอัดไอ, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม
 - m_a = อัตราการไหลเชิงมวล, กิโลกรัม ต่อ วินาที
 - h_1 = เอนทาลปีของสารทำงานก่อนเข้าเครื่องอัดไอ, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม
 - h_2 = เอนทาลปีของสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม

2. อุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) เป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากอุปกรณ์ควบแน่นหาได้จาก

$$Q_{23} = m_a (h_3 - h_2) \quad (9)$$

- โดย
- Q_{23} = ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากอุปกรณ์ควบแน่น, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม
 - h_3 = เอนทาลปีของสารทำงานที่ออกจากอุปกรณ์ควบแน่น, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม

3. วาล์วลดความดัน (Expansion valve) เป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่ ความดันลดลง
อย่างเดียว ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

$$h_3 = h_4 \quad (10)$$

โดย h_4 = เอนทาลปีของสารทำงานก่อนเข้าอุปกรณ์ระเหย, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม

4. อุปกรณ์ระเหย (Evaporator) เป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ ความร้อนที่ดูดกลืนหาได้
จาก

$$q_{41} = m_a(h_1 - h_4) \quad (11)$$

โดย q_{41} = ความร้อนที่ดูดกลืนไว้ในอุปกรณ์ทำระเหย, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม

การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน Chua *et al.*(2000)

1. ประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ(coefficient of
performance, COP)

$$\text{COP} = \frac{\text{ความสามารถในการทำความร้อน/ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้}}{\quad} \quad (12)$$

2. ประสิทธิภาพทางด้านการอบแห้งแบ่งสามารถพิจารณาได้จาก

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คัดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อ
ระยะเวลาในการอบแห้ง

$$\text{DR} = \frac{(M_i - M_f)}{t} \quad (13)$$

โดย M_i = ความชื้นวัสดุก่อนการอบแห้ง, เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก

M_f = ความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง, เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, ชั่วโมง

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมดตลอดการอบแห้ง

$$SMER = \frac{(W_i - W_f)}{P_e} \quad (14)$$

โดย W_i = ปริมาณน้ำในวัสดุก่อนการอบแห้ง, กิโลกรัม
 W_f = ปริมาณน้ำในวัสดุหลังการอบแห้ง, กิโลกรัม
 P_e = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, กิโลวัตต์ ต่อ ชั่วโมง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งเป็นค่าส่วนกลับของ SMER

$$SCE = \frac{3.6P_e}{(W_i - W_f)} \quad (15)$$

โดย W_i = ปริมาณน้ำในวัสดุก่อนการอบแห้ง, กิโลกรัม
 W_f = ปริมาณน้ำในวัสดุหลังการอบแห้ง, กิโลกรัม
 P_e = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, กิโลวัตต์ ต่อ ชั่วโมง

อัตราความชื้น (Moisture Extraction Rate, MER) คือปริมาณน้ำความชื้นที่เครื่องทำระเหยต่อเวลาที่ใช้ออบแห้ง

$$MER = \frac{M_{wc}}{t} \quad (16)$$

โดย M_{wc} = ความชื้นวัสดุที่ความชื้นน้ำที่เครื่องทำระเหย, เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก
 t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, ชั่วโมง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chompukeaw (1996) ได้ศึกษาการลดความชื้นเมล็ดข้าวโพดหวานพบว่าความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาและได้อัตราการงอกสูงอยู่ในช่วง 10-12 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก โดยปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์คือ อุณหภูมิ ความชื้นและอัตราการไหลของอากาศ

ศานิต (2550) กล่าวไว้ว่า การลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดโดยวิธีการตากแดด จนความชื้นเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก จะมีอัตราการงอก 98 เปอร์เซ็นต์

Copeland (1976) กล่าวไว้ว่าความชื้นเมล็ดที่อยู่ในช่วง 10-13 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก เป็นช่วงที่สามารถเก็บรักษาเมล็ดได้ดีในระยะเวลา 6-12 เดือน แมลงรบกวนได้บ้าง ความชื้นของเมล็ดอยู่ในช่วง 8-10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกเป็นช่วงที่สามารถเก็บรักษาเมล็ดได้ดีในระยะเวลา 1-2 ปี แมลงทำลายได้น้อยมาก

Nangjuet *al.* (1978) แนะนำว่า ความร้อนที่ใช้ทำให้เมล็ดพันธุ์แห้งไม่ควรเกิน 49 องศาเซลเซียส สำหรับพืชที่มีความชื้นต่ำกว่า 24 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก และ ไม่เกิน 43 องศาเซลเซียส สำหรับเมล็ดที่มีความชื้นสูงกว่า 24 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

Meyer and Grevenstein (1992) นำเอาระบบปั๊มความร้อนมาใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืช แทนที่การใช้พลังงานจากความร้อนและเชื้อเพลิงโดยทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายพลังงานและต้นทุนของเครื่องจักรจะพบว่าพลังงานจากปั๊มความร้อนมีข้อได้เปรียบเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่าพลังงานรูปแบบอื่นแต่เนื่องจากเมล็ดพืชมีการอบแห้งน้อยครั้งต่อปีดังนั้นจึงควรนำระบบปั๊มความร้อนไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นร่วมด้วยเช่น นำไปใช้ในการทำน้ำอุ่น

Barbosa-Cannvas and Vega-Merado (1996) กล่าวว่าเครื่องอบแห้งแบบตู้ (Cabinet dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเป็นชั้น (Bed dryer) จะใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืชผักและผลไม้ นอกจากนี้ยังพบว่าหากใช้เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำ (Steam dryer) และปั๊มความร้อนจะช่วยรักษาคุณภาพสีของวัสดุเกษตรได้ดีและมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งทั้งสองชนิดข้างต้น

มารีนา และคณะ (2536) ได้ศึกษาการอบแห้งสับปะรดแช่เย็นโดยพิจารณาความเหมาะสมจากคุณภาพเวลาที่ใช้ออบและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่าการอบแห้งสับปะรดแช่เย็นควรใช้อุณหภูมิอบแห้ง 65 องศาเซลเซียส อัตราการไหลอากาศจำเพาะ 11 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราอากาศ by pass เท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์ ผลลัพธ์ที่ได้จะมีคุณภาพดี ใช้เวลาอบสั้นสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 9.5 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

Chou *et al.*(1993) ได้ศึกษาการอบแห้งผลไม้ด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับขดลวดไฟฟ้าทำการทดลองแบบระบบเปิด (Full open system) และระบบเปิดบางส่วน (Partially open system) โดยระบบเปิดอากาศร้อนขึ้นบางส่วนถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศส่วนที่เหลือส่งไปยังเครื่องทำระเหยเพื่อทำการปรับคืนความร้อน (Heat recovery) ส่วนระบบเปิดบางส่วนอากาศร้อนขึ้นหลังอบแห้งจะถูกทิ้งสู่บรรยากาศส่วนที่เหลือเวียนกลับมาที่เครื่องทำระเหยก่อนจะไปผสมกับอากาศภายนอกแล้วจึงนำไปควบคุมอุณหภูมิเพื่อเพิ่มอุณหภูมิโดยการทดลองใช้กล้วยและสับปะรดเป็นผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง ควบคุมอุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้งเท่ากับ 61 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 43 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาอบแห้ง 6 ชั่วโมงสรุปได้ว่าอัตราการอบแห้งจะมีค่าสูงในช่วงต้นแล้วค่อยๆลดลง อัตราการอบแห้งจะสูงเมื่อผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง ในด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าการอบแห้งผลไม้โดยใช้ปั๊มความร้อนในระบบเปิดบางส่วนจะประหยัดกว่าเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์

สุน (2529) อธิบายว่าการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์เป็นวิธีการนำน้ำออกโดยวิธีที่ปลอดภัยต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ซึ่งในกระบวนการระเหยน้ำนั้นปัจจัยที่ควบคุมคืออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในอากาศที่มีอุณหภูมิสูงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะสามารถระเหยน้ำได้ดีการลดความชื้นแบบอาศัยธรรมชาติเช่นการตากแดดและการผึ่งลมเป็นวิธีที่ลงทุนน้อยไม่สะดวกต่อการอบแห้งเมล็ดพันธุ์จำนวนมากๆใช้เวลานานไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ส่วนการลดความชื้นโดยการปรุงแต่งอากาศเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเพราะสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ ในการปรุงแต่งอากาศให้มีความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม ใช้ Psychrometric chart ในการตรวจสอบ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และใช้ Thermostat ในการควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดความร้อนอีกส่วนที่สำคัญคือปริมาณลมที่พัดผ่านเมล็ดพันธุ์ซึ่งแนะนำอัตราการไหลในเขตร้อนขึ้นอยู่ระหว่าง 8-16 ลูกบาศก์เมตรขึ้นอยู่กับระดับความชื้นและชนิดเมล็ดพันธุ์

ศักดิ์รินทร์ (2541) ศึกษาการอบแห้งมะม่วงแช่อิ่ม โดยใช้ปั๊มความร้อน อบโดยระบบปิด ใช้ปั๊มความร้อนขนาด 3.5 กิโลวัตต์ อบแห้งมะม่วงแช่อิ่ม 40 กิโลกรัม ที่ความชื้น เริ่มต้น 85 เปอร์เซ็นต์ ฐานแห้ง จนเหลือความชื้นสุดท้าย 18 เปอร์เซ็นต์ ฐานแห้ง จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบมะม่วงแช่อิ่มโดยระบบปั๊มความร้อนคือ 50 องศาเซลเซียส สัดส่วน By pass 60 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลเชิงมวลอยู่ในช่วง 0.321 -0.428 กิโลกรัมต่อวินาที จะทำให้รูปร่างของมะม่วงแช่อิ่มมีขนาดสม่ำเสมอและตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

อาทิตย์ (2543) ได้ทำการศึกษาระยะของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรมที่ใช้อบเมล็ดพันธุ์ข้าว เครื่องอบแห้งเป็นแบบระบบปิด โดยมีสัดส่วน By pass อยู่ที่ 77-83 เปอร์เซ็นต์ โดยเครื่องอบแห้งบรรจุข้าวเปลือกได้ 4,922-8,250 กิโลกรัม โดยลดความชื้นจาก 13.5-15.4 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก ลดเหลือ 11.2 – 12.7 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก ใช้เวลาอบอยู่ในช่วง 5-14 ชั่วโมง พบว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยอยู่ที่ 13.7-25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ค่าการควบคุมจากเครื่องทำระเหยอยู่ในช่วง 1.86-7.79 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ในช่วง 1.93-3.60 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมโดยค่าสรรณของเครื่องอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

มากกว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ โดยเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ทดสอบมีการออก เฉลี่ยอยู่ที่ 91-97 เปอร์เซ็นต์ ปัญหาส่วนใหญ่คือเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปและเกิดการสะสมของฝุ่นที่บริเวณเครื่องทำระเหยจึงเกิดมีน้ำแข็งเกาะ

วุฒิทัต (2543) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นสูงด้วยวิธีฟลูอิดไอเซชันพบว่าอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่อุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้งและอัตราการไหลจำเพาะของอากาศโดยในการทดลองเริ่มต้นของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบ 150-170 องศาเซลเซียสในระบบปิดเป็นระยะเวลา 40 นาทีจึงเป่าอากาศเข้าไปในกองข้าวโพดคุณภาพของข้าวโพดพิจารณาจากปริมาณแอฟลาทอกซินเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของเมล็ดจากการทดลองพบว่าปริมาณสารแอฟลาทอกซินไม่ลดลงในช่วงการทดลอง และการปริมาตรของเมล็ดขึ้นอยู่กับความชื้นสุดท้ายของการอบแห้ง ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง

คงศักดิ์ (2543) ได้ทำการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บข้าวโพดหลังจากอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชัน โดยที่ข้าวโพดมีความชื้นเริ่มต้น 27 และ 30 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก อบครั้งแรกแบบฟลูอิดไอเซชันอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเมล็ดข้าวโพดไปเก็บไว้ในห้องอบแห้งในช่วงที่ 2 เร็วขึ้น ใช้เวลาการอบแห้งน้อยลงและในกระบวนการเป่าด้วยอากาศ พบว่า ความเร็วของอากาศไม่มีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ความเร็วที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.075-0.375 เมตรต่อวินาทีขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเมล็ดข้าวโพด ถ้าชั้นหนาควรใช้ความเร็วต่ำ

เบญจมาภรณ์ (2543) ได้ศึกษาอิทธิพลของการลดความชื้นของถั่วลิสงพันธุ์ไทนาน 9 โดยการลดความชื้นด้วยลมร้อน ที่ความสูงเมล็ด 60 และ 80 เซนติเมตร จากพื้นถึงอบ เปรียบเทียบกับการตากแดด พบว่าในการใช้เครื่องลดความชื้นแบบลมร้อนสามารถลดความชื้นจาก 25-27 เปอร์เซ็นต์ให้เหลือ 6-7 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลา 24 และ 36 ชั่วโมง เมื่อความหนาเมล็ดในถังอบ 60 และ 80 เซนติเมตร ใช้เวลา 24 และ 36 ชั่วโมง ความชื้นลดลงเฉลี่ย 0.8 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง ในขณะที่การตากแดดใช้เวลา 48 และ 78 ชั่วโมง ความชื้นลดลงเฉลี่ย 0.4 และ 0.3 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมงตามลำดับ

M. Fatouh (2005) ทำการศึกษาการอบแห้งสมุนไพรโดยใช้ปริมาณความร้อนอบต้น Mallow และ ผักชีฝรั่ง อบที่อุณหภูมิ 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.2, 1.9 และ 2.7 เมตรต่อวินาที ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 6 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก พบว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่า อุณหภูมิ 50 และ 45 องศาเซลเซียส เป็น 24 และ 50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับเวลาที่ใช้ในการอบน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 50 และ 45 องศาเซลเซียส เป็น 26 และ 35 เปอร์เซ็นต์สรุปว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสความเร็วลม 0.2 เมตรต่อวินาทีที่มีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุดคือ 3.695 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมจากการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าปริมาณความร้อนสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คมกฤษ (2539) ได้ทำการทดสอบเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดด้วยวิธีฟลูอิดไคซ์ เบตอย่างต่อเนื่อง โดยความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพด 40 เปอร์เซ็นต์ ฐานแห้ง ให้เหลือความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ ฐานแห้ง อบด้วยอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 4.3 นาที ความเร็วลมในห้องอบ 2.96 เมตรต่อวินาที พบว่าเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดมีค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง 1.75 บาทต่อกิโลกรัม

Teeboonma (2002) ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งผลไม้ ด้วยป้อนความร้อน โดยใช้มะละกอ ความชื้นเริ่มต้น 40 เปอร์เซ็นต์ ฐานแห้งและมะม่วงความชื้น เริ่มต้น 60 เปอร์เซ็นต์ ฐานแห้ง อบปริมาณ 100 กิโลกรัม ลดความชื้นให้เหลือ 18 เปอร์เซ็นต์ ฐานแห้ง ใช้เวลาในการอบ 35 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 และ 55 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสในการอบแห้งมะละกอ ใช้อัตราการไหลของอากาศ เท่ากับ 40.94 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และที่ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 20.72 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีค่าใช้จ่าย ในการอบแห้ง 4.31 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสในการอบแห้งมะม่วง ใช้ อัตราการไหลของอากาศ เท่ากับ 71.62 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ใช้ อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 30.88 กิโลกรัมต่อ มีค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง 12.72 บาทต่อกิโลกรัม อัตราการไหลของอากาศในการอบมะม่วงมีค่ามากกว่าการอบมะละกอเพราะสัมประสิทธิ์การแพร่ของมะละกอ มากกว่ามะม่วง จึงใช้ปริมาณลมในการอบน้อยกว่าตามโครงสร้างของเนื้อเยื่อ

นเรศ (2543) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งผักตบชวา โดยใช้ป้อนความร้อนโดยใช้เครื่องอัดไอ ขนาด 1.6 กิโลวัตต์ เครื่องควบแน่นชุดในขนาด 3.3 กิโลวัตต์ และเครื่องควบแน่นชุดนอก 1.2 กิโลวัตต์ เครื่องทำระเหยขนาด 3.6 กิโลวัตต์ อบแห้งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยมี ความเร็วลม 0.3, 0.6 และ 0.9 เมตร ต่อวินาที ตามลำดับ ความชื้นเริ่มต้น 970 เปอร์เซ็นต์ ฐานแห้ง อบจนเหลือความชื้นสุดท้าย 14 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้งพบว่าการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพ สูงสุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบ 18 ชั่วโมง

Apichart (2009) ทำการศึกษาการอบแห้งพริกโดยใช้เครื่องอบแห้งป้อนความร้อนระบบ สูญญากาศ อบที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นพริกเริ่มต้น 344 เปอร์เซ็นต์ ฐานแห้ง ลดลงเหลือความชื้นสุดท้าย 15 เปอร์เซ็นต์ ฐานแห้ง ใช้เวลา 7 ชั่วโมง อบพริกจำนวน 20 กิโลกรัม พบว่าอุณหภูมิไม่ส่งผลกระทบต่อ การหดตัวของพริกแต่ความดันในระหว่างการอบแห้งมี ผลกระทบต่อการหดตัวของพริก

Brooker (1992) กล่าวว่า ความต้องการพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง หมายถึงผลรวม ของการใช้เชื้อเพลิงและไฟฟ้าในการอบแห้งเพื่อไล่น้ำออกมีหน่วยเป็นเมกกะจูล ต่อกิโลกรัมน้ำ สำหรับเครื่องอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิ 50–200 องศาเซลเซียสความต้องการพลังงานจำเพาะจะมีค่า ระหว่าง 3-10 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ

พิพัฒน์ (2538) ทำการทดสอบเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดโดยใช้ลมเป่าผ่านกองข้าวโพดปริมาณ 30 ตัน อัตราการไหลอากาศ 5.44 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างที่ระดับผิวบน และ ลึก 0.30, 0.7 และ 1.2 เมตร ตามลำดับ ลดความชื้นจาก 19 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก เหลือ 12.5 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก ใช้เวลาอบ 20 วัน พบว่าเสียค่าสิ้นเปลืองพลังงาน เป็นเงิน 0.32 บาทต่อ กิโลกรัม น้ำที่ระเหย

จากการศึกษาพบว่าข้าวโพดเป็นเมล็ดพันธุ์เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยเพราะมีอัตราการส่งออกเมล็ดพันธุ์ตั้งแต่ปี 2547 จนถึงปัจจุบันเป็นอันดับ 1 (ข้อมูลจาก ฝ่ายพืชพันธุ์ สำนักควบคุมพืชและวัสดุเกษตรกรมวิชาการเกษตร) และการอบแห้งแบบถึงโดยใช้แหล่งความร้อนจากระบบบีบความร้อนแบบระบบปิดมีความเหมาะสมในการอบเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดเพราะเป็นการอบแห้งที่ใช้ อุณหภูมิต่ำ สามารถควบคุมอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ ระบบความร้อนมี ค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานต่ำในระยะยาวเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งชนิดต่างๆ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องอบแห้งระบบปิดความร้อน
2. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล :Precisaรุ่น6200 CSCS
3. เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศและอุณหภูมิ:Digiconรุ่นDM635
4. เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์ (Gran moisture):Kettรุ่น PM-400
5. อุปกรณ์วัดความเร็วลม (Hot wire anemometer): Dwyer รุ่น 471
6. กิโลวัตต์ชั่วโมงมิเตอร์ : MITSUBISHI
7. มอเตอร์ไฟฟ้า : MITSUBISHI รุ่น SF-JR ขนาด 3 แรงม้า
8. พัดลมแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal fan) ขนาด 16 นิ้ว
9. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พันธุ์ NK40 จากอำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี

วิธีการ

เพื่อให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ ผักกระบับปิดความร้อนจึงได้ทำการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอนคือการศึกษาการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ ข้าวโพดด้วยระบบปิดความร้อนและ การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

เกณฑ์และรายละเอียดในการออกแบบ

1. เครื่องอบแห้งแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของห้องอบแห้ง และ ส่วนของระบบทำความร้อน ดังภาพที่ 11



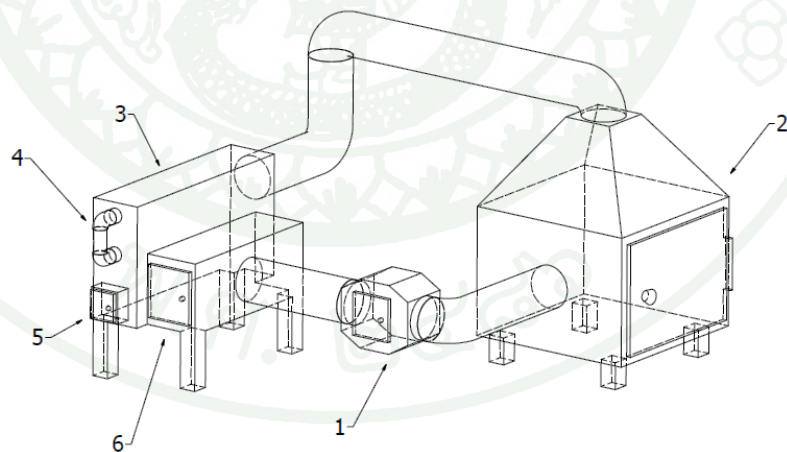
(ก) ส่วนของห้องอบแห้ง



(ข) ส่วนของระบบทำความร้อน

ภาพที่ 11 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้ง

2. เครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดระบบบีบความร้อนต้นแบบที่สร้างขึ้น ห้องอบแห้งทำด้วยไม้ ภายในมีตระแกรง สำหรับรองรับเมล็ดพืช ขนาดปริมาตรภายใน กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ $1.15 \times 1.22 \times 0.45$ ลูกบาศก์เมตร มีการติดตั้งอุปกรณ์ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 เครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดระบบบีบความร้อนต้นแบบ

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| (1) พัดลม | (2) ห้องอบแห้ง |
| (3) เครื่องทำระเหย (Evaporator) | (4) ท่อลมอากาศไหลผ่านเครื่องทำระเหย |
| (5) ชุดควบคุมอุณหภูมิอากาศ | (6) เครื่องควบแน่น (Condensers) |

3. ขั้นตอนในการออกแบบระบบทำความร้อน

เงื่อนไขในการออกแบบระบบทำความร้อนกำหนดดังนี้

3.1 ปริมาณข่าวโพตอบแห้งครั้งละ 200 kg

3.2 ข่าวโพตมีความชื้นเริ่มต้น 15 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียกและต้องการอบแห้ง ข่าวโพตให้มีความชื้นสุดท้าย 8 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียกอุณหภูมิอากาศที่เข้าอบแห้ง 38, 43 และ 48 องศาเซลเซียส

3.3 กำหนดให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยเป็น 50 % ของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหย

3.4 สารทำงานที่ใช้ คือ R-22 โดยกำหนดให้อุณหภูมิของสารทำงานที่อุปกรณ์ควบแน่น เท่ากับ 45 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องทำระเหย เท่ากับ 7 องศาเซลเซียส และค่า Bypass factor ที่อุปกรณ์ทำระเหย มีค่า 0.3 ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเริ่มต้นความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุตั้งสมการคือ

$$\begin{aligned}
 m_w &= m_i \left(1 - \frac{(M_0 + 1)}{(M_i + 1)}\right) \\
 &= 200 \left(1 - \frac{(0.08 + 1)}{(0.15 + 1)}\right) \\
 &= 12.18 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

เมื่อ	m_w	คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ, กิโลกรัม
	m_i	คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ, กิโลกรัม
	M_i	คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, ทศนิยม ฐานเปียก
	M_0	คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุอบแห้ง, ทศนิยม ฐานเปียก

การสมดุลความร้อนของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งทำการสมดุลพลังงานของอากาศกับความชื้นของวัสดุโดยสมมติให้ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากวัสดุขึ้นมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของอากาศซึ่งมีรูปสมการคือ (Brooker *et al.* 1992)

$$m_w h_{fg} = m_a c_a (T_{ai} - T_{ao}) t \quad (18)$$

เมื่อ	m_w	คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ, กิโลกรัม
	h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม
	m_a	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, กิโลกรัม ต่อ วินาที
	c_a	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม องศาเซลเซียส
	T_{ai}	คือ อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง, องศาเซลเซียส
	T_{ao}	คือ อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้ง, องศาเซลเซียส
	T	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, วินาที

การออกแบบปั๊มความร้อน

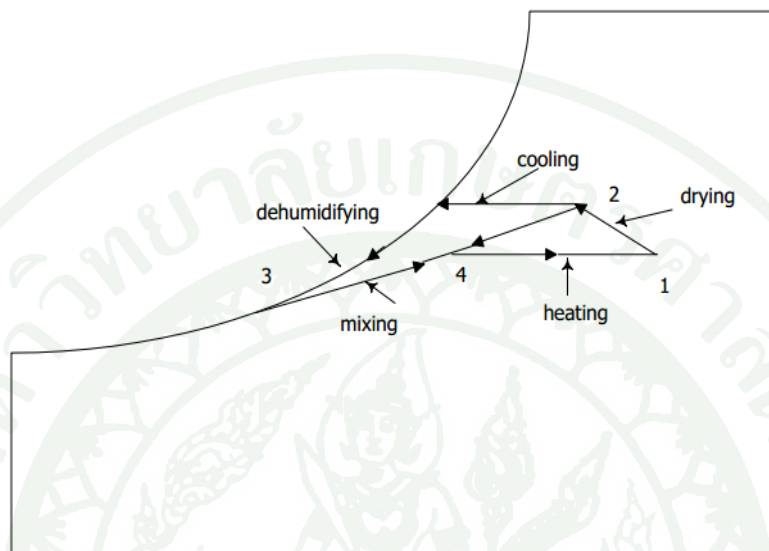
จากเงื่อนไขในการออกแบบสามารถหาอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยได้ดังนี้

$$BF = \frac{(T_{eo} - T_{er})}{(T_a - T_{er})} \quad (19)$$

เมื่อ	BF	= Bypass factor
	T_{eo}	= อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากอุปกรณ์ทำระเหย, องศาเซลเซียส
	T_{er}	= อุณหภูมิของสารทำงานที่อุปกรณ์ทำระเหย, องศาเซลเซียส
	T_a	= อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม, กำหนดให้ เท่ากับ 27 องศาเซลเซียส

แทนค่าจะได้ $T_{eo} = 13$ องศาเซลเซียส

พิจารณาจากกระบวนการอบแห้งจากแผนภาพไซโครเมตริก (Psychrometric) ตามภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แผนภาพไซโครเมตริกแสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นของการอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

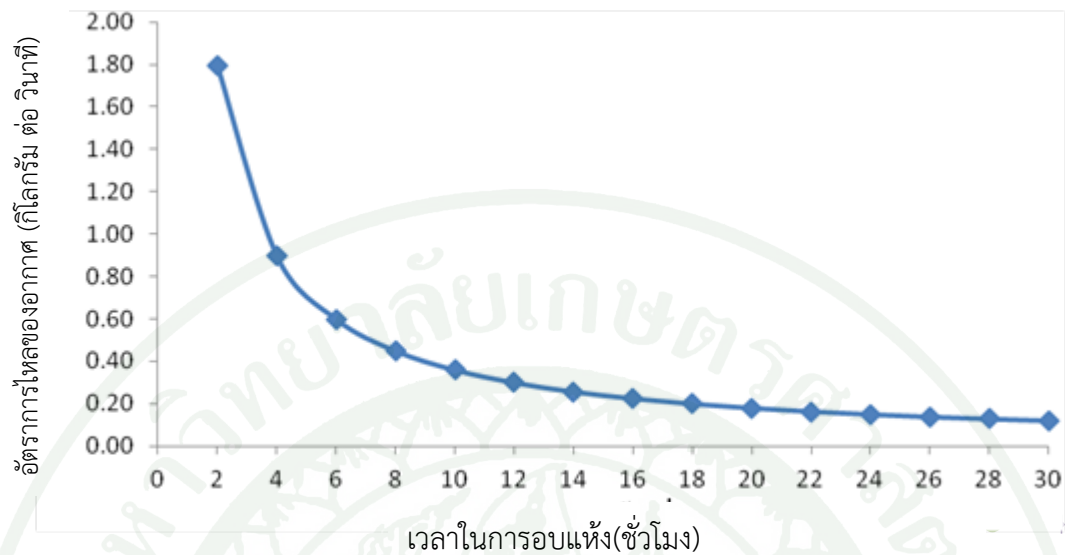
กระบวนการอบแห้ง (drying) จากจุด 1 ไปจุด 2 จะเป็นการใช้อากาศเป็นตัวกลางพา โดยกำหนดให้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 48 องศาเซลเซียส หลังอบแห้งลดลงเหลือ 40 องศาเซลเซียส

กระบวนการลดความชื้น (cooling and dehumidifying) จากจุด 2 ไปจุด 3 จะเป็นการทำให้อากาศชื้นเย็นลงพร้อมทั้งช่วยลดความชื้นในอากาศ กำหนดให้อุณหภูมิลดลงจาก 40 องศาเซลเซียส เหลือ 13 องศาเซลเซียส

กระบวนการผสมอากาศ (mixing) อากาศที่ผ่านการลดความชื้นจากจุด 3 ผสมกับอากาศ by pass จากจุด 2 มาผสมกันที่จุด 4 โดยอากาศผสมจะมีอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

กระบวนการให้ความร้อน (heating) จากจุด 4 ไปจุด 1 เป็นการเพิ่มความร้อนให้กับอากาศ จนถึง 48 องศาเซลเซียส แล้วนำกลับไปสู่ระบบการอบแห้งต่อ

การจำลองสถานการณ์เพื่อหาอัตราการไหลของอากาศ จากสมการ (18) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจากภาพที่ 14 เลือกเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 24 ชั่วโมงจะได้อัตราการไหลของอากาศ 0.15 กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง



ภาพที่ 14 ผลจากการจำลองสถานการณ์หาอัตราการไหลของอากาศต่อเวลาในการอบแห้ง

คำนวณหาความเร็วอากาศที่ไหลในห้องอบ โดยอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.15 กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง หาความเร็วอากาศในห้องอบได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{m_a}{\rho_a A} & (20) \\
 &= \frac{0.15}{1.09 \times 1.15 \times 1.22 \times 0.45} \\
 &= 0.217 \text{ เมตรต่อวินาที}
 \end{aligned}$$

- เมื่อ
- V = ความเร็วอากาศที่ไหลในห้องอบ, เมตร ต่อ วินาที
 - m_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, กิโลกรัม ต่อ วินาที
 - ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ, 1.09 กิโลกรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร
 - A = พื้นที่หน้าตัดห้องอบแห้ง, ตารางเมตร

จากสภาวะการทำงานตามแผนภูมิอากาศชื้นในภาพที่ 14 สามารถนำไปหาขนาดของเครื่องทำระเหยได้ดังนี้ สภาวะอากาศก่อนเข้าเครื่องทำระเหย 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศ 0.15 กิโลกรัม ต่อ วินาทีคิดเป็นอัตราการระเหยน้ำได้เท่ากับ 0.5 กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมงและกำหนดให้อากาศหลังอบแห้งมีอัตราส่วน ในการรับอากาศ 50 เปอร์เซ็นต์จะได้การไหลผ่านเครื่องทำระเหยเท่ากับ 0.075 กิโลกรัม ต่อ วินาทีสภาวะของอากาศออกจากเครื่องทำระเหย 13 องศาเซลเซียส ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (c_a) 1.006 กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม องศาเซลเซียสสร้อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 Q_e &= m_e c_a (T_{ei} - T_{eo}) + m_e (W_{ei} - W_{eo}) h_{fg} & (21) \\
 &= 0.075 \times 1.006 (40 - 13) + 0.075 (0.0185 - 0.0098) 2438.771 \\
 &= 3.6 \text{ กิโลวัตต์}
 \end{aligned}$$

เมื่อ Q_e = ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิของเครื่องทำระเหย, กิโลวัตต์
 T = อุณหภูมิของอากาศ, องศาเซลเซียส
 c_a = ความร้อนจำเพาะของอากาศ (=1.006 กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม องศาเซลเซียส)
 h_{fg} = เอนทัลปีของการระเหยน้ำ, กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม
 $= 2502 - 2.386(T_{ei} + T_{eo})/2 = 2438.771$ กิโลจูล ต่อ กิโลกรัม
 m_e = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหย, กิโลกรัม ต่อ วินาที
 W = อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, กิโลกรัม น้ำ ต่อ กิโลกรัมอากาศแห้ง

อัตราส่วนในการรับอากาศแวดล้อม 50 เปอร์เซ็นต์จะมีอัตราการไหลเท่ากับ 0.075 กิโลกรัม ต่อ วินาทีจากสภาวะการออกแบบนำไปหาอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่นเพื่อใช้ในการหาขนาดของเครื่องควบแน่นได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 T_{ci} &= \frac{[m_e T_f + m_e T_{eo}]}{m_a} & (22) \\
 &= \frac{[0.075 \times 40 + 0.075 \times 13]}{0.15} \\
 &= 26.5 \text{ องศาเซลเซียส}
 \end{aligned}$$

เมื่อ T_f = อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้ง, องศาเซลเซียส
 T_{ci} = อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น, องศาเซลเซียส

หาขนาดของเครื่องควบแน่นได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 Q_c &= m_a c_a (T_{co} - T_{ci}) & (23) \\
 &= 0.15 \times 1.006 (48 - 26.5) \\
 &= 3.24 \text{ กิโลวัตต์}
 \end{aligned}$$

ในการทดลองได้เลือกซื้อขนาดของเครื่องทำระเหยที่มีขายทางพาณิชย์ขนาด 24,000 บีทียู

วิธีการทดสอบ

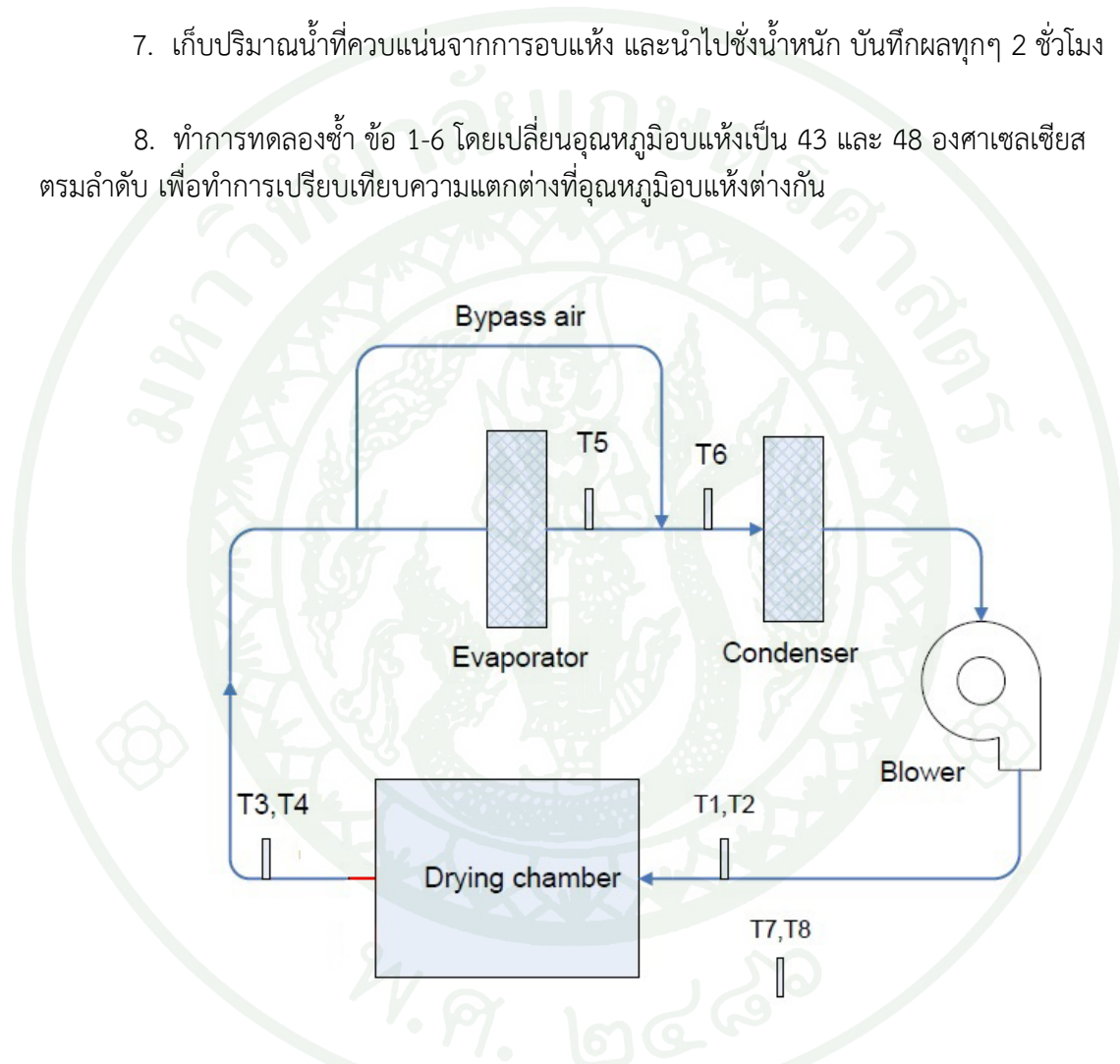
1. การหาความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพดทำโดยการสุ่มเก็บตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ก่อนทำการอบแห้ง ตัวอย่างละ 200 กรัมแล้วนำไปวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์ (Grain moisture) จำนวน 4 ครั้งแล้ว นำข้อมูลที่ได้มาเฉลี่ยกัน
2. นำเมล็ดข้าวโพด ปริมาณ 200 กิโลกรัม อบด้วยลมร้อน 38 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 0.217, 0.254 และ 0.338 เมตร ต่อ วินาที ตามลำดับ
3. หาอัตราการไหลของอากาศทำโดยวัดความเร็วลมบริเวณหน้าตัดของท่ออากาศ โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบขดลวด (Hot-wire anemometer) ที่บริเวณทางเข้าห้องอบแห้งและพื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศแล้วจึงคำนวณค่าอัตราการไหลด้วยสมการที่ 24

$$Q = \frac{V}{A} \quad (24)$$

เมื่อ Q = อัตราไหลอากาศ, ลูกบาศก์เมตร ต่อ วินาที
 V = ความเร็วลม, เมตร ต่อ วินาที
 A = พื้นที่, ตารางเมตร

4. เก็บปริมาณน้ำที่ระเหยจากเครื่องทำระเหย นำมาชั่งน้ำหนัก ทุกๆ 2 ชั่วโมงตลอดระยะเวลาการอบแห้ง

5. ระหว่างการอบแห้งทุกๆ 2 ชั่วโมง บันทึกค่าพลังงานที่ใช้จาก Kilowatt hour meter
6. วัดอุณหภูมิของอากาศในระบบทั้งกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียก โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดตามตำแหน่ง ดังภาพที่ 16 เก็บข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง
7. เก็บปริมาณน้ำที่ควบแน่นจากการอบแห้ง และนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกผลทุกๆ 2 ชั่วโมง
8. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิอบแห้งเป็น 43 และ 48 องศาเซลเซียส ตมลำดับ เพื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างที่อุณหภูมิอบแห้งต่างกัน



ภาพที่ 16 วงจรตำแหน่งการวัดอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

- โดย
- T1 คือ อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง, องศาเซลเซียส
 - T2 คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกอากาศอบแห้ง, องศาเซลเซียส
 - T3 คือ อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้ง, องศาเซลเซียส
 - T4 คือ อุณหภูมิอากาศกระเปาะเปียกอากาศหลังอบแห้ง, องศาเซลเซียส
 - T5 คือ อุณหภูมิอากาศผ่านเครื่องทำระเหย, องศาเซลเซียส
 - T6 คือ อุณหภูมิอากาศผสม, องศาเซลเซียส
 - T7 คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, องศาเซลเซียส

T8 คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกอากาศแวดล้อม, องศาเซลเซียส
วิธีการเพาะเมล็ดพันธุ์เพื่อทดสอบการงอก

1. ฉีดน้ำลงบนกระดาษสำหรับเพาะใช้ชุ่ม แล้วนำเมล็ดพันธุ์ไปวาง โดยมีระยะห่างเมล็ดประมาณ 1 เซนติเมตร

2. เมื่อเวลาผ่านไป 5 วันจึงนับจำนวนเมล็ดที่งอก เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การงอกดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การงอก} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดพันธุ์ที่งอก}}{\text{จำนวนเมล็ดพันธุ์ทั้งหมด}} \times 100 \quad (25)$$

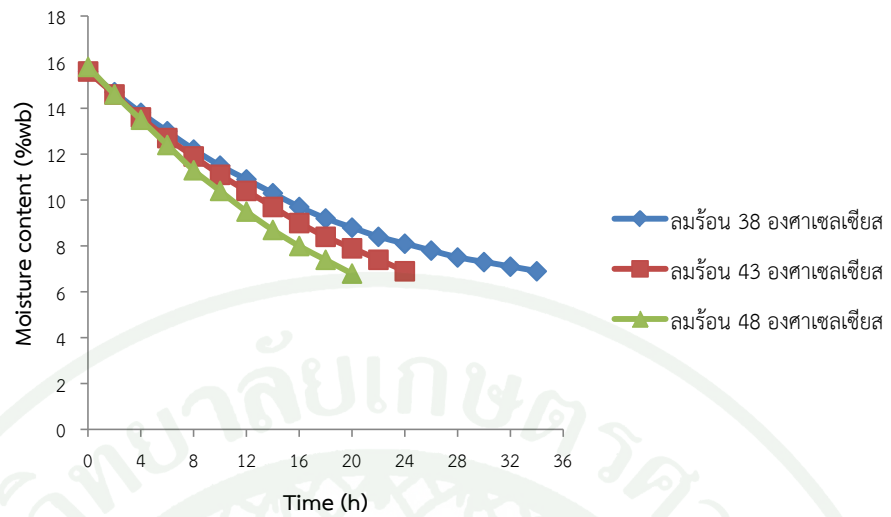
ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวโพด จำนวน 9 การทดลอง โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองดังนี้

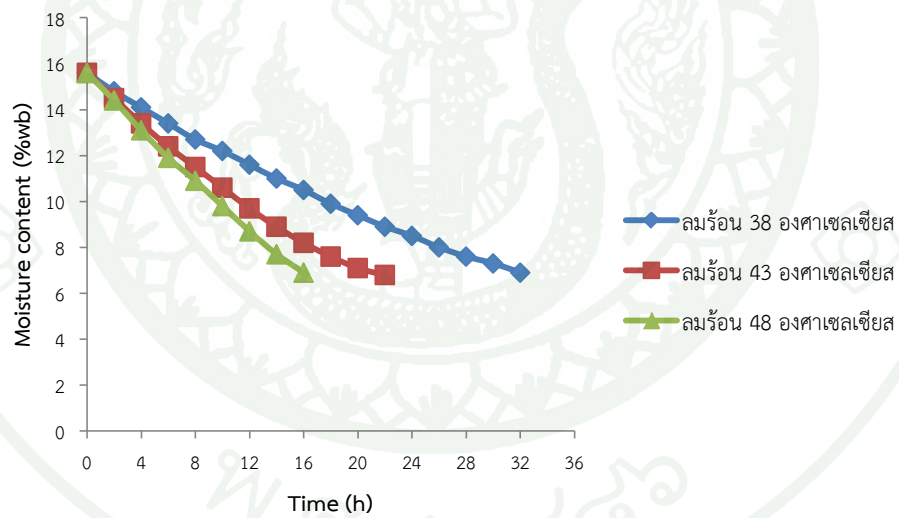
1. เครื่องอบแห้งเป็นแบบปิด (closed system)
2. ใช้เครื่องอบแห้งแบบถัง (Bin drier) โดยใช้ลมร้อนเป่าผ่านกองเมล็ดพันธุ์ ลมร้อนได้จากระบบปั๊มความร้อน
3. ควบคุมอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง 3 สภาวะ คือ 38, 43 และ 48 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
4. ความเร็วอากาศ 3 ระดับ คือ 0.217, 0.254 และ 0.338 ตามลำดับ
5. อากาศที่ไหลผ่านเครื่องทำระเหย 50 %

ผลการทดลอง

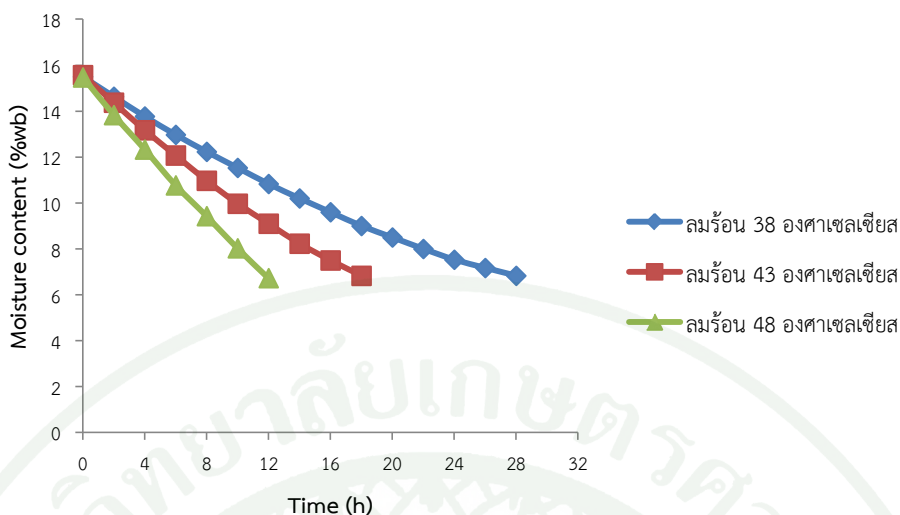
1. การอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 38, 43, และ 48 องศาเซลเซียสที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.217, 0.254 และ 0.338 เมตร ต่อ วินาที พบว่าใช้เวลาในการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียสใช้เวลานานที่สุด ในการลดความชื้นเมล็ดข้าวโพดจาก 15 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกให้ลดลงเหลือ 8 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้นลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้น และความเร็วอากาศมีผลต่อเวลาในการลดความชื้น เมื่อความเร็วอากาศมากขึ้นจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลงตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 16, 17 และ 18



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.217 เมตร ต่อ วินาที

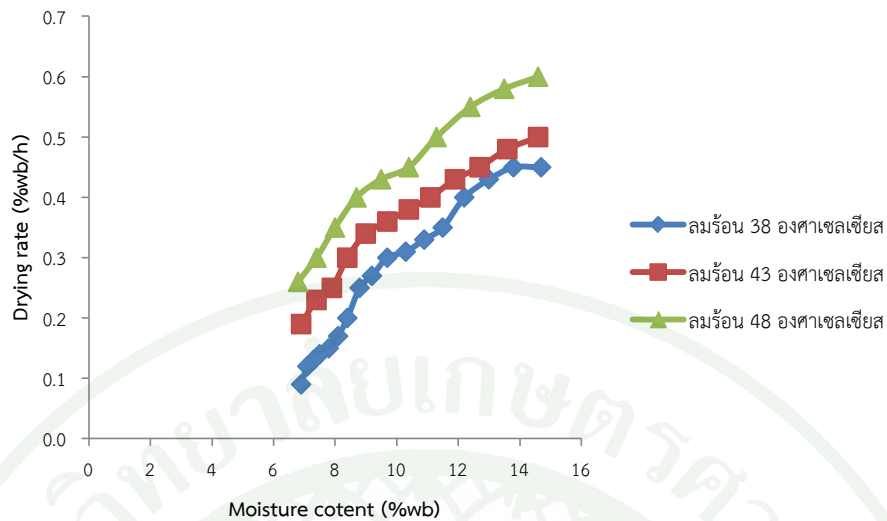


ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.254 เมตร ต่อ วินาที

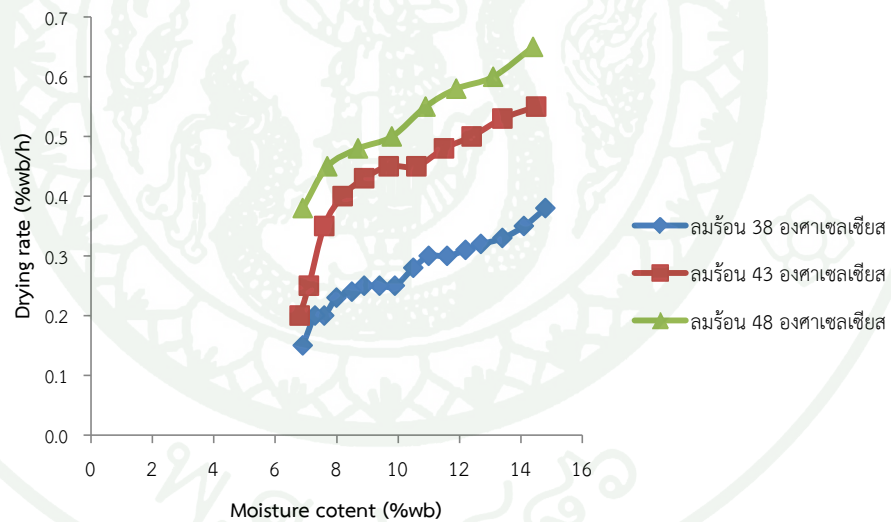


ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที

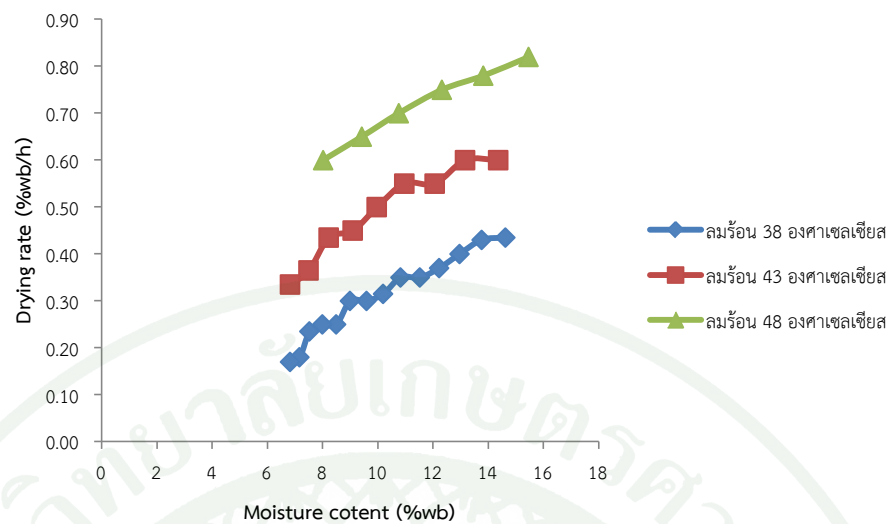
2. อัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนพบว่าอยู่ในช่วงของการอบแห้งลดลง ซึ่งจะพบว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียสมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิลมร้อน 43 และ 38 องศาเซลเซียส ตามลำดับดังนั้นการอบแห้งด้วยลมร้อนจึงจำเป็นที่จะต้องใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ค่อนข้างสูงเพื่อเป็นการเพิ่มแรงในการขับความชื้นให้ระเหยออกจากตัววัสดุในช่วงเริ่มต้นที่วัสดุมีความชื้นสูงที่มีอัตราการอบแห้งที่สูงเนื่องจากความชื้นอิสระที่อยู่ใกล้บริเวณผิวจะถูกขับเคลื่อนออกสู่ผิวได้โดยง่าย และเมื่อความชื้นส่วนนี้หมดไปชั้นของความชื้นที่อยู่ภายในตัววัสดุจะเคลื่อนตัวออกสู่ผิวได้ช้าลงทำให้อัตราการอบแห้งลดลงซึ่งในการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดนี้ก็เช่นเดียวกันความชื้นที่ชั้นเปลือกของเมล็ดข้าวโพดจะได้รับความร้อนและระเหยออกมาก่อนทำให้ผิวของเมล็ดข้าวโพดเหี่ยวและมีการหดตัวส่วนความชื้นที่อยู่ในเมล็ดซึ่งเป็นความชื้นส่วนใหญ่เมื่อได้รับความร้อนแล้วระเหยออกมาจะถูกชั้นผิวซึ่งผิวที่แห้งขัดขวางการเคลื่อนที่ออกสู่ผิวนอกทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งที่นาน เช่นเดียวกับวัสดุเกษตรหลายชนิดที่มีพฤติกรรมการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ดังภาพที่ 19, 20 และ 21



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้งข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.217 เมตร ต่อ วินาที

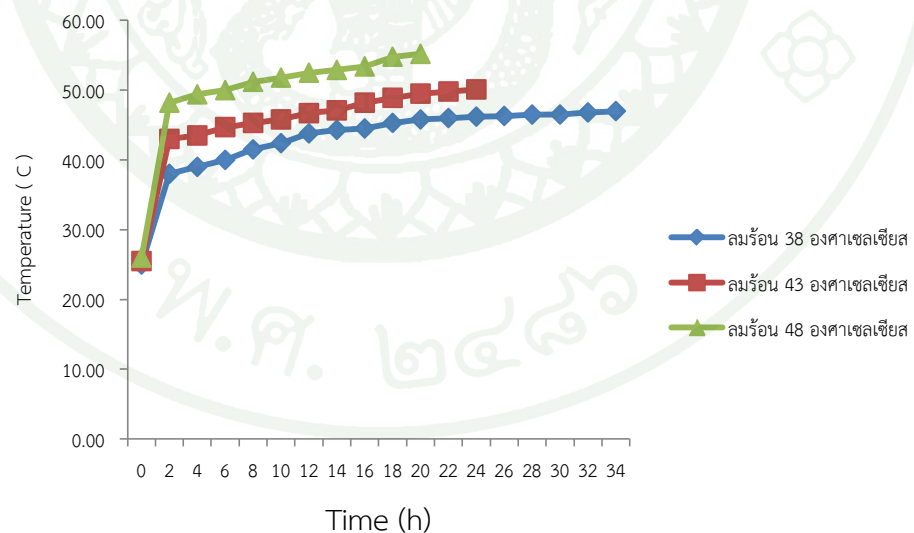


ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้งข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.254 เมตร ต่อ วินาที

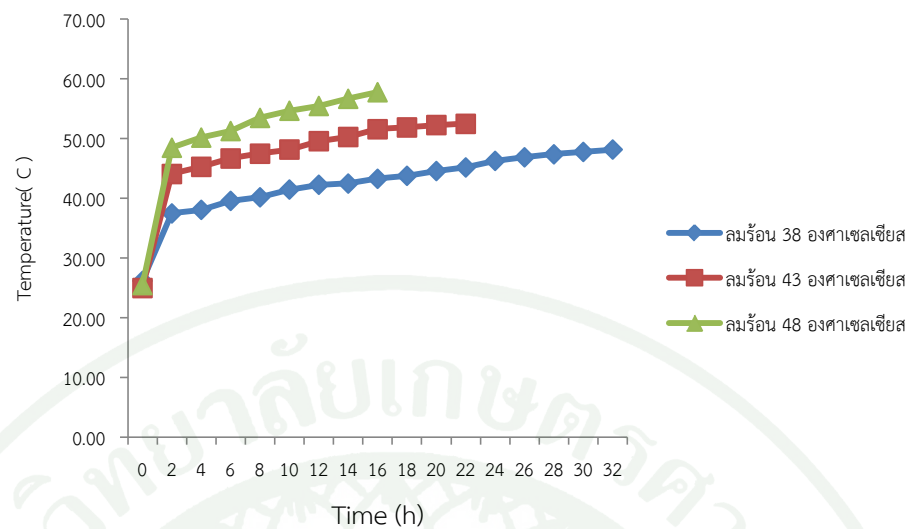


ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้งข้าวโพดด้วยลมร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที

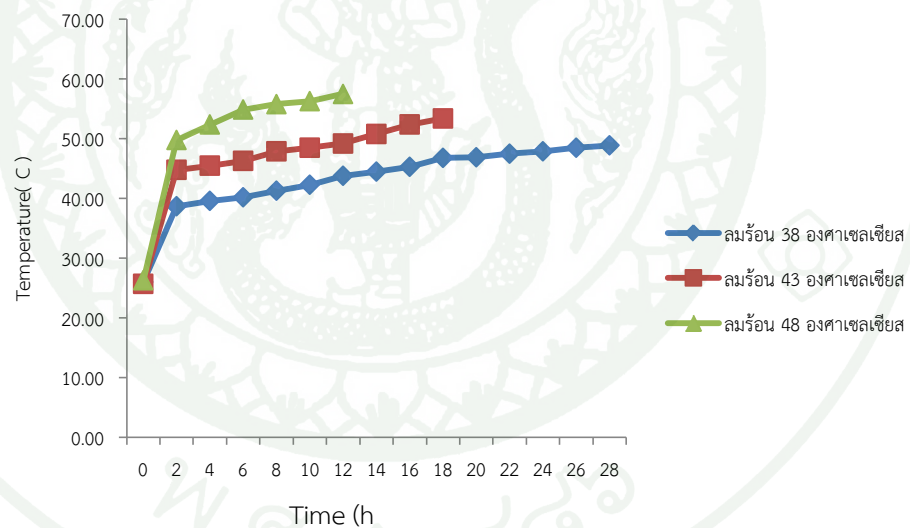
3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดในระหว่างการอบแห้งแสดงในภาพที่ 22, 23 และ 24 โดยอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นเข้าสู่อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดในระหว่างการอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.217 เมตร ต่อ วินาที



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดในระหว่างการอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.254 เมตร ต่อ วินาที



ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดในระหว่างการอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที

4. ประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 38, 43 และ 48 องศาเซลเซียส พบว่าปัจจัยหลักของระบบที่ทำการพิจารณาประกอบด้วย อัตราการอบแห้ง อัตราการควบแน่น อัตราการระเหยจำเพาะ และการสิ้นเปลืองพลังงาน ดังตารางที่ 3, 4 และ 5

ตารางที่ 3 ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.217 เมตร ต่อ วินาที

รายละเอียด	การทดลองที่ 1		
	1	2	3
สภาวะอากาศแวดล้อม			
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย, องศาเซลเซียส	27.74	27.75	27.40
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย	82.60	83.98	79.30
เงื่อนไขเมล็ดพันธุ์			
ความชื้นเริ่มต้น, เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก	15.6	15.6	15.8
ความชื้นสุดท้าย, เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก	6.9	6.9	6.8
น้ำหนักเริ่มต้น, กิโลกรัม	200	200	200
เงื่อนไขอากาศอบแห้ง			
อุณหภูมิเฉลี่ย, องศาเซลเซียส	38	43	48
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย	65.2	59.2	56.1
เวลาที่ใช้, ชั่วโมง	34	24	20
อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย, เปอร์เซ็นต์	50	50	50
สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน			
อัตราการอบแห้ง(DR), กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง	0.26	0.36	0.45
อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ(SMER), กิโลกรัม ต่อ กิโลวัตต์อาว	0.32	0.42	0.47
ค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน(SCE), กิโลวัตต์ ต่อ กิโลกรัม			
	3.125	2.38	2.12

ตารางที่ 4 ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.254 เมตร ต่อ วินาที

รายละเอียด	การทดลองที่1		
	1	2	3
สภาวะอากาศแวดล้อม			
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย, องศาเซลเซียส	27.50	26.95	27.00
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย	84.50	82.85	80.63
เงื่อนไขเมล็ดพันธุ์			
ความชื้นเริ่มต้น, เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก	15.6	15.6	15.6
ความชื้นสุดท้าย, เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก	6.8	6.8	6.8
น้ำหนักเริ่มต้น, กิโลกรัม	200	200	200
เงื่อนไขอากาศอบแห้ง			
อุณหภูมิเฉลี่ย, องศาเซลเซียส	38	43	48
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย	63.5	55.0	52.8
เวลาที่ใช้, ชั่วโมง	32	22	16
อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย, เปอร์เซ็นต์	50	50	50
สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน			
อัตราการอบแห้ง(DR), กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง	0.27	0.40	0.55
อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ(SMER), กิโลกรัม ต่อ กิโลวัตต์อ่าว	0.33	0.43	0.53
ค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน(SCE), กิโลวัตต์ ต่อ กิโลกรัม			
	3.030	2.32	1.88

ตารางที่ 5 ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที

รายละเอียด	การทดลองที่ 1		
	1	2	3
สภาวะอากาศแวดล้อม			
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย, องศาเซลเซียส	26.50	26.45	27.50
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย	85.60	83.75	84.65
เงื่อนไขเมล็ดพันธุ์			
ความชื้นเริ่มต้น, เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก	15.5	15.5	15.4
ความชื้นสุดท้าย, เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก	6.8	6.8	6.7
น้ำหนักเริ่มต้น, กิโลกรัม	200	200	200
เงื่อนไขอากาศอบแห้ง			
อุณหภูมิเฉลี่ย, องศาเซลเซียส	38	43	48
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย	60.7	50.3	48.9
เวลาที่ใช้, ชั่วโมง	28	18	12
อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย, เปอร์เซ็นต์	50	50	50
สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน			
อัตราการอบแห้ง(DR), กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง	0.31	0.48	0.72
อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ(SMER), กิโลกรัม ต่อ กิโลวัตต์อ่าว	0.35	0.49	0.67
ค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน(SCE), กิโลวัตต์ ต่อ กิโลกรัม			
	2.86	2.04	1.49

ตารางที่ 6 อัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดที่สภาวะต่างๆ

สภาวะ	อัตราการงอก, เปอร์เซ็นต์
การตากแดด 27 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)	98.6
อุณหภูมิอบแห้ง 38 องศาเซลเซียส	97.6
อุณหภูมิอบแห้ง 43 องศาเซลเซียส	97.3
อุณหภูมิอบแห้ง 48 องศาเซลเซียส	96.3

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ในการลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ระบบปั๊มความร้อนสามารถวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยมีรายละเอียดของการคำนวณดังนี้

1. ต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้งรวม 63,000 บาท
2. สามารถอบเมล็ดพันธุ์ได้ครั้งละ 200 กิโลกรัม
3. น้ำหนักหลังอบแห้ง เท่ากับ 175.04 กิโลกรัม
4. เวลาที่ใช้ในการอบแห้งครั้งละ 24 ชม. ที่สภาวะอากาศ 53 องศาเซลเซียส (ลดความชื้นจาก 15.3 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียกเหลือ 6.5 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก)
5. ทำการอบแห้งสัปดาห์ละ 5 วัน ดังนั้นทำงานปีละ 240 วัน
6. อัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเท่ากับ 4.93 กิโลวัตต์ ต่อ ชั่วโมง
7. อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 8.75 เปอร์เซ็นต์
8. ตัวเครื่องมีอายุการใช้งาน 10 ปี
9. มูลค่าซากคิดเป็น 10% ของต้นทุน
10. ค่าบำรุงรักษารายปีคิดเป็น 5 % ของต้นทุน
11. ค่าไฟฟ้าราคา 3.70 บาท/ kwh

ค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบกับรายปีของต้นทุนสร้างเครื่อง, C_c

$$= 63,000 \frac{[i(1+i)^n]}{[(1+i)^n - 1]}$$

$$= 63,000 \frac{[0.0875(1+0.0875)^{10}]}{[(1+0.0875)^{10} - 1]}$$

$$= 9,708.908 \text{ บาท}$$

มูลค่าซากของเครื่องอบแห้งคิดเป็นรายปี, C_s

$$= 63,000 \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right]$$

$$= 63,000 \left[\frac{0.0875}{(1+0.0875)^{10} - 1} \right]$$

$$= 4,196.408 \text{ บาท}$$

ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ารายปี, C_e

$$= \text{ชั่วโมงการทำงานรวม} \times \text{อัตราการใช้ไฟฟ้า} \times \text{ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย}$$

$$= 240 \times 22 \times 4.93 \times 3.7$$

$$= 105,068.2 \text{ บาท}$$

ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษารายปี, C_m

$$= 63,000 \times 0.05$$

$$= 3,150 \text{ บาท}$$

ค่าใช้จ่ายรวมรายปี

$$= C_c + C_e + C_m - C_s$$

$$= 9,708.908 + 105,068.2 + 3,150 - 4,196.406$$

$$= 113,730.7 \text{ บาท}$$

ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งต่อตันทุนผลผลิตแห้ง

$$= 113,730.7 / (240 \times 175.04)$$

$$= 2.70 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง}$$

ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง

$$= (9,708.908 - 4,196.408) / (240 \times 175.04)$$

$$= 0.13 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง}$$

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

$$= (105,068.2 + 3,150) / (240 \times 175.04)$$

$$= 2.58 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง}$$

ระยะเวลาคืนทุน 2 ปี

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยระบบปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ ขนาด 24,000 บีทียู ที่อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 38, 43 และ 48 องศาเซลเซียส สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1.1 อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิลมร้อน 48 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งสูง ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น มีการระเหยน้ำได้มากกว่าที่อุณหภูมิลมร้อน 38 องศาเซลเซียส และ 43 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับระดับการสิ้นเปลืองพลังงานที่เท่ากัน

1.2 คุณภาพของเมล็ดพันธุ์ที่อบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน มีความงอกเฉลี่ยเท่ากับ 97.6, 97.3 และ 96.3 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิลมร้อน 38, 43 และ 48 องศาเซลเซียส ตามลำดับจากการตากแดดมีความงอกเฉลี่ย 98.6 เปอร์เซ็นต์

1.3 จากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพบว่ามีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งทั้งหมด 2.70 บาทต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งเท่ากับ 0.13 บาทต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง และ ค่าใช้จ่ายในด้านการดำเนินการเท่ากับ 2.58 บาทต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ระยะเวลาคืนทุน 2 ปี

ข้อเสนอแนะ

2.1 ในกรณีของอัตราการไหลข้ามเครื่องทำระเหยควรมีการเปรียบเทียบ หลายระดับ มากกว่านี้ว่ามีความแตกต่างกันในด้าน การสิ้นเปลืองพลังงาน และอัตราการอบแห้ง มากน้อยเพียงใด

2.2 ควรศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้อบแห้ง ความดันในระบบ และอัตราการไหลของอากาศในการอบแห้ง

เอกสารอ้างอิงและสิ่งอ้างอิง

กรมการข้าว. 2550. พันธุ์ข้าวเฉลิมพระเกียรติ 80. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

จวงจันทร์ ดวงพัตรา. 2529. เทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์. ภาควิชาพืชไร่ฯ คณะเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เจียมจิต คู่เทียม. 2537. การทำกระเทียมผงโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบถาด. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ณัฐหทัย เอพานิช. 2547. การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์. สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ
กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2551. การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเพื่อ
อบแห้งสมุนไพร. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธานินทร์ การภักดี. 2540. การอบแห้งเมล็ดพันธุ์ด้วยปั๊มความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ปนิดา คำมี. 2553. ผลของวิธีการลดความชื้นด้วยการตากแดดต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วฝักยาว.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ประนอม ศรีสวัสดิ์. 2547. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์. ข้าวสารเมล็ดพืชปีที่ 10-11.

พิทักษ์ สิงห์ทองลา. 2550. การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการผลิตเมล็ดพันธุ์กะหล่ำปลีในจังหวัด
เชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เรวัต เลิศฤทัยโยธิน. 2541. ข้าวโพดในพฤกษศาสตร์พืชเศรษฐกิจ หน้า12-19. กรุงเทพฯ:
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรพงศ์ วิมลพันธุ์. 2537. การลดความชื้นวิธีต่างๆก่อนการนวดในการผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง
ที่ปลูกต้นฤดูฝน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ศานิตสวัสดิกาญจน์. 2550. การเก็บรักษาและระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยาของเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดเทียน
ที่ผลิตในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา. มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา.

สมบัติ ขอวิวัฒนา. 2529. **กรรมวิธีการอบแห้ง**. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรม
เกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 284 น.

สำนักเมล็ดพันธุ์ข้าว กรมการข้าว.2555. **มาตรฐานเมล็ดพันธุ์จำหน่าย**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
,กรุงเทพฯ.

อรพรรณ ตั้งขจันทรานนท์.2534. **พัฒนาการและความสามารถในการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์
ผักบ่งจิ้น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

A.N. Chandran, S. SubbaRao and Y.B.G. Varma, **Fluidized bed drying of solids**,
AIChE Journal 36, Vol. 36, Issue 1.,1990, p29–38.

Barbosa-Cannvas, G.V. and H. Vega-Merado. 1996. **Dehydration of Food**. Chapman &
Hall,New York. 330p

Brooker, Donald B., Fred W. Bakker-Arkema and Carl W. Hall.**Drying and Storage of
Grainsand Oilseeds**. Van Nostrand Reinhold, USA.

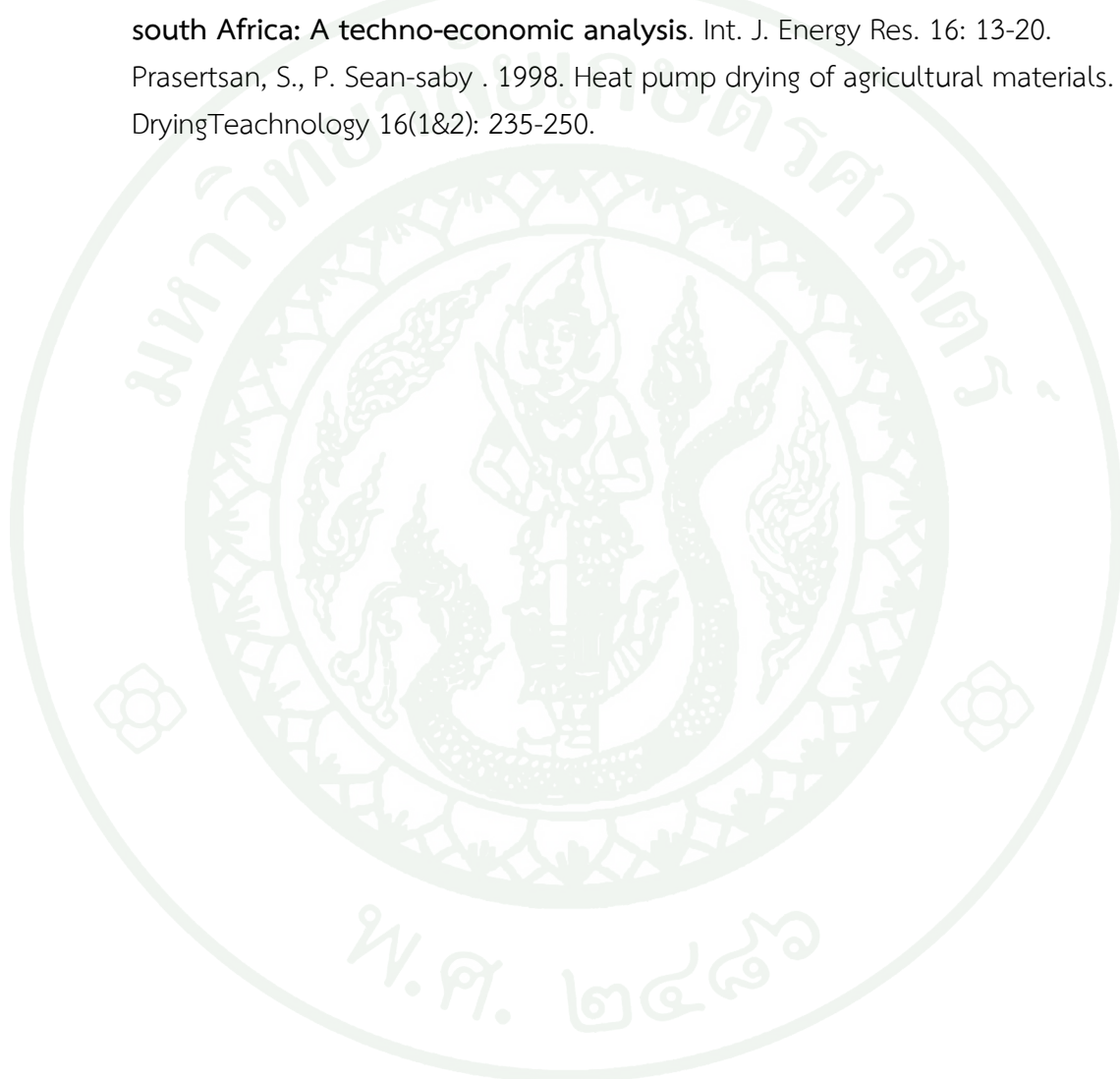
B.K. BALA. 1997. **Drying and storage of cereal grains**. Science Publishers Inc,
United States of America.

ChauKian Jon, Arun S. Mujumder, Chou Siaw Kiang, Ho Jual Choy and Mohammad
NuralAlamHawlder. 2000. Heat Pump Drying Systems: Principles, Applications
andPotential, P 95-134. In Development in Drying Volume II Drying of Food
and Agro-Product, ed. Arun S. Mujumdar and SirikalayaSuvachittanont.
KasetsartuniversityBangkok, Thailand.

Copeland. 1976. Principles of Seed Science and Technology. Burgers Publishing
Company, Minneapolis, Minisota.

Chompukeaw. 1996. **The effect of Nitrogen,Fugicide,Time and Method of Harvest
or Seed Quality in Super Sweetcorn**.(Zeamay.L.)cv.ILLINI Gold.
M.Agr.Sc.thesis,MasseyUniversity,Palmerston North, New Zealand.

- Guillermo H. Crapiste and Enrique Rotstein. 1997. **Design and Performance Evaluation of Dryers**, P 125-166. In Handbook of Food Engineering Practice, ed. Kenneth J.Valentas, Enrique Rotstein and R. Paul Singh. CRC Press, Boca Raton.
- Myer, J. P. and G. P. Greyvenstein. 1992. **The drying of grain with heat pumps in south Africa: A techno-economic analysis**. Int. J. Energy Res. 16: 13-20.
- Prasertsan, S., P. Sean-saby . 1998. Heat pump drying of agricultural materials. DryingTeachnology 16(1&2): 235-250.





ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ผลการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส
ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.217 เมตร ต่อ วินาที

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่1			การทดลองที่2			การทดลองที่3		
	น้ำหนัก	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนัก	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนัก	ความชื้น	พลังงาน
	(kg)	(%wb)	(Kwh)	(kg)	(%wb)	(Kwh)	(kg)	(%wb)	(Kwh)
0	200.0	15.7	0.00	200	15.6	0.00	200	15.5	0.00
2	198.6	15.0	1.55	198.0	14.6	1.60	197.8	14.4	1.65
4	197.4	14.4	1.50	196.0	13.6	1.65	195.8	13.4	1.60
6	196.2	13.8	1.60	194.2	12.7	1.68	194.0	12.5	1.60
8	195.0	13.2	1.60	192.6	11.9	1.60	192.2	11.6	1.58
10	193.8	12.6	1.68	191.2	11.2	1.57	190.6	10.8	1.60
12	192.6	12.0	1.68	189.8	10.5	1.55	189.2	10.1	1.63
14	191.6	11.5	1.60	188.6	9.9	1.60	187.8	9.4	1.58
16	190.6	11.0	1.58	187.4	9.3	1.60	186.6	8.8	1.55
18	189.6	10.5	1.50	186.2	8.7	1.63	185.8	8.4	1.50
20	188.6	10.0	1.58	185.4	8.3	1.65	185.2	8.1	1.60
22	187.6	9.5	1.60	184.8	8.0	1.68	184.6	7.8	1.63
24	186.6	9.0	1.67	184.2	7.7	1.60	184.0	7.5	1.60
26	185.6	8.5	1.56	183.6	7.5	1.58	183.6	7.3	1.58
28	184.6	8.0	1.55	183.2	7.4	1.60	183.2	7.1	1.57
30	183.8	7.6	1.60	182.6	7.2	1.60	183.0	7.0	1.58
32	183.0	7.2	1.65	182.2	7.1	1.60	182.8	6.9	1.60
34	182.4	6.9	1.65	181.8	6.9	1.60	182.6	6.8	1.58

ตารางผนวกที่ 2 ผลการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยบ่มความร้อนที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.254 เมตร ต่อ วินาที

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่1			การทดลองที่2			การทดลองที่3		
	น้ำหนัก (kg)	ความชื้น (%wb)	พลังงาน (Kwh)	น้ำหนัก (kg)	ความชื้น (%wb)	พลังงาน (Kwh)	น้ำหนัก (kg)	ความชื้น (%wb)	พลังงาน (Kwh)
0	200.0	15.6	0.00	200.0	15.7	0.00	200.0	15.6	0.00
2	198.4	14.8	1.65	198.4	14.9	1.67	198.4	14.8	1.70
4	197.0	14.1	1.60	196.8	14.1	1.70	197.0	14.1	1.65
6	195.6	13.4	1.65	195.4	13.4	1.68	195.6	13.4	1.60
8	194.4	12.8	1.70	194.0	12.7	1.69	194.2	12.7	1.64
10	193.2	12.2	1.68	193.0	12.2	1.70	193.2	12.2	1.67
12	192.0	11.6	1.59	191.8	11.6	1.72	192.0	11.6	1.70
14	190.8	11.0	1.60	190.6	11.0	1.70	190.8	11.0	1.65
16	189.6	10.4	1.60	189.6	10.5	1.73	189.8	10.5	1.73
18	188.6	9.9	1.65	188.4	9.9	1.70	188.6	9.9	1.70
20	187.6	9.4	1.63	187.4	9.4	1.65	187.6	9.4	1.67
22	186.6	8.9	1.60	186.4	8.9	1.67	186.6	8.9	1.70
24	185.6	8.4	1.63	185.6	8.5	1.70	185.8	8.5	1.70
26	184.8	8.0	1.67	184.8	8.1	1.65	184.8	8.0	1.68
28	184.0	7.6	1.60	184.0	7.7	1.68	184.0	7.6	1.68
30	183.2	7.2	1.65	183.2	7.3	1.70	183.4	7.3	1.70
32	182.4	6.8	1.63	182.8	6.9	1.65	182.6	6.9	1.68

ตารางผนวกที่ 6 ผลการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส
ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่1			การทดลองที่2			การทดลองที่3		
	น้ำหนัก (kg)	ความชื้น (%wb)	พลังงาน (Kwh)	น้ำหนัก (kg)	ความชื้น (%wb)	พลังงาน (Kwh)	น้ำหนัก (kg)	ความชื้น (%wb)	พลังงาน (Kwh)
0	200.0	15.5	0.00	200.0	15.7	0.00	200.0	15.5	0.00
2	197.6	14.3	1.97	197.6	14.5	1.90	197.6	14.3	1.95
4	195.2	13.1	1.95	195.2	13.3	2.00	195.2	13.1	2.00
6	193.0	12.0	1.97	193.0	12.2	1.95	193.0	12.0	1.90
8	190.8	10.9	2.00	190.8	11.1	1.93	190.8	10.9	1.95
10	188.8	9.9	1.95	188.8	10.1	1.85	188.8	9.9	1.95
12	187.2	9.1	1.97	187.0	9.2	1.88	187.0	9.0	2.00
14	185.6	8.3	1.95	185.2	8.3	1.90	185.2	8.1	1.95
16	184.2	7.6	2.00	183.6	7.5	1.95	183.8	7.4	2.00
18	182.8	6.9	1.97	182.2	6.8	2.00	182.6	6.8	1.97

ตารางผนวกที่ 9 ผลการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส
ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 เมตร ต่อ วินาที

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่1			การทดลองที่2			การทดลองที่3		
	น้ำหนัก (kg)	ความชื้น (%wb)	พลังงาน (Kwh)	น้ำหนัก (kg)	ความชื้น (%wb)	พลังงาน (Kwh)	น้ำหนัก (kg)	ความชื้น (%wb)	พลังงาน (Kwh)
0	200.0	15.6	0.00	200.0	15.4	0.00	200.0	15.4	0.00
2	196.8	14.0	2.10	196.8	13.8	2.25	196.6	13.7	2.20
4	193.8	12.5	2.15	193.9	12.3	2.10	193.6	12.2	2.10
6	190.8	11.0	2.20	190.8	10.8	2.00	190.2	10.5	2.10
8	188.0	9.6	2.20	187.8	9.4	2.20	187.8	9.3	2.15
10	185.2	8.2	2.18	185.2	8.0	2.25	185.0	7.9	2.20
12	182.6	6.9	2.25	182.6	6.7	2.15	182.4	6.6	2.25

ตารางผนวกที่ 10 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวโพด

เวลา (ชั่วโมง)	ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.217 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.254 m/s			ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.338 m/s		
	อุณหภูมิลมร้อน			อุณหภูมิลมร้อน			อุณหภูมิลมร้อน		
	38	43	48	38	43	48	38	43	48
0	15.6	15.6	15.8	15.6	15.6	15.6	15.5	15.6	15.5
2	14.7	14.6	14.6	14.8	14.5	14.4	14.6	14.4	13.8
4	13.8	13.6	13.5	14.1	13.4	13.1	13.8	13.2	12.3
6	13	12.7	12.4	13.4	12.4	11.9	13.0	12.1	10.8
8	12.2	11.9	11.3	12.7	11.5	10.9	12.2	11.0	9.4
10	11.5	11.1	10.4	12.2	10.6	9.8	11.5	10.0	8.0
12	10.9	10.4	9.5	11.6	9.7	8.7	10.8	9.1	6.7
14	10.3	9.7	8.7	11	8.9	7.7	10.2	8.2	
16	9.7	9	8.0	10.5	8.2	6.9	9.6	7.5	
18	9.2	8.4	7.4	9.9	7.6		9.0	6.8	
20	8.8	7.9	6.8	9.4	7.1		8.5		
22	8.4	7.4		8.9	6.8		8.0		
24	8.1	6.9		8.5			7.5		
26	7.8			8			7.2		
28	7.5			7.6			6.8		
30	7.3			7.3					
32	7.1			6.9					
34	6.9								

