

การออกแบบเครื่องอบแห้งขมิ้นชัน

Design of the Turmeric (*Curcuma longa* Linn.) Dryer

คำนำ

ขมิ้นชัน หรือขมิ้น (*Curcuma longa* Linn.) เป็นพืชเครื่องเทศชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเด่นคือมีสีเหลืองถึงส้ม และให้กลิ่นเฉพาะตัว นิยมใช้เป็นส่วนผสมในผงกะหรี่ (curry powder) ซึ่งจัดเป็นเครื่องปรุงรสที่นิยมบริโภคกันทั่วโลก จากคุณลักษณะดังกล่าวขมิ้นชันจึงเป็นพืชเครื่องเทศที่มีความสำคัญทางการค้าเป็นอันดับที่ 5 ของกลุ่มพืชเครื่องเทศจากประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รายงานว่าขมิ้นเป็นพืชเครื่องเทศที่สำคัญในทางการค้ารองจากพริกไทยและขิงตามลำดับ ขมิ้นเป็นพืชที่สามารถเพาะปลูกได้ดีทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ดังนั้นประเทศไทยจึงมีสภาพที่เหมาะสมสำหรับการปลูกขมิ้น การบริโภคในประเทศจะบริโภคในรูปแบบขมิ้นสด ขมิ้นผงและผลิตภัณฑ์ที่ใช้ขมิ้นผงเป็นส่วนผสม ตลาดต่างประเทศที่สำคัญของขมิ้นจากประเทศไทยคือ ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย สิงคโปร์ ฮองกง สหรัฐอเมริกา และเยอรมัน ต่างประเทศแบ่งลักษณะแ่งขมิ้นออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดนิ้วมือ มีคุณภาพดีที่สุดเป็นที่ต้องการมาก ชนิดทั้งเหง้าและชนิดแตกหัก สำหรับประเทศไทยเนื่องจากตลาดต่างประเทศไม่แน่นอน ผลิตผลส่วนใหญ่ใช้บริโภคภายในประเทศมีเพียงเล็กน้อยที่ส่งไปจำหน่ายต่างประเทศ ส่วนการนำเข้าก็มีบ้าง

ปัจจุบันแนวโน้มการใช้ขมิ้นชันแห้งมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากขณะนี้ประชาชนในประเทศพัฒนา นิยมบริโภคผงกะหรี่เครื่องเทศต่างๆ มากขึ้น นอกจากนี้ยังหันมาบริโภคผลิตภัณฑ์อีก ทำให้ความต้องการขมิ้นในตลาดโลกเพิ่มมากขึ้น การยืดอายุการเก็บรักษาขมิ้นชันจึงเป็นสิ่งสำคัญก่อนที่จะทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น งานวิจัยนี้จึงนำวิธีการอบแห้งมาใช้ในการยืดอายุขมิ้นชัน โดยใช้การอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเข้ามาช่วยในการออกแบบเครื่องอบแห้งขมิ้นชัน เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาโดยที่คุณค่าสารอาหารของขมิ้นชันไม่เปลี่ยนแปลง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งขมิ้นชัน
2. หาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของการอบแห้งขมิ้นชันที่มีผลต่อคุณภาพของขมิ้นผง
3. ศึกษาผลตอบแทนและค่าใช้จ่ายในเชิงเศรษฐศาสตร์

ตรวจเอกสาร

ขมิ้นชันหรือขมิ้นเป็นพืชล้มลุกในตระกูลขิงขีเบอร์ราซีอี (Zingiberaceae) สกุลเคอร์คิวมา (Curcuma) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Curcuma domestica* Valetton หรือ *Curcuma longa* Linnaeus ขมิ้นมีถิ่นกำเนิดในเอเชียใต้ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (พิทยา, 2529) และหมู่เกาะอินเดียนตะวันออกเฉียงใต้ (ส่วนวิจัยเกษตรกรรม ฝ่ายวิชาการธนาคารกสิกรไทย, 2530)

ขมิ้นมีลำต้นอยู่ใต้ดินซึ่งส่วนลำต้นใต้ดินแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนหัว (tuber) และส่วนเหง้า (rhizome) ซึ่งเกิดมาจากส่วนหัวจากเหง้าชุดแรกและจะมีเหง้าชุดที่สองเจริญแตกสาขาออกไปเรียกว่าแง่ง (finger หรือ daughter rhizome) เหง้าขมิ้นจะมีกลิ่นและรสชาติเฉพาะตัว เปลือกนอกมีสีน้ำตาลแต่เนื้อภายในมีสีส้มจัดเนื่องจากมีรงควัตถุสีเหลืองถึงส้มอยู่ในเนื้อเยื่อของลำต้นใต้ดิน ดังนั้นความสำคัญทางเศรษฐกิจของขมิ้นจะมีผลเนื่องมาจากสมบัติในการให้สีธรรมชาติมากกว่าสมบัติทางด้านกลิ่นรสชาติของพืชเครื่องเทศ (พิทยา, 2529)

1. องค์ประกอบของขมิ้นชัน

องค์ประกอบทางเคมีของขมิ้นส่วนใหญ่เป็นสตาร์ชและเยื่อใย แต่ปริมาณจะเล็กน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับพันธุ์ การเพาะปลูก ความแก่อ่อน และอายุการเก็บเกี่ยว โดยสตาร์ชจะเป็นส่วนของคาร์โบไฮเดรตในขมิ้นและจัดเป็นองค์ประกอบหลักของขมิ้น (Govindarajan, 1980) ในขมิ้นจะมีสตาร์ชอยู่ประมาณร้อยละ 40 - 50 ของน้ำหนักแห้ง (พิทยา, 2529) นอกจากนี้ประกอบด้วยโปรตีนไขมัน เยื่อใยและองค์ประกอบที่สำคัญ คือรงควัตถุที่ให้สีเหลือง ได้แก่ สารประกอบเคอร์คิวมินอยด์ (curcuminoid pigment) และน้ำมันหอมระเหย (Govindarajan, 1980)

องค์ประกอบทางโภชนาของขมิ้นแสดงดังตารางที่ 1 แต่โดยทั่วไปการบริโภคขมิ้นมักไม่คำนึงถึงคุณค่าทางโภชนา แต่จะคำนึงถึงการให้สีเหลืองและให้กลิ่นรสของพืชเครื่องเทศ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางโภชนาการของขมิ้นแห้ง 100 กรัม

Composition	USDA Handbook 8-2 (Ground) ^{1/}	ASTA ^{2/}
Water (grams)	11.36	6.0
Food energy (Kcal)	354	390
Protein (grams)	7.83	8.5
Fat (grams)	9.88	8.9
Carbohydrate (grams)	64.93	69.9
Ash (grams)	6.02	6.8
Calcium (grams)	0.182	0.2
Phosphorus (mg)	268	260
Sodium (mg)	38	10
Potassium (mg)	2525	2500
Iron (mg)	41.42	47.5
Thiamine (mg)	0.152	0.090
Riboflavin (mg)	0.233	0.190
Niacin (mg)	5.140	4.8
Ascorbic acid (mg)	25.85	50
Vitamin A activity (RE)	Trace	ND ^{3/}

^{1/} Composition of Foods: Spices and Herbs. USDA Agricultural Handbook 8-2. January 1977.

^{2/} The Nutritional Composition of Spices. ASTA Research Committee. February. 1977.

^{3/} ND = Not detected

ที่มา : Tainter และ Grenis (1993)

2. การแปรรูปขมิ้น (การเคี้ยวรี้งและการทำแห้ง)

ขมิ้นมักถูกนำไปใช้เป็นสารให้สีธรรมชาติ ซึ่งอาจอยู่ในรูปผง หรือสารทำละลาย การแปรรูปขมิ้นจะเริ่มจากการแยกส่วนเหง้าและส่วนแง่ออกจากกัน การล้างทำความสะอาดตามด้วยการเคี้ยวรี้งซึ่งควรทำภายใน 2 - 3 วันหลังจากการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ขมิ้นมีสีที่คงตัว (Govindarajan, 1980) นอกจากนี้การเคี้ยวรี้งยังมีวัตถุประสงค์เพื่อยับยั้งการงอกของขมิ้นในขณะเก็บรักษา ช่วยลดเวลาในการทำแห้ง (Purseglove และคณะ, 1981) และทำให้เกิดกลิ่นรสที่ดีในขมิ้น (Pruthi, 1980)

วิธีการเคียวรังที่เหมาะสมคือ วิธีที่ทำให้ขมิ้นที่ผ่านการเคียวรังและทำแห้งแล้วเกิดการสูญเสียปริมาณรงควัตถุและน้ำมันหอมระเหยต่ำที่สุด โดยวิธีการเคียวรังที่เหมาะสมที่สุดคือ การต้มขมิ้นในน้ำเป็นเวลา 1 ชม. ก่อนการทำแห้งซึ่งจะช่วยลดเวลาในการทำแห้งได้ รวมถึงการทำให้ขมิ้นมีสีสม่ำเสมอและทำให้ขมิ้นแห้งที่ได้มีลักษณะแข็ง เนื่องจากสตาร์ชเกิดเจลลาติน (Purseglove และคณะ, 1981) ขมิ้นที่นำมาเคียวรังอาจอยู่ในรูปเหง้า (rhizome หรือ bulb) หรือแง่ง (finger) แต่ต้องทำการแยกส่วนเหง้าและแง่งออกจากกันก่อนการเคียวรัง ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเคียวรังจะแตกต่างกันตามขนาดและความหนาของขมิ้น การเคียวรังจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีดีและสม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากการแพร่ของรงควัตถุสีเหลืองจาก oil cell แต่ละเซลล์ไปยังเนื้อเยื่อที่อยู่รอบข้าง และการใช้ด่างในการเคียวรังก็เพื่อให้สีของขมิ้นมีความเข้มมากขึ้น (Govindarajan, 1980)

การทำขมิ้นปกตินิยมใช้ทำแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Govindarajan, 1980) แต่ใช้เวลานานมากและมีปัญหาการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และสิ่งปนื้อต่าง ๆ จึงมีการนำอุปกรณ์ทำแห้งเข้ามาใช้เพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว อุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ทำแห้งต้องไม่สูงเกิน 65°C เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีและช่วยลดปัญหาการซีดจางของสีเนื่องจากการสัมผัสกับแสงอาทิตย์โดยตรงเป็นเวลานานในระหว่างการทำแห้ง โดยเฉพาะขมิ้นที่หั่นเป็นชิ้นก่อนการทำแห้ง (Purseglove และคณะ, 1981) ขมิ้นที่ได้ภายหลังการทำแห้งจะมีลักษณะแข็ง เปราะมีสีเหลืองสม่ำเสมอและมีลักษณะคล้ายเขาสัตว์ ขมิ้นแห้งควรมีปริมาณความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 5 และปริมาณผลผลิตขมิ้นแห้งที่มีความชื้นต่ำจะประมาณร้อยละ 20 (Govindarajan, 1980)

Said และ Hussain (1964) ทำการเคียวรังขมิ้นด้วยวิธีการต่าง ๆ คือการจุ่มแง่งขมิ้นในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 5 เป็นเวลา 5 min การต้มแง่งขมิ้นในน้ำเดือดเป็นเวลา 1 h และการอบในทรายร้อนเป็นเวลา 8 - 10 min พบว่าการเคียวรังโดยการอบในทรายร้อนเป็นเวลา 8 - 10 min จะให้ขมิ้นแห้งที่มีลักษณะดีกว่าวิธีอื่น ๆ คือให้สีเหลืองเข้มและมีกลิ่นดี และใช้เวลาในการทำแห้งเพียง 2 วันเท่านั้น วิธีการเคียวรังที่ให้ขมิ้นแห้งที่มีสีเหลืองและมีกลิ่นขมิ้นดีรองลงมาคือการต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 1 h ซึ่งจะใช้เวลาทำแห้ง 7 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ทำการเคียวรังขมิ้นโดยการอบในทรายร้อนที่เวลา 3, 6, 9, 12 และ 15 min และการต้มขมิ้นในน้ำเดือดเป็นเวลา 30, 60 และ 90 min จะพบว่าการเคียวรังโดยการอบในทรายร้อนจะใช้เวลาในการทำแห้งสั้นกว่าวิธีการต้มในน้ำเดือด และขมิ้นแห้งที่ได้จากขมิ้นที่อบในทรายร้อน 9 - 12 min จะมีรูปร่างดี มีกลิ่นและสีดีกว่าขมิ้นที่ผ่านการเคียวรังด้วยวิธีอื่นๆ ในขณะที่การเคียวรังโดย

การต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 30 min จะให้ปริมาณผลผลิตไขมันแห้งสูงที่สุดคือร้อยละ 20 และให้ผลิตภัณฑ์ไขมันแห้งที่มีสีเหลืองสว่าง มีผิวเรียบและมีกลิ่นของไขมันดี

Krishnamurthy และคณะ (1975) ทำการเคียวรีงไขมันด้วยวิธีการต่างๆ คือ การต้มในน้ำ การพ่นด้วยไอน้ำร่วมกับการปอกเปลือกและการหั่นเป็นท่อน แล้วทำแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า การเคียวรีงจะช่วยลดเวลาในการทำแห้งไขมันได้เมื่อเปรียบเทียบกับไขมันที่ไม่ผ่านการเคียวรีง ต่อมาในปี 1977 Krishnamurthy ได้ทำการเคียวรีงไขมันด้วยวิธีการต่างๆ กันคือ การต้มในน้ำเป็นเวลา 1 h และ 3 h การพ่นด้วยไอน้ำ 5 min จากนั้นทำแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และอุปกรณ์ทำแห้ง แล้วศึกษาผลกระทบของวิธีการดังกล่าวต่อองค์ประกอบทางเคมีของไขมันทั้งปริมาณน้ำมันหอมระเหยและปริมาณรงควัตถุ พบว่าเคียวรีงและการทำแห้งด้วยวิธีการต่างๆ ไม่มีผลต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยและปริมาณรงควัตถุ โดยไขมันแห้งที่ได้มีปริมาณน้ำมันหอมระเหยประมาณร้อยละ 3 และปริมาณรงควัตถุประมาณร้อยละ 2-3

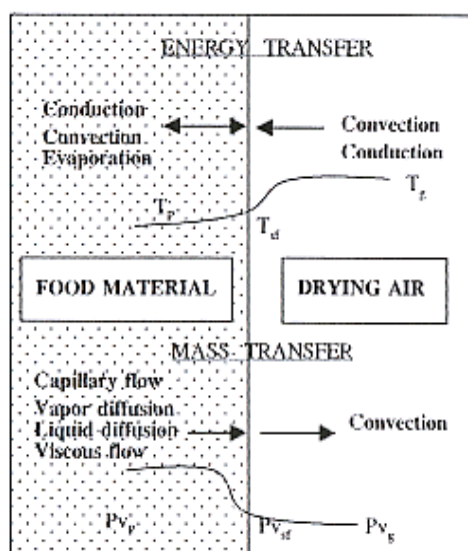
Sampathu และคณะ (1988) ทำการเคียวรีงไขมันโดยใช้วิธีการแบบดั้งเดิม การต้มในน้ำและการต้มในสารละลายต่างเจือจางร่วมกับการบดและการหั่นไขมันเป็นท่อน และศึกษาผลของการเคียวรีงต่อองค์ประกอบทางเคมีและการทำแห้งไขมัน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และใช้อุปกรณ์ทำแห้งที่ $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ พบว่าการเคียวรีงโดยการต้มในน้ำและสารละลายต่างเจือจางของโซเดียมไบคาร์บอเนต ร้อยละ 0.1 จะช่วยลดเวลาในการทำแห้งได้ ในการทำแห้งทั้งสองวิธี และการหั่นจะช่วยลดเวลาในการทำแห้งลงได้อีก โดยการทำแห้งแบบใช้อุปกรณ์ทำแห้งจะเร็วกว่าแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนผลที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีคือปริมาณน้ำมันหอมระเหย และรงควัตถุพบว่าการเคียวรีงด้วยวิธีการต่างๆ ไม่มีผลต่อปริมาณองค์ประกอบทั้งสองดังกล่าว โดยจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 3 - 4 แต่ในกรณีการเคียวรีงโดยการต้มในสารละลายต่างเจือจางจะทำให้ไขมันที่ได้มีปริมาณเคอร์คิวมินต่ำกว่าตัวอย่างอื่นๆ เพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากรงควัตถุดังกล่าวมีความไวต่อค่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุได้

สายสนม และวราภา (1993) พบว่าการเคียวรีงไขมันโดยการต้มในน้ำเดือด 1, 2 และ 3 h การต้มในด่างอ่อนแอลเซียมออกไซด์ร้อยละ 1 เป็นเวลา 3 h และโพแทสเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 2.5 เป็นเวลา 1 h แล้วทำแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อนที่ 70°C จะช่วยลดเวลาในการทำแห้งลงได้เกือบ 4 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับไขมันที่ไม่ผ่านการเคียวรีง และเวลาการต้มในน้ำที่ต่างกันไม่มีผลต่อค่าสีปรากฏคือ ไขมันผงมีค่า L ค่า a และค่า b ใกล้เคียงกัน ส่วนสีของไขมันผงที่ต้มในด่างอ่อนพบว่าค่าสี

เหลือง (b) ลดลงแต่มีค่าสีแดง (a) เพิ่มขึ้น ส่วนสีของขมิ้นผงที่ไม่ผ่านการเคียวรังจะมีสีเหลืองสูงกว่าและมีค่าความสว่าง (L) สูงกว่าเล็กน้อย

3. พื้นฐานการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นการดึงความชื้นซึ่งก็คือปริมาณน้ำออกจากเนื้อวัสดุโดยมีจุดประสงค์เพื่อความเหมาะสมในการเก็บรักษาก็สามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสียหายเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และประหยัดเนื้อที่เนื่องจากการอบแห้งทำให้ปริมาณและน้ำหนักที่ลดลง การอบแห้งโดยทั่วไปมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังการอบแห้ง ทั้งในเรื่องของสี กลิ่น และรสชาติ ระหว่างการอบแห้งมีกระบวนการถ่ายเทเกิดขึ้นคือ การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกไปยังผิวหน้าของวัสดุอาหาร และการถ่ายเทมวลจากข้างในไปยังผิวของวัสดุอาหารเนื่องจากการถ่ายเทความชื้นสู่สิ่งแวดล้อม (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 Schematic of the food drying phenomenon

ที่มา : Guillermo et al. (1997)

พลังงานถ่ายเทสู่วัสดุอบแห้งโดย

1. การพาความร้อน เกิดขึ้นเมื่อพลังงานสำหรับการระเหยได้รับจากกระแสน้ำอากาศร้อนที่ไหลผ่านวัสดุ ดังเช่น การอบแห้งแบบถาด, belt-conveyor, flash, fluid-bed และ spray drying
2. การนำความร้อน เกิดขึ้นเมื่อวัสดุสัมผัสกับผิวร้อนดังในกรณีของ เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหรือ rotary dryer

การส่งผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นโดยการนำเนื่องจาก internal gradient ของอุณหภูมิและมีเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการพาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้น การเคลื่อนที่ของความชื้นของวัสดุอาหารอาจเกิดขึ้นจากกลไกการถ่ายเทที่ต่างกันคือ

1. Capillary flow เนื่องจาก gradients ของ capillary suction pressure
2. การแพร่กระจายของเหลวเนื่องจาก gradient ของความเข้มข้น
3. การแพร่กระจายของไอเนื่องจาก partial vapor-pressure gradients
4. Viscous flow เนื่องจาก total pressure gradient ซึ่งมีสาเหตุมาจากความดันภายนอกหรืออุณหภูมิที่สูง

การถ่ายเทมวลสารจากผลิตภัณฑ์ไปสู่สิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นหลักๆ เนื่องจากการพาความร้อน เนื่องมาจากความแตกต่างของ partial vapor pressure ที่ boundary layer ในบริเวณรอยต่อของอากาศและผลิตภัณฑ์ การระเหยโดยตรงเกิดขึ้นเมื่อความดันไอในผิวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ อย่างเช่นในกรณีของ vacuum drying และ freeze drying

การอบแห้งแบบการพาความร้อน สภาวะขอบสำหรับ heat flux, q_c และอัตราการระเหย n_w จะอยู่ในรูป

$$\text{Heat transfer} \longrightarrow q_c = h_g (T_{sf} - T_g) \quad (1)$$

$$\text{Mass transfer} \longrightarrow n_w = k_g (P_{vsf} - P_{vg}) \quad (2)$$

เมื่อ h_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
 k_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

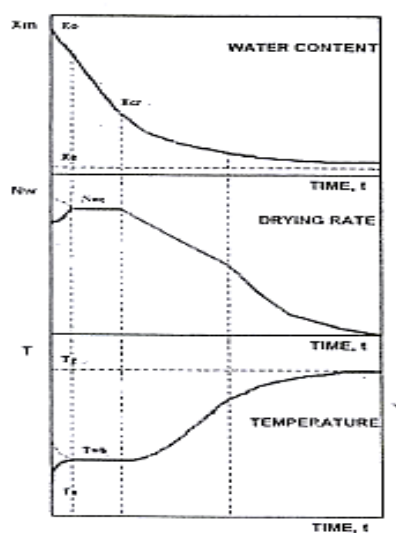
T	คือ	อุณหภูมิ
P _v	คือ	water vapor partial pressure

3.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics)

ข้อมูลการอบแห้งส่วนใหญ่ได้มาจากการทดลองหรือได้มาจากการทำนายด้วยแบบจำลองพฤติกรรมของการอบแห้งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมักแสดงอยู่ในรูปของ Drying curve หรือ drying rate curve อัตราการอบแห้ง n_w นิยามคือ

$$n_w = -\frac{m_s}{A_s} \frac{dX_m}{dt} = -\frac{\rho_s}{a_v} \frac{dX_m}{dt} \quad (3)$$

เมื่อ	m_s	คือ	มวลของวัสดุแห้ง
	A_s	คือ	พื้นที่ผิว
	ρ_s	คือ	ความหนาแน่นของมวลแห้ง
	a_v	คือ	พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตร



ภาพที่ 2 Characteristic behavior for convective drying

ที่มา : Guillermo et al. (1997)

Drying curve สามารถที่จะแบ่งเป็นบริเวณที่แตกต่างกัน คือ ช่วงเริ่มต้นซึ่งการระเหยเกิดขึ้นที่ผิวและอุณหภูมิจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นอุณหภูมิ wet bulb ซึ่งโดยทั่วไปจะเรียกว่าเป็นช่วงการอบแห้งคงที่ ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่จะไม่มีพฤติกรรมนี้เนื่องจากไม่มีปริมาณน้ำอิสระที่ผิวหน้า จุดที่เกิดอัตราการอบแห้งลดลงจะเริ่มจุดซึ่งเรียกว่า ความชื้นวิกฤต X_c ระหว่างช่วงนี้ปริมาณที่ผิวหน้าลดลงและอุณหภูมิที่ผิวหน้าเพิ่มสูงขึ้นเหนืออุณหภูมิ wet bulb เกิดการพัฒนา non-flat internal moisture and temperature profiles โชนการระเหยจะย้ายจากผิวหน้าเข้าสู่เนื้อวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะการอบแห้งและคุณสมบัติของวัสดุ

ขณะที่ความชื้นลดลง ความต้านทานภายในสำหรับการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นและชัดเจนขึ้นเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นประมาณอุณหภูมิ dry bulb ทำให้เกิดช่วงที่สองอัตราการอบแห้งลดลง กลไกการควบคุมก็คือ อัตราการเคลื่อนที่ความชื้นภายในวัสดุ โดยมีการแพร่กระจายของไอน้ำเป็นหลัก ปริมาณความชื้นมาถึง X_c ซึ่งเป็นค่าสมดุลที่ relative humidity และ อุณหภูมิของอากาศ

3.2 การอบแห้งที่ควบคุมจากภายนอก (External controlled drying)

กระบวนการอบแห้งจะถูกควบคุมจากภายนอกถ้าทั้งความต้านทานการถ่ายเทความร้อนและมวลสารอยู่ที่ด้านอากาศ ในทางปฏิบัติการควบคุมภายนอกจะเกิดขึ้นเมื่อค่า Biot number น้อยกว่า 0.1 ภายใต้สถานะนี้ profiles ของอุณหภูมิและความชื้นภายในวัสดุเป็นแผ่นราบ กระบวนการนี้เกิดจากการระเหยน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุและอาจทำนายได้ด้วยสมการการถ่ายเทความร้อนและมวลสารคือ

$$m_s \frac{dX_m}{dt} = k_g A_s (P_{vs} - P_{vg}) \quad (4)$$

$$m_s C_p \frac{dT}{dt} = h_g A_s (T_g - T_s) = k_g (P_{vs} - P_{vg}) A_s \Delta H_v \quad (5)$$

เมื่อ	C_p	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์
	ΔH	คือ	ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

เมื่อมาถึงสถานะ wet bulb สมการ (3) และ (4) สามารถประกอบเข้าด้วยกันเป็นสมการสำหรับ wet bulb thermometer

$$\frac{dX_m}{dt} = \frac{k_g A_s (P_{vwp} - P_{vg})}{m_s} = \frac{h_g A_s (T_g - T_{wb})}{m_s \Delta H} \quad (6)$$

4. การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน

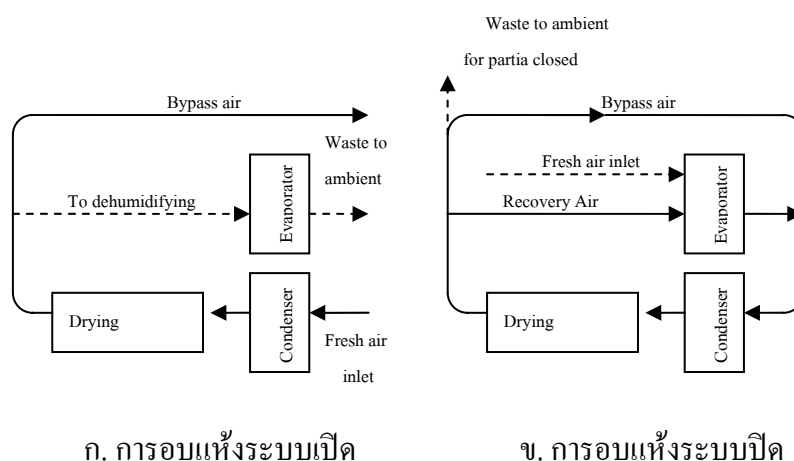
เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ส่วนของห้องอบแห้งซึ่งต้องมีการออกแบบให้มีการกระจายของอากาศอบแห้งที่ดีมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งห้องอบแห้ง และระบบปั๊มความร้อนซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ เครื่องอัดไอ เครื่องควบแน่น วาล์วขยาย และเครื่องทำระเหย การอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ระบบ ดังนี้คือ

1. การอบแห้งระบบเปิด (Open system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้วทำให้มีความชื้นสูงขึ้น จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศทั้งหมด ซึ่งการอบแห้งระบบเปิดนี้จะมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนในการอุ่นอากาศเพียงอย่างเดียวหรืออาจมีการลดความชื้นอากาศก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศก็ได้

2. การอบแห้งระบบปิดบางส่วน (Partial closed system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้ว จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศบางส่วน โดยคำนึงถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างอากาศที่ปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศกับอากาศร้อนที่นำกลับมาเพื่อใช้ผสมกับอากาศใหม่สำหรับใช้อบแห้งต่อไป ซึ่งการอบแห้งระบบปิดบางส่วนนี้จะมีการใช้ประโยชน์จากปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและการลดความชื้น

3. การอบแห้งระบบปิด (Closed system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้ว จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด ซึ่งอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกจะถูกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนหนึ่งจะนำมาผสมกับอากาศส่วนแรกที่ผ่านการลดความชื้นที่เครื่องทำระเหยแล้วซึ่งอัตราส่วนของอากาศทั้งสองนี้จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับอากาศผสมที่ได้และความสามารถในการทำงานของเครื่องทำระเหย การอบแห้งระบบปิดนี้จะมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนทั้งในการอุ่นอากาศและการลดความชื้น

จากการอบแห้งทั้งสามระบบจะพบว่าในระบบปิดมีการใช้ประโยชน์จากปั๊มความร้อนทั้งในการอุ่นอากาศและการลดความชื้น (ภาพที่ 3) จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอื่นเนื่องจากสามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งสองส่วน แต่ข้อเสียคือเนื่องจากต้องมีการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งไม่ให้สูงเกินความต้องการที่กำหนดไว้ สภาวะภายในห้องอบแห้งจึงต้องอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน ซึ่งจากกฎเทอร์โมไดนามิกส์ข้อที่หนึ่งจะพบว่าไม่สามารถทำได้เนื่องจากมีงานภายนอกซึ่งเป็นงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอและพัดลมใส่ให้กับระบบตลอดเวลาในรูปความร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องควบแน่นตัวนอกเพื่อระบายความร้อนส่วนเกินออกสู่บรรยากาศแวดล้อมจึงทำให้มีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งให้กับสิ่งแวดล้อม ส่วนการอบแห้งระบบเปิดนั้นจะมีข้อคือสามารถทำอุณหภูมิอากาศอบแห้งได้สูงกว่าระบบปิดเนื่องจากอากาศภายนอกทั้งหมดจะถูกทำให้ร้อนขึ้นที่เครื่องควบแน่นโดยไม่ถูกลดความชื้นที่เครื่องทำระเหยก่อนการอบแห้งแต่มีข้อเสียคือเนื่องจากการนำอากาศภายนอกมาใช้ดังนั้นสภาวะของอากาศแวดล้อมภายนอกคือ ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน โดยเฉพาะในกรณีที่อากาศภายนอกมีความชื้นสูงซึ่งจะทำให้ความสามารถในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนลดลงได้ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนไม่ว่าจะเป็นแบบใดก็ตามก็ยังคงมีความสามารถในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งลมร้อนโดยทั่วไปที่ใช้ขดลวดไฟฟ้า น้ำมันหรือก๊าซเป็นเชื้อเพลิง (Prasertsan and Sean-saby, 1998)

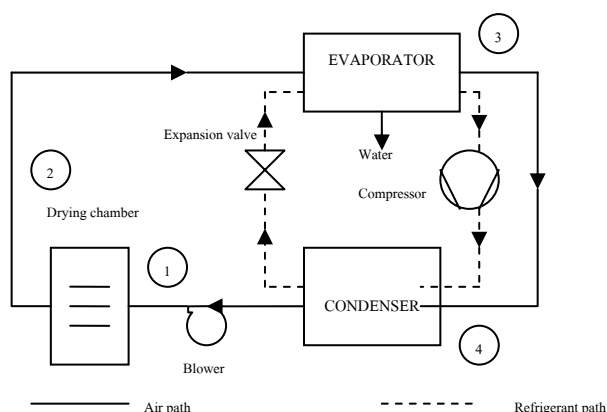


ภาพที่ 3 แสดงวงจรอากาศของการอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

เนื่องจากความต้องการให้เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสามารถทำงานได้ที่สภาวะการทำงานที่กว้างขึ้นเพื่อทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกันจึงมีการเพิ่มอุปกรณ์เสริม เช่น เพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งด้วยการติดตั้ง และเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านการใช้พลังงานโดยชุดกลักความร้อน

4.1 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

การทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแสดงในภาพที่ 4 โดยอากาศอบแห้งจะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง 1 อากาศได้รับความชื้นจากวัตถุเป็นอากาศร้อนชื้นและออกจากห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง 2 และเข้าสู่เครื่องทำระเหย (Evaporator) เพื่อทำการลดความชื้นโดยการควบแน่นน้ำออกจากอากาศ กระบวนการจาก 2-3 ความร้อนแฝงของการระเหยจะถูกใช้ในการระเหยสารทำความเย็นภายในเครื่องทำระเหย สารทำความเย็นจะถูกอัดด้วยเครื่องอัดไอ (Compressor) ทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงแล้วส่งต่อไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) อากาศเย็นที่ผ่านการลดความชื้นจะได้รับความร้อนคืนกลับเมื่อผ่านเครื่องควบแน่นจากตำแหน่ง 4-1 ส่วนสารทำความเย็นก็จะไหลจากเครื่องควบแน่นสู่เครื่องทำระเหยโดยผ่านวาล์วขยายเพื่อทำการลดความดันให้ต่ำลง



ภาพที่ 4 แสดงหลักการทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา : ดัดแปลงจาก Chua et al. (2000)

4.2 การประเมินสมรรถนะ

4.2.1 ประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance, COP) ซึ่งหาได้จาก

$$\text{COP} = \frac{\text{useful heat output}}{\text{power input}} \quad (7)$$

ค่าประสิทธิภาพสูงสุดทางทฤษฎีของปั๊มความร้อนคือ Carnot efficiency ซึ่งหาได้จาก

$$\text{COP}_{\text{carnot}} = \frac{T_{\text{condensar}}}{T_{\text{condenser}} - T_{\text{evaporator}}} \quad (8)$$

ซึ่งค่า ประสิทธิภาพการใช้งานจะมีค่าประมาณ 40 ถึง 50% ของค่าทางทฤษฎี Chua et al. (2000)

4.2.2 ประสิทธิภาพทางด้านการอบแห้งแบ่งสามารถพิจารณาได้จาก

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คัดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง คือ

$$\text{DR} = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (9)$$

$$\text{DR} = \frac{M_i - M_f}{t} \quad (10)$$

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมดตลอดการอบแห้ง

$$\text{SMER} = \frac{W_i - W_f}{P_c} \quad (11)$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งเป็นค่าส่วนกลับของ SMER

$$SEC = \frac{3.6P_e}{W_i - W_f} \quad (12)$$

อัตราการควบแน่น (Moisture Extraction Rate, MER) คือปริมาณน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหยต่อเวลาที่ใช้อบแห้ง

$$MER = \frac{M_{wc}}{t} \quad (13)$$

เมื่อ	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง, kg/hr หรือ %db/hr
	W	คือ	น้ำหนักของวัสดุ, kg
	M	คือ	ความชื้นวัสดุ, %db
	t	คือ	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, hr
	SMER	คือ	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, kJ/kWh
	P _e	คือ	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh
	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/h
	MER	คือ	อัตราการควบแน่นน้ำที่เครื่องทำระเหย, kg/h

ตัวห้อย

i	คือ	ก่อนอบแห้ง
f	คือ	หลังอบแห้ง
wc	คือ	ควบแน่นน้ำ

Barbosa-Canovas and Vega-Merado (1996) กล่าวว่าเครื่องอบแห้งแบบตู้ (Cabinet dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเป็นชั้น (Bed dryer) จะพบมากในการอบแห้งเมล็ดพืช ผัก และผลไม้ โดยมีทั้งแบบที่เป็นวงจร แบบกึ่งต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่อง ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและปริมาณการอบแห้งเป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าหากใช้เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำ (Steam dryer) และปั๊มความ

ร้อน จะช่วยรักษาคุณภาพสีของวัสดุเกษตรได้ดีและมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งทั้งสองชนิดข้างต้น

Clements และคณะ (1993) ได้ทำการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องด้วยปั๊มความร้อนซึ่งใช้สารทำความเย็น R12 โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการอบแห้งวัสดุประเภทยาง จากการศึกษาพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก ได้ค่า SMER (Specific moisture extraction rate) อยู่ระหว่าง 1.5-2.5 kg/kWh สามารถอบแห้งยางได้ประมาณ 20 kg/h นอกจากนี้ยังพบว่าค่า COP จะเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านเข้าเครื่องทำระเหย อัตราส่วน Bypass air ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 60-70% ของอัตราการไหลรวมของอัตราการไหลรวมของอากาศภายในระบบ สำหรับการทดลองนี้มีห้องอบแห้งขนาด $1 \times 4.1 \times 0.5 \text{ m}^3$ จะมีอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมเท่ากับ 0.63 kg/h

Meyer and Greyvenstein (1992) ได้ทำการศึกษานำเอาระบบปั๊มความร้อนมาใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืช แทนที่การใช้พลังงานจากขดลวดความร้อนและเชื้อเพลิงดีเซล โดยทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายพลังงานและต้นทุนของเครื่องจักร จะพบว่าพลังงานจากปั๊มความร้อนมีข้อได้เปรียบเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่าพลังงานรูปแบบอื่น แต่เนื่องจากเมล็ดพืชมีการอบแห้งน้อยครั้งต่อปี ดังนั้นจึงควรนำระบบปั๊มความร้อนไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นร่วมด้วย

Pendyala and Patwardhan (1990) ได้ทำการศึกษารอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนแบบอัดไอทำการทดลองด้วยสารทำความเย็น R11 และ R12 โดยมีขนาดของห้องอบแห้งเท่ากับ $2.1 \times 1.5 \times 0.6 \text{ m}^3$ ภายในระบบประกอบด้วย ขดลวดความร้อนสองชุด ชุดแรกใช้อุ่นอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งมีขนาด 6 kW และชุดที่สองใช้เพิ่มอุณหภูมิอากาศมีขนาด 3 kW ส่วนพัดลมจะมีอยู่สามชุด ชุดแรกเป็นพัดลมหลักมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร $1.31 \text{ m}^3/\text{s}$ ชุดที่สองเป็นพัดลมเป่าอากาศผ่านเครื่องควบแน่นมีอัตราการไหล $0.33 \text{ m}^3/\text{s}$ และชุดสุดท้ายเป็นพัดลมสำหรับเป่าอากาศ Bypass มีอัตราการไหล $0.29 \text{ m}^3/\text{s}$ ทำการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้งสูง 120°C ด้วยสารทำความเย็น R11 และที่อุณหภูมิอบแห้ง 75°C ด้วยสารทำความเย็น R12 จากผลการทดลองพบว่าค่า COP ของ R11 เท่ากับ 3.5 และค่า COP ของ R12 เท่ากับ 2.5 โดยมีค่า COP จะเปลี่ยนแปลงตามความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย และจะมีค่าต่ำลงเมื่อเปิดขดลวดความร้อนสำหรับค่า SEC (Specific energy consumption) ของ R11 เท่ากับ 3.5 MJ/kg และค่า SEC ของ R12

เท่ากับ 1.8 MJ/kg ความเร็วของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยที่เหมาะสมเท่ากับ 1.4 m/s จึงจะได้ค่า SEC ต่ำสุด

Poduval and Murthy (1992) ได้ศึกษาสมรรถนะของการลดความชื้นอากาศด้วยปั๊มความร้อนแบบอัดไอซึ่งใช้สารทำความเย็น R114 ร่วมกับการอุ่นอากาศด้วยขดลวดความร้อนโดยจำลองกระบวนการอบแห้งขึ้นในอุโมงค์ลมระบบปิด เพื่อศึกษาอิทธิพลของการอุ่นอากาศก่อนก่อนเข้าเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย จากการทดลองจะได้ค่า COP ของระบบอยู่ในช่วง 2-3 และพบว่าค่า COP จะลดลงเมื่อระบบมีการใช้พลังงานความร้อนจากการอุ่นอากาศร่วมด้วย เนื่องจากวัสดุบางชนิดต้องการอุณหภูมิในการอบแห้งสูง

Prasertsan and Sean-saby (1998) ได้ทดลองอบแห้งวัสดุเกษตรด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอซึ่งใช้สารทำความเย็น R22 มีอุณหภูมิอบแห้งในช่วง 50-60 °C เครื่องอบแห้งนี้สามารถทำงานได้ทั้งระบบเปิดและระบบปิดบางส่วน โดยในเบื้องต้นทำการอบแห้งไม้ยางซึ่งมีขนาด 1×1 inch², 2×2 inch² และ 3×3 inch² ความยาว 1 m ทำการทดลองทั้งระบบเปิดและระบบปิดบางส่วนระบบละ 2 การทดลอง ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่บริเวณชั้นล่างสูงกว่าบริเวณชั้นบนในขณะที่ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) ที่บริเวณชั้นบนสุดสูงกว่าค่า MER เฉลี่ยสูงสุด 2.854 kg/h ค่า SMER เฉลี่ยของการอบแห้งไม้ยางอยู่ที่ 0.572 kg/kWh นอกจากนี้ยังพบว่าเครื่องอบแห้งที่ระบบเปิดมีประสิทธิภาพมากกว่าการอบแห้งที่ระบบปิดบางส่วน

Zylla และคณะ (1982) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาปั๊มความร้อนมาใช้ในการอบแห้งและระบบการลดความชื้น โดยทดสอบระบบการอบแห้งด้วยลมร้อน 5 รูปแบบ คือ 1.แบบปล่อยลมทิ้งสู่บรรยากาศ 2.แบบนำลมร้อนกลับมาช่วยอุ่นอากาศ 3.แบบใช้ปั๊มความร้อนอุ่นอากาศ 4.แบบใช้ปั๊มความร้อนอุ่นอากาศร่วมกับขดลวดความร้อน และ 5.แบบลดความชื้นอากาศด้วยปั๊มความร้อน จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานด้วยค่า SPC (Specific power consumption) และค่า PEC (Primary energy consumption) พบว่าการใช้ปั๊มความร้อนลดความชื้นอากาศในแบบที่ 5 ซึ่งเป็นระบบปิด จะมีค่า SPC และ PEC ที่ต่ำกว่าแบบอื่นๆ หรือกล่าวได้ว่าใช้พลังงานน้อยกว่าในการระเหยน้ำปริมาณเท่ากัน ดังนั้นจึงเป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานมากที่สุด นอกจากนี้ได้ข้อสรุปว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่ำสุดที่เหมาะสมกับเครื่องอบแห้งอยู่ที่ 30%

ฐานิตย์ และคณะ (2542) ได้ออกแบบสร้าง และประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนเพื่อเป็นเครื่องต้นแบบในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งเครื่องสามารถทำงานได้ทั้งระบบปิดและระบบเปิด ทำการทดสอบเฉพาะระบบปิดโดยใช้มะละกอแช่อิ่มเป็นวัสดุอบแห้ง ซึ่งมีน้ำหนักเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 600-700 kg การอบแห้งแบ่งเป็นสามช่วงคือ ช่วงแรก อบแห้งมะละกอชิ้นใหญ่ ขนาดประมาณ $11.5 \times 6.5 \times 1.7 \text{ cm}^3$ จากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 83-86 %db จนถึงความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 31-37 %db ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 19 h ช่วงที่สอง นำมะละกอสองแรกมาลดขนาดลงเป็น $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ cm}^3$ โดยมีการพรมน้ำลงบนมะละกอเพื่อความสะดวกในการหั่น ชี้นมะละกอที่หั่นแล้วถูกนำมาเรียงซ้อนกันเนื่องจากพื้นที่ถาดมีจำกัด แล้วนำไปอบจนความชื้นลดลงเหลือ 17-22 %db ใช้เวลาประมาณ 9 h จากนั้นนำไปคลุกน้ำตาลทรายบดละเอียด ช่วงที่สาม นำมะละกอจากช่วงที่สองมาอบจนเหลือความชื้นสุดท้าย 12-14 %db ใช้เวลาประมาณ 4 h รวมเวลาอบแห้งทั้งสิ้น 32 ชม. คุณภาพของมะละกอแช่อิ่มแห้งในด้านสีอยู่ในเกณฑ์ที่ดี พลังงานที่ใช้ทั้งหมดค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการอบแห้ง ซึ่งการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งสามารถทำอัตราการอบแห้งและค่า SMER เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ $9.34 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ และ $0.732 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kW h}$ ตามลำดับ ค่า MER เฉลี่ยสูงสุด 9.21 kg/h ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยต่ำสุดในการทดลองที่สามมีค่าเท่ากับ 4.92 MJ/kg และค่า $(\text{COP}_{\text{hp}})_{\text{sys}}$ มีค่าระหว่าง 4.2-4.9 ในขณะที่ $(\text{COP}_{\text{hp}})_{\text{used}}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.3-3.8

ประทาน (2539) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอซึ่งใช้สารทำความเย็น R22 ด้วยการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มภายในเครื่องอบแห้งระบบปิด ทำการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 0.45 kg/s อัตราส่วนอากาศ Bypass 63% โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองช่วง ในช่วงแรกอบแห้งที่ชี้นมะละกอขนาด $6.35 \times 15 \times 2.54 \text{ cm}^3$ ความชื้นเริ่มต้น 74%db และช่วงที่สองนำมะละกอลดขนาดเป็น $0.98 \times 0.98 \times 0.98 \text{ cm}^3$ แล้วนำไปอบต่อจนได้ความชื้นสุดท้าย 23 %db พบว่ามีอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานเท่ากับ $9.93 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ และมีค่า SMER เท่ากับ $0.363 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kW h}$ ที่อัตราการไหลของอากาศจำเพาะต่ำสุด $21.42 \text{ kg/h-kg}_{\text{dry product}}$ ได้ค่า COP ของปั๊มความร้อนอยู่ระหว่าง 3.71-3.85 ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการอบแห้งทั้งหมด $12.8 \text{ bath/kg}_{\text{water}}$ แบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน $5.3 \text{ bath/kg}_{\text{water}}$ ค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษา $1.4 \text{ bath/kg}_{\text{water}}$ และค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง $6.1 \text{ bath/kg}_{\text{water}}$

สมยศและสุทธิศักดิ์ (2543) ได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนซึ่งทำงานเป็นแบบระบบปิด โดยนำชุดกักความร้อนมาช่วยลดความชื้นและการคืนความร้อนกลับของ

อากาศ เครื่องอบประกอบด้วย ห้องอบขนาด $0.65 \times 0.58 \times 0.55 \text{ m}^3$ ภายในบรรจุภัณฑ์ได้ 8 ถาด มีพื้นที่ใช้งาน 2.5 m^2 ใช้ระบบปั๊มความร้อนขนาดหนึ่งตันความเย็นและชุดกลักความร้อนขนาด 1.6 kW การทำงานของเครื่องเป็นระบบปิดมีอุณหภูมิอบแห้ง 50°C สมรรถนะจากการระเหยน้ำจำนวน 4 กิโลกรัม ที่อัตราการไหลอากาศ 0.363, 0.447 และ 0.536 kg/s อัตราส่วนอากาศBypass 60-67% เป็นเวลา 3 ชม. พบว่าค่า SMER (Specific Moisture Extraction Rate) ของระบบอยู่ในช่วง 0.330-0.3338 kg/kWh ค่า MER (Moisture Extraction Rate) ทำได้สูงสุด 0.590 kg/h และค่า COP (Coefficient of Performance) ของระบบปั๊มความร้อนอยู่ในช่วง 3.31-4.09 สำหรับสัมประสิทธิ์กำลังความร้อนอยู่ในช่วง 0.194-0.212 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจากการอบแห้งเห็ดฟางเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $0.544\text{-}0.568 \text{ kg/s}$ อัตราส่วนอากาศ Bypass ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 65.42-67.82% อัตราการอบแห้งตลอดการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง $0.530\text{-}1.019 \text{ kg/h}$ ต่อมา สมยศและเทวรัตน์ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการศึกษาระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่พัฒนาขึ้นมานี้โดยใช้หลักการสมดุลมวลสารและพลังงานของอากาศและผลิตภัณฑ์บนปริมาตรควบคุมร่วมกับกระบวนการอุณหพลศาสตร์ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง จากนั้นทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ HPD 1.0 เพื่อใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์ และทำการพิสูจน์แบบจำลองโดยการทดลองอบแห้งสับปะรดเชื่อมด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนดันแบบที่อุณหภูมิ 45°C และ 50°C อุณหภูมิละ 2 การทดลอง เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และผลที่ได้จากการทดลองพบว่ามีความไวเช่นเดียวกันและมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยทั้งด้านความชื้นและสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง