บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 กุหลาบ *(Rosa hybrida)*

กุหลาบ *(Rosa hybrida)* นับว่าเป็นไม้ดอกที่มีความงามยากที่ดอกไม้ชนิดอื่นจะเทียบเท่า จนได้ชื่อว่าเป็น “ราชินีแห่งดอกไม้” (Queen of flower) กุหลาบมีมานานประมาณ 30 ล้านปี มาแล้ว มีทั้งหมดประมาณ 200 สายพันธุ์ พันธุ์ดั้งเดิม (wild species) มีทั้งชนิดกลีบดอกชั้นเดียว และกลีบดอกซ้อน ส่วนพันธุ์กุหลาบที่ปลูกกันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน เป็นพันธุ์กุหลาบที่ผ่านการวิวัฒนา-การมานานนับร้อยๆปี และทั้งหมดเป็นพันธุ์กุหลาบลูกผสมของพันธุ์กุหลาบดั้งเดิมประมาณ 1-8 สายพันธุ์ และส่วนมากมีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชีย

กุหลาบจัดเป็นไม้ดอกประเภทไม้พุ่มผลัดใบ มีลำต้นตั้งตรงหรือเลื้อย แข็งแรงมีใบย่อย 3-5 ใบ ใบมีสีเขียวเข้มเป็นมันและมีรอยย่นเล็กน้อย ดอกเป็นดอกสมบูรณ์เพศ มี 2 เพศในดอกเดียวกัน มีทั้งดอกชั้นเดียวและดอกซ้อน การจำแนกกุหลาบตามลักษณะสีของดอกแบ่งเป็น 5 ประเภท คือ (สมพงษ์, 2548)

1. Single color มีสีของกลีบดอกสีเดียว ไม่ว่าจะเป็นด้านหน้าหรือด้านหลังของดอก และทุกๆ กลีบมีสีเหมือนกัน เช่น พันธุ์คริสเตียนดิออร์ (Christian Dior)

2. Multi color มีสีของกลีบดอกเปลี่ยนไปตามอายุการบานของดอก ในช่วงหนึ่งจะมีหลายสีเพราะดอกจะบานไม่พร้อมกัน ส่วนมากจะเป็นชนิดกุหลาบพวง เช่น พันธุ์แซมบรา (Sambra) หรือชาร์เลสตัน (Charleston)

3. Bi color มีสีของกลีบดอก 2 สี คือ กลีบด้านในสีหนึ่ง และด้านนอกอีกสีหนึ่ง เช่น พันธุ์ Forty Niner

4. Blend-color มีสีของกลีบดอกด้านในมากกว่า 2 สีขึ้นไปเช่น พันธุ์ Monte Carlo

5. Striped color กลีบดอกในแต่ละกลีบมีสีมากกว่า 2 สีขึ้นไป ส่วนมากเป็นสีสลับกันเป็นเส้นตามความยาวของกลีบดอก เช่น พันธุ์ Candy Stripe

ปัจจุบันกุหลาบที่นิยมปลูกเป็นไม้ตัดดอกในประเทศไทยมีอยู่มากมายหลายพันธุ์ แต่พันธุ์ที่กรมส่งเสริมการเกษตร (2541) แนะนำให้ปลูกมีดังนี้

ก. พันธุ์ดอกสีแดง ได้แก่ พันธุ์บราโว, เรดมาสเตอร์พีช, คริสเตียนดิออร์, โอลิมเปียด, นอริค้า, แกรนด์มาสเตอร์พีช, ปาปามิลแลนด์ และเวก้า

ข. พันธุ์ดอกสีเหลือง ได้แก่ พันธุ์คิงส์แรนซัม, ซันคิงส์, เฮสมุดสมิดท์,นิวเดย์ โอรีโกลด์ และเมลิลอน

ค. พันธุ์ดอกสีส้ม ได้แก่ พันธุ์ซันดาวน์เนอร์, แซนดรา และซุปเปอร์สตาร์ หรือทรอพปิ-คานา

ง. พันธุ์ดอกสีชมพู ได้แก่ พันธุ์มิสออลอเมริกันบิวตี้ หรือมาเรีย, คาสลาส, ไอเฟลทาว-เวอร์, สวาทมอร์, เฟรนด์ชิพ, เพอร์ฟูมดีไลท์, จูวังแซล, เฟิร์สท์ไพรซ์, อเควเรียส และซูซานแฮมเชียร์

จ. พันธุ์ดอกสีขาว ได้แก่ พันธุ์ไวท์คริสต์มาส และเอทีนา

ฉ. พันธุ์ดอกสีอื่นๆ ได้แก่ พันธุ์แยงกี้ดูเดิ้ล, ดับเบิ้ลดีไลท์ และเบลแอนจ์

2.1.1 ความสำคัญของกุหลาบตัดดอก

กุหลาบเป็นไม้ตัดดอกที่มีการซื้อขายกันมากเป็นอันดับสองของตลาดโลก เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ มีหลายชนิด หลายพันธุ์ สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ใช้ทั้งดอกสดและเป็นวัตถุดิบสำหรับกลั่นน้ำหอมระเหยและทำดอกไม้แห้ง สามารถควบคุมการออกดอกได้ง่าย ทำให้ควบคุมการออกดอกให้ตรงกับเทศกาลได้ ส่งผลให้มีราคาดี นอกจากนี้ยังสามารถหาตลาดได้ง่ายด้วย

ในประเทศไทย ขณะนี้มีการปลูกกุหลาบกันมาก ประมาณว่ามีพื้นที่ปลูกกุหลาบประมาณ 3,500 ไร่ โดยแหล่งปลูกที่สำคัญ เช่น จังหวัดนครปฐม นนทบุรี กรุงเทพมหานคร สมุทรสาคร เชียงใหม่ เชียงราย ตาก เพชรบูรณ์ หนองคาย อุบลราชธานี และสงขลา

กุหลาบเป็นไม้ตัดดอกชนิดหนึ่งที่ให้ผลตอบแทนสูง ประเทศไทยมีการส่งออกไปยังประเทศสิงคโปร์ มาเลเซีย ฮ่องกง ฟิลิปปินส์ แคนาดา และซาอุดิอะราเบีย ตลาดที่ใหญ่ที่สุดของประเทศไทยอยู่ที่กรุงเทพมหานคร นิยมใช้ทั้งกุหลาบคุณภาพดีและคุณภาพปานกลาง ดอกกุหลาบคุณภาพดีส่วนมากส่งมาจากจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย ตาก และเพชรบูรณ์ ปกติราคาจะอยู่ระหว่างดอกละ 3-5 บาท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพ (ณิฏฐ์ศิริ, 2545)

2.1.2 การทำแห้งดอกไม้

ในปัจจุบันดอกไม้แห้งเป็นที่นิยมแพร่หลายและเห็นกันอยู่ทั่วไป ในภาพแบบต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การนำมาทำเป็นของขวัญซึ่งมีคุณค่าต่อผู้ที่ได้รับ และสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน ดอกไม้แห้งสามารถจัดแต่งได้ภาพแบบที่เราต้องการ และมีการเคลือบดอกเพื่อเพิ่มความสวยงามและยืดอายุการใช้งาน การเลือกดอกไม้หรือใบไม้แห้งโดยทั่วไป จะต้องเป็นดอกไม้สด

และมีระยะการบานที่เหมาะสม เลือกดอกที่มีระยะเริ่มบานเต็มที่ และมีวิธีการทำแห้งหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของดอกไม้และการนำมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างเช่น (ณิฏฐ์ศิริ, 2545)

1. การผึ่งลม (air drying) เป็นวิธีที่เก่าแก่ และทำได้ง่ายที่สุด โดยการใช้หนังยางมัดก้านดอกรวมกันเป็นกำ และแขวนห้อยหัวลง โดยมัดติดกับไม้ เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะระเหยออกจากก้านดอกและมีการยุบตัวลง ใช้เวลา 2-3 สัปดาห์ การทำแห้งวิธีนี้ ดอกไม้จะมีสีซีดหรือมีการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

2. การอัดแห้ง (pressing) นิยมใช้กับใบไม้ หญ้า และดอกไม้ที่มีกลีบดอกบาง หรือมีกลีบดอกซ้อนกันหลายชั้นที่ไม่หนาเกินไป ใช้เวลาอัดแห้งในกระดาษดูดซับความชื้น จะใช้ระยะเวลาประมาณ 1 เดือน ดอกจะแห้งสนิท ดอกไม้และใบที่ได้มักจะนำไปติดกรอบภาพและทำบัตรอวยพรต่างๆ

3. การเคลือบด้วยกลีเซอรีน วิธีนี้ใช้กับใบไม้ ทำให้ใบอ่อนหรือยืดหยุ่นได้ แต่สีจะคล้ำลงหรือเป็นสีน้ำตาล โดยการใช้กลีเซอรีนต่อน้ำในอัตราส่วน 1 : 2 และทำให้เกิดบาดแผลบริเวณปลายก้านใบ นำมาจุ่มในสารละลาย ใช้ระยะเวลาประมาณ 7-28 วัน ผิวหน้าจะเป็นมัน นำมาห้อยหัวลงเก็บไว้ในที่มืดและแห้ง

4. การตากแดดหรืออบในเตา วิธีนี้ใช้กับดอกไม้บางชนิด โดยนำมาทำแห้งโดยการตากแดดหรืออบในเตาไมโครเวฟ

5. การฟอกสี โดยจุ่มลงในสารละลายของสารฟอกสีอัตราส่วนต่อน้ำ 1:1 แกลลอน นาน 24 ชั่วโมง หรือจนหมดสีเขียว จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วซับให้แห้ง นำไปจุ่มในกลีเซอ-รีน หรือวางไว้ในกระดาษดูดซับความชื้น

6. การทำแห้งด้วยความเย็น (freeze drying) วิธีนี้จะทำได้กับดอกไม้ และใบไม้ วิธีการนี้จะมีกระบวนการทำให้แห้งโดยจะลดความเย็นจนถึงจุดเยือกแข็ง ความชื้นในดอกไม้จะกลายเป็นน้ำแข็งและระเหยเป็นไอน้ำออกจากดอกจนกระทั่งดอกแห้ง จะได้ดอกไม้ที่มีสีสวยเหมือนกับดอกก่อนการอบแห้งมากที่สุด แต่เครื่อง freeze dryer มีราคาแพงมาก

7. การใช้ซิลิกาเจล ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นที่มีราคาแพงกว่าสารชนิดอื่นๆ แต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซิลิกาเจลจัดว่าเป็นสารดูดความชื้นที่ดีที่สุดในการรักษาสภาพของดอกไม้ เนื่องจากทำให้ดอกไม้แห้งอย่างรวดเร็ว และยังคงสภาพสีตามธรรมชาติอยู่ ซิลิกาเจลเมื่อนำไปอบแห้งดอกไม้แล้วจะต้องนำมาอบเพื่อไล่ความชื้นออก แล้วนำมาใช้ใหม่ได้ ระยะเวลาในการอบแห้งประมาณ 7 วัน

8. การอบแห้งด้วยเตาไมโครเวฟ ทำให้ดอกไม้สดกลายเป็นดอกไม้แห้งในเวลาไม่กี่นาที และคุณภาพดอกดี สีสดใสแม้คุณภาพสีดอกไม่เท่ากับการทำแห้งด้วยความเย็น แต่ต้นทุนการผลิตมีราคาถูกกว่า

ก. การทำแห้งดอกไม้โดยการผึ่งแดด

ข. การทำแห้งดอกไม้โดยการอัดแห้ง

ค. การทำแห้งดอกไม้โดยการใช้ซิลิกาเจล

รูปที่ 2.1 การทำแห้งดอกไม้ด้วยวิธีการผึ่งแดด การอัดแห้ง และการใช้ซิลิกาเจล

2.1.3 การเลือกดอกไม้สำหรับอบแห้ง

ดอกไม้สดเกือบทุกชนิดสามารถนำมาทำเป็นดอกไม้อบแห้งได้ ขึ้นอยู่กับความต้องการของตลาด ดอกไม้ที่นิยมในปัจจุบัน ได้แก่ ดอกกุหลาบ ดอกกล้วยไม้ ดอกคาร์เนชั่น และดอกลิลลี่ เป็นต้น และเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ดอกไม้อบแห้งที่มีความสวยงาม ควรนำหลักการเลือกดอกไม้ไปปฏิบัติ สำหรับดอกกุหลาบนั้น เป็นดอกไม้ที่เมื่อนำมาอบแห้งแล้วสวยที่สุด แต่ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการเลือกสี และลักษณะของดอกด้วย หลักการเลือกดอกกุหลาบ ควรเลือกกุหลาบดอกใหญ่ ดอกมีความสด กลีบดอกอยู่ในสภาพสมบูรณ์ แข็งแรง ไม่มีรอยช้ำ หรือเน่าเสีย ไม่เป็นโรค หรือถูกหนอนกัด

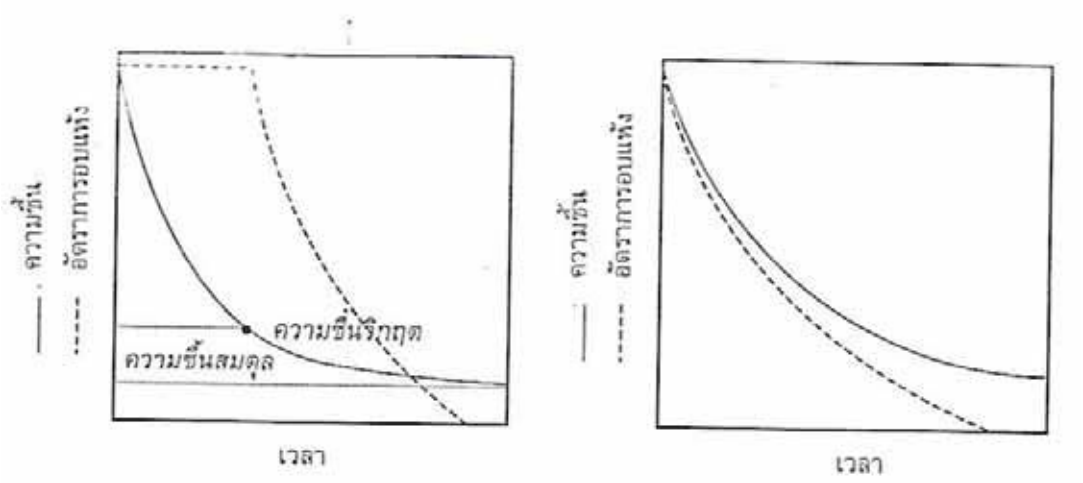
กินกลีบดอก การพิจารณาสีของดอกกุหลาบสำหรับนำมาอบแห้งมีดังนี้ (สถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อย, 2547)

- ดอกกุหลาบสีแดงเข้มเมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะเปลี่ยนเป็นสีดำ
- ดอกกุหลาบสีแสดเมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะเปลี่ยนเป็นสีแดงสด
- ดอกกุหลาบสีโอรสเมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้มขึ้น
- ดอกกุหลาบสีขาวเมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน
- ดอกกุหลาบสีเหลืองเมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนลง
- ดอกกุหลาบสีชมพูอมส้ม เมื่อผ่านการอบแล้วจะเปลี่ยนสีชมพูอ่อนลง

2.2 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นวัสดุ จนถึงระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ เพื่อให้วัสดุมีรูปทรงที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา ด้วยการถ่ายเทความร้อนและมวลสารไปพร้อมๆ กัน การอบแห้งวัสดุโดยทั่วๆไปมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกไปจากวัสดุ (สมชาติ, 2540) ดังนั้นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งจึงได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศ สำหรับปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นในการอบแห้งด้วยลมร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างวัสดุและของไหล โดยมีแรงขับจากความต่างศักย์ของอุณหภูมิและความชื้น กล่าวคือความร้อนจากของไหลจะถูกถ่ายเทสู่วัสดุ ทำให้ความชื้นระเหยไปกับอากาศในขณะเดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวหน้าวัสดุไปยังอากาศ ซึ่งการเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากวัสดุมี 2 ลักษณะด้วยกัน คือการเคลื่อนที่ด้วยแรงคาพิลลารี่ (capillary) ซึ่งจะเกิดกับวัสดุที่มีเซลล์โปร่ง ความพรุนสูง และมีความต่อเนื่องระหว่างเซลล์ โดยมักจะเกิดขึ้นในช่วงต้นของการอบแห้ง และการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (diffusion) ผ่านเซลล์ จะเกิดกับวัสดุที่มีเนื้อแน่นไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ หรือเกิดกับวัสดุที่ผ่านการอบแห้งไประยะหนึ่ง เซลล์เกิดการหดตัวทำให้แรงคาพิลลารี่หมดไป น้ำจึงต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (สุคนธ์ชื่น, 2539) ถ้าวัสดุมีเนื้อโปร่งการเคลื่อนที่ด้วยการไหลแบบคาพิลลารี่ น้ำจะเคลื่อนที่มาที่ผิวได้เร็วกว่าการระเหยกลายเป็นไอทำให้ผิววัสดุเปียกชุ่มไปด้วยน้ำ น้ำระเหยได้อย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ จึงเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ต่อมาเมื่อการไหลแบบคาพิลลารี่หมดไป น้ำต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ ซึ่งช้าลงมากจนมาสู่ผิวหน้าไม่ทัน จึงทำให้ผิวของวัสดุแห้ง การระเหยน้ำเกิดขึ้นได้ช้าลงมีอัตราการอบแห้งลดลง จึงเรียกการอบแห้งช่วงนี้ว่า การอบแห้งลดลง สำหรับวัสดุที่มีเนื้อแน่น น้ำในวัสดุนั้นจะเคลื่อนที่มาสู่ผิวหน้าได้ช้า ซึ่งจะทำให้มีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น และเมื่อความชื้นของอากาศ

ใน ห้องอบแห้งสมดุลกับความชื้นของวัสดุ การอบแห้งจะสิ้นสุดลงและเรียกความชื้นของวัสดุขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล และจุดเปลี่ยนแปลงจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ไปยังอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต ลักษณะของกราฟอัตราการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 2.2 (รุ่งนภา, 2536)



ก. อัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง ข. อัตราการอบแห้งลดลง

รูปที่ 2.2 ลักษณะของกราฟอัตราการอบแห้งวัสดุ
ที่มา : สุทธิศักดิ์ (2543)

2.2.1 อัตราการอบแห้งคงที่

ที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือการเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆ ผิววัสดุเท่านั้น ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งคงที่คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม

2.2.2 การทำแห้งในช่วงอัตราลดลง

ภายหลังจากที่ความชื้นลดลงถึงปริมาณความชื้นวิกฤต กระบวนการอบแห้งจะดำเนินไปในอัตราลดลง เนื่องจากการระเหยเกิดขึ้นด้วยอัตราลดลง หลังจากถึงที่จุดปริมาณความชื้นวิกฤต อัตราการอบแห้งจะลดลงด้วยความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับปริมาณความชื้นที่ลดลง ในบางผลิตภัณฑ์อาจจะมีช่วงอัตราลดลงมากกว่าหนึ่ง

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงพื้นที่ผิวอิ่มตัวจะลดลง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในของแข็งไม่เพียงพอต่อการระเหย อัตราการอบแห้งจึงลดลงขณะที่พื้นที่ผิวไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง รวมถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากของแข็งนอกจากอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายใน จนกระทั่งเมื่อพื้นที่ผิวทั้งหมดถึงสภาวะไม่อิ่มตัว การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในจะกลายเป็นปัจจัยหลัก กลไกที่ทำให้ความชื้นเคลื่อนที่ภายในผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การเคลื่อนที่ของเหลวด้วยแรงคาพิลลารี่ การแพร่ของของเหลว หรือการแพร่ของไอน้ำ

2.2.3 การถ่ายเทความร้อนและมวล (Heat and mass transfer)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น การกำจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ จะมีการถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นพร้อมกัน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์และเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวของผลิตภัณฑ์ และผิวบางจุดภายในผลิตภัณฑ์ ขณะที่ให้ปริมาณความร้อนจำนวนหนึ่ง ซึ่งเพียงพอต่อการทำให้น้ำระเหย ไอที่เกิดขึ้นจะถูกส่งออกจากน้ำภายในผลิตภัณฑ์ ความแตกต่างที่ก่อให้เกิดการแพร่กระจายของไอน้ำคือ ความดันไอที่ผิวน้ำเปรียบเทียบกับความดันไอของอากาศที่ผิวผลิตภัณฑ์ การถ่ายเทความร้อน และมวลภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์จะเกิดในระดับโมเลกุลโดยที่การถ่ายเทความร้อนจะถูกจำกัดด้วยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโครงสร้างผลิตภัณฑ์ และการถ่ายเทมวลเป็นสัดส่วนกับการแพร่กระจายโมเลกุลของไอน้ำในอากาศ ที่ผิวของผลิตภัณฑ์การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นพร้อมกันและควบคุมด้วยกระบวนการพา การขนถ่ายไอน้ำจากผิวผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศ และการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังผิวผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับความดันไอน้ำที่มีอยู่ และความแตกต่างของอุณหภูมิ ตามลำดับ ในผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ การถ่ายเทความร้อนและมวลภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์ จะเป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับระยะเวลา

การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้งตามวิธีการให้ความร้อน สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้ (สุทธิศักดิ์, 2543)

1. การใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากวัสดุ เป็นวิธีการอบแห้งแบบอากาศพาความร้อน (convection drying) เครื่องอบแห้งส่วนมากจะใช้วิธีนี้ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ใช้งานง่าย และค่าใช้จ่ายไม่สูงเกินไป

2. การกระจายวัสดุออกเป็นชั้นบางบนพื้นผิวที่ให้ความร้อน เป็นวิธีการอบแห้งแบบการนำความร้อน (conduction) ไอน้ำจะกระจายตัวสู่บรรยากาศแวดล้อมได้ดี วัสดุจะแห้งในระยะเวลาอันสั้น แต่การสัมผัสความร้อนโดยตรงอาจทำให้วัสดุเกิดความเสียหายได้

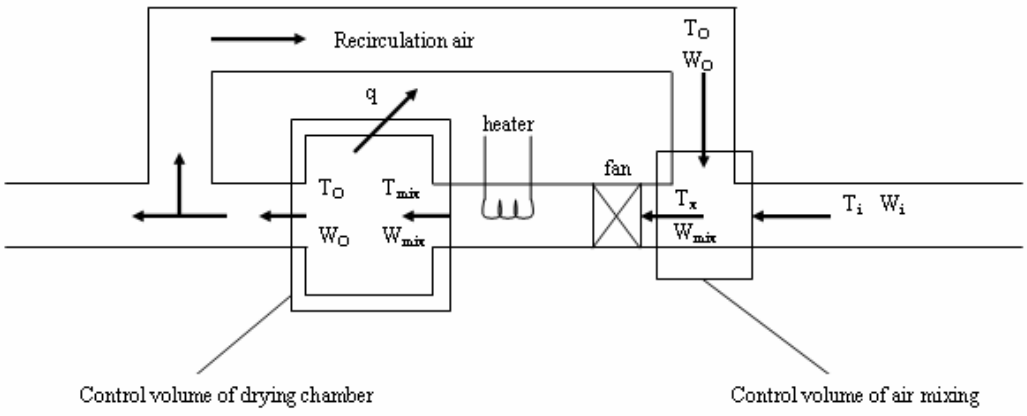
3. การให้ความร้อนบริเวณรอบๆ ห้องอบแห้ง โดยวัสดุไม่สัมผัสกับแหล่งความร้อนเป็นวิธีการอบแห้งแบบการแผ่รังสี (radiation drying) บางครั้งอาจใช้ระบบดูดไอน้ำออกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพหรือใช้สุญญากาศลดความดัน เพื่อประหยัดพลังงานความร้อนได้

4. การปรับสภาพความดันและอุณหภูมิ เมื่อให้น้ำในวัสดุเปลี่ยนเป็นของแข็งที่ระดับต่ำกว่าจุดร่วมสามสถานะ (triple point) แล้วให้พลังงานความร้อนหรือลดความดันลงจนกระทั่งเกิดการระเหิด น้ำเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอโดยตรง เรียกว่าการอบแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying) วิธีการนี้จะช่วยรักษาคุณภาพ และการคืนตัวของวัสดุได้ดีมาก แต่ค่าใช้จ่ายจะสูงตามไปด้วย

5. การใช้ความดันออสโมซิสลดปริมาณน้ำภายในวัสดุ (osmotic dehydration) โดยการแช่วัสดุลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า น้ำจะซึมผ่านผนังเมมเบรน (membrane) ออกมาจนความเข้มข้นของสารละลายเจือจางลง จนกระทั่งทั้งสองด้านเท่ากัน

2.2.4 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลของการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งทั่วไปจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังผิวของวัสดุ และไอน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุจะเคลื่อนจากบริเวณผิววัสดุมายังกระแสอากาศ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุกับอากาศจะเกิดขึ้นรอบๆ ผิววัสดุ สมชาติ (2540) ได้แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์สมดุลพลังงานในการอบแห้ง และสามารถทำนายการอบแห้งเมล็ดพืชได้ดี โดยสมมติว่าเกิดสมดุลความร้อนระหว่างวัสดุและอากาศ ไม่มีการสูญเสียความร้อนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูป 2.3 แสดงปริมาตรควบคุมของส่วนการอบแห้งและส่วนอากาศผสม

ที่มา : สมชาติ (2540)

เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งชั้นบางใดๆ ตำแหน่งหนึ่งในห้องอบแห้งที่ช่วงเวลาหนึ่ง จะสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงาน โดยอาศัยกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ดังนี้ (สมชาติ, 2540)

$$\dot{m}_{mix}\left[C_a T_x + w_{mix}\left(h_{fg} + C_v T_x\right)\right] - \dot{m}_i\left[C_a T_i + w_i\left(h_{fg} + C_v T_i\right)\right] - \dot{m}_{rc}\left[C_a T_o + w_o\left(h_{fg} + C_v T_o\right)\right] = 0 \quad (2.1)$$

จากรูปที่ 2.3 ปริมาตรควบคุมการผสมกันระหว่างอากาศแวดล้อมกับอากาศหลังผ่านการอบแห้ง จากหลักการอนุรักษ์มวลจะสามารถเขียนสมการสมดุลมวลของไอน้ำได้ดังนี้

$$\dot{m}_{mix}\, w_{mix} = \dot{m}_i\, w_i + \dot{m}_{rc}\, w_o \quad (2.2)$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s

w คือ อัตราส่วนความชื้น, kg water/kg dry air

C คือ ค่าความร้อนจำเพาะ, kJ/kg-^{o}C

h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, kJ/kg

T คือ อุณหภูมิ, ^{0}C

สัญลักษณ์กำกับล่าง :

a	คือ อากาศแห้ง
i	คือ สภาวะก่อนผสม
o	คือ สภาวะหลังผสม
rc	คือ อากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่
mix	คือ อากาศผสม

2.2.5 สมการการอบแห้ง

1. สมการการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoretical drying equation)

เป็นที่ทราบกันทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของปริมาณความชื้น อัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนท์ความเข้มข้นของความชื้น การอบแห้งผลไม้ส่วนมากจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 DM \quad (2.3)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น, %dry-basis

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/h

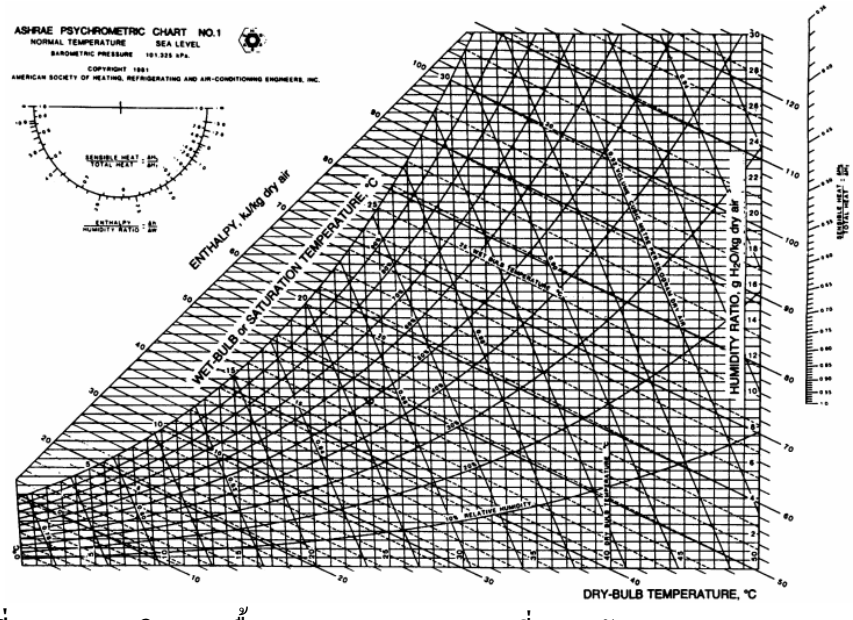
t คือ เวลา, h

2 สมการการอบแห้งเอ็มไพริคอล (Empirical drying equation)

สมการการอบแห้งเอ็มไพริคอลเป็นสมการที่สร้างจากแนวโน้มของข้อมูล ที่ได้จากการทดลอง สำหรับผลิตภัณฑ์ในช่วงอุณหภูมิ ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งหนึ่งๆ สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับเงื่อนไขในการอบแห้งที่ต้องตรงกันกับสภาวะในการทดลอง

2.3 แผนภูมิอากาศชื้น (Psychometric chart)

แผนภูมิอากาศชื้นเป็นแผนภูมิที่แสดงคุณสมบัติของอากาศชื้น เป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง ซึ่งแผนภูมิอากาศชื้นจะช่วยให้การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งได้สะดวก ซึ่งในการหาคุณสมบัติต่างๆของอากาศชื้นนั้นจำเป็นที่จะต้องรู้ค่าคุณสมบัติของอากาศชื้นอย่างน้อย 2 ค่า จึงจะสามารถอ่านค่าอื่นๆที่เหลือได้ แผนภูมิอากาศชื้นแต่ละอันจะใช้ได้สำหรับความดันบรรยากาศหนึ่งๆ เท่านั้น



รูปที่ 2.4 แผนภูมิอากาศชื้น (Psychometric chart) ที่ความดันบรรยากาศ 101.325 kPa (ASHRAE handbook, 2548)

2.3.1 คุณสมบัติของอากาศชื้น (moist air properties)

คุณสมบัติของอากาศชื้นมีความสำคัญมากในการประเมินคุณสมบัติต่างๆ ของการอบแห้ง เพราะโดยทั่วไปแล้วจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยใช้อากาศร้อนผ่านเข้าไปยังวัสดุ เพื่อทำให้ความชื้นในวัสดุระเหยออกมากับอากาศที่ผ่านเข้าไป เรียกอากาศนี้ว่าอากาศชื้น เพราะอากาศจะประกอบไปด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ แม้ว่าโดยทั่วไปแล้วมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศที่ใช้ในการอบแห้งจะมีน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของมวลทั้งหมด แต่โมเลกุลของไอน้ำเหล่านี้มีผลอย่างมากต่อกระบวนการอบแห้ง ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงคุณสมบัติพื้นฐานของอากาศชื้นก่อน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งต่อไป

- อัตราส่วนความชื้น (humidity ratio : w) คือมวลของไอน้ำที่อยู่ในอากาศแห้งในหนึ่งหน่วยมวล
- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry-bulb temperature : T) คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่บอกโดยเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป
- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature : T_{wb}) คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่ชี้บ่งโดยเทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะถูกหุ้มด้วยผ้ากอสเปียก และมีลมผ่านกระเปาะด้วยความเร็วอย่างน้อย 4.6 เมตร/วินาที (m/s)
- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew-point temperature : T_{db}) คือ อุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเริ่มควบแน่นเมื่ออากาศนั้นถูกทำให้เย็นลงที่อัตราส่วนความชื้นและความดันของบรรยากาศคงที่
- เอนทัลปี (Enthalpy : h) คือค่าปริมาณความร้อนของอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง ที่สูงกว่าค่าที่อุณหภูมิอ้างอิงกำหนดขึ้น
- ปริมาตรจำเพาะ (specific volume : v) คือ ปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง
- ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity : ϕ) คืออัตราส่วนของเศษส่วนเชิงโมล (mole fraction) หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศต่อเศษส่วนเชิงโมล หรือความดันของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

2.3.2 การผสมอากาศสองกระแส

ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์บางครั้ง อาจพบว่าอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วยังมีอุณหภูมิสูงอยู่และความชื้นสัมพัทธ์อาจจะยังไม่สูงนัก ดังนั้นจึงมีการนำเอาอากาศบางส่วนที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศใหม่ แล้วค่อยทำให้ร้อนขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ระหว่างทำการอบแห้งการคำนวณหา

คุณสมบัติของส่วนผสมของอากาศชื้นสองกระแส สามารถกระทำได้โดยสมการสมดุลมวลและพลังงานดังนี้

สมดุลมวลอากาศแห้ง

$$m_{a1} + m_{a2} = m_{a3} \tag{2.4}$$

สมดุลมวลไอน้ำ

$$m_{a1}w_1 + m_{a2}w_2 = m_{a3}w_3 \tag{2.5}$$

เมื่อ m_a คือ มวลของอากาศแห้ง, kg

w คือ อัตราส่วนความชื้น, kg water/kg dry air

2.4 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเปรียบเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.4.1 ความชื้นฐานเปียก

$$Mw = \frac{w - d}{w} \times 100 \tag{2.6}$$

ความชื้นฐานเปียกเป็นความชื้นที่นิยมใช้กันในวงการค้า

2.4.2 ความชื้นฐานแห้ง

$$Md = \frac{w - d}{d} \times 100 \tag{2.7}$$

เมื่อ Mw คือ ความชื้นฐานเปียก, %wb

Md คือ ความชื้นฐานแห้ง %wd

w คือ มวลของวัสดุ, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง, kg

ความชื้นฐานแห้งเป็นความชื้นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่ หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่ว่าเกือบคงที่เพราะผลิตผลทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย

สำหรับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเริ่มต้น ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายของวัสดุ ดังสมการ

$$m_w = m_{p,i}\left(1 - \frac{\left(M_f + 1\right)}{M_i + 1}\right) \tag{2.8}$$

มื่อ m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ, (kg)
$m_{p,i}$ คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ, (kg)
M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, (%db)
M_f คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุ, (%db)

2.4.3 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content : M_e)

ความชื้นสมดุล มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการทำแห้ง และการเก็บรักษาพืชผลทางการเกษตร ความชื้นสมดุลใช้ในการหาว่าผลิตผลจะเกิดการรับหรือสูญเสียความชื้น ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่กำหนดให้ ผลผลิตจะสมดุลกับสิ่งแวดล้อมก็ต่อเมื่ออัตราการสูญเสียความชื้นจากผลิตผลสู่สิ่งแวดล้อม เท่ากับอัตราการรับความชื้นจากสิ่งแวดล้อมสู่ผลิตผล เมื่อสภาพของบรรยากาศที่แวดล้อมถูกกำหนดด้วยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณความชื้นของผลิตผลที่สมดุลกับบรรยากาศแวดล้อมถูกเรียกว่าความชื้นสมดุล ความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศรอบๆวัสดุที่เกิดความสมดุลอยู่นั้น เรียกว่า Equilibrium Relative Humidity (ERH) ซึ่งจะผันแปรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

2.5 ทฤษฎีการทำงานของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

2.5.1 หลักการทำงานของปั๊มความร้อน

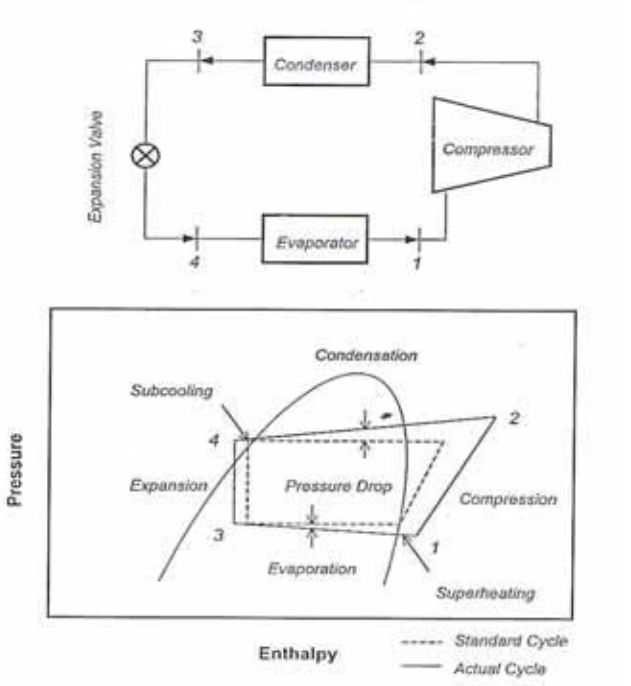
หลักการทำงานของปั๊มความร้อนคือการถ่ายเทความร้อน ไม่ใช่การสร้างความร้อน กล่าวคือปั๊มความร้อนทำงานโดยการดึงความร้อนจากแหล่งความร้อน (heat source) แล้วนำไป

ถ่ายเทในบริเวณที่ต้องการความร้อน (heat sink) ด้วยเหตุนี้จึงเรียกว่าปั๊มความร้อน เพราะทำหน้าที่ในการปั๊มเอาความร้อนจากแห่งหนึ่งไปยังอีกแห่งหนึ่ง ที่สำคัญคือปั๊มความร้อนไม่ได้เป็นตัวสร้างความร้อน แต่เป็นตัวส่งผ่านความร้อน ซึ่งวัฏจักรการทำงานไม่แตกต่างจากระบบการทำความเย็นทั่วไปที่มีใช้กันอยู่ ซึ่งเป็นระบบอัดไอ (mechanical vapor compression refrigeration system) แตกต่างกันเพียงปั๊มความร้อนจะเลือกใช้ประโยชน์จากด้านที่ทำความร้อนเป็นหลัก และควบคุมอุณหภูมิด้านทำความร้อนแทนด้านทำความเย็น ส่วนความเย็นที่ได้จะกลายเป็นผลพลอยได้ของระบบ

ระบบปั๊มความร้อน แบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้ (เหมือนจิต, 2547)

1. ระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ
2. ระบบปั๊มความร้อนแบบดูดกลืน
3. ระบบปั๊มความร้อนแบบเทอร์โมอิเล็กทริก
4. ระบบปั๊มความร้อนแบบแยกตัว
5. ระบบปั๊มความร้อนทางเคมี

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและทดลองเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอเท่านั้น



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบและวัฏจักรการทำงานของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

ที่มา : สุทธิศักดิ์ (2543)

2.5.2 ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

ส่วนประกอบของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ แสดงรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ ดังต่อไปนี้

- **เครื่องควบแน่น (condenser)** ทำหน้าที่ระบายความร้อนจากสารทำงานในระบบไปสู่แหล่งรับความร้อน
- **เครื่องทำระเหย (evaporator)** ทำหน้าที่ดูดความร้อนจากแหล่งความร้อนเข้าสู่สารทำงานในระบบ
- **เครื่องอัดไอ (compressor)** ทำหน้าที่อัดไอของสารทำงานให้มีความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งอุณหภูมิของสารทำงานในระบบจะสูงกว่าอุณหภูมิโดยรอบของชุดคอล์ยร้อน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากสารทำงานออกสู่ภายนอกระบบ
- **วาล์วลดความดัน (expansion valve)** ทำหน้าที่ลดความดันของสารทำงานให้ต่ำลง

2.5.3 วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ (heat pump cycle)

ระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอดังในรูปที่ 2.5 มีวัฏจักรการทำงานซึ่งอธิบายได้จากแผนภูมิความดันและเอนทัลปี ดังต่อไปนี้

กระบวนการอัดไอ 1-2 ในทางอุดมคติไออิ่มตัว (saturated vapor) ของสารทำความเย็นจะถูกอัดตัวแบบ Isentropic เพื่อให้อุณหภูมิ ความดัน และเอนทัลปีเพิ่มขึ้น แต่ในทางปฏิบัติจะเป็นกระบวนการ Polytropic เนื่องจากกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ (irreversible process) สาเหตุหลักคือ เกิดความร้อนจากแรงเสียดทานของอุปกรณ์ภายในเครื่องอัดไอ และการเกิดไอร้อนยวดยิ่ง (superheat vapor) ของสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดไอ

กระบวนการควบแน่น 2-3 ไอของสารทำความเย็นจะคายความร้อนออกและควบแน่นเป็นของเหลว ซึ่งในทางอุดมคติจะเป็นกระบวนการความดันคงที่ แต่ความเป็นจริงความดันและอุณห-ภูมิจะลดลงตามระยะทางของเครื่องควบแน่น สารทำความเย็นจะไหลเป็นสองสถานะ (two phase flow) จนอุณหภูมิลดลงถึงสถานะของเหลวอิ่มตัว (subcooling) ในที่สุด

กระบวนการลดความดัน 3-4 เมื่อสารทำความเย็นไหลผ่านวาล์วขยายตัวความดัน และอุณห-ภูมิจะลดต่ำลงและเปลี่ยนสถานะเป็นสารผสม เป็นกระบวนการเอนทัลปีคงที่ (Throttling process)

กระบวนการระเหย 4-1 สารทำความเย็นผสมจะดูดกลืนความร้อนเข้ามา และเปลี่ยนสถานะเป็นไออิ่มตัว ในทางอุดมคติจะเป็นกระบวนการความดันคงที่ แต่ความเป็นจริงความดันจะลดลง

ตามระยะทางของเครื่องทำระเหยทำนองเดียวกันกับเครื่องควบแน่น และสุดท้ายจะถูกเพิ่มอุณหภูมิจนถึงสถานะไอร้อนยวดยิ่งก่อนเข้าสู่เครื่องอัดไอต่อไป (เหมือนจิต, 2547)

2.6 เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

เครื่องอบแห้งที่ใช้ระบบปั๊มความร้อน มีความสำคัญมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนของระบบปั๊มความร้อนและห้องอบแห้ง

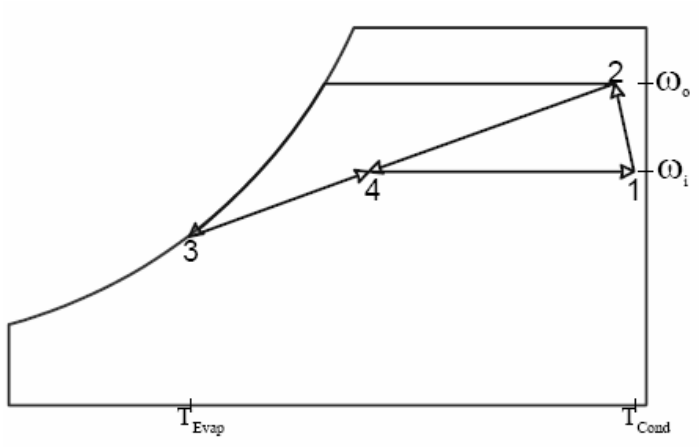
Young (1997) ได้แนะนำวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนโดยการไหลเวียนอากาศชื้นเพียงบางส่วน

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนตามลักษณะการไหลของวงจรอากาศออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่

1. เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนระบบปิด (closed loop system)

ระบบการอบแห้งปั๊มความร้อนแบบปิด เป็นระบบที่มีการนำเอาอากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งกลับไปใช้ใหม่ในระบบทั้งหมด (fraction of air recycled : 100%) อากาศจะหมุนเวียนอยู่ในระบบโดยไม่มีการปล่อยอากาศออกจากระบบ หรือนำอากาศจากภายนอกเข้าสู่ระบบ โดยอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่จะมีการกำจัดความชื้นอากาศที่เครื่องทำระเหย จากนั้นอากาศจะถูกทำให้ร้อนขึ้นที่เครื่องควบแน่น ก่อนส่งเข้าสู่ห้องอบแห้ง และอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งจะมีการหมุนเวียนกลับเข้าสู่เครื่องทำระเหยใหม่อีกครั้ง

หลักการของทฤษฎีการอบแห้ง เป็นที่ทราบกันว่าถ้าอากาศที่ใช้อบแห้งมีความชื้นต่ำ จะเป็นการเพิ่มความต่างศักย์ของความเข้มข้นไอน้ำที่ผิววัสดุอบแห้งและในอากาศ ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพในการอบแห้ง ดังนั้นเครื่องอบแห้งชนิดนี้จึงถูกออกแบบมาเพื่อจุดประสงค์นี้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพทิศทางของอากาศในกระบวนการลดความชื้นของการอบแห้งแบบระบบปิด
ที่มา : มโน (2546)

2. เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนระบบเปิด (opened loop system)

ระบบอบแห้งปั๊มความร้อนแบบเปิด เป็นระบบที่ไม่มีการนำอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ในระบบ (fraction of air recycled : 0%) แต่มีการนำอากาศแวดล้อมจากภายนอกเข้ามากำจัดความชื้นที่เครื่องทำระเหย เมื่ออากาศผ่านเครื่องควบแน่นจะได้อากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งและอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งจะถูกทิ้งทั้งหมด

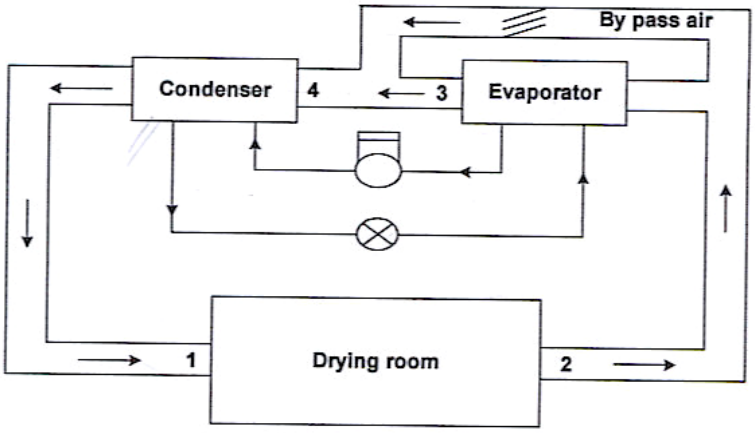
3. เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนระบบปิดบางส่วน (partially closed loop system)

เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนระบบปิดบางส่วน เป็นระบบที่มีการนำอากาศร้อนบางส่วนที่ออกจากห้องอบแห้งกลับไปใช้ใหม่ในระบบ (fraction of air recycled : 1-99%) บางส่วนปล่อยทิ้งไปและมีการนำอากาศแวดล้อมภายนอกเข้ามาบางส่วน เพื่อผสมอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งซึ่งจะได้อากาศผสม จากนั้นนำไปกำจัดความชื้นที่เครื่องทำระเหย เมื่ออากาศผสมผ่านเครื่องควบแน่นจะได้อากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง

สำหรับงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนแบบระบบปิด

2.6.1 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนระบบปิด

ความร้อนที่อากาศได้รับจากคอนเดนเซอร์เพื่อใช้ในการระเหยน้ำจากวัสดุ จะถูกปรับคืนโดยผ่านอีแวปปอเรเตอร์ (evaporator) ซึ่งความชื้นในอากาศจะถูกควบแน่นออกมาในปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง อากาศหลังการอบแห้งที่หมุนเวียนกลับไปใช้ในระบบมีบางส่วนที่ไหลข้ามอีแวปปอเรเตอร์ และจะไปผสมกับอากาศที่ออกมาจากอีแวปปอเรเตอร์ก่อนที่จะถูกส่งไปเพิ่มอุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้งต่อไป ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนระบบปิดที่มีความชื้นออกจากอากาศ
ที่มา : ฐานิตย์และคณะ (2542)

2.6.2 ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

1. สามารถอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าการอบแห้งแบบธรรมดา เนื่องจากอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

2. สามารถอบแห้งได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิเท่ากัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีมีคุณภาพดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งธรรมดา

3. สามารถอบแห้งอาหารที่ไวต่อความร้อนโดยไม่ทำให้เสื่อมคุณภาพ

4. เป็นการใช้พลังงานต่ำจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำ

5. เป็นการอนุรักษ์สภาวะแวดล้อม เนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเดียว ไม่มีการปล่อยสิ่งมีพิษออกจากระบบ

6. สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ตามต้องการ

2.7 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศ คือ เป็นระบบที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศปกติ แบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทตามระดับความดันสุญญากาศ ได้แก่

- Low vacuum อยู่ในช่วงความดันตั้งแต่ 760 torr ถึง 25 torr (101.32-3.33 kPa.abs)
- Medium vacuum อยู่ในช่วงความดันตั้งแต่ 25 torr ถึง 10^{-3} torr ($3.33\text{-}1.33\times10^{-4}$kPa.abs)
- High vacuum อยู่ในช่วงความดันตั้งแต่ 10^{-3}torr ถึง 10^{-6} torr (1×10^{-4}- 1.33×10^{4}kPa.abs)
- Very high vacuum อยู่ในช่วงความดันตั้งแต่ 10^{-6} torr ถึง 10^{-9}torr (1.33×10^{-7}-1.33×10^{-10}kPa.abs)
- Untra-high vacuum อยู่ในช่วงความดันตั้งแต่ 10^{-9} torr ถึง10^{-9} torr (1.33×10^{-10}kPa.abs) ขึ้นไป

การสร้างสุญญากาศในถังปิดนั้น ทำได้โดยการดึงเอาก๊าซหรืออากาศที่อยู่ภายในถังปิดออกสู่ภายนอกถังโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ซึ่งผลจากการดึงอากาศออกมาจากถังจะทำให้ความดันภายในถังจะค่อยๆ ลดต่ำลง ซึ่งปริมาณอากาศที่ถูกดึงออกจะสัมพันธ์กับความดันที่ต่ำลง จนกระทั่งความดันภายในถังเท่ากับความดันที่ทางออก ทำให้ไม่สามารถดูดอากาศออกได้อีก (พยุงศักดิ์, 2545)

2.8 เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ

การอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศ เป็นกระบวนการอบแห้งที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศปกติ มีการนำไอน้ำออกมาจากวัสดุได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน ณ ความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เนื่องจากความดันไอน้ำในอากาศลดลง ทำให้ผลต่างระหว่างความดันไอน้ำที่วัสดุกับอากาศมีค่ามากขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทของไอน้ำจะมากขึ้น ช่วยให้ไอน้ำที่วัสดุออกมาสู่อากาศได้ดีขึ้นด้วย ซึ่งด้วยหลักการนี้จึงสามารถอบแห้งวัสดุโดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำ หรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องได้ และเนื่องจากห้องอบแห้งของระบบนี้ต้องมีการปิดอย่างมิดชิด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยรั่วของอากาศ จึงเป็นผลทำให้ต้องนำวัสดุเข้าห้องอบแห้งทีละกลุ่ม ไม่สามารถที่จะอบแห้งอย่างต่อเนื่อง (นักเศรษฐ์, 2547)

การอบแห้งในระบบความดันต่ำ ระดับความดันและอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการอบแห้งในระบบนี้ขึ้นอยู่กับความไวต่อความร้อนของวัตถุดิบ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบเป็นแบบการนำความร้อนหรือการแผ่รังสี อย่างไรก็ตาม การนำความร้อนจะทำให้อาหารหดตัว ซึ่งจะทำให้พื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อนลดลง โดยทั่วไปช่วงอุณหภูมิที่ใช้สำหรับอบแห้งประมาณ

35-60 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ วัตถุดิบที่จะนำมาอบในเครื่องอบแห้งประเภทนี้ควรเป็นวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อน ซึ่งผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้จะมีคุณภาพดีเนื่องจากเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ สารระเหยต่างๆ ยังคงอยู่ในผลิตภัณฑ์ แต่จะมีความไวในการดูดความชื้น ดังนั้น จึงต้องมีการบรรจุที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการดูดความชื้นกลับเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา (นักเศรษฐ์, 2547)

2.9 สารดูดความชื้น

สารดูดความชื้นแต่ละชนิดมีคุณสมบัติพื้นฐานที่แตกต่างกัน ซึ่งรวมถึงความสามารถในการดูดความชื้น ความเร็วในการดูดความชื้น และความสามารถในการกักเก็บความชื้นไว้ภายใน โดยมาตรฐานสากลที่ใช้อยู่ คือ US-Mil-D3464 (ประเทศสหรัฐอเมริกา) DIN 55.473 (ประเทศเยอรมนี) JIS-Z 0701 (ประเทศญี่ปุ่น) สารดูดความชื้น ได้รับการทดสอบภายใต้อุณหภูมิประมาณ 22-25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ ตั้งแต่ 20-90% โดยเหตุนี้ การใช้สารดูดความชื้นสำหรับในประเทศไทยที่มีอุณหภูมิ โดยเฉลี่ย 35 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% นั้น จึงต้องพิจารณาถึงความสามารถของสารดูดความชื้นที่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม ในการปฏิบัติงานเป็นอย่างยิ่ง (บริษัท ธนพลวานิช จำกัด, 2548)

ซิลิกาเจล (silica gel) เป็นสารดูดความชื้นที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ใส่ในโถดูดความชื้นสำหรับห้องปฏิบัติทางเคมี ใส่ในห่อสินค้าเพื่อดูดความชื้นระหว่างการขนส่ง ใช้ในเครื่องมือเพื่อดูดความชื้น และใช้Tการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ เป็นต้น ซิลิกาเจลที่ใช้โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ เหมือนลูกปัด บางครั้งมีการใส่ลิเทียมคลอไรด์ทำให้เปลี่ยนสีได้ กล่าวคือ เมื่อซิลิกาเจลอยู่ในสภาพแห้งจะเป็นสีน้ำเงิน และเมื่อดูดความชื้นเข้าไปมากพอระดับหนึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู ซิลิกาเจลไม่มีพิษ สามารถดูดความชื้นได้ถึง 40% ของน้ำหนักตัว และสามารถไล่ความชื้นออกได้โดยการเผาหรืออบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส หรือคั่วบนกระทะหุงต้ม ซึ่งสามารถนำมาใช้ซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ (บริษัท ธนพลวานิช จำกัด, 2548)

2.6.1 การประเมินประสิทธิภาพการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้ง

การประเมินประสิทธิภาพของตู้อบแห้งระบบปั๊มความร้อน แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 แบบ คือ ประสิทธิภาพด้านการอบแห้ง โดยพิจารณาจากความสามารถในการอบแห้ง และประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน โดยพิจารณาจากอัตราการใช้พลังงาน (มโน, 2546)

2.6.1.1 ความสามารถในการอบแห้ง (capacity of drying)

- อัตราการอบแห้ง (drying rate, DR) (kg/hr)

$$DR = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ}}{\text{ระยะเวลาในการอบแห้ง}} \quad (2.9)$$

หรือ $DR = (m_{p.i} - m_{p.f})/ t$

- อัตราการควบแน่นน้ำที่อีแวปปอเรเตอร์ (moisture extraction rate, MER) (kg/hr) เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพการลดความชื้นของอากาศอบแห้งในอีแวปปอเรเตอร์

$$MER = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ควบแน่นที่เครื่องทำระเหย}}{\text{ระยะเวลาในการอบแห้ง}} \quad (2.10)$$

หรือ $MER = m_w/t$

2.7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม คือการหาค่าความสัมพันธ์ของเงินจากกระบวนการผลิต โครงการ และกระบวนการออกแบบทางวิศวกรรม ซึ่งมีความสำคัญต่อการลงทุนและการคงอยู่ (สามารถ, 2547)

การตัดสินใจในทางวิศวกรรม มีความสำคัญต่อการตัดสินใจลงทุนต่อโครงการทางวิศวกรรมในแง่ของดอกเบี้ย จากการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่าย กำไร และการตัดสินใจลงทุน (สามารถ, 2547)

2.7.1 ค่าเงินต้นเทียบเท่าที่ปีปัจจุบัน (present worth)

คือการเปรียบเทียบเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายที่ประเมินไว้ในแต่ละโครงการ หรือเครื่องจักรนั้นเหมาะสมที่สุดที่ควรจะตัดสินใจเลือก (สามารถ, 2547))

2.7.2 ค่าเทียบเท่าของเงินจ่ายเท่ากันรายปี (annual cost)

เป็นการเปรียบเทียบอีกวิธีหนึ่งเพื่อช่วยในการตัดสินใจ โดยที่เครื่องจักรหรือโครงงานใดที่มีค่าเทียบเท่ารายจ่ายเท่ากันรายปีน้อยกว่าจะมีความเหมาะสมที่จะตัดสินใจเลือก (สามารถ, 2547)

ในการคิดหาการคำนวณ จะกำหนดสัญญลักษณ์ดังต่อไปนี้

i = อัตราดอกเบี้ยต่อระยะเวลา (วัน เดือน ปี)

n = จำนวนระยะเวลาที่กำหนดในการตกลงการกู้ยืม (วัน เดือน ปี)

p = จำนวนเงินเริ่มต้นเมื่อมีการกู้ยืม เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Present worth

F = จำนวนเงินรวม ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นเงินต้น อีกส่วนหนึ่งเป็นผลประโยชน์หรือดอกเบี้ยที่คิดในอัตรา i% และเงินรวมนี้จะได้รับเมื่อครบกำหนดระยะเวลา n แล้ว หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Future sum

A = จำนวนเงินที่ส่วนหนึ่งเป็นเงินต้น อีกส่วนหนึ่งเป็นดอกเบี้ยที่คิดในอัตรา i% เหมือนกัน แต่เงินจำนวนนี้จะจ่ายหรือรับทุกๆช่วงระยะเวลา และจะมีค่าเท่ากันตลอดระยะเวลาที่กำหนดหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า annual payment

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$P = A(SPWE, i\%, n)$$

$$P = F(PWF, i\%, n)$$

$$A = P(CRF, i\%, n)$$

$$A = F(SFF, i\%, n)$$

$$F = P(CAF, i\%, n)$$

$$F = A(SCAF, i\%, n)$$

เมื่อ SPWE = Ununiform series present worth factor

PWF = Single payment present worth factor

CRF = Capital recovery factor

SFF = Sinking fund factor

CAF = Single payment compound amount factor

SCAF = Ununiform series compound amount factor

2.7.3 อัตราผลตอบแทนการลงทุน (internal rate of return, IRR)

คือผลได้จากการลงทุนเป็นอัตราร้อยละเมื่อเปรียบเทียบต่อเวลาหนึ่งปีที่ลงทุนไป หรืออีกนัยหนึ่งคืออัตราดอกเบี้ย อัตราผลตอบแทนการลงทุนเป็นค่าที่ช่วยในการตัดสินใจการลงทุน ถ้าโครงงานหรือเครื่องจักรที่มีอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนมากกว่าดอกเบี้ยเงินกู้ ถือว่ามีความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ (สามารถ, 2547)

2.7.4 ระยะเวลาคืนทุน (pay back period)

คือระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสมจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับค่าเงินลงทุน ผลที่ได้รับจากการประเมินการลงทุน โดยวิธีนี้จะทำให้ทราบว่าจะได้รับเงินทุนเร็วหรือช้าเท่าใด

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yang and Atallah (1985) ได้ทดลองอบแห้งบลูเบอรี่ จนเหลือความชื้นสุดท้ายที่ 16-25% ด้วยวิธีอบแห้งที่แตกต่างกัน 4 วิธีคือการอบแห้งแบบเยือกแข็ง สุญญากาศ อากาศพาความร้อน และคลื่นไมโครเวฟร่วมกับอากาศพาความร้อน ผลการทดลองพบว่าการอบแห้งแบบเยือกแข็งและสุญญากาศทำให้สีของบลูเบอรี่เปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่าแบบพาความร้อนและไมโครเวฟร่วมกับอากาศพาความร้อน

Clement *et al.* (1993) ได้รายงานผลการอบแห้งยางแผ่นแบบต่อเนื่องโดยใช้ปั๊มความร้อนที่มีขนาด 1 ตันความเย็น ความชื้นของวัสดุอบแห้งเริ่มต้นประมาณ 64% ฐานเปียก อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 18% ฐานเปียก ระบบปั๊มความร้อนสามารถผลิตอุณหภูมิของอากาศอบแห้งได้สูงสุด 70 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าอีแวปปอเรเตอร์ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 30% เป็น 80% ค่า BPA ที่เหมาะสมกับเครื่องอบแห้งนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 60-70%

ประทาน (2539) ได้รายงานการออกแบบเครื่องอบแห้งมะละกอแช่อิ่มโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบกะ (batch drying) ในระบบปิด ใช้ปั๊มความร้อนขนาด 1 ตัน ใช้ R- 22 เป็นสารทำงาน อบแห้งได้ครั้งละ 100-132 กิโลกรัม อุณหภูมิที่อบแห้ง 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 0.45 กิโลกรัม/วินาที อัตราส่วนลมไม่ผ่านอีแวปปอเรเตอร์ 63% วัสดุอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้น 74% ฐานเปียก อบจนวัสดุมีความชื้นมีความชื้นสุดท้าย 23% ฐานเปียก โดยพบว่าอัตราการอบแห้ง (drying rate DR) เป็น 0.686 กิโลกรัมของน้ำที่ควบแน่นที่อีแวปปอเรเตอร์/ชั่วโมง

Krokida *et al.* (1998) ได้ศึกษาสภาวะอบแห้งแบบอากาศพาความร้อนและแบบสุญญากาศว่ามีผลต่อสีของแอปเปิล กล้วย แครอท และมันฝรั่งโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 15, 30 และ 40% ผลที่ได้พบว่าทั้งอุณหภูมิและความชื้นไม่มีผลต่อค่าความมืด-สว่าง (L) ของผักและผลไม้ทุกชนิด แต่มีผลต่อโทนสีแดง-เขียว (a) และโทนสีเหลือง-น้ำเงิน (b) ซึ่งสีจะเปลี่ยนไปมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและความชื้นสัมพัทธ์ลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งทั้งสองแบบที่อุณหภูมิเดียวกันแล้ว การอบแห้งแบบอากาศพาความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่าการอบแห้งแบบสุญญากาศ และอุณหภูมิส่งผลกระทบมากกว่าความชื้นสัมพัทธ์

Prasertsan and Saen-saby (1998) ได้รายงานผลการเปรียบเทียบกระบวนการต่างๆ ในการอบแห้งขี้เลื่อยไม้ยางพาราและกล้วย พบว่าการอบแห้งแบบใช้ระบบ heat pump จะมีค่าใช้จ่ายของพลังงานที่ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระบบไฟฟ้าขดลวดความร้อน และระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง

Balladin and Headley (1999) ได้ทดลองอบแห้งกลีบดอกกุหลาบเป็นเวลา 2 วัน ที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส หรือใช้เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์อบเป็นเวลา 16 ชั่วโมง เพื่อให้ถึงความชื้นสมดุล และยังทดสอบหาคุณสมบัติทางชีวเคมีของกลีบดอกกุหลาบ ผลการทดลองพบว่ากลีบดอกกุหลาบมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 581% ฐานแห้ง และความชื้นสมดุล 25.2%

Chen *et al.* (2000) ได้อบแห้งแบบเยือกแข็งกับดอกกุหลาบและดอกคาร์เนชั่นสีแดงและสีชมพู เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของเวลาในการแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อสี ความชื้นและความแข็งแรงของกลีบและก้านดอก พบว่าที่อุณหภูมิต่ำจะให้สีใกล้เคียงกับสีของดอกไม้สด ซึ่งดอกสีแดงจะได้รับผลกระทบมากกว่าสีชมพู ในขณะที่อุณหภูมิสูงทำให้ความชื้นลดลง กลีบและก้านมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่สีของดอกเปลี่ยนไปมาก และยังพบว่าอุณหภูมิยังเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบกับดอกไม้มากกว่าเวลาในการแช่เยือกแข็ง ผลงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นได้ว่าสภาวะการอบแห้งแบบเยือกแข็งที่เหมาะสมจะต่างกันสำหรับการอบแห้งดอกไม้ที่มีสีต่างกันและต่างชนิดกัน

Masken (2000) ได้อบแห้งกล้วย 3 วิธีคือ แบบอากาศพาความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศา-เซลเซียสและความเร็วอากาศ 1.45 เมตรต่อวินาที แบบคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 350, 490 และ 700 วัตต์ และแบบอากาศพาความร้อนก่อนแล้วตามด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าการอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าใช้อากาศพาความร้อน และคลื่นไมโครเวฟที่มีพลังงานสูงอัตราการอบแห้งจะมากขึ้น เมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟมาช่วยในการอบแห้งแบบใช้อากาศพาความร้อนสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ประมาณ 64.3 เปอร์เซ็นต์ สีของกล้วยภายหลังการอบแห้งจะใกล้เคียงกับกล้วยสดมากที่สุด เมื่ออบแห้งด้วยวิธีใช้อากาศพาความร้อนก่อนแล้วตามด้วยคลื่นไมโครเวฟ รองลงมาแบบใช้คลื่นไมโครเวฟ และใช้อากาศพาความร้อน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดสีของกล้วยอบแห้ง ถ้าใช้เวลาในการอบแห้งนานสีจะเปลี่ยนมากขึ้นตามไปด้วย

Yanin (2003) ได้ศึกษาคุณภาพของดอกไม้หลังการอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟและอากาศพาความร้อน โดยทำการอบดอกกุหลาบ 2 พันธุ์ คือ พันธุ์ Hybrid tea และ พันธุ์ Miniature โดยใช้เตาอบสามชนิด คือ เตาอบไฟฟ้า เตาอบไมโครเวฟ และเตาอบปั๊มความร้อน ทดลองที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส พันธุ์ Hybrid tea ทำการอบแห้งเป็นระยะเวลา 16, 18 และ 20 ชั่วโมง พันธุ์ Miniature ทำการอบแห้งเป็นระยะเวลา 12, 14 และ 16 ชั่วโมง ทำการอบแห้งดอก

กุหลาบเป็นจำนวน 20 ดอก อบแห้งด้วยเตาไมโครเวฟใช้เวลา 2 และ 4 นาที ส่วนการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน ทำการอบแห้งที่สภาวะอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 และ 40 ชั่วโมง โดยพบว่าคุณภาพสีของดออกกุหลาบภายหลังอบแห้งสำหรับพันธุ์ Hybrid tea เปลี่ยนแปลงไปเมื่อระยะเวลาของการอบแห้งนานขึ้น วิธีการอบแห้งด้วยเตาอบไฟฟ้าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และอบแห้งด้วยเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 2 นาที เป็นวิธีที่ทำให้คุณภาพสีมีค่าสีเทียบเท่าค่าสีอ้างอิง แต่การอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนเป็นวิธีที่กลีบดอกไม่มีความทนทานต่อแรงดึงมากที่สุด

นักเศรษฐ์ (2547) ได้ทดลองอบแห้งกลีบดอกกุหลาบสีแดง ด้วยวิธีอากาศพาความร้อน วิธีสุญญากาศ และการใช้สารดูดความชื้น ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส วิธีสุญญากาศทดลองที่ความดันอากาศสมบูรณ์ 10, 15 และ 20 นิ้วปรอท ความชื้นเริ่มต้นของกลีบดอกกุหลาบเฉลี่ยเท่ากับ 57.5% เวลาของการอบแห้งขึ้นกับอุณหภูมิของอากาศร้อน วิธีการอบแห้งแบบอากาศพาความร้อนทำให้สีของดอกกุหลาบแห้งมีส่วนประกอบของสี Ruby Red ลดลงเหลือ 80 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของการอบแห้งไม่มีผลต่อคุณภาพของสีแดง การอบแห้งโดยวิธีสุญญากาศทำให้สีของดอกกุหลาบแห้งมีส่วนประกอบของสี Ruby Red ลดลงเหลือประมาณ 27-33% ขึ้นกับอุณหภูมิการอบแห้ง และการอบแห้งโดยการใช้สารดูดความชื้นทำให้สีของกลีบดอกกุหลาบแห้งมีส่วนประกอบของสี Ruby Red ลดลงเหลือ 80% และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับวิธีอากาศพาความร้อน วิธีอากาศพาความร้อนเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มปริมาณของการอบแห้งได้ง่ายกว่าวิธีการใช้สารดูดความชื้น

สัมพันธ์และคณะ (2547) ได้ทำการออกแบบสร้างและทดลองเครื่องต้นแบบอบแห้งดอกไม้ด้วยระบบปั๊มความร้อน โดยเครื่องต้นแบบมีขนาดกว้าง×ยาว×สูง 2 เมตร× 2.6 เมตร × 2.1 เมตร สามารถอบแห้งดอกกุหลาบได้ครั้งละ 2,000 ดอก พบว่าระยะเวลาของการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับเครื่องต้นแบบคือ 56 ชั่วโมง ความชื้นเริ่มต้นของดอกกุหลาบสีขาวและสีชมพูเท่ากับ 83.7% และ 85.8% ฐานเปียกตามลำดับ การทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 45±5 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 8.77 เมตรต่อวินาที ให้ผลดีที่สุดคือ ค่าสีหลังการอบแห้งใกล้เคียงดอกกุหลาบสด ความชื้นหลังการอบแห้งอยู่ในช่วง 10 – 14% ฐานเปียก ซึ่งเป็นความชื้นอยู่ในช่วงที่ต้องการ สำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า เครื่องต้นแบบมีต้นทุนการผลิตดอกไม้แห้งเท่ากับ 2.96 บาทต่อดอก มีอัตราผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ 140% และมีระยะเวลาคืนทุน 9 เดือน

ศิริชัย (2547) ได้ทดลองอบแห้งข้าวแตนโดยใช้ปั๊มความร้อน โดยทำการออกแบบและสร้างตู้อบแห้งที่ใช้ระบบปั๊มความร้อนให้เหมาะสมกับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ให้มีความสามารถในการอบแห้งข้าวแตนเปียกครั้งละ 50 กิโลกรัม ชุดปั๊มความร้อนมีขนาดการทำความเย็น 9,000 BTU/h ใช้สารทำความเย็น R-22 มีอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศภายในระบบ 0.512 กิโลกรัม/

วินาที ทดลองที่อัตราส่วนไม่ผ่านอีแวปปอเรเตอร์ (bypass air ratio, BPA) 4 ระดับคือ 0, 25, 50 และ 75% ในทุกการทดลอง ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวแตนเปียกประมาณ 81% ฐานแห้ง ใช้เวลาอบแห้ง 8 ชั่วโมง พบว่าอัตราส่วนไม่ผ่านอีแวปปอเรเตอร์ (BPA) 0, 25, 50 และ 75% สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนมีค่า $COP_{hp,avg}$ เท่ากับ 4.43, 4.44, 4.43 และ 3.66 ค่า $COP_{ref,avg}$ เท่ากับ 5.30, 5.38, 3.76 และ 1.91 มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 2.19, 2.39, 2.29 และ 2.30 กิโลกรัมของน้ำที่ระเหยออกไป/ชั่วโมง อัตราการควบแน่นน้ำที่อีแวปปอเรเตอร์ (MER_{avg}) 0, 25, 50 และ 75% เท่ากับ 1.59, 1.59, 1.52 และ 1.26 กิโลกรัมของน้ำที่ควบแน่นที่อีแวปปอเรเตอร์/ชั่วโมง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ย (SECavg) เท่ากับ 2.98, 2.64, 2.55 และ 2.53 MJ/kg water evap