บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

2.1 สถานการณ์ความต้องการผักอบแห้ง

ประเทศไทยถือเป็นเหล่งอาหารที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก และมีผลผลิตวัตถุดิบอาหารสดที่เพียงพอบริโภคภายในประเทศ แต่เนื่องจากภาวะทางเศรษฐกิจส่งผลในผู้บริโภคภายในประเทศมีพฤติกรรมการบริโภคอาหารกึ่งสำเร็จรูปมากขึ้นทั้งนี้ จากรายงานของศูนย์วิจัยกสิกรไทย (2005) พบว่าความต้องการอาหารกึ่งสำเร็จรูปของผู้บริโภคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเป็นสินค้าที่มีความสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบันได้ดี โดยเฉพาะในช่วงที่ผู้บริโภคต้องการประหยัด จากค่าครองชีพที่สูงมากขึ้น เนื่องจากจุดเด่นของอาหารกึ่งสำเร็จรูปคือ ราคาจำหน่ายอยู่ในเกณฑ์ต่ำเมื่อเทียบกับอาหารประเภทอื่นๆ ไม่ต้องเสียเวลาในการเตรียมอาหารมากนัก มีความสะดวกรวดเร็ว และมีให้เลือกหลากหลายรสชาติ รวมทั้งยังเป็นอาหารที่เก็บไว้ได้นานอีกด้วย

การคาดการณ์ทางการตลาดของอาหารกึ่งสำเร็จรูปในปี 2548 พบว่ามีมูลค่ารวมมากกว่า 11,000 ล้านบาท โดยบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปเป็นเป็นสินค้าที่ได้รับความนิยมอันดับหนึ่ง มีมูลค่าทางการตลาดสูงสุดในบรรดาอาหารกึ่งสำเร็จรูปทุกประเภท รองลงมาคือโจ๊กกึ่งสำเร็จรูป ซึ่งมีแนวโน้มการขยายตัวทางการตลาดที่สูงขึ้น

ถึงแม้ว่าอาหารกึ่งสำเร็จรูปจะมีแนวโน้มทางการตลาดที่ดี แต่ก็ยังมีข้อกังขาที่ว่าเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางอาหารต่ำ เนื่องจากจะประกอบไปด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่ และผู้บริโภคในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะหันมาสนใจในสุขภาพเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีแรงหนุนที่สำคัญคือ กระแสสุขภาพเชิงป้องกัน ที่เน้นการดูแลสุขภาพให้แข็งแรงไม่เจ็บป่วย เพื่อจะได้ไม่ต้องเสียค่ารักษาพยาบาล (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2007) ดังนั้นการเพิ่มคุณค่าให้กับอาหารกึ่งสำเร็จรูปที่มีความนิยมสูงขึ้นในปัจจุบันสามารถทำได้โดยการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเข้าไป ผักอบแห้งจึงเป็นทางเลือกหนึ่งนอกเหนือจากผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์อบแห้ง ซึ่งจากรายงานของ ธิติวัฒน์ (2550) ที่ทำการศึกษาถึงความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ผักรวมอบแห้งสำเร็จรูป ในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ผู้บริโภคส่วนใหญ่เห็นความสำคัญของคุณประโยชน์ของอาหารในระดับมาก และมีความต้องการในการรับประทานผักและธัญพืชในปริมาณที่มากขึ้น และมีปัจจัยในการเลือกรับประทานอาหารคือ ความสะอาด ถูกสุขอนามัย มีมาตรฐานการผลิต และเห็นว่าผักอบแห้งกึ่งสำเร็จรูปสามารถนำมาผสมได้ดีในอาหารกึ่งสำเร็จรูป เช่น ข้าวต้ม โจ๊ก เพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหารในรูปของใยอาหาร และ

สารอาหารจากผักและธัญพืช สามารถรับประทานได้ทุกมื้อ แต่ผู้บริโภคก็เกรงว่าคุณค่าสารอาหารบางชนิดในผักอบแห้งจะลดลง รสชาติไม่อร่อยเท่าผักสดและธัญพืชปรุงเสร็จใหม่ และไม่มีความมั่นใจด้านความปลอดภัยในการบริโภค

2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง

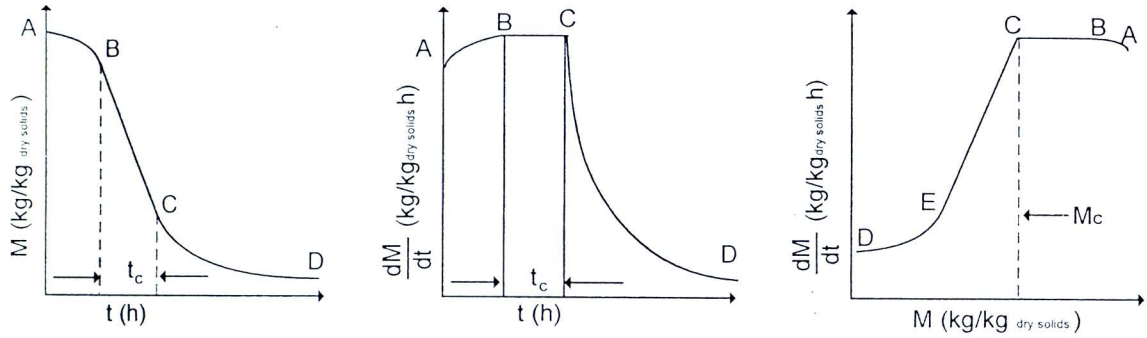
การอบแห้ง (Drying) คือการกำจัดความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ในวัสดุให้ลดลงจนมีความชื้นอยู่ในปริมาณที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา และมีคำอีกคำหนึ่งซึ่งเรามักจะพบอยู่เป็นประจำคือ การทำแห้ง (Dehydration) ซึ่งเป็นการกำจัดความชื้นหรือน้ำออกจากวัสดุจะกระทั่งวัสดุนั้นไม่มีความชื้นหรือเข้าใกล้มวลแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญกระบวนการหนึ่งเพื่อให้ผลผลิตทางการเกษตรมีความเหมาะสมต่อการเก็บรักษา คือสามารถยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสียหายเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากผลิตผลทางการเกษตรส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูงขณะทำการเก็บเกี่ยวทำให้เก็บรักษาได้ไม่นาน การอบแห้งจะช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลิตผลได้เป็นระยะเวลายาวนานขึ้น ผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญและต้องทำการอบแห้งได้แก่ ธัญพืช ผลไม้ ผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อิ่ม ผัก สมุนไพร เป็นต้น

การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย (สมชาติ, 2540) ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง โดยพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ เมื่อสมมติให้ อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศเหนือผิวของวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีการถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุโดยการพาความร้อน การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดระบวนการอบแห้งแสดงในภาพที่ 2.1 โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วงคือ

ช่วง A-B ช่วงนี้เป็นช่วงสภาวะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุจนถึงค่า ๆ หนึ่งซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

ช่วง B-C ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period of drying) ช่วงนี้ผิววัสดุยังคงชุ่มไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกนำออกจากผิววัสดุด้วยการระเหยซึ่งอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของการอบแห้ง อัตราการถ่ายเทมวลมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้ง



ภาพที่ 2.1 การลดลงของความชื้นวัสดุ

ที่มา: Brennan et al. (1990)

ช่วง C-D ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง ณ จุด C ในภาพที่ 2.1 อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่าความชื้นวิกฤต เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปรกติช่วงอัตราการอบแห้งลดลงประกอบไปด้วยสองช่วงคือ ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (C-E) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะแห้งและอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 2 (E-D) ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุและผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น อัตราการไหลของอากาศ มีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาตลอดกระบวนการอบแห้งจะพบว่าช่วงของการอบแห้งลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น

อัตราการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วนั้นมีปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งคือ

1. ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของวัสดุ ถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อวัสดุและเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมาก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชิ้นวัสดุทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

3. ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นในถาดทำให้ปริมาณของวัสดุต่อถาดมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบางเพื่อให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4. อุณหภูมิของอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อวัสดุได้ดีจึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

5. ความชื้นของอากาศร้อน หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

6. ความดันของบรรยากาศ การอบแห้งโดยทั่วไปมักทำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดความดันของบรรยากาศในขณะทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน เครื่องอบแห้งมีการลดความดันในสภาวะการอบแห้งเช่น เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบลูกกลิ้ง (Vacuum drum drier) เป็นต้น

7. ความเร็วลมร้อน ถ้าความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

8. สมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งคือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ

การส่งผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นโดยการนำเนื่องจาก internal gradient ของอุณหภูมิและมีเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการพาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้น การเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุอาหารอาจเกิดขึ้นจากกลไกที่ต่างกันคือ

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

การถ่ายเทมวลจากผลิตภัณฑ์ไปสู่สิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นเนื่องจากการพาความร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของ partial vapor pressure ที่ boundary layer ในบริเวณรอยต่อของอากาศและผลิตภัณฑ์ การระเหยโดยตรงเกิดขึ้นเมื่อความดันไอในผิวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศอย่างเช่นในกรณีนี้ของ vacuum drying และ freeze drying

การสมดุลความร้อนอย่างง่ายของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน Brooker et al. (1992) ได้แนะนำสมการซึ่งทำการสมดุลพลังงานของอากาศกับความชื้นของวัสดุ โดยสมมติให้ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากวัสดุชื้น มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของอากาศ ซึ่งมีรูปสมการคือ

$$m_w h_{fg} = \dot{m}_a c_a (T_{ai} - T_{af})t \qquad (2.1)$$

เมื่อ m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

c_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg ^{o}C)

T_{ai} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง (^{o}C)

T_{af} คือ อุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้ง (^{o}C)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)

สำหรับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักเริ่มต้น ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายของวัสดุ ดังสมการคือ

$$m_w = m_i\left(1-\frac{M_{df}+1}{M_{di}+1}\right) \qquad (2.2)$$

เมื่อ m_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ (kg)

M_{di} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

M_{df} คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

2.3 ความชื้นวัสดุ

ปริมาณความชื้นของวัสดุจะอธิบายอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความชื้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง

ความชื้นมาตรฐานเปียก จะแสดงน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ โดยปกติจะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในทางการค้า เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_w = \frac{m_w}{m_w + m_d} \qquad (2.3)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง ซึ่งจะใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้งดังนั้นจึงง่ายในการวิเคราะห์การถ่ายเทความชื้น ความชื้นมาตรฐานแห้งหาได้จาก

$$M_d = \frac{m_w}{m_d} \tag{2.4}$$

จากสมการ (3) และ (4) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้งดังนี้

$$M_d = \frac{M_w}{1 - M_w} \tag{2.5}$$

และ

$$M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \tag{2.6}$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (w.b, อัตราส่วน)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b, อัตราส่วน)

m_w คือ มวลของความชื้น (kg)

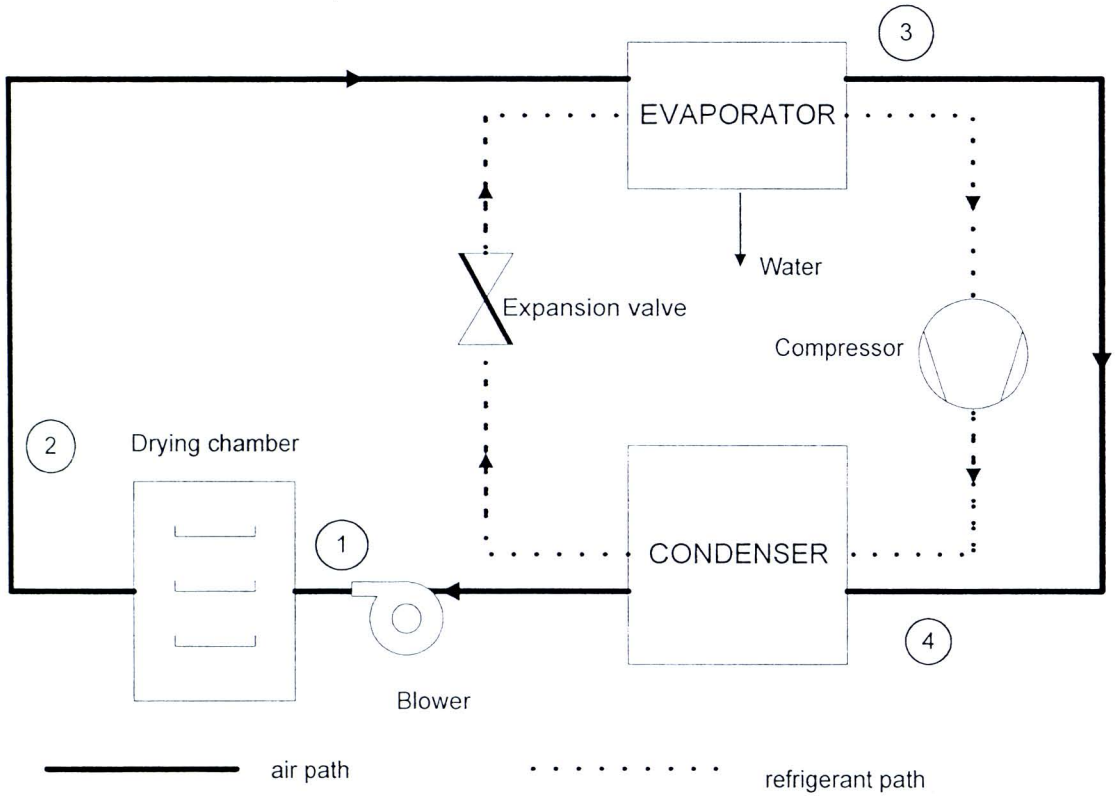
m_d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

2.4 การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน

การทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแสดงในภาพที่ 2.2 โดยอากาศอบแห้งจะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง 1 อากาศได้รับความชื้นจากวัสดุเป็นอากาศร้อนชื้นและออกจากห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง 2 และเข้าสู่เครื่องทำระเหย (Evaporator) เพื่อทำการลดความชื้นโดยการควบแน่นน้ำออกจากอากาศ กระบวนการจาก 2–3 ความร้อนแฝงของการระเหยจะถูกใช้ในการระเหยสารทำความเย็นในเครื่องทำระเหยจากนั้นสารทำความเย็นจะถูกอัดด้วยเครื่องอัดไอ (Compressor) ทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงแล้วส่งต่อไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) อากาศเย็นที่ผ่านการลดความชื้นจะได้รับความร้อนคืนกลับเมื่อไหลผ่านเครื่องควบแน่นจากตำแหน่ง 4-1

ส่วนสารทำความเย็นก็จะไหลจากเครื่องควบแน่นสู่เครื่องทำระเหยโดยผ่านวาล์วขยายเพื่อทำการลดความดันให้ต่ำลง การอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสามารถแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้ 3 ระบบคือ

1. การอบแห้งระบบเปิด (open system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้วทำให้มีความชื้นสูงขึ้น อากาศนี้จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศทั้งหมด ซึ่งการอบแห้งระบบเปิดนี้จะมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนในการอุ่นอากาศเพียงอย่างเดียวหรืออาจมีการลดความชื้นอากาศก่อนปล่อยสู่บรรยากาศก็ได้ ลักษณะการอบแห้งระบบเปิดแสดงในภาพที่ 2.3 (ก)



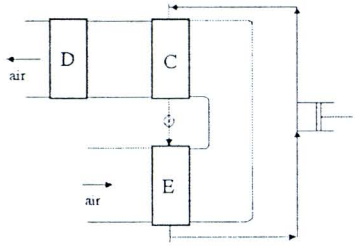
ภาพที่ 2.2 หลักการทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Chua et al. (2000)

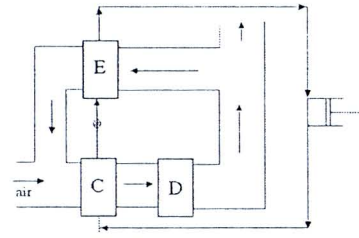
2. การอบแห้งระบบปิดบางส่วน (partial closed system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้ว จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งจะถูกลดความชื้นก่อนนำกลับมาใช้ผสมกับอากาศใหม่ การอบแห้งรูปแบบนี้จึงมีการใช้ประโยชน์จากปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและลดความชื้นอากาศ ลักษณะการอบแห้งระบบปิดบางส่วนแสดงในภาพที่ 2.3 (ข)

3. การอบแห้งระบบปิด (closed system) การอบแห้งรูปแบบนี้จะนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด โดยอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

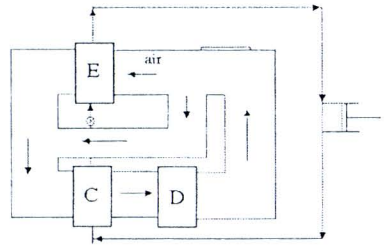
ส่วนแรกจะถูกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนหนึ่งจะนำมาผสมกับอากาศส่วนแรกที่ผ่านการลดความชื้นแล้ว การอบแห้งระบบปิดนี้จึงมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและการลดความชื้น ลักษณะการอบแห้งระบบปิดแสดงในภาพที่ 2.3 (ค)



(ก) ระบบเปิด



(ข) ระบบปิดบางส่วน



(ค) ระบบปิด

ภาพที่ 2.3 ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

เนื่องจากเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเป็นการรวมเอาส่วนประกอบหลักสองส่วนเข้าด้วยกันคือ ส่วนอบแห้ง กับระบบปั๊มความร้อน ดังนั้นการออกแบบระบบปั๊มความร้อนจึงต้องมีความสัมพันธ์กับส่วนอบแห้ง สำหรับการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนแบบปิด เมื่อพิจารณาที่วงจรอากาศ (ภาพที่ 2.3 (ค)) จะพบว่าอากาศหลังการอบแห้งที่เวียนกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนจะไหลข้ามเครื่องทำระเหย (bypass) ไปผสมกับอากาศส่วนแรก แล้วนำไปอุ่นที่เครื่องควบแน่นต่อไป การออกแบบจึงเริ่มจากการหาขนาดของเครื่องทำระเหย ซึ่งจากการสมดุลความพลังงานจะได้ว่า

$$Q_e = \dot{m}_{ae} c_a (T_{ei} - T_{eo}) \qquad (2.7)$$

เมื่อ Q_e คือ อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำระเหย (kW)

$\dot{m}_{ae}$ คือ อัตราการไหลอากาศผ่านเครื่องทำระเหย (kg/s)

T_{ei} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำระเหย (^{o}C)

T_{eo} คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องทำระเหย (^{o}C)

ในการอบแห้งระบบปิดจะมีเครื่องควบแน่น 2 ชุด เป็นชุดเครื่องควบแน่นตัวในซึ่งใช้ในการอุ่นอากาศ และเครื่องควบแน่นตัวนอกใช้สำหรับระบายความร้อนส่วนเกินออกจากระบบ ในการหาขนาดเริ่มจากเครื่องควบแน่นตัวใน ซึ่งจำเป็นต้องทราบอุณหภูมิของอากาศผสมระหว่างอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยกับอากาศ bypass ซึ่งเป็นสภาวะอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น ซึ่งจากการสมดุลความร้อนสัมผัสของอากาศผสมจะได้ว่า

$$\dot{m}_a T_{ci} = \dot{m}_{bp} T_f + \dot{m}_{ae} T_{eo} \qquad (2.8)$$

เมื่อ $\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลของอากาศผสม (kg/s)

$\dot{m}_{bp}$ คือ อัตราการไหลของอากาศ bypass (kg/s)

T_{ci} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น (^{o}C)

T_f คือ อุณหภูมิของอากาศหลังการอบแห้ง (^{o}C)

เมื่อทราบอุณหภูมิของอากาศผสมแล้ว ก็สามารถหาขนาดของเครื่องควบแน่นตัวในได้จากสมการการถ่ายเทความร้อนคือ

$$Q_{cin} = \dot{m}_a c_a (T_{co} - T_{ci}) \qquad (2.9)$$

เมื่อ Q_{cin} คือ อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวใน (kW)

T_{co} คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องควบแน่น (^{o}C)

เมื่อได้ขนาดของเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นตัวในแล้ว สามารถนำไปหาขนาดของเครื่องอัดไอได้จาก catalogue ของบริษัทผู้ผลิต และเมื่อได้เครื่องอัดไอแล้วสามารถหาขนาดของเครื่องควบแน่นตัวนอกได้จาก

$$Q_{cex} = Q_e + W_c - Q_{in} \qquad (2.10)$$

เมื่อ Q_{cex} คือ อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวนอก (kW)

W_c คือ กำลังของเครื่องอัดไอ (kW)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนจะพิจารณาเป็นสองส่วนคือ

1. ประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance, COP) ซึ่งหาได้จาก

$$COP = \frac{\text{useful heat output}}{\text{power input}} = \frac{Q_{cin}}{W_c} \qquad (2.11)$$

ค่าประสิทธิภาพสูงสุดทางทฤษฎีของปั๊มความร้อนคือ Carnot efficiency ซึ่งหาได้จาก

$$COP_{carnot} = \frac{T_{condenser}}{T_{condenser} - T_{evaporator}} \qquad (2.12)$$

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

2. ประสิทธิภาพทางด้านการอบแห้งแบ่งสามารถพิจารณาได้จาก

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คิดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง คือ

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} \qquad (2.13)$$

$$DR = \frac{M_{di} - M_{df}}{t} \qquad (2.14)$$

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมดตลอดการอบแห้ง

$$SMER = \frac{m_i - m_f}{Pe} \qquad (2.15)$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
05 ต.ค. 2555
วันที่.....
เลขทะเบียน.....249165
เลขเรียกหนังสือ.....

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งเป็นค่าส่วนกลับของ SMER

$$SEC = \frac{3.6\,Pe}{m_i - m_f} \tag{2.16}$$

อัตราควบแน่น (Moisture Extraction Rate, MER) คือปริมาณน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหยต่อเวลาที่ใช้อบแห้ง

$$MER = \frac{m_{wc}}{t} \tag{2.17}$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง, kg_{water}/h หรือ %db/h

m คือ น้ำหนักของวัสดุ, kg

M_d คือ ความชื้นวัสดุ, %db

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h

SMER คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, kg_{water}/kWh

Pe คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg_{water}

MER คือ อัตราควบแน่นน้ำ, kg/h

ตัวห้อย

i คือ ก่อนอบแห้ง

f คือ หลังอบแห้ง

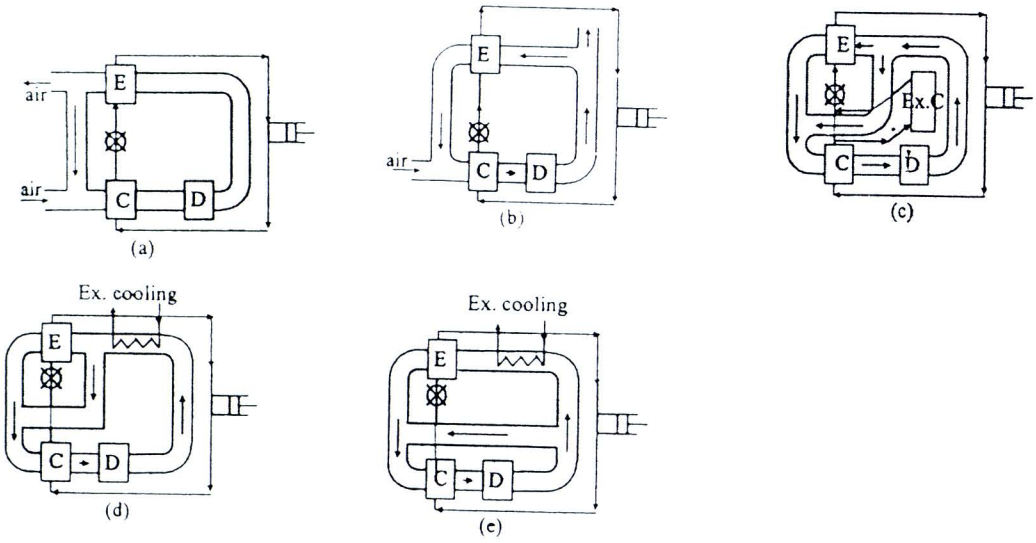
wc คือ น้ำควบแน่น

เนื่องจากเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเป็นเครื่องอบแห้งที่สามารถทำการอบแห้งได้หลากหลายรูปแบบ จึงมีนักวิจัยได้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเพื่อการอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหารในรูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

Sosle et al. (2003) ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนโดยปั๊มความร้อนมีขนาด 2.3 kW และมี external condenser เป็นแบบ water-cooled ทำการทดลองอบแห้ง apple

เปรียบเทียบกับ hot air drying พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนมีการคืนน้ำกลับได้ดีกว่า และมีค่า water activity ต่ำกว่าที่ค่าความชื้นเท่ากัน แต่ในด้านความสิ้นเปลืองพลังงานกับพบว่าเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่า ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนของระบบออกไปทาง external condenser ซึ่งต่างจากผลการทดลองของ Prasertsan and Sean-saby (1998) ที่ทำการทดลองอบแห้งกล้วยโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งใช้ก๊าซหุงต้มและน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง พบว่าการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนจะเสียค่าใช้จ่ายในการทำงานที่ต่ำกว่าซึ่งผลการศึกษาที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับ Meyer and Greyvenstein (1992) ที่นำเอาระบบปั๊มความร้อนมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งเมล็ดพืชแทนที่การอบแห้งโดยใช้พลังงานจากขดลวดความร้อนและเชื้อเพลิงดีเซล แต่เนื่องจากการอบแห้งเมล็ดพืชจะกระทำเพียงไม่กี่ครั้งในรอบปี ดังนั้นเพื่อให้คุ้มค่ากับการลงทุนจึงแนะนำว่าควรที่จะนำระบบปั๊มความร้อนไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นร่วมด้วย เช่นการทำน้ำอุ่นเป็นต้น

นอกจากนี้ Saensabai and Prasertsan (2003) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งเป็นการศึกษาทั้งสามรูปแบบการทำงานคือ ระบบเปิด ระบบปิดบางส่วน ระบบปิด โดยมุ่งเน้นหาระบบการทำงานที่เหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น โดยการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Prasertsan et al. (1996) พัฒนาขึ้นซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบเปิดและระบบปิดบางส่วนมาใช้ในการจำลองสถานการณ์และใช้ผลการทดลองของ Prasertsan et al. (1997) มาทำการพิสูจน์เปรียบเทียบ แต่ว่าผลการทดลองในปี 1997 ของ Prasertsan et al. นี้ไม่ครอบคลุมถึงช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาและการศึกษานี้ไม่ได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการจัดเรียงตำแหน่งของอุปกรณ์ในรูปแบบ (d) และ (e) ด้วย ผลจากการศึกษาทั้ง 5 รูปแบบนี้พวกเขาสรุปว่าเครื่องอบแห้งที่ทำงานเป็นแบบระบบปิดบางส่วนมีความเหมาะสมกับสภาวะอากาศร้อนชื้นมากที่สุดและยังพบว่าการทำงานที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับอัตราการอบแห้งและสภาวะอากาศแวดล้อมด้วย



C = condenser, D = dryer, E =e vaporator, Ex.C = external condenser,

Ex. Cooling = extenal cooling

ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา: Saensabi and Prasertsan, 2003

สุทธิศักดิ์ (2543) ได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนซึ่งทำงานเป็นแบบระบบปิด โดยการนำชุดกาลักความร้อนมาช่วยลดความชื้นและการคืนความร้อนกลับของอากาศเครื่องอบแห้งประกอบด้วย ห้องอบแห้งขนาด 0.65 ×0.58×0.55 m^3 ภายในบรรจุผลิตภัณฑ์ได้จำนวน 8 ถาด มีพื้นที่ใช้งาน 2.5 m^2 ใช้ระบบปั๊มความร้อนขนาดหนึ่งตันความเย็นและชุดกาลักความร้อนขนาด 1.6 กิโลวัตต์ การทำงานของเครื่องเป็นระบบปิดมีอุณหภูมิอบแห้ง 50 ^0C จากการประเมินสมรรถนะจากการระเหยน้ำจำนวน 4 กิโลกรัม ที่อัตราการไหลอากาศ 0.363, 0.447 และ 0.536 kg/s อัตราส่วนอากาศ Bypass 60-67% เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า ค่า 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 ประสิทธิภาพของกาลักความร้อนอยู่ในช่วง 0.194-0.212 และจากการทดลองอบแห้งเห็ดฟางจำนวน 6 การทดลอง ที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.544 - 0.568 kg/s อัตราส่วนอากาศ Bypass ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 65.42 - 67.82 % เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราการอบแห้งตลอดการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.530 - 1.019 kg/h โดยอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของผลผลิตและความชื้นเริ่มต้นของแต่ละการทดลอง ในด้านการใช้พลังงานพบว่ามีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมงอยู่ระหว่าง 1.71- 1.83

kWh ซึ่งคิดเป็นปริมาณน้ำที่ระเหยต่อหน่วยพลังงาน (SMER) ได้ค่าระหว่าง 0.305 -0.594 kg/kWh คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจากการทดสอบเทียบสีมาตรฐานพบว่ามีความสม่ำเสมออยู่ในค่ามาตรฐานเดียวกัน และจากรายงานของ Tawarat and Somyot (2007) พบว่าคุณภาพของไพลที่ได้หลังการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนมีคุณภาพทางด้านสีที่ดีกว่าการทำแห้งไพลด้วยวิธีการตากแดดอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีของไพลก็ไม่แตกต่างจากไพลสด ดังนั้นการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนจึงสามารถที่จะยังคงคุณภาพของผลิตไว้ได้ โดยเฉพาะไพลซึ่งเป็นพืชที่มีน้ำมันหอมระเหยซึ่งจำเป็นต้องระมัดระวังในเรื่องของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

จากรายงานที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนมีศักยภาพในการอบแห้งผัก ผลไม้ และสมุนไพร ที่ต้องการคงไว้ซึ่งคุณภาพ และต้องการประหยัดพลังงานในการอบแห้ง โดยค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนอาจจะสูงได้ถึง 4 kg_{water}/kWh (Perera and Rahman, 1997) ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น ชนิดของวัสดุที่ใช้อบแห้ง ขนาดของชิ้นวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ และการจัดเรียงวัสดุในชั้นอบแห้ง เป็นต้น