

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีกระบวนการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย ในที่นี้กล่าวถึงการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารเท่านั้น ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารส่วนมากจะไม่ใช้วัสดุที่สามารถทำให้แห้งจนความชื้นมีค่าเป็นศูนย์ได้ แต่จะมีความชื้นจำนวนหนึ่งแฝงอยู่ (Hygroscopic Materials) เช่น ผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ต่างๆ ซึ่งต่างจากวัสดุบางอย่าง เช่น ทราช หรือ น้ำ ซึ่งสามารถทำให้แห้งจนความชื้นมีค่าเป็นศูนย์ได้ (Non-Hygroscopic Materials)

ความชื้นในผลไม้

ความชื้นในผลไม้มีทั้งความชื้นที่เกาะติดที่ผิวของผลไม้ (Unbound Moisture) ซึ่งสามารถไล่ความชื้นนี้ออกไปได้หมดโดยการให้ความร้อน ความชื้นอาจเกาะติดอยู่ภายในผนังด้านในท่อเล็ก (Capillaries) ที่อยู่ภายในเนื้อผลไม้ (Bound Moisture) โดยไม่สามารถไล่ความชื้นภายในผลไม้นี้ได้หมด ปริมาณความชื้นในผลไม้สามารถแสดงได้ 2 แบบ

ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในผลไม้ต่อน้ำหนักผลไม้เริ่มต้น มีค่าดังนี้

$$M_w = \frac{(W_i - d)}{W_i} \quad (3.1)$$

เมื่อ

M_w = ความชื้นเริ่มต้น (เศษส่วนมาตรฐานเปียก)

W_i = มวลของผลไม้เริ่มต้น (kg)

d = มวลของผลไม้แห้ง (kg)

การแสดงความชื้นแบบนี้นิยมใช้ในทางการค้า

ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในผลไม้ต่อน้ำหนักผลไม้แห้ง มีค่าดังนี้

$$M_d = \frac{(W_i - d)}{d} \quad (3.2)$$

เมื่อ

M_0 = ความชื้นเริ่มต้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

W_i = มวลของผลไม้เริ่มต้น (kg)

d = มวลของผลไม้แห้ง (kg)

การแสดงความชื้นแบบนี้ ส่วนใหญ่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของผลไม้แห้งจะมีค่าคงที่ หรือเกือบคงที่ ระหว่างการอบแห้ง ที่ว่าเกือบคงที่นี้ เพราะผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้น จึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย

ในการอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งที่จะต้องศึกษาเพื่อความเข้าใจในหลักการทำงานของระบบ คือ ทฤษฎีการอบแห้ง และทฤษฎีฮีตปั๊ม เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานและสมรรถนะโดยรวมของระบบอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ระบบฮีตปั๊มมีส่วนประกอบสำคัญ คือ คอนเดนเซอร์ เครื่องระเหย คอมเพรสเซอร์ และวาล์วระเหยสารทำความเย็น ซึ่งในส่วนของเครื่องระเหยจะมีท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ช่วยให้ความเย็นเบื้องต้น ซึ่งอยู่ทางช่องลมเข้า ก่อนที่จะผ่านคอยล์ทำความเย็น และจะช่วยให้ความร้อนกับอากาศที่ออกจากคอยล์ทำความเย็นในส่วนที่ 2 ของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายเทความร้อน และถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ในทางปฏิบัติมักจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งผลไม้โดยการผ่านอากาศร้อนไปยังผิวด้านนอกของผลไม้ ซึ่งจะเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน และความร้อนสัมผัส จากอากาศที่ผลไม้ได้รับส่วนใหญ่ จะใช้ในการทำให้น้ำระเหยออกจากผลไม้ ซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งผลไม้ชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ในส่วนที่สำคัญสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังนี้

3.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

ในกรณีที่อากาศร้อนไหลผ่านวัสดุชิ้นจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุและพาไอน้ำออกไปด้วย ถ้าอากาศร้อนมีอุณหภูมิและความชื้นคงที่ จะพบว่า ปรากฏการณ์ของกระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกอัตราการอบแห้งจะคงที่ และเมื่ออบแห้งต่อไปจนวัสดุลดความชื้นลงถึงค่าหนึ่ง จะพบว่าอัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลง เรียกความชื้นที่จุดนี้ว่าความชื้นวิกฤต ถ้าค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าความชื้นวิกฤตในการอบแห้ง จะมีช่วงอัตรา

การอบแห้งลดลงเท่านั้น ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ผิวของวัสดุจะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น อัตราการอบแห้ง จะถูกควบคุมโดยความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงอิทธิพลของอากาศภายนอกจะลดลงด้วย อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำที่ออกมาจากวัสดุเท่านั้น

3.1.2 อัตราการอบแห้งคงที่

ในกรณีที่อัตราการอบแห้งคงที่นั้น การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร ระหว่างวัสดุกับอากาศ จะมีพฤติกรรมเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกทางเทอร์มิสเตอร์ ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมของอากาศ ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงอัตราการถ่ายเทมวลสารของวัสดุอบแห้งได้ดังนี้

$$\dot{m}_w = h_d \rho_a A (W_{wb} - W) \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_w = \frac{h'A(T - T_{wb})}{h_{fg}} \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$\dot{m}_w = \text{อัตราการถ่ายเทมวลสาร (kg/hr)}$$

$$h_d = \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (m/hr)}$$

$$h' = \text{สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (kJ/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C-hr)}$$

$$A = \text{พื้นที่ของวัสดุ (m}^2\text{)}$$

$$h_{fg} = \text{ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากวัสดุ (kJ/kg)}$$

$$\rho_a = \text{ความหนาแน่น (kg/m}^3\text{)}$$

$$W = \text{อัตราส่วนความชื้น (kg water / kg dry air)}$$

จากสมการ (3.3) และ (3.4) จะเห็นว่า \dot{m}_w มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ h_d หรือ h' มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำได้โดยเพิ่มความเร็วลม อันเป็นผลให้ความหนาของชั้นอากาศนิ่งที่อยู่รอบ ๆ ผิววัสดุมีค่าลดลง หรือโดยการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งจะทำให้ $T - T_{wb}$ เพิ่มขึ้น หรือโดยการ

ลดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ซึ่งจะทำให้ $W_{wb} - W$ มีค่าเพิ่มขึ้น หรือโดยการเพิ่มค่า A ซึ่งอาจทำได้โดยลดขนาดวัสดุให้เล็กลง

3.1.3 อัตราการอบแห้งลดลง

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวลมิได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่เกิดภายในเนื้อของวัสดุด้วยการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวซ้ำกว่าการพาความร้อนจากวัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่นั้นอุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น อัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนต์ความเข้มข้นของความชื้น และสามารถเขียนได้ว่า

$$\dot{m}_w = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$$\dot{m}_w = \text{อัตราการถ่ายเทมวล (kg/hr)}$$

$$A = \text{พื้นที่การถ่ายเทมวล (m}^2\text{)}$$

$$C = \text{ความเข้มข้นของความชื้น (kg/m}^2\text{)}$$

$$x = \text{ระยะ (m)}$$

$$D = \text{สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m}^2\text{/hr)}$$

เมื่อพิจารณาอัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าและออกจากปริมาตรบังคับ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลในปริมาตรบังคับ โดยเริ่มที่แกน x ก่อน จะเขียนอัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าปริมาตรบังคับได้ว่า

$$\dot{m}_w|_x = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.6)$$

และเขียนอัตราการเคลื่อนที่ของมวลออกจากปริมาตรบังคับได้ว่า

$$\dot{m}_w|_{x+dx} = -AD \frac{\partial C}{\partial x} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) dx \right] \quad (3.7)$$

กำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลในปริมาตรบังคับ คือ

$$\Delta \dot{m}_w = A \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) dx \quad (3.8)$$

เมื่อ t = เวลา (hr)

จากกฎทรงมวลจะได้ว่า อัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าปริมาตรบังคับย่อมเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรบังคับ บวกกับอัตราการเคลื่อนที่ของมวลออกจากปริมาตรบังคับ ดังนั้น

$$-AD \frac{\partial C}{\partial x} = A \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) dx - AD \frac{\partial C}{\partial x} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] dx \quad (3.9)$$

หรือ

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3.10)$$

ถ้าหารสมการ (3.10) ด้วยความหนาแน่นของวัสดุ จะได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (3.11)$$

เมื่อ M = ความชื้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

ถ้าสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่จากสมการ (3.11) จะได้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (3.12)$$

หากกำหนดภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขต ดังนี้

$$M(x,0) = M_{in} \quad (3.13)$$

$$M(0,t) = M(L,t) = M_{eq} \quad (3.14)$$

เมื่อ

M = ความชื้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

M_{in} = ความชื้นเริ่มต้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

M_{eq} = ความชื้นสมดุล (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

และกำหนดให้

$$MR = \frac{(M - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} \quad (3.15)$$

$$\bar{x} = \frac{x}{L} \quad (3.16)$$

$$\theta = \frac{Dt}{L^2} \quad (3.17)$$

แทนค่า MR , \bar{x} และ θ ลงในสมการ (3.12) จะได้

$$\frac{\partial MR}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 MR}{\partial \bar{x}^2} \quad (3.18)$$

โดยมีภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขตดังนี้

$$MR(\bar{x},0) = 1 \quad (3.19)$$

$$MR(0,\theta) = 0 \quad (3.20)$$

$$MR(1,\theta) = 0 \quad (3.21)$$

หาคำตอบของสมการ (3.18) โดยใช้วิธีการแยกตัวแปร (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข) จะได้สมการคำตอบ คือ

$$MR(x,t) = \left(\frac{4}{\pi}\right) \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2i+1}\right) \sin[(2i+1)\pi x] \exp\left[-(2i+1)^2 \pi^2 \frac{Dt}{L^2}\right] \quad (3.22)$$

ค่าอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยในแนวแกน x จะได้

$$\overline{MR}(t) = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2i+1)^2}\right] \exp\left[-(2i+1)^2 \pi^2 \frac{Dt}{L^2}\right] \quad (3.23)$$

3.1.4 ความชื้นสมดุล

ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง จำเป็นต้องทราบความชื้นสมดุลของผลไม้ และคุณสมบัติเชิงความร้อนทางฟิสิกส์บางอย่าง เช่น ความร้อนจำเพาะของผลไม้ ความหนาแน่นของผลไม้ เมื่อทำการอบแห้งผลไม้โดยใช้อากาศที่มีสภาวะคงที่ ความชื้นของผลไม้จะลดต่ำจนถึงค่า ๆ หนึ่งซึ่งผลไม้มีความชื้นคงที่ หรือความชื้นในผลไม้จะมีความดันไอเท่ากับความดันของอากาศที่อยู่รอบ ๆ เรียกความชื้นนี้ว่า ปริมาณความชื้นสมดุล ค่าปริมาณความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้อบแห้ง

3.1.4.1 ความชื้นสมดุลของสับปะรดแช่แข็ง

อารีย์ เทียนไชย (2532) ได้ทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของ สับปะรดแช่แข็งแล้วนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองต่าง ๆ พบว่า สมการแบบจำลองความชื้นสมดุลที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง คือ รูปแบบสมการของ Iglesias & Chirife ดังนี้

$$M_{eq} = \frac{\exp[2(A + B \cdot RH)] - M_{0.5}}{2 \exp(A + B \cdot RH)} \quad (3.24)$$

เมื่อ

$$M_{0.5} = \frac{1}{(0.100346 - 0.00063 T)} \quad (3.25)$$

$$A = 3.403184 - 0.020486 T \quad (3.26)$$

$$B = \frac{1}{(0.728827 - 0.005964 T)} \quad (3.27)$$

$$M_{0.5} = \text{ความชื้นของผลไม้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 \%}$$

$$M_{eq} = \text{ความชื้นสมดุลของผลไม้ (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)}$$

$$RH = \text{ความชื้นสัมพัทธ์ (เศษส่วน)}$$

$$T = \text{อุณหภูมิของอากาศ (}^{\circ}\text{C)}$$

3.1.4.2 ค่า Water activity

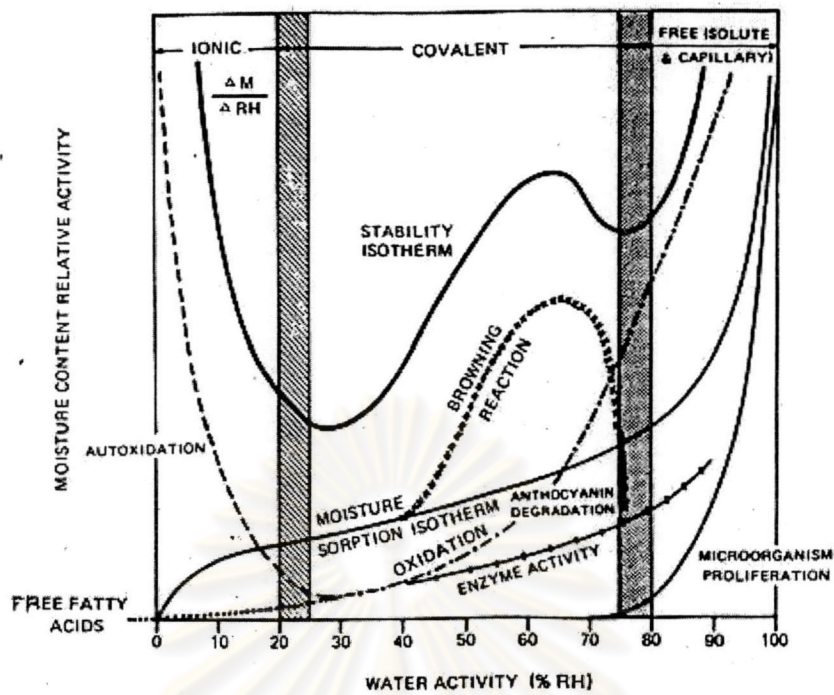
ค่า Water activity (A_w) เป็นความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่สัมผัสกับบรรยากาศขณะที่ไม่มีการดูดซับหรือคายน้ำ (Desorption) เกิดขึ้น

$$A_w = ERH / 100$$

เมื่อ $ERH = \text{ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (เปอร์เซ็นต์)}$

ในเรื่องของอาหารแห้งจำเป็นต้องเน้นการวัดปริมาณความชื้นสมดุลอย่างมาก เนื่องจากค่า A_w มีความสำคัญต่อการเก็บอาหาร จากการศึกษาวิจัยพบว่าปฏิกิริยาหลายอย่างและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เกิดขึ้นภายในช่วงของค่า A_w ที่แน่นอนช่วงหนึ่ง ดังในรูปที่ 3.1 เป็นแผนภาพแสดงอิทธิพลของ A_w ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เอนไซม์ และจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นชนิดที่น้ำยึดเกาะอยู่ดังที่กล่าวมาแล้ว คือ ค่า A_w ระหว่าง 0 ถึง 0.25 เป็นช่วงที่น้ำยึดด้วยอ็อกซิเจนกรุป เช่น NH_3^+ ยึดกับโปรตีน และ COO^- ยึดกับโปรตีน ในช่วง A_w ตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.75 เกิดจากโมเลกุลน้ำยึดด้วยพันธะโคเวเลนต์ เช่น OH ในโปรตีน และพอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง เพกทิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส และค่า A_w จาก 0.75 ถึง 1.0 จะมีชั้นของน้ำอยู่หลายชั้นบนโปรตีนและพอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้ยังมีน้ำความดันไอต่ำ เนื่องจากมีปริมาณตัวถูกละลายอยู่ เช่น น้ำตาล และกรดอิมมิส

นอกจากค่า A_w จะบอกถึงความคงตัวระหว่างการเก็บของผลิตภัณฑ์ต่อปฏิกิริยาการเสื่อมเสียต่างๆ แล้ว ปริมาณความชื้นสมดุลยังเป็นขีดจำกัดด้านต่ำของความแตกต่าง (Gradient) ในการกำจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ และเราสามารถคาดได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะให้ปริมาณความชื้นสมดุลที่ต่ำลง และมีผลให้ความแตกต่างความชื้น สำหรับการเคลื่อนที่ของความชื้นมากขึ้น



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงอิทธิพลของ A_w ต่ออัตราการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหาร
ที่มา : Rockland และ Nishi (1980)

3.1.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง

3.1.5.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันไอกายในและภายนอกผลไม้เป็นสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งผลไม้จะทำให้ค่าความดันไอกายในและภายนอกแตกต่างกันมากขึ้น อารีย์ เทียนไชย (2532) ได้ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของสับปะรดเชื่อม ซึ่งจากผลการทดลองได้นำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการคำนวณทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นได้ดังนี้

$$D = \exp\left(-13.2393 - \frac{86.9162}{T}\right) \quad (3.28)$$

เมื่อ

$$D = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น} \quad (\text{m}^2/\text{hr})$$

$$T = \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์} \quad (^\circ\text{C})$$

3.1.5.2 ค่าความหนาแน่น

ค่าความหนาแน่น จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของผลไม้ อารีย์ เทียนไชย (2532) ได้ทำการทดลองหาค่าความหนาแน่นของสับปะรดแช่อิ่มได้ผลตามสมการ

$$\rho = 1171.46 + 3.488M \quad (3.29)$$

เมื่อ

$$\rho = \text{ความหนาแน่นของสับปะรดแช่อิ่ม} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$M = \text{ความชื้นของสับปะรดแช่อิ่ม} \quad (\text{เศษส่วนมาตรฐานแห้ง})$$

3.1.5.3 ค่าความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของผลไม้ อารีย์ เทียนไชย (2532) ได้ทำการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดแช่อิ่มได้ผลตามสมการ

$$C = 1.7522 + 2.882 \left(\frac{M}{1+M} \right) \quad (3.30)$$

เมื่อ

$$c = \text{ความร้อนจำเพาะของสับปะรดแช่อิ่ม} \quad (\text{kJ/kg}^\circ\text{C})$$

$$M = \text{ความชื้นของสับปะรดแช่อิ่ม} \quad (\text{เศษส่วนมาตรฐานแห้ง})$$

3.1.6 การคำนวณสภาวะอากาศหลังการอบแห้ง

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อพิจารณาเป็นระบบเปิดซึ่งมีของไหลไหลผ่านขอบเขตระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม จะสามารถเขียนกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ดังนี้

$$\Delta U + \Delta H + \Delta KE + \Delta PE = Q + W \quad (3.31)$$

เมื่อ

$$\Delta U = \text{การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของปริมาตรควบคุม} \quad (\text{kJ})$$

$$\Delta H = \text{การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของกระแสการไหลของของไหล} \quad (\text{kJ})$$

$$\Delta KE = \text{การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์} \quad (\text{kJ})$$

- ΔPE = การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ (kJ)
 Q = ความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างปริมาตรควบคุมและสิ่งแวดล้อม (kJ)
 W = งานเพลลาที่แลกเปลี่ยนระหว่างปริมาตรควบคุมและสิ่งแวดล้อมรวมกับงานจากการหดหรือขยายตัวของปริมาตรควบคุม (kJ)

เมื่อกำหนดให้ตู้อบแห้งเป็นปริมาตรควบคุมที่พิจารณาและมีอากาศร้อนไหลผ่านตู้อบแห้ง จะได้ว่า ผลรวมของความแตกต่างของเอนทาลปีของอากาศชั้นที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุมและการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในของปริมาตรควบคุมเท่ากับผลรวมของความร้อนที่เปลี่ยนระหว่างปริมาตรควบคุมกับสิ่งแวดล้อม ดังนี้

$$[C_a(T_o - T_i) + C_v(W_o T_o - W_i T_i) + h_{fg}(W_o - W_i)] + \Delta U_p = Q \quad (3.32)$$

เมื่อ

- ΔU_p = การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของผลไม้เชื่อมต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง ซึ่งมีค่าน้อยมาก จึงอาจตัดทิ้งได้ (kJ/kg-dry air)
 Q = ความร้อนที่สูญเสียของตู้อบแห้งต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง ซึ่งสมมติว่ามีค่าเป็นศูนย์ (kJ / kg-dry air)
 W = อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (kg-H₂O / kg-dry air)
 c = ความร้อนจำเพาะ (kJ / kg°C)
 h_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (kJ / kg-H₂O)
 T = อุณหภูมิ (°C)

สัญลักษณ์กำกับล่าง

- a = อากาศแห้ง
 v = ไอน้ำ
 i = อากาศเข้าตู้อบแห้ง
 o = อากาศออกจากตู้อบแห้ง

เมื่อจัดเทอมต่าง ๆ จะได้อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากตู้อบแห้งดังนี้

$$T_o = \frac{Q + c_a T_i + W_i(h_{fg} + c_v T_i) - W_o h_{fg} - \Delta U_p}{c_a + W_o c_v} \quad (3.33)$$

สำหรับอัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจากตู้อบแห้ง สามารถหาได้จาก ปริมาณน้ำในอากาศที่เพิ่มขึ้นเท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลไม้แช่แข็งจัดเทอมต่าง ๆ จะได้ว่า

$$W_o = (M_i - M_o) \frac{m_p}{\dot{m}_a \Delta t} + W_i \quad (3.34)$$

เมื่อ

M = ความชื้นของผลไม้แช่แข็ง (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

m_p = มวลของผลไม้ (kg)

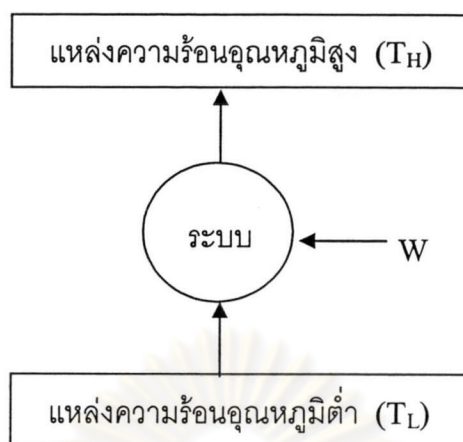
\dot{m}_a = อัตราการไหลของมวลอากาศแห้ง (kg/hr)

Δt = ช่วงเวลาที่พิจารณา (hr)

3.2 ทฤษฎีการทำงานของระบบฮีตปั๊ม

3.2.1 ระบบทำความเย็นและระบบฮีตปั๊ม (Refrigerator and Heat Pump)

ระบบทำความเย็นและระบบฮีตปั๊ม เป็นอุปกรณ์ที่รับความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำถ่ายเทให้กับสารทำความเย็นพาความร้อนที่ได้รับไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูง ทั้งนี้ โดยจะต้องป้อนงานให้แก่วัฏจักรของระบบ ระบบทำความเย็นและระบบฮีตปั๊มโดยหลักการทำงานของวัฏจักรซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ๆ เหมือนกันมาก แต่ทั้งสองระบบนี้จะแตกต่างกันที่วัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน โดยที่ระบบทำความเย็นจะมุ่งเน้นใช้ประโยชน์จากการดูดความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ส่วนระบบฮีตปั๊มนั้นจะมุ่งเน้นใช้ประโยชน์จากการคายความร้อนให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงเป็นสำคัญ

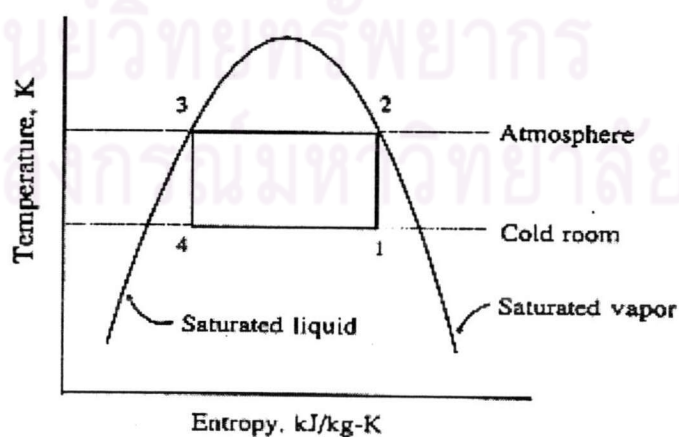


รูปที่ 3.2 หลักการทำงานของระบบทำความเย็นและระบบฮีตปั๊ม

3.2.2 วัฏจักรย้อนกลับของคาร์โน (The Reversed Carnot Cycle)

ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงแล้ววัฏจักรย้อนกลับของคาร์โน จะไม่มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นก็ตาม แต่ในการศึกษาระบบทำความเย็นและระบบฮีตปั๊ม มีความจำเป็นจะต้องศึกษาวัฏจักรย้อนกลับของคาร์โน ทั้งนี้ด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ

- ก. เพื่อใช้เป็นกรอบมาตรฐานในการเปรียบเทียบหาปรับปรุงระบบ
- ข. เป็นตัวบ่งชี้ถึงอุณหภูมิทำงานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุด



รูปที่ 3.3 วัฏจักรย้อนกลับของคาร์โน

ในทุก ๆ กระบวนการในวัฏจักรคาร์โนต์รูปที่ 3.3 เป็นกระบวนการแบบย้อนกลับได้ (Reversible) ดังนี้

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการอัดตัวแบบไอเซนทรอปิก

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการคายความร้อน ความดัน และอุณหภูมิคงที่

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนทรอปิก

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการรับความร้อน ความดัน และอุณหภูมิคงที่

3.2.3 ประเภทของระบบอัดปั๊ม

ระบบอัดปั๊มมีหลายชนิดโดยมีวิธีการทำงานที่แตกต่างกัน ซึ่งมีดังต่อไปนี้

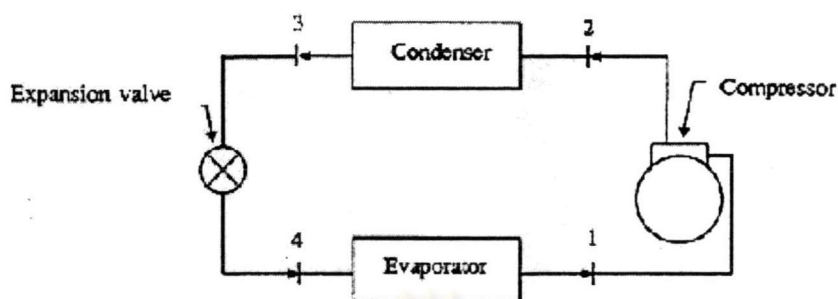
1. ระบบอัดปั๊มแบบอัดไอ
2. ระบบอัดปั๊มแบบดูดกลืน
3. ระบบอัดปั๊มแบบเทอร์โมอิเล็กตริก
4. ระบบอัดปั๊มแบบแยกตัว
5. ระบบอัดปั๊มทางเคมี

ในการทำวิจัยครั้งนี้จะศึกษาระบบอัดปั๊มแบบอัดไอเท่านั้น เนื่องจากระบบอัดปั๊มแบบอัดไอเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

3.2.4 วัฏจักรอัดปั๊มแบบอัดไอทางอุดมคติ (The Ideal Vapour Compression Heat Pump Cycle)

ส่วนประกอบหลักของวัฏจักรอัดปั๊มแบบอัดไอมีดังนี้

1. คอมเพรสเซอร์ (Compressor)
2. คอนเดนเซอร์ (Condenser)
3. เครื่องระเหย (Evaporator)
4. วาล์วขยายตัว (Expansion Valve)



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของระบบฮีตปั๊ม

ในการศึกษาวัฏจักรฮีตปั๊มแบบอัดไอทางอุดมคติสามารถอธิบายการทำงานของวัฏจักรด้วยการทำงานของสารทำความเย็นในวัฏจักร ซึ่งนิยมใช้แผนภูมิในการบรรยายคุณสมบัติโดยทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ มักจะใช้แผนภูมิอุณหภูมิและเอนทัลปี หรือในทางปฏิบัติเอนทัลปีเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่ถูกหาบ่อย ๆ ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภูมิความดันและเอนทัลปี ดังรูปที่ 3.5

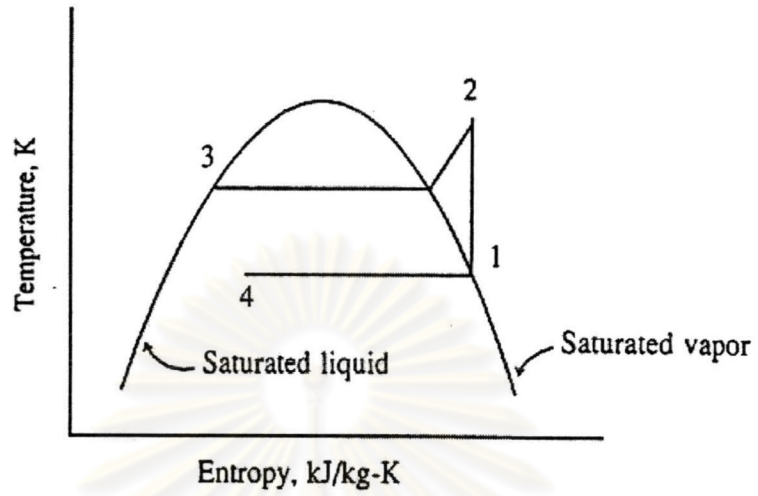
จากรูปที่ 3.5 วัฏจักรฮีตปั๊มแบบอัดไอทางอุดมคติประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นอัดแบบไอเซนทรอปิกด้วยคอมเพรสเซอร์เพื่อให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น

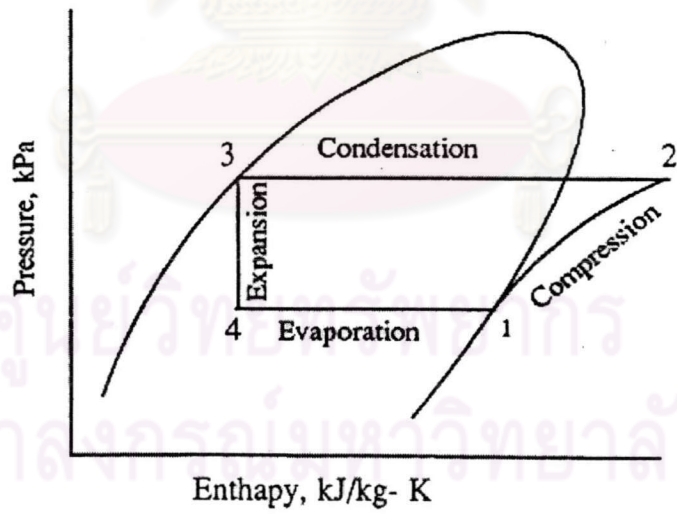
กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการที่ไอสารทำความเย็นกลั่นตัวกลายเป็นของเหลว คายความร้อนออกมา ซึ่งเกิดที่คอนเดนเซอร์ เป็นกระบวนการที่ความดันคงที่

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นมีสถานะเป็นของเหลว ลดความดันด้วยวาล์วขยายตัว ซึ่งเป็นกระบวนการเอนทัลปีคงที่

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นสถานะเป็นของเหลวจะเดือดกลายเป็นไอ จึงดูดความร้อนเข้าไป เกิดที่เครื่องระเหย ซึ่งเป็นกระบวนการความดันคงที่



ก) แผนภูมิอุณหภูมิและเอนโทรปี (T-S Diagram)

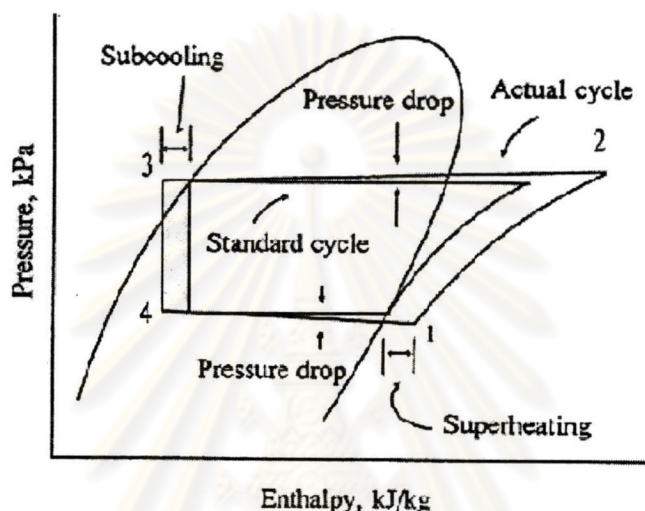


ข) แผนภูมิความดันและเอนทาลปี (P-h Diagram)

รูปที่ 3.5 วัฏจักรซีตีมแบบอัดไอทางอุดมคติ

3.2.5 วัฏจักรจริงของฮีตปั๊มแบบอัดไอ (Actual Vapour Compression Heat Pump Cycle)

วัฏจักรจริงของฮีตปั๊มแบบอัดไอ เมื่อเปรียบเทียบกับวัฏจักรฮีตปั๊มทางอุดมคติ จะมีบางอย่างที่ผิดแผกไป ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบพฤติกรรมของวัฏจักรจริงกับ วัฏจักรทางอุดมคติของฮีตปั๊มแบบอัดไอ

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นข้อแตกต่างที่สำคัญ มี 2 เหตุผลดังนี้

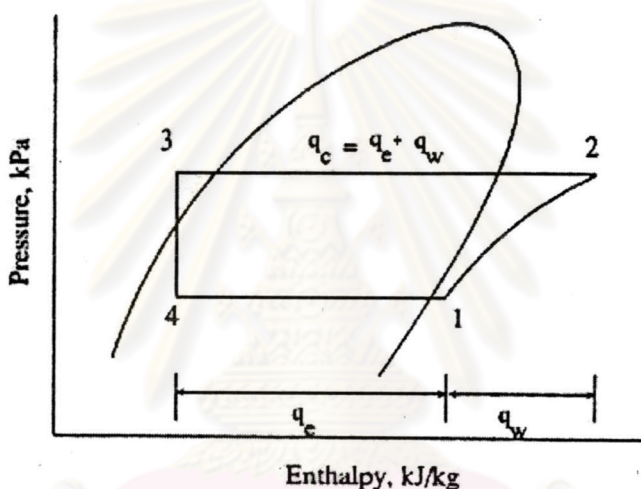
ก. ผลที่เกิดขึ้นโดยไม่อาจหลีกเลี่ยง ได้แก่ ความดันที่ตกลงในคอนเดนเซอร์และเครื่องระเหยที่เกิดขึ้นในวัฏจักรจริง ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างสารทำความเย็นกับผนังท่อ และในวัฏจักรจริงการอัดตัวในคอมเพรสเซอร์ไม่ได้เป็นแบบไอเซนทรอปิก ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์จริงต่ำกว่าคอมเพรสเซอร์ทางอุดมคติ สาเหตุเนื่องมาจากในตัวคอมเพรสเซอร์มีแรงเสียดทานและการสูญเสียอื่น ๆ

ข. เหตุผลที่เกิดขึ้นโดยเจตนา ได้แก่ การทำให้เกิดสถานะ Superheating และ Subcooling แก่สารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องระเหยและคอนเดนเซอร์ตามลำดับ สาเหตุเนื่องมาจากเพื่อให้แน่ใจว่า สารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องระเหยมีสถานะเป็นไอทั้งหมด เพราะถ้าของเหลวเข้าสู่คอมเพรสเซอร์จะทำให้คอมเพรสเซอร์ชำรุด และเพื่อให้แน่ใจว่าสารทำความเย็นที่เข้าวาล์วขยายตัวมีสถานะเป็นของเหลวทั้งหมด

3.2.6 การวิเคราะห์วัฏจักรฮีตปั๊มแบบอัดไอ

การวิเคราะห์วัฏจักรฮีตปั๊มแบบอัดไอจะอาศัยสมมติฐานต่าง ๆ ดังนี้

- ก. วิเคราะห์ระบบตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์
 - ข. สภาวะต่าง ๆ ของระบบคงที่
 - ค. ไม่พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์
- ตามที่เคยกล่าวไว้ว่าเอนทาลปีเป็นคุณสมบัติของสารทำความเย็นที่สำคัญและถูกใช้บ่อย ๆ จึงแสดงการวิเคราะห์ระบบด้วยแผนภูมิแรงดันและเอนทาลปี ดังนี้



รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์วัฏจักรฮีตปั๊มบนแผนภูมิความดันและเอนทาลปี

จากรูปที่ 3.7 วิเคราะห์ระบบโดยแยกแต่ละกระบวนการออกเป็นดังนี้

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการอัดสารทำความเย็นตามกระบวนการไอเซน

ทรอปิก

$$q_w = h_2 - h_1 \quad (3.35)$$

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็นตามกระบวนการความดันคงที่

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (3.36)$$

หรือ

$$q_c = q_e + q_w \quad (3.37)$$

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการขยายตัวของสารทำความเย็นตามกระบวนการ
เอนทาลปีคงที่

$$h_3 = h_4 \quad (3.38)$$

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการดูดความร้อนของสารทำความเย็นเพื่อเปลี่ยน
สถานะตามกระบวนการความดันคงที่

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (3.39)$$

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญ ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรรีฟิเจอร์นี้

ก. ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิของเครื่องระเหย

$$\dot{Q}_e = m_f q_e \quad (3.40)$$

ข. ความสามารถในการทำความร้อนสุทธิของคอนเดนเซอร์

$$\dot{Q}_c = m_f q_c \quad (3.41)$$

ค. งานที่ป้อนให้แก่คอมเพรสเซอร์ทางอุณหพลศาสตร์

$$W_c = m_f q_w \quad (3.42)$$

ง. ปริมาณสารทำความเย็นที่ไหลในวัฏจักร

$$V_f = m_f v \quad (3.43)$$

เมื่อ

$$\dot{Q}_e = \text{ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิของเครื่องระเหย} \quad (\text{kW})$$

$$\dot{Q}_c = \text{ความสามารถในการทำความร้อนสุทธิของคอนเดนเซอร์} \quad (\text{kW})$$

$$W_c = \text{งานที่ป้อนให้กับคอมเพรสเซอร์ทางอุณหพลศาสตร์} \quad (\text{kW})$$

$$m_f = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น} \quad (\text{kg/s})$$

$$V_f = \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำความเย็น} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$v = \text{ปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็นที่เครื่องระเหย} \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

$$q_w = \text{พลังงานที่ป้อนให้กับคอมเพรสเซอร์ทางอุณหพลศาสตร์} \quad (\text{kJ/kg})$$

- q_e = ความสามารถในการทำความเย็นต่อมวล (kJ/kg)
 q_c = ความสามารถในการทำความร้อนต่อมวล (kJ/kg)
 h = เอนทาลปีในระบบที่จุดใด ๆ (kJ/kg)

สัญลักษณ์กำกับตัวอักษร

- 1 = Compressor inlet
 2 = Condenser inlet
 3 = Expansion valve inlet
 4 = Evaporator inlet

3.2.7 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ

ในการแสดงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบแสดงในรูปค่า COP (Coefficient of performance) ซึ่งกำหนดดังนี้

จากรูปที่ 3.3 วงจรย้อนกลับของคาร์โน ซึ่งเป็นวงจรที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด มาแสดงค่า COP จะได้ว่า

ก. ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็น

$$COP_{re} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (3.44)$$

ข. ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊ม

$$COP_{hp} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (3.45)$$

และ

$$COP_{hp} = COP_{re} + 1 \quad (3.46)$$

จากรูปที่ 3.7 นำวัฏจักรแบบอัดไอมาแสดงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบจะได้ว่า

ก. ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็น

$$COP_{re} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (3.47)$$

ข. ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊ม

$$\text{COP}_{\text{hp}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (3.48)$$

เมื่อ

COP_{re} = Coefficient of performance for refrigeration

COP_{hp} = Coefficient of performance for heat pump

T_L = แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)

T_H = แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (องศาเซลเซียส)

3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้ง

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพด้านการอบแห้งของเครื่องอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. อัตราการอบแห้ง (Drying Rate)

การหาอัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้ง เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่แสดงถึงค่าประสิทธิภาพในการอบแห้งลดความชื้นของผลไม้ ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{อัตราการอบแห้ง} = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลไม้}}{\text{เวลาในการอบแห้ง}} \quad (3.49)$$

(kg water evaporated / hr)

2. อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ (Specific Air Flow Rate)

$$\text{อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ} = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ} \times 3600}{\text{มวลผลไม้แห้ง}} \quad (3.50)$$

(kg dry air / hr-kg dry fruits)

3. ความสิ้นเปลืองพลังงาน

สำหรับการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงาน สามารถเสนอได้ 2 รูปแบบ คือ

1. ความสิ้นเปลืองพลังงาน (Energy Consumption) จะแสดงในรูปของพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น ซึ่งการแสดงค่าแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันในการออกแบบ สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{ความสิ้นเปลืองพลังงาน} = \frac{\text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลไม้}} \quad (\text{MJ/kg water evaporated}) \quad (3.51)$$

2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate , SMER) เป็นการแสดงปริมาณความสิ้นเปลืองพลังงาน ที่นิยมแสดงใช้ในด้านระบบฮีตปั๊ม มีรูปแบบของสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ} = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลไม้}}{\text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้}} \quad (\text{kg water evaporated/kW-hr}) \quad (3.52)$$

4. การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากการสมดุลพลังงาน โดยสมมติว่า ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากผลไม้แช่แข็งมีค่าเท่ากับความร้อนสัมผัสของอากาศที่เปลี่ยนไป จะได้ว่า

$$t = \frac{m_w h_{fg}}{\dot{m}_a c_a (T_i - T_o)} \quad (3.53)$$

เมื่อ

$$\dot{m}_a = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ} \quad (\text{kg/hr})$$

$$c_a = \text{ความร้อนจำเพาะของอากาศ} = 1.006 \quad \text{kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$T_i = \text{อุณหภูมิก่อนเข้าตู้อบแห้ง} \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_o = \text{อุณหภูมิหลังเข้าตู้อบแห้ง} \quad (^\circ\text{C})$$

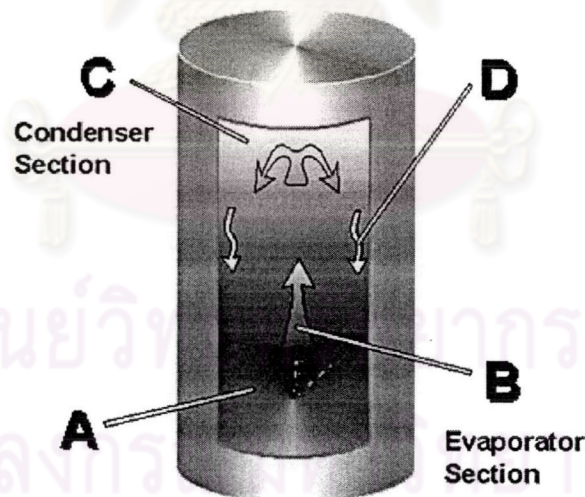
$$m_w = \text{ปริมาณมวลน้ำที่ระเหยจากผลไม้} \quad (\text{kg})$$

$$h_{fg} = \text{ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)}$$

$$t = \text{เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)}$$

3.4 ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการทำวิจัยครั้งนี้ระบบฮีตปั๊ม จะมีส่วนประกอบของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน คือ อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนชนิดพิเศษ ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แม้ในสภาพอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นท่อโลหะ (มักเป็นทองแดง) ซึ่งได้ทำให้ภายในเป็นสูญญากาศ แล้วบรรจุของเหลวคุณสมบัติพิเศษ คือ สารทำความเย็นหรือ Refrigerant (ฟร็อน-22) ก่อนที่จะปิดผนึกหัวท้าย เนื่องจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนถ่ายเทความร้อนโดยหลักการของการระเหยและการกลั่นตัวของของเหลว จึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องกลไกหรือพลังงานจากภายนอกใด ๆ ในการทำงาน



รูปที่ 3.8 การทำงานของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

หลักการทํางาน

หลักการทํางานของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นง่ายมาก โดยที่โครงสร้างพื้นฐานของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นท่อทองแดงหุ้มปิดท้าย ภายในบรรจุด้วยสารทำความเย็น เช่น ฟรีออน แอมโมเนีย ออกซิเจน มีเทน และน้ำ สารที่บรรจุอยู่ในท่อเป็นของเหลว ดังรูปที่ 3.8 (ส่วน A) เมื่อได้รับความร้อนจะระเหยกลายเป็นไอ (ส่วน B) และเคลื่อนตัวไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่ง (ส่วน C) ในระหว่างการเคลื่อนตัวนี้จะคายความร้อนและกลายเป็นของเหลวที่บริเวณผิวภายในของท่อ (ส่วน D) แล้วไหลกลับไปสู่ปลายท่อที่รับความร้อนที่อยู่ต่ำกว่า

คุณสมบัติพิเศษของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะอยู่ที่การออกแบบให้ภายในท่อสามารถแยกสารที่เป็นของเหลวออกจากสารที่เป็นไอ เนื่องจากการเคลื่อนตัวของสารทั้งสองสถานะนี้เคลื่อนในทิศทางตรงข้ามกัน หากไม่สามารถแยกออกจากกันได้ก็จะเคลื่อนชนกันเองและจะไม่ได้ไปไหน

ในการทํางาน ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ส่วนให้ความเย็นเบื้องต้น (Precool heat pipe section) ซึ่งอยู่ทางช่องลมเข้า ก่อนที่จะผ่านตัวคอยล์เย็น เมื่ออากาศร้อนผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนนี้ อากาศร้อนก็จะถ่ายเทความร้อนให้แก่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้น อากาศที่ออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะมีอุณหภูมิลดลงและผ่านไปยังคอยล์เย็น จึงทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำกว่าปกติ ทำให้อากาศทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากอุณหภูมิที่ผ่านคอยล์เย็นจะเย็นกว่าปกติ และทำให้อิอน้ำกลั่นตัวได้มากขึ้น

ในขณะที่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนแรก (Precool) รับพลังงานจากอากาศร้อนที่ผ่านสารทำความเย็นภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะระเหยและพาความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนนั้นไปยังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนที่ 2 เรียกว่า ส่วนเพิ่มความร้อน (Reheat heat pipe section) โดยสารทำความเย็นระเหยลอยไปตามท่อไปยังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนนี้ เมื่ออากาศที่ออกจากคอยล์เย็นผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนนี้ ก็จะได้รับความร้อน (พลังงาน) จากส่วนนี้ ทำให้อากาศที่ผ่านระบบมีอุณหภูมิที่พอเหมาะ โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มความร้อน ส่วนสารทำความเย็นที่คายความร้อนให้แก่อากาศ อุณหภูมิจะลดลงและเปลี่ยนสถานะไหลกลับลงมาตามท่อ และไหลไปยังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนแรก (Precool)

ขั้นตอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นดำเนินไปโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก และผลที่ได้คือสามารถดึงเอาไอน้ำออกจากอากาศได้มากขึ้น ซึ่งระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนนี้สามารถช่วยลดความชื้นในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

คุณสมบัติและประโยชน์ของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

1. เป็นระบบที่ไม่ใช่เครื่องกลไกใด ๆ จึงช่วยตัดปัญหาเรื่องเปลี่ยนหรือซ่อมแซมอะไหล่
2. เป็นทางเลือกของระบบเพิ่มความร้อนโดยใช้ไฟฟ้า ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานมาก
3. ไม่ต้องดูแลรักษา เพียงทำความสะอาดตามปกติ
4. ประหยัดพลังงาน
5. ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม
6. มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

จะเห็นว่า ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ใช่อุปกรณ์ประหยัดพลังงานด้วยตัวเอง แต่หากนำไปใช้อย่างเหมาะสม จะสามารถช่วยในการประหยัดพลังงานได้ โดยวิธีการดังต่อไปนี้คือ

1. สามารถลดขนาดและลดการทำงานของอุปกรณ์เพิ่มความร้อน (Electric Reheat) ในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์เพิ่มความร้อนในการลดความชื้น

2. ลดการทำงานของตู้แช่และชุดละลายน้ำแข็งของตู้แช่ในห้างสรรพสินค้า โดยการลดความชื้นในห้างสรรพสินค้าลง ตู้เย็นและตู้แช่จะมีอุณหภูมิที่คงที่มากขึ้น ทำให้อาหารคงความสดอยู่ได้นาน

3. เพิ่มอุณหภูมิของห้องจาก 23 – 24 องศาเซลเซียส เป็น 25 – 26 องศาเซลเซียส โดยการปรับความชื้นให้ลดลงจาก 60%RH เป็น 50%RH ซึ่งยังรู้สึกสบายอยู่ จากการระเหยของเหงื่อที่ดีขึ้นและความชื้นที่ลดลง

4. เพิ่มอุณหภูมิของคอยล์เย็น (Evaporative Temperature) ได้ โดยที่ยังคงระดับความชื้นไว้ที่เดิม ทำให้เครื่องปรับอากาศมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

5. ไม่ต้องเพิ่มความเย็น (Overcool) ซึ่งต้องใช้พลังงานมาก

ส่วนผลพลอยได้ที่ตามมาก็คือ การที่อายุของวัสดุ หนังสือที่มีค่า อาหาร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะอยู่ในสภาพที่ดี ไม่มีปัญหาเชื้อรา เช่นที่พบมากในโรงพยาบาล และสำหรับบางคนที่คัดจมูกอยู่ตลอดเวลาเมื่อความชื้นลดลง อาการนี้จะทุเลาลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 ผลไม้อบแห้ง

ผลไม้ที่มีศักยภาพสูงในการอบแห้ง ได้แก่ ลำไย สับปะรด ซึ่งกรรมวิธีการผลิตผลไม้อบแห้งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. ผลไม้อบแห้งที่มีการปรุงแต่งรสหวาน โดยการเชื่อมในน้ำเชื่อมก่อนอบแห้ง ผลไม้ที่นิยมผลิตในลักษณะนี้ คือ สับปะรด มะละกอ มะม่วง ขนุน มะพร้าว ฝรั่ง เป็นต้น

2. ผลไม้อบแห้งที่ไม่มีการปรุงแต่งรสหวาน เช่น ลำไย ลิ้นจี่ และผลไม้ที่มีการปรุงแต่งรสเพียงเล็กน้อย เช่น กัลย

ผลไม้อบแห้งปรุงแต่งรสหวานทุกชนิดทำมาจากผลไม้กึ่งดิบกึ่งสุก มีวิธีทำเช่นเดียวกัน คือ ปอกเปลือก สับปะรดหั่นเป็นแว่นตามขวางของผล มะละกอหั่นตามยาวของผล มะม่วงหั่นเป็นชิ้นตามยาวของผล และขนุนผ่าซีกทั้งชิ้น อาจมีการแช่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ให้เนื้อผลไม้แข็งไม่เละง่าย ลวกน้ำร้อนเพื่อทำลายเอนไซม์และทำลายผนังเซลล์ของเนื้อผลไม้ ทำให้การดูดซึมน้ำตาลและการคายน้ำเกิดขึ้นได้เร็ว แช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 30-40 บริกซ์ ซ้ำมคืน เพิ่มความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลอีกวันละ 10 บริกซ์ จนถึง 70 บริกซ์ หรือได้ความหวานตามต้องการ จากนั้นนำชิ้นผลไม้ไปอบแห้งในตู้อบแห้ง อุณหภูมิไม่เกิน 65 องศาเซลเซียส อาจเคลือบผิวผลไม้ด้วยน้ำตาลทรายละเอียด

ผลไม้อบแห้งไม่ปรุงแต่งรสหวานที่นิยมนำมาทำแห้ง คือ กัลยน้ำว่า โดยทำจากกัลยที่มีความสูงอมเพื่อให้รสหวานตามธรรมชาติ ในอดีตในการตากแดด ซึ่งจะเห็นว่า กัลยที่แห้งจะยังมีความชื้นอยู่ และมีลักษณะสีคล้ำไม่น่ารับประทาน แต่ปัจจุบันมีการใช้ตู้อบมากขึ้น อุณหภูมิที่แนะนำคือ 60 องศาเซลเซียส อบนาน 24 ชั่วโมง ทับให้แน่นแล้วอบต่อไปอีก 24 ชั่วโมง ทับให้แบนอีกครั้งแล้วอบต่อจนแห้ง ผู้ผลิตบางรายนิยมจุ่มกัลยในสารละลายน้ำผึ้งก่อนการอบครั้งสุดท้าย เพื่อให้มีกลิ่นรสน้ำผึ้ง

3.6 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์การลงทุนจะพิจารณาถึง

1. เงินลงทุนสร้างเครื่องอบแห้ง
2. ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน
3. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา
4. มูลค่าซากเครื่องอบแห้ง

3.6.1 แฟกเตอร์สำหรับมูลค่าในอนาคตและแฟกเตอร์สำหรับมูลค่าปัจจุบัน (Compound-Amount Factor and Present-Worth Factor)

แฟกเตอร์ที่ใช้เปลี่ยนมูลค่าของเงินระหว่างปัจจุบันและอนาคต เรียกว่า Compound-Amount Factor (CAF หรือ f/p) และ Present-Worth Factor (PWF หรือ p/f)

การนำมาประยุกต์ใช้ทำได้ดังนี้

$$\text{มูลค่าเงินในอนาคต} = (\text{มูลค่าเงินในปัจจุบัน}) \left(\frac{f}{p} \right) \quad (3.54)$$

$$\text{โดยที่} \quad f/p = \left(1 + \frac{i}{m} \right)^{mn}$$

$$\text{มูลค่าเงินในปัจจุบัน} = (\text{มูลค่าเงินในอนาคต}) \left(\frac{p}{f} \right) \quad (3.55)$$

$$\text{โดยที่} \quad p/f = \frac{1}{\left(1 + \frac{i}{m} \right)^{mn}}$$

เมื่อ i = อัตราดอกเบี้ยรายปีระบุ (nominal annual interest rate)

n = จำนวนปี

m = จำนวนคาบ (period) ที่คิดดอกเบี้ยในหนึ่งปี

3.6.2 มูลค่าอนาคตจากยอดเงินเป็นงวด ๆ ละเท่า ๆ กัน (Future Worth of a Uniform Series of Amounts)

Series-Compound-Amount Factor (SCAF หรือ f/a) เป็นแฟกเตอร์เปลี่ยนจากยอดเงินที่มีการจ่ายหรือรับเป็นงวดละเท่า ๆ กันเป็นยอดเงินในปัจจุบัน

$$f/a = (1+i)^{n-1} + (1+i)^{n-2} + \dots + (1+i) + 1$$

เอา $(1+i)$ คูณสมการทั้ง 2 ข้าง

$$(f/a)(1+i) = (1+i)^n + (1+i)^{n-1} + \dots + (1+i)$$

เอาไปลบสมการข้างต้น จะได้

$$(f/a)[(1+i) - 1] = (1+i)^n - 1$$

ดังนั้น

$$f/a = \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (3.56)$$

ส่วนกลับของ SCAF เรียกว่า Sinking-Fund Factor , SFF (a/f)

เงินในปัจจุบันแต่ละงวด (R) = (เงินในอนาคต)(SFF) = (เงินในอนาคต)(a/f)

$$a/f = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (3.57)$$

3.6.3 มูลค่าปัจจุบันจากยอดเงินเป็นงวดๆ ละเท่าๆ กัน (Present Worth of a Uniform Series of Amounts)

Series-Present-Worth Factor (SPWF หรือ p/a) เป็นแฟกเตอร์เปลี่ยนจากยอดเงินที่มีการจ่ายหรือรับเป็นงวดละเท่าๆ กันเป็นยอดเงินในปัจจุบัน

$$\text{มูลค่าในปัจจุบัน} = \frac{R}{(1+i)} + \frac{R}{(1+i)^2} + \dots + \frac{R}{(1+i)^n}$$

เอา $(1+i)^n$ คูณสมการทั้ง 2 ข้าง

$$\begin{aligned} (\text{มูลค่าในปัจจุบัน}) (1+i)^n &= R[(1+i)^{n-1} + (1+i)^{n-2} + \dots + 1] \\ &= R(f/a) \\ &= R \frac{(1+i)^n - 1}{i} \end{aligned}$$

$$p/a = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (3.58)$$

จะได้

$$p/a = (f/a)(p/f)$$

ส่วนกลับของ SPWF เรียกว่า Capital-Recovery Factor , CRF (a/p)

$$\text{เงินในอนาคตแต่ละงวด (R)} = (\text{เงินในปัจจุบัน})(\text{CRF}) = (\text{เงินในปัจจุบัน})(a/p)$$

$$a/p = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.59)$$