บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีในงานวิจัย การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน จะประกอบด้วย ทฤษฎีพื้นฐานของการอบแห้ง คุณสมบัติของอากาศชื้น ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางการเงิน และมาตรฐานการผลิตใบมะกรูดอบแห้ง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการอบแห้ง

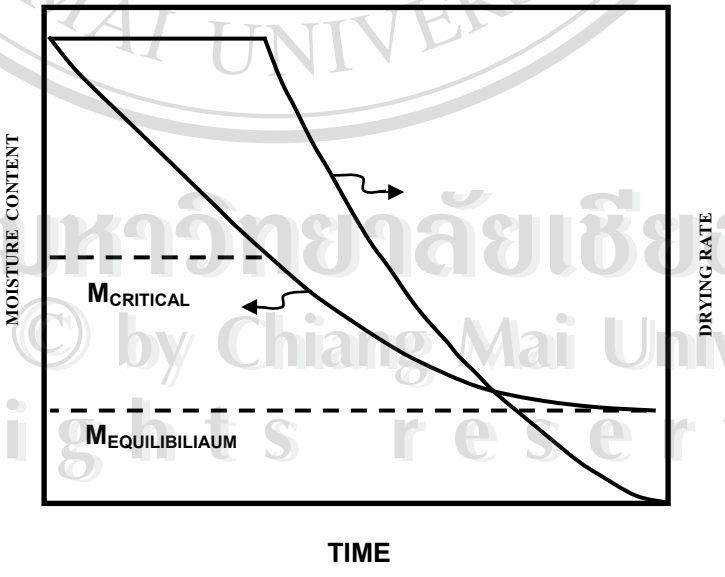
การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายเทความร้อนและมวลสารเกิดขึ้นพร้อมกัน ในทางปฏิบัติมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง การถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดความจากการพาความร้อนระหว่างอากาศ และความชื้นที่ผิวของวัสดุอบแห้ง โดยความร้อนที่สัมผัสส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปในการระเหยน้ำจากวัสดุอบแห้ง จากทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารระหว่างของแข็งและของไหล สามารถที่จะนำมาอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความชื้นระหว่างผิววัสดุอบแห้ง และอากาศร้อนได้ว่า ปริมาณการถ่ายเทจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของความเข้มข้นของผิวไอน้ำที่ผิววัสดุและไอที่ผิววัสดุและไอน้ำอากาศ ดังนั้นขณะที่บริเวณผิววัสดุอิ่มตัวด้วยน้ำ (ได้แก่ ช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง) และอากาศค่อนข้างแห้งการถ่ายเทน้ำจะเกิดขึ้นได้ดี ในทางตรงกันข้ามหากผิววัสดุมีความชื้นลดลงเหลือน้อยมาก (ได้แก่ ช่วงท้ายของการอบแห้ง) และอากาศที่ใช้อบแห้งค่อนข้างชื้น การถ่ายเทน้ำจะเป็นไปได้ค่อนข้างยาก การถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวของแข็งและของไหลจะเกิดขึ้นใน 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นการถ่ายเทมวลแบบฟุ้งกระจายโมเลกุลจะเกิดขึ้นระหว่างผิวของแข็งและขอบเขต ส่วนที่สองจะเป็นการถ่ายเทแบบกำลังบังคับเกิดขึ้นระหว่างขอบเขตและกระแสของไหล และเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้สภาวะอากาศคงที่ (เช่นอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนกระทั่งความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ เรียกว่าความชื้นสมดุล ซึ่งความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และ Water activity ในวัสดุ ซึ่งในกระบวนการอบแห้งได้แบ่งอัตราการอบแห้งเป็น 2 ช่วง คือ

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวล ระหว่างวัสดุ กับอากาศเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น เมื่อน้ำเกาะที่ผิวของวัสดุที่เป็นจำนวนมาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

และความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มอากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการอบแห้งจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุ และกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวที่ผิววัสดุ และอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลมากขึ้น ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ คือ อุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ การถ่ายเทความร้อนและมวลมิได้เกิดขึ้นเฉพาะผิดเท่านั้น แต่เกิดภายในเนื้อวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดย ความต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะนั้นอุณหภูมิของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น และสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น และมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแล้ว จะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมพบว่า ความหนาของฟิล์มอากาศนิ่งมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานที่ฟิล์มอากาศมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลมากนัก



รูป 2.1 การอบแห้งในช่วงอบแห้งคงที่และลดลง(Brooker *et al.* 1981)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2 คุณสมบัติของอากาศชื้น

ในกระบวนการอบแห้ง พบว่าตัวกลางในการอบแห้งวัสดุเป็นการผ่านอากาศไปที่วัสดุที่ต้องการอบแห้ง อากาศนี้เราเรียกว่า “อากาศชื้น” เพราะประกอบไปด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ อากาศแห้งมีไนโตรเจน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก แม้ว่าปริมาณโดยมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศที่ใช้ในการอบแห้งโดยทั่วๆ ไปจะมีค่าน้อยกว่า 10% ของมวลทั้งหมด แต่โมเลกุลของไอน้ำเหล่านี้มีผลต่อกระบวนการอบแห้งเป็นอย่างมาก ดังนั้นเราจึงจำเป็นจะต้องเข้าใจคุณสมบัติของอากาศชื้นก่อน เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับทำความเข้าใจกับกระบวนการอบแห้งต่อไป ซึ่งได้มีการกำหนดตัวแปรที่แสดงคุณสมบัติอากาศชื้น ดังนี้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb Temperature : T_{db}) คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่บอกโดยเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป

อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-bulb Temperature : T_{wb}) คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่บอกโดยเทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะถูกหุ้มด้วยผ้ากอสเปียก และมีลมเป่าผ่านด้วยความเร็วอย่างน้อย 4.6 m/s

ความดันไออิ่มตัว (Saturated Vapor Pressure : P_{vs}) ความดันไออิ่มตัว คือ ความดันที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำในอากาศที่สภาวะอิ่มตัวด้วยไอน้ำ ซึ่งความดันไออิ่มตัวจะขึ้นกับอุณหภูมิ สามารถหาได้จากสมการของ Clausius–Clapeyron ดังนี้

$$\ln P_{vs} = \frac{-7511.52}{T_{abs}} + 89.63121 + 0.02399897 T_{abs} - 1.1654551 \times 10^{-5} T_{abs}^{2} + 1.2810336 \times 10^{-8} T_{abs}^{3} + 2.0998405 \times 10^{-11} T_{abs}^{4} - 12.150799 \ln(T_{abs}) \quad (2.1)$$

$$273.15 \leq T_{abs} \leq 393.15 \ ^{o}K$$

เมื่อ P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัว (Pa)

T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (^{o}K)

โดย $T_{abs} = T_{db} + 273.15$ (^{o}K)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

อัตราส่วนความชื้นที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Saturation Humidity : W^*_{wb}) คือ อัตราส่วนของมวลไอน้ำที่อยู่ในอากาศต่อมวลอากาศที่แห้งสนิทที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก

$$W^*_{wb} = \frac{0.62189 P_{vs}}{(P - P_{vs})} \tag{2.2}$$

เมื่อ P คือ ความดันที่บรรยากาศ (P = 101.325 kPa)

W^*_{wb} คือ อัตราส่วนความชื้นที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ($kg_{water} / kg_{dry\ air}$)

P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัว (Pa)

อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio : W) คือ มวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศแห้งหนึ่งหน่วยมวล จากกฎของก๊าซสมบูรณ์ จะได้ว่า

$$W = \frac{(2501 - 2.411 T_{wb}) W^*_{wb} - 1.006 (T_{db} - T_{wb})}{2501 + 1.775 T_{db} - 4.186 T_{wb}} \tag{2.3}$$

เมื่อ W^*_{wb} คือ อัตราส่วนความชื้นที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ($kg_{water} / kg_{dry\ air}$)

W คือ อัตราส่วนความชื้น ($kg_{water} / kg_{dry\ air}$)

T_{wb} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (^oC)

T_{db} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (^oC)

ความดันไอ (Vapor Pressure : P_V) คือ ส่วนของความดันย่อย (Partial Pressure) ที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้น สำหรับความดันไอ สามารถหาได้จากสมการของก๊าซสมบูรณ์

$$P_v = \frac{1.608 WP}{1 + 1.608 W} \tag{2.4}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ P_v คือ ความดันไอ (Pa)

W คือ อัตราส่วนความชื้น ($kg_{water} / kg_{dry\ air}$)

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity : RH) คือ อัตราส่วนของเศษส่วนเชิงโมล (Mole Fraction) หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศต่อเศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 สามารถเขียนได้เป็น

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \tag{2.5}$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์

ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น (Specific Volume : v) คืออัตราส่วนของปริมาตรต่อมวลของอากาศแห้ง สามารถหาได้จากสมการ

$$v = \frac{RT_{abs}(1 + 1.608W)}{M_a P} \tag{2.6}$$

เมื่อ v คือ ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น ($m^3 / kg_{dry\ air}$)

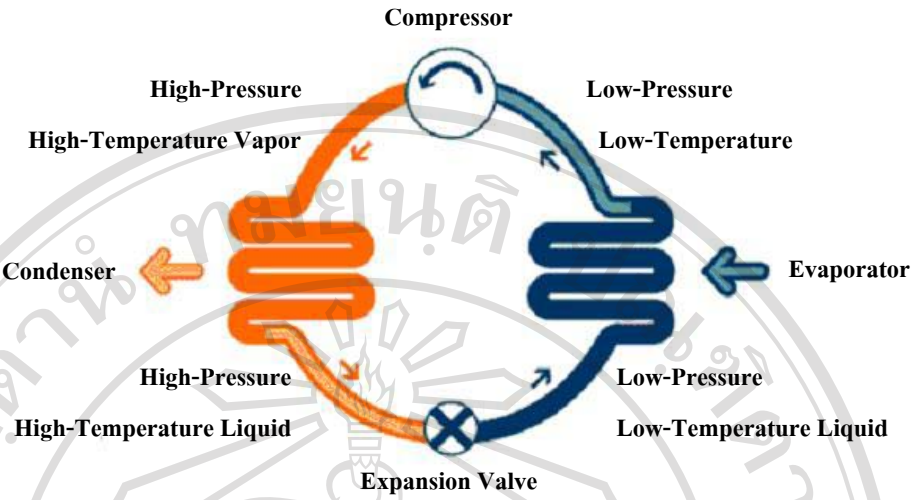
R คือ ค่าคงที่ ($8.314\ kJ / kg\,mole\ ^oK$)

M_a คือ มวลของอากาศแห้ง (kg / m^3)

2.3 ทฤษฎีปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

ปั๊มความร้อน (Heat Pump) เป็นชุดอุปกรณ์ทำความร้อนที่ใช้เครื่องอัดไอ (Compressor) แบบเดียวกับที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ กล่าวคือปั๊มความร้อนทำงานโดยการดึงความร้อนจากแหล่งความ แล้วนำไปถ่ายเทในบริเวณที่ต้องการความร้อน ที่สำคัญคือปั๊มความร้อนไม่ได้เป็นตัวสร้างความร้อน แต่ส่งผ่านความร้อน ซึ่งวัฏจักรการทำงานก็ไม่แตกต่างจากระบบการทำความเย็นทั่วไปที่มีใช้กันอยู่ซึ่งเป็นระบบอัดไอ ต่างกันเพียงแต่ปั๊มความร้อนจะเลือกใช้ประโยชน์จากด้านความร้อนเป็นหลักและควบคุมอุณหภูมิด้านความร้อนแทนด้านความเย็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 2.2 ส่วนประกอบของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

วัฏจักรดังรูป 2.2 แสดงการทำงานด้านความเย็นกับความร้อนนั้นจะเชื่อมโยงกันด้วยสารทำงาน โดยเริ่มจากการทำงานของเครื่องอัดไอซึ่งสารทำงานก็จะถูกอัดเพื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิก็เพิ่มตามมาด้วยจากนั้นสารทำงานก็จะถูกนำมากลั่นในเครื่องควบแน่น (Condenser) (สารทำงานคายความร้อนออกไปให้กับน้ำหรืออากาศ ทำให้ได้น้ำหรืออากาศร้อน) จนได้ของเหลวความดันสูงแล้วก็จะถูกลดความดันในวาล์วลดความดัน (Expansion Valve) จนสารทำงานบางส่วนกลายเป็นไอ หรือพร้อมที่จะระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนในเครื่องทำระเหย พลังงานที่ใช้จึงใช้เพื่อการขับเครื่องอัดไอและพัดลมที่บริเวณเครื่องทำระเหย (Evaporator) หรือเครื่องควบแน่น

2.3.1 ส่วนประกอบของระบบปั้มความร้อน

ระบบปั้มความร้อนตามความหมายของ ARI (Air Condition and Refrigeration Institute) จะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้

1. เครื่องควบแน่น (Condenser) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำหน้าที่กลั่นสารทำงานที่มีสถานะไอที่ออกจากเครื่องอัดไอ ให้เป็นของเหลวเมื่อผ่านเครื่องควบแน่น ดังนั้นสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นไอจะคายความร้อนแฝงและกลั่นตัวเป็นของเหลวที่เครื่องควบแน่น การคายความร้อนจะต้องมีสารอื่นมารับความร้อน เช่น อากาศรอบๆ เครื่องควบแน่น หรือใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

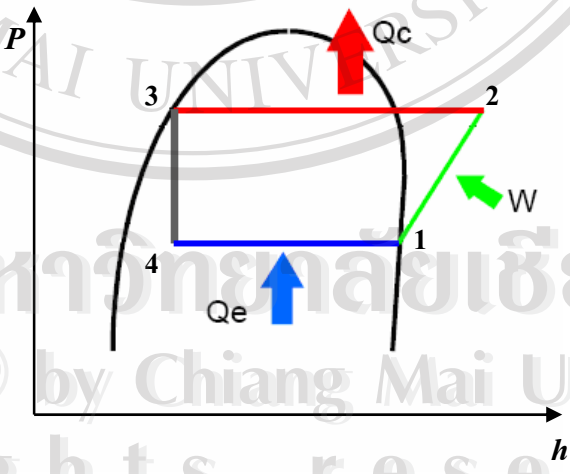
2. เครื่องทำระเหย (Evaporator) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำหน้าที่ระเหยสารทำความเย็นที่มีความดันต่ำให้เปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซ โดยดึงความร้อนจากบริเวณรอบๆ ตัวมาใช้ในการทำให้สารทำความเย็นเดือดกลายเป็นไอ ดังนั้นบริเวณรอบๆ เครื่องทำระเหยจะมีอุณหภูมิต่ำ

3. เครื่องอัดไอ (Compressor) ซึ่งทำหน้าที่อัดไอของสารทำงาน ให้ไหลเวียนในระบบ และมีความดันสูงมากพอที่จะกลั่นตัวเป็นของเหลวในเครื่องควบแน่น อีกทั้งสร้างความดันในเครื่องควบแน่นกับเครื่องทำระเหยให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

4. วาล์วลดความดัน หรืออาจเรียกว่าวาล์วขยายตัว (Expansion Valve) ในกรณีที่ระบบมีขนาดเล็กจะใช้ท่อขนาดเล็ก ซึ่งมีหน้าที่ ควบคุมอัตราการไหลของสารทำความเย็นในระบบให้พอเหมาะกับความต้องการดูดความร้อนที่เครื่องทำระเหยและยังมีหน้าที่ให้ความดันทั้งสองด้านแตกต่างกันโดยการที่สารทำความเย็นผ่านกระบวนการทรอตทลิ่ง (Throttling Process) จากความดันในเครื่องควบแน่นซึ่งเป็นความดันสูง กลายเป็นการทำความเย็นความดันต่ำจะสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนเพียงเล็กน้อย

2.3.2 วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

กระบวนการทำงานของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอแสดงด้วยแผนภูมิความดันและเอนทาลปี แสดงตามรูป 2.3 ซึ่งทางอุดมคติประกอบไปด้วย 4 กระบวนการดังต่อไปนี้



รูป 2.3 แสดงแผนภูมิความดัน-เอนทาลปีของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการอัดไอ (Compression Process) งานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอจะทำให้เอนทาลปี, อุณหภูมิ และความดันสารทำความเย็นเพิ่มสูงขึ้น ในทางปฏิบัติกระบวนการอัดไอเป็นกระบวนการ Polytropic มากกว่ากระบวนการ Isentropic (เอนโทรปีคงที่) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible Process) สาเหตุหลักมาจากเกิดการสูญเสียเนื่องจากการเสียดทานของอุปกรณ์ในเครื่องอัดไอ นอกจากนี้ในความเป็นจริงสภาวะของสารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องอัดไอจะอยู่ในสถานะไอร้อนยวดยิ่ง (Superheated Vapor) มากกว่าสถานะไออิ่มตัว (Saturated Vapor)

กระบวนการ 2-3 คือกระบวนการควบแน่น (Condensation Process) ซึ่งในกรณีที่นำมาใช้กับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน (Heat Pump Dryer, HPD) สารทำความเย็นจะคายความร้อนให้กับอากาศอบแห้ง ในทางปฏิบัติความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็นจะไม่คงที่ตลอดทั้งเครื่องควบแน่น แต่จะลดลงไปตามระยะทางของท่อน้ำยา และน้ำยาที่ไหลภายในท่อน้ำยาจะมีลักษณะเป็นสองสถานะ (Two Phase Flow) น้ำยาก่อนเข้าสู่วาล์วขยายตัว อาจอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสารทำความเย็นลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิของเหลวอิ่มตัวที่เรียกว่า Subcooling หรืออาจอยู่ในสภาวะของเหลวอิ่มตัวก็ได้

กระบวนการ 3-4 คือกระบวนการที่สารทำความเย็นที่มีสถานะของเหลวถูกลดความดันโดยการผ่านวาล์วลดความดัน ทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิลดต่ำลง และอยู่ในสถานะสารผสมระหว่างไอและของเหลว ซึ่งพร้อมที่จะดูดกลืนความร้อนจากระบบ กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการที่เอนทาลปีมีค่าคงที่

กระบวนการ 4-1 คือกระบวนการที่สารทำความเย็นดูดกลืนความร้อน ในกรณีที่นำมาใช้กับ HPD จะดูดกลืนความร้อนจากอากาศร้อนชื้นที่ออกจากห้องอบแห้ง และสารทำความเย็นจะเปลี่ยนสถานะจากสารผสมเป็นไออิ่มตัว หรือในทางปฏิบัติมักจะเป็นไอร้อนยวดยิ่ง ก่อนเข้าสู่เครื่องอัดไอและเช่นเดียวกับกระบวนการ 2-3 ที่ความดันและอุณหภูมิสารทำความเย็นลดลงไปตามระยะทางการไหลของสารทำความเย็น และสารทำความเย็นอยู่ในสภาวะสองสถานะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4 การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสามารถพิจารณาได้จาก

2.4.1 ประสิทธิผลของการใช้พลังงาน (Energy Effectiveness)

ประสิทธิผลของการใช้พลังงาน กำหนดด้วยค่า อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER)

$$SMER = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุ}}{\text{พลังงานที่จ่ายให้แก่เครื่องอัดไอ}} \quad (2.6)$$

2.4.2 ความสามารถในการอบแห้ง (Capacity of Drying)

ความสามารถในการอบแห้ง กำหนดด้วยค่า อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) หรืออัตราการดึงน้ำออก (Moisture Extraction Rate, MER)

$$\text{อัตราการอบแห้ง} = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุ}}{\text{เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง}} \quad (2.7)$$

$$MER = \frac{\text{ปริมาณน้ำควบแน่นที่เครื่องควบแน่น}}{\text{เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง}} \quad (2.8)$$

2.4.3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน (Coefficient of Performance of Heat Pump,COP)

สัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน สามารถคำนวณ โดยพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นต่อกำลังงานที่เครื่องอัดไอให้แก่สารทำความเย็นดังสมการที่ 2.9

$$COP = \frac{Q_c}{P_c} \quad (2.9)$$

เมื่อ Q_c คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (kW)

P_c คือ กำลังงานที่จ่ายให้แก่เครื่องอัดไอ (kW)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ซึ่งในการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนในกรณีที่เป็นระบบปิดหรือระบบเปิดบางส่วนจะแบ่งค่า COP ออกเป็น 2 ค่าคือ

1. COP_{sys} คำนวณจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวใน และเครื่องควบแน่นตัวนอกรวมกันต่อกำลังงานที่จ่ายให้แก่เครื่องอัดไอ

2. COP_{use} คำนวณจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวในเท่านั้น ซึ่งเป็นส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งต่อกำลังงานที่จ่ายให้แก่เครื่องอัดไอ

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น สามารถคำนวณจากอากาศที่มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเมื่อไหลผ่านเครื่องควบแน่น โดยสามารถหาจากสมดุลพลังงานที่ความดันคงที่ และไม่มีงานที่ให้หรือได้รับจากระบบดังสมการที่ 2.10

$$Q_c = \left[m_a C_a \left(T_{di} - T_{ci}\right)\right] + \left[m_a W_{di} C_v \left(T_{di} - T_{ci}\right)\right] \quad (2.10)$$

เมื่อ m_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง ($kg_{dry\,air}/s$)

T_{di} คือ อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง ($^{\circ}C$)

T_{ci} คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากห้องอบแห้ง ($^{\circ}C$)

C_a คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง ($kJ/kg\,^{\circ}C$)

C_V คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ($kJ/kg\,^{\circ}C$)

2.5 คุณภาพสมุนไพร

การประเมินคุณภาพจะใช้การประเมินด้านประสาทสัมผัส (Sensory Evaluation) หรือ การใช้คนซึ่งมีประสบการณ์ใช้ประสาทสัมผัสทั้งห้าบอกคุณภาพของอาหาร การใช้ประสาทสัมผัสนี้อาจใช้พร้อมๆกันหรืออย่างใดอย่างหนึ่งแล้วแต่ลักษณะที่ต้องการทราบ เช่น ความรู้สึกจากการสัมผัสด้วยมือ หรือภายในช่องปาก การดมกลิ่น การเคี้ยว การได้ยิน นิธิยา รัตนาปนนท์ และ ไพโรจน์ วิริยจารี (2547) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เกณฑ์การประเมินคุณภาพด้วยกัน 3 ด้าน

2.5.1. การดูด้วยสายตา มีเกณฑ์การประเมินคือ ใบมะกรูดอบแห้งจะต้องมีสีเขียวตลอดใบใกล้เคียงใบมะกรูดสด

2.5.2. การสัมผัส มีเกณฑ์การประเมินคือ เมื่อขยี้ด้วยมือแล้วใบมะกรูดอบแห้งต้องกรอบแตกกลายเป็นผงได้

2.5.3. การดมกลิ่น มีเกณฑ์การประเมินคือ ใบมะกรูดหลังอบแห้งต้องคงเหลือกลิ่นของใบมะกรูดใกล้เคียงของสด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.6 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการจะเป็นการประเมินต้นทุน และผลตอบแทนทางจากการลงทุนของโครงการใดๆ โดยเป็นการเปรียบเทียบประโยชน์หรือผลตอบแทน และต้นทุนของโครงการนั้นๆ ซึ่งผลประโยชน์ของโครงการจะเกิดขึ้นที่ระยะเวลาต่างๆกัน ตลอดอายุโครงการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับค่าเวลาของโครงการเพื่อให้ได้มาซึ่งผลประโยชน์ที่ได้รับและต้นทุนที่เสียไป ในช่วงระยะเวลาที่ต่างกันให้เป็นค่าผลประโยชน์และต้นทุนในเวลาเดียวกัน แล้วจึงจะสามารถทำการเปรียบเทียบได้อย่างถูกต้องแน่นอน และชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการตัดสินใจของผู้บริหารเกี่ยวกับการใช้เงินทุนในการซื้อสินทรัพย์ถาวรซึ่งถือเป็นรายจ่ายลงทุน (Capital Expenditure) ที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นการใช้เงินทุนจำนวนมาก การตัดสินใจลงทุนในปัจจุบันแต่ผลประโยชน์จะได้รับในอนาคต ซึ่งทำให้มีผลกระทบจากการลงทุนเป็นเวลาหลายปี ทำให้ผู้บริหารจำเป็นจะต้องพิจารณาและวิเคราะห์เงื่อนไขและปัจจัยในการลงทุน เพื่อให้กิจการได้รับผลประโยชน์สูงสุด ภายใต้ความเสี่ยงที่เหมาะสม โดยในการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางการเงิน จะเป็นการวิเคราะห์ถึงการหมุนเวียนของกระแสเงินสดต่างๆ ของโครงการ อันประกอบด้วยกระแสเงินสดรับ กระแสเงินสดจ่าย และกระแสเงินสดสุทธิ เพื่อวิเคราะห์ว่าโครงการที่ทำการศึกษาจะให้ผลตอบแทนคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่ ซึ่งจะอาศัยเกณฑ์ในการตัดสินใจดังนี้

2.6.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ผลรวมของผลตอบแทนสุทธิที่ได้ปรับค่าของเวลาแล้ว ซึ่งมุ่งหวังเพื่อประเมินว่าโครงการที่กำลังพิจารณาอยู่นั้น จะให้ผลตอบแทนคุ้มค่า หรือมีกำไรต่อส่วนรวมหรือไม่ กล่าวคือ ถ้าค่าของ NPV ที่ได้ออกมาเป็นลบหรือต่ำกว่า ศูนย์ แสดงว่าการลงทุนตามโครงการนั้นจะไม่คุ้มค่า ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจที่จะรับหรือปฏิเสธโครงการได้

โดยทั่วไป การวิเคราะห์โครงการจะใช้วิธีคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยหาผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับหรือผลตอบแทน (มูลค่าของผลได้) กับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดจ่ายหรือต้นทุน (มูลค่าของต้นทุน) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ 2.11

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+i)^t} - C_0 \qquad (2.11)$$

เมื่อ NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ, (baht)

B_t คือ ผลตอบแทนในปีที่ t, (baht)

C_t คือ ต้นทุนในปีที่ t, (baht)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

C_0 คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรกของโครงการ, (baht)

i คือ อัตราดอกเบี้ย (Interest rate), (%)

t คือ ปีที่ของการดำเนินโครงการ

n คือ อายุโครงการ, (year)

2.6.2 อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return : IRR)

อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ หมายถึงอัตราผลตอบแทนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับทั้งหมดเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดจ่ายทั้งหมด หรือนัยหนึ่งคืออัตราผลตอบแทนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิของโครงการ มีค่าเท่ากับศูนย์พอดีนั่นเอง

อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ ถือว่าเป็นอัตราส่วนร้อยละที่แสดงถึงความสามารถของเงินทุนที่จะก่อให้เกิดรายได้คุ้มกับเงินลงทุนของโครงการพอดี การคำนวณหาค่าอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ ก็คือการคำนวณอัตราส่วนลด (Discount rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นการคำนวณหาค่า IRR นั้นจึงคล้ายกับการคำนวณ NPV เกือบทุกอย่างจะแตกต่างกันก็ตรงที่ใช้อัตราดอกเบี้ยในการคำนวณหาNPV ที่เท่ากับศูนย์ และเมื่อคำนวณค่า IRR แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ กล่าวคือ ถ้า IRR สูงกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ ก็แสดงว่าการลงทุนให้ผลตอบแทนคุ้มค่ากับเงินทุนที่จ่ายออกไป

การคำนวณอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) สามารถทำได้หลายวิธี แต่ในที่นี้จะเสนอวิธีที่นิยมใช้และให้ค่าที่เที่ยงตรงมากที่สุดคือ วิธี Trial and error กล่าวคือจะต้องทดลองหาค่าของ Discount factor มาคูณกับค่าของ Discount cash-flow จนกระทั่ง NPV มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งอัตราส่วนลดนี้ก็คือ อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการนั่นเอง โดยวิธี Trial and error นั้นสามารถคำนวณโดยใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+i)^t} - C_0 = 0 \qquad (2.12)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.6.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period : PB)

ระยะเวลาคืนทุน หมายถึง ระยะเวลาดำเนินงานโครงการที่ทำให้ผลตอบแทนสุทธิที่ได้ปรับค่าของเวลา มีค่าเท่ากับค่าใช้จ่ายในการลงทุนพอดี หรืออาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาคืนทุนของโครงการ คือจำนวนปีในการดำเนินงานที่ทำมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนใช้วิธี Trial and error แบบเดียวกับการหาผลตอบแทนภายในของโครงการ แต่

ต่างกันตรงที่จะต้องทดลองหาค่าของอายุโครงการที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ = 0 โดยใช้อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ในการคำนวณ

2.7 มาตรฐานขั้นตอนการผลิตใบมะกรูดอบแห้ง

ขั้นตอนการผลิตใบมะกรูดอบแห้งที่เป็นมาตรฐานปฏิบัติ จะเป็นกระบวนการผลิตใบมะกรูดอบแห้งตั้งแต่การรับวัตถุดิบ ผ่านกระบวนการต่างๆ จนถึงขั้นการจัดเก็บ ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อดังนี้

1. ใบมะกรูดสด จากการซื้อจากเกษตรกร และสุ่มตรวจคุณภาพวัตถุดิบโดยใบมะกรูดต้องไม่มีใบอ่อนหรือใบที่โดนแมลงกัดกินไม่เกิน 10% จากนั้นทำการบันทึกน้ำหนัก และจัดเก็บวัตถุดิบไว้ในที่อากาศถ่ายเทได้สะดวก

2. นำใบมะกรูดที่รับซื้อจากเกษตรกรมาล้างทำความสะอาดและคัดสิ่งแปลกปลอม โดยการคัดเศษหญ้าออก ใบอ่อน รวมไปถึงใบที่มีตำหนิ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะคัดสิ่งแปลกปลอมออกไปประมาณ 10 %ของน้ำหนักใบมะกรูดตอนรับซื้อเข้าโรงงาน

3. แช่สารละลายคลอรีน โดยนำใบมะกรูดที่ผ่านการตัดสิ่งแปลกปลอมออกแล้วไปแช่น้ำที่ผสมคลอรีนในสัดส่วน คลอรีน 100 กรัม ต่อ น้ำ 500 ลิตร หรือความเข้มข้นของสารละลายประมาณ 200 ppm. นาน 5 นาที

4. นำใบมะกรูดที่ผ่านการแช่สารละลายคลอรีน มาใส่ตะกร้าเพื่อสะเด็ดน้ำอย่างน้อย 15 นาที

5. อบแห้ง โดยนำใบมะกรูดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 250 – 280 %db.ใส่ถาดในห้องอบแห้ง แล้วทำการอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง และสัดส่วนข้ามเครื่องระเหยตามที่ต้องการ และอบจนใบมะกรูดมีความชื้นสุดท้ายที่ 10 %db.

6. คัดใบมะกรูดที่ไม่ได้คุณภาพออก หลังจากอบแห้ง คัดใบมะกรูดที่ไม่แห้ง มีสีเหลือง หรือน้ำตาลบางส่วนออก และสุ่มวัดความชื้นก่อนบรรจุถุง

7. บรรจุถุง โดยนำใบมะกรูดอบแห้งที่ได้คุณภาพมาบรรจุถุง อลูมิเนียมฟอล์ย ถุงละ 0.5 kg พร้อมใส่ถุงบรรจุสารดูดความชื้น และสุ่มตรวจน้ำหนักใบมะกรูดหลังบรรจุถุงแล้ว

8. นำสินค้าจัดเก็บที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 22-25^{O}C ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 65 %

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved