

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยความชื้นในวัสดุ และความชื้นที่ถ่ายเทไปยังวัสดุชื้น เป็น ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

2.1.1 ความชื้นในวัสดุ (Moisture Content, M)

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลวัสดุชื้นหรือมวล วัสดุแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบคือ

2.1.1.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์โดยทั่ว ๆ ไปจะอ้างอิงใน รูปของเปอร์เซ็นต์

$$M_w = \frac{(w - d)}{w} \quad (2.1)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, เปอร์เซ็นต์
 w คือ มวลของวัสดุ, kg
 d คือ มวลของวัสดุแห้งที่ไม่มีความชื้น, kg dry product

2.1.1.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทาง ทฤษฎีเพราะมวลแห้งจะมีค่าคงที่ตลอดการอบแห้ง

$$M_d = \frac{(w - d)}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เปอร์เซ็นต์

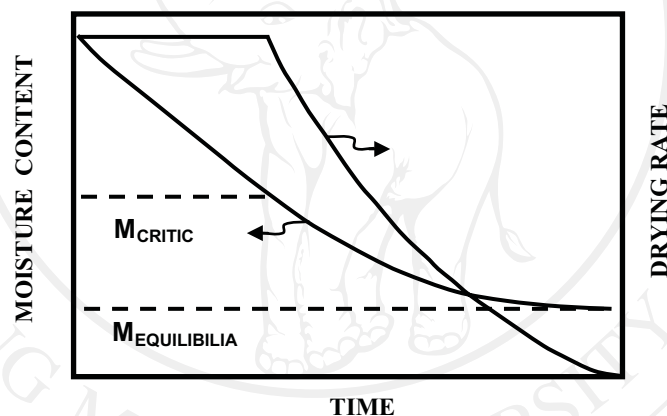
2.1.2 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, M_{eq})

เมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้สภาวะอากาศคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนกระทั่งความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับ ความดัน

ไของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ เรียกว่า ความชื้นสมดุล หรือ ความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและวอเตอร์แอกติวิตี้ (Water activity) ในวัสดุ ซึ่งก็หมายความว่าเหมือนกันเพราะวอเตอร์แอกติวิตี้ มีค่าเท่ากับ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เมื่อวัสดุและอากาศอยู่ในภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ และสมมุติให้อไอน้ำเป็นก๊าซในอุดมคติ

2.1.3 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate)

อัตราการอบแห้ง คืออัตราการดึงความชื้นออกจากวัสดุที่เปลี่ยนไปตามเวลา สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 2.1 การอบแห้งในช่วงอบแห้งคงที่และลดลง (Brooker et al. 1992)

ในการอบแห้งวัสดุทั่วไป มักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนส่วนใหญ่ใช้ในการระเหยน้ำ ไอน้ำจะเคลื่อนตัวจากผิววัสดุมาที่กระแสอากาศ ถ้าผิววัสดุมีไอน้ำมีจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นที่ผิวจะคงที่ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและ อัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้ว อุณหภูมิที่ผิววัสดุจะสูงขึ้น ความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุลดลง ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและ อัตราการอบแห้งจะลดลง

2.1.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติอากาศชื้น

ในการการหาค่าคุณสมบัติของอากาศชื้น (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ (2540) จากตำแหน่งต่าง ๆ ที่ต้องการทราบข้อมูลบางครั้งเครื่องมือวัดที่เราไม่มีอาจไม่ได้วัดข้อมูลที่เรา

ต้องการนำมาวิเคราะห์โดยตรง แต่จะให้ค่าข้อมูลดิบเพื่อนำมาคำนวณหาค่าที่ต้องการ จึงใช้
ทฤษฎีพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่สำคัญดังนี้ คือ

2.1.4.1 ความดันไอน้ำอิ่มตัว หาได้จากสมการ Clausius-Clapeyron

$$\ln(P_{vs}) = -7511.52/T_{abs} + 89.63121 + 0.023998970 T_{abs} - (1.1654551 \times 10^{-5}) T_{abs}^2 \\ - (1.2810336 \times 10^{-8}) T_{abs}^3 + (2.0998405 \times 10^{-11}) T_{abs}^4 - 12.150799 \ln(T_{abs}) \quad (2.3)$$

โดยที่ $273.16K \leq T_{abs} \leq 393.16K$

เมื่อ P_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว, kPa

T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศ, K

2.1. 4.2 ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศหาได้จาก

$$P_v = 1.608 \frac{WP}{(1 + 1.308W)} \quad (2.4)$$

เมื่อ P_v คือ ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ, kPa

P คือ ความดันรวมของอากาศชื้น, kPa

W คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, $\text{kg}_{\text{w vapor}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$

2.1. 4.3 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหาได้จาก

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (2.5)$$

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, เศษส่วน

2.1.4 .4 อัตราส่วนความชื้นของอากาศจากกฎของก๊าซสมบูรณ์จะได้ว่า

$$W = \frac{0.62189 RH P_{vs}}{(P - RH P_{vs})} = 0.62189 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (2.6)$$

เมื่อคำนวณจากอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะได้เป็น

$$W = \frac{(2501 - 2.411T_{wb})W_{wb} - 1.006(T - T_{wb})}{2501 + 1.775T - 4.186T_{wb}} \quad (2.7)$$

เมื่อ T_{wb} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ, °C

W_{wb} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, $\text{kg}_w \text{ vapor} / \text{kg}_{\text{dry air}}$

2.1.4.5 เอนทาลปีของอากาศชื้น

จากนิยาม เอนทาลปีของอากาศชื้น (h) มีค่าเท่ากับผลบวกของเอนทาลปีของอากาศแห้ง (h_a) และเอนทาลปีของไอน้ำในอากาศ (h_v)

$$h = h_a + W h_v \quad (2.8)$$

ถ้าอุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 0°C สามารถเขียน h_a และ h_v ได้ว่า

$$h_a = c_a T = 1.006T \quad (2.9)$$

$$h_v = c_v(T - T_{dp}) + h_{fg@T_{dp}} + c_w T_{dp} \quad (2.10)$$

เมื่อ T มีค่าเท่ากับ T_{db} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, °C

T_{dp} คือ อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, °C

หรือ สามารถหาค่าเอนทาลปีของไอน้ำในอากาศได้จากการวิเคราะห์สมการลดหย่อนคือ

$$h_v = 2501 + 1.775T \quad (2.11)$$

เมื่อ $-50^\circ\text{C} \leq T \leq 110^\circ\text{C}$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.7) และ (2.9) ลงในสมการที่ (2.6) จะได้

$$h = 1.006T + (2501 + 1.775T)W \quad (2.12)$$

2.1. 4.6 ปริมาตรจำเพาะของอากาศหาจากกฎของก๊าซสมบูรณ์

$$v = R T_{\text{abs}} \frac{(1 + 1.608W)}{M_a P} \quad (2.13)$$

เมื่อ R คือ ค่าคงที่สากลของอากาศ ($8.314 \text{ kg/kg mole K}$)

M_a คือ น้ำหนักโมเลกุลของอากาศแห้ง, kg/kg mole K

หรือ สามารถหาค่าคุณสมบัติของอากาศเหล่านี้ได้จากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychometric chart)

2.2 ปัมความร้อนแบบอัดไอ

2.2.1 ระบบทำความเย็นและระบบปั๊มความร้อน (Refrigeration and Heat Pump System)

ระบบทำความเย็นและระบบปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่รับความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปถ่ายเทให้กับสารทำงานพาความร้อนที่ได้รับไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูง ทั้งนี้โดยจะต้องป้อนงานให้แก่วัฏจักรของระบบทำความเย็น และระบบปั๊มความร้อนโดยหลักการทำงานของวัฏจักรและส่วนประกอบหลักๆเหมือนกันมาก แต่ทั้งสองระบบนี้จะแตกต่างกันที่วัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน โดยที่ระบบทำความเย็นจะมุ่งเน้นใช้ประโยชน์จากการดูดความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ส่วนระบบปั๊มความร้อนนั้นจะมุ่งเน้นใช้ประโยชน์จากการจ่ายความร้อนให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงเป็นสำคัญ

โดยปกติปั๊มความร้อนแบบอัดไอมีอุปกรณ์หลักที่สำคัญ คือ

2.2.1.1 เครื่องอัดไอ (Compressor)

ทำหน้าที่ สร้างอัตราการไหล เพิ่มอุณหภูมิและความดันให้สารทำความเย็นสถานะก๊าซที่อยู่ในระบบ โดยการอัดสารทำความเย็นที่ออกมาจากเครื่องทำระเหย

2.2.1.2 เครื่องควบแน่น (Condenser)

เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่ทำหน้าที่ควบแน่นสารทำความเย็นและสถานะก๊าซที่มีอุณหภูมิ และความดันสูงโดยกระบวนการระเหยความร้อนออกจากสารทำความเย็นที่รับมาจากเครื่องอัดไอ ทำให้สารความเย็นเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว

2.2.1.3 วาล์วขยายตัว (Expansion valve)

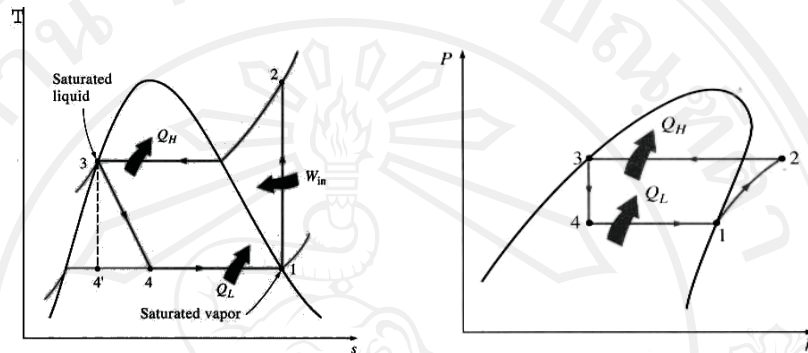
ทำหน้าที่ลดความดันของสารทำความเย็นเหลวให้มีความดันต่ำลงเพื่อให้สารความเย็นสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย

2.2.1.4 เครื่องทำระเหย (Evaporator)

เครื่องทำระเหย เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่ทำหน้าที่ระเหยสารความเย็นที่มีความดันต่ำให้เปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซโดยการดึงความร้อนจากบริเวณรอบๆตัวมาใช้ในการทำให้สารความเย็นระเหยเป็นไอ

2.2.2 วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

การอธิบายการเคลื่อนที่ของความร้อนและงานที่กระทำกับระบบสามารถแสดงสถานะการกระทำลงบนแผนภูมิ อุณหภูมิ -เอนโทรปี หรือแผนภูมิ ความดัน -เอนทาลปี ของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แผนภูมิอุณหภูมิ-เอนโทรปี และแผนภูมิความดัน-เอนทาลปีของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติ (Yunus A. Cengel and Michael A. Boles. 2002)

วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติ ประกอบไปด้วย 4 กระบวนการ (Processes) ในการวิเคราะห์หาค่าของงานและความร้อนได้ดังต่อไปนี้คือ

กระบวนการ 1-2: เป็นกระบวนการอัดตัวแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic process) เครื่องอัดไอจะอัดไอสารทำความเย็นให้เป็นไอที่มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นโดยที่ค่าเอนโทรปีคงที่

$$P_{\text{comp}} = \dot{m}_r (h_2 - h_1) \quad (2.14)$$

เมื่อ

P_{comp} คือ งานที่ให้แก่อุปกรณ์อัด, kJ/kg

$\dot{m}_r$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น, kg/s

h_1 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดไอ, kJ/kg

h_2 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องอัดไอ, kJ/kg

กระบวนการ 2-3 :เป็นกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ (Constant pressure process) สารทำความเย็นจะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลวจึงคายความร้อนออกมาที่เครื่องควบแน่นดังนั้น

$$Q_c = \dot{m}_r (h_2 - h_3) \quad (2.15)$$

เมื่อ Q_c คือ ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่น, kJ/kg
 h_3 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะออกจากเครื่องควบแน่น , kJ/kg

กระบวนการ 3-4 : เป็นกระบวนการลดความดันที่เอนทาลปีคงที่ หรือที่ร้อดลิ่ง (Constant enthalpy or throttling process) ดังนั้นจะได้ว่า

$$h_3 = h_4 \quad (2.16)$$

h_4 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องทำระเหย , kJ/kg

กระบวนการ 4-1 : เป็นกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ (Constant pressure process) สารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลวผสมไอจะเดือดกลายเป็นไอจึงดึงความร้อนเข้าไปที่เครื่องทำระเหยได้สมการคือ

$$Q_e = \dot{m}_r (h_1 - h_4) \quad (2.17)$$

เมื่อ Q_e คือ ความร้อนที่เข้าสู่วัฏจักรที่เครื่องทำระเหย, kJ/kg
 h_1 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่เข้าสู่ เครื่องอัดไอ, kJ/kg
 h_4 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่เข้าสู่ เครื่องทำระเหย , kJ/kg

2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน (Coefficient of Performance, COP_h) คืออัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นต่องานที่ใช้ในเครื่องอัดสามารถคำนวณหา จากสมการต่อไปนี้

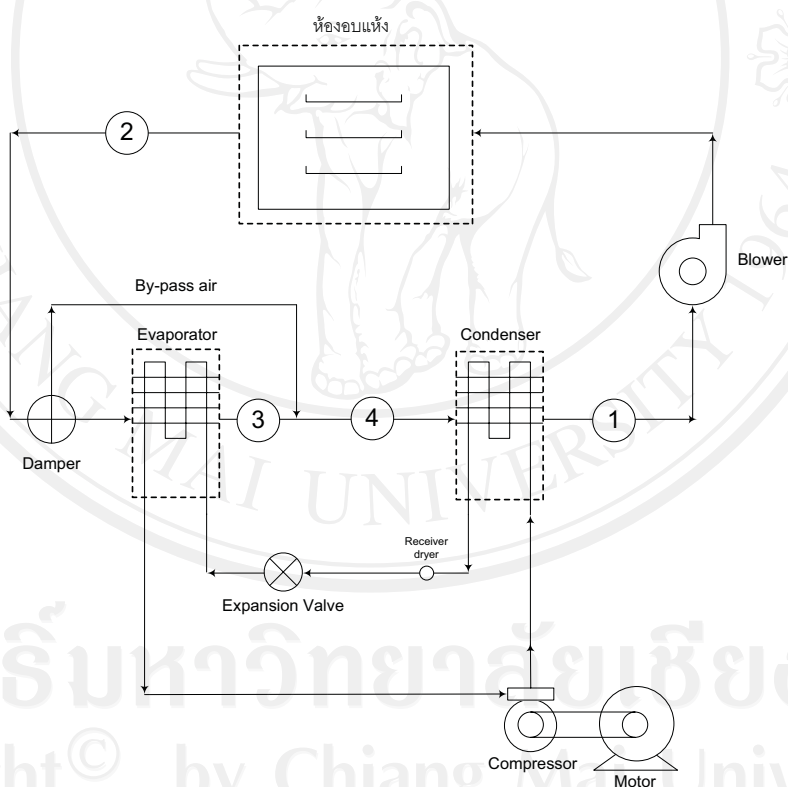
$$COP = \frac{Q_c}{P_{comp}} \quad (2.18)$$

หรือ
$$COP = (h_2 - h_3)/(h_2 - h_1)$$

หากค่า COP_h มีค่ายิ่งมากจะชี้ให้เห็นว่า ระบบปั๊มความร้อนมีสมรรถนะสูง

2.3 เครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน

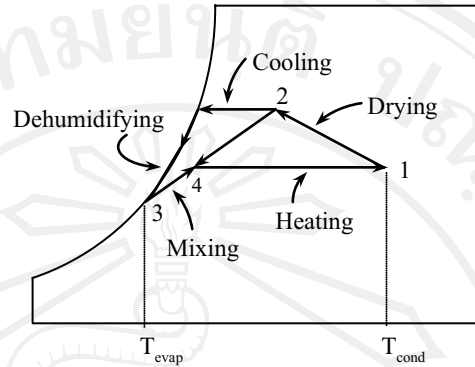
การนำระบบปั๊มความร้อนมาใช้ในการอบแห้ง อาศัยหลักการทางวิศวกรรมการทำ ความเย็นในส่วนของการปั๊มความร้อนและวิศวกรรมการอบแห้ง รูปที่ 2.3 และ 2.4 แสดงการทำงานของระบบอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน และกระบวนการของอากาศในการอบแห้งของระบบอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน ตามลำดับ โดยตำแหน่งที่ 1 คือลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลไปยังตำแหน่ง 2 ซึ่งอุณหภูมิความร้อนจะต่ำลง แต่ความชื้นสัมพัทธ์จะสูงขึ้น ที่ตำแหน่งที่ 2 นี้ลมร้อนแยกออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกลมร้อนไหลผ่านเครื่องทำระเหย ทำให้ลมร้อนเย็นลงจนถึงจุดน้ำค้างแล้วเกิดการควบแน่นของไอน้ำในลมร้อนและอุณหภูมิต่ำลงจนถึงตำแหน่ง 3 ส่วนที่สองไม่ไหลผ่านเครื่องทำระเหย จากนั้นเป็นกระบวนการผสมกระแสลมร้อนทั้งสองส่วน ทำให้ได้ลมร้อนตำแหน่งที่ 4 ซึ่งจะไหลผ่านเครื่องควบแน่นและมีการแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้อุณหภูมิความร้อนสูงขึ้นเป็นตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 2.3 ผังแสดงการทำงานของระบบอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน

เนื่องจากในกระบวนการอบแห้ง ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิเข้าห้องอบแห้งให้คงที่และไม่ให้สูงเกินความต้องการของสภาวะภายในห้องอบแห้ง งานวิจัยนี้จึงใช้การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบ สองวิธีคือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเครื่องอัดไอ ในการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง (Variable speed drive heat pump dryer, VSD-HPD) ให้มีความเหมาะสมกับ

สภาวะภายในห้องอบแห้งตลอดช่วงเวลาของการอบแห้ง และ การระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการบายพาสสารทำความเย็นไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก (Bypass working fluid heat pump dryer, BWF-HPD)



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการของอากาศในการอบแห้งของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

2.4 การควบคุมอุณหภูมิเข้าห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

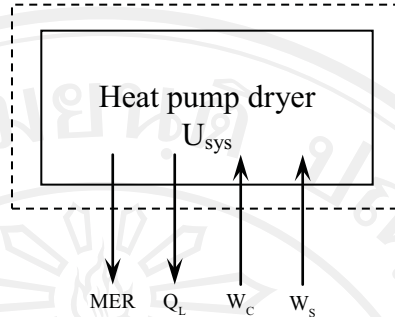
ในกระบวนการอบแห้งจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิเข้าห้องอบแห้งให้คงที่และไม่ให้สูงเกินความต้องการของสภาวะภายในห้องอบแห้ง โดยการควบคุมอุณหภูมิต้องทำให้อุณหภูมิถึงค่าที่กำหนด (Set Point) ในเวลาที่สั้นที่สุดและรักษาอุณหภูมิตรงให้ค่าที่กำหนดนั้นไว้ให้คงที่ตลอดไป (อมรอน อิเล็กทรอนิกส์, 1998)

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยส่วนใหญ่ ควบคุมอุณหภูมิที่เข้าห้องอบแห้ง โดยการระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการทำบายพาสสารทำความเย็นไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก (Bypass working fluid heat pump dryer, BWF-HPD) แต่ก็มีมีการควบคุมอุณหภูมิเข้าห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนอีกวิธีที่ใช้วิธีแปรเปลี่ยนอัตราไหลของสารทำความเย็นให้เหมาะสมกับภาระทำความร้อน (Variable speed drive heat pump dryer, VSD-HPD)

2.4.1 การควบคุมอุณหภูมิโดยระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการทำบายพาสสารทำความเย็นไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก (Bypass working fluid heat pump dryer, BWF-HPD)

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ “พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปหรือถูกถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นหรือทำลายให้สูญสลายไปได้ ” พลังงานจะถูกสะสมอยู่ในระบบของ HPD อยู่ตลอดเวลาซึ่งเป็นผลมาจากงานที่ป้อนให้กับระบบที่เครื่องอัดไอและพัด

ลม แ่่งงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอดีเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของความร้อนที่ระบายออกโดยเครื่องควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปริมาตรควบคุมของเครื่องอบแห้ง (HPD) ในระบบปิด (ฐานันท์ เมธิยานนท์, 2541)

พลังงานที่ถูกถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ = พลังงานรวมของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป

$$-Q_L + W_C + W_s = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในที่เพิ่มขึ้น} + \text{พลังงานของน้ำควบแน่นที่ออกจากปริมาตรควบคุม} \quad (2.19)$$

เมื่อ W_C คือ งานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอดี, kW
 W_s คือ งานเพลลาของพัดลม, kW

โดยที่พลังงานของน้ำควบแน่นที่ออกจากปริมาตรควบแน่นน้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นสมการที่ (2.19) เขียนได้ว่า

$$\Delta U_{sys} \approx W_C + W_s - Q_L \quad (2.20)$$

จากสมการ (2.20) สามารถสรุปได้ว่า ในระบบปิดหากต้องการให้ภายในตู้อบแห้งอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน (อุณหภูมิอากาศอยู่ในสภาวะคงที่ตลอดเวลา) จะต้องมีการระบายความร้อนส่วนเกินทิ้งสู่อากาศแวดล้อมภายนอก ซึ่งเป็นเหตุผลที่จำเป็นต้องมีเครื่องควบแน่นตัวนอก (external condenser) นอกเหนือไปจากเครื่องควบแน่นตัวใน (internal condenser) ซึ่งมีไว้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ใช้ออบแห้ง ดังนั้นจะได้ว่า

$$Q_{ce} = \Delta U_{sys} \quad (2.21)$$

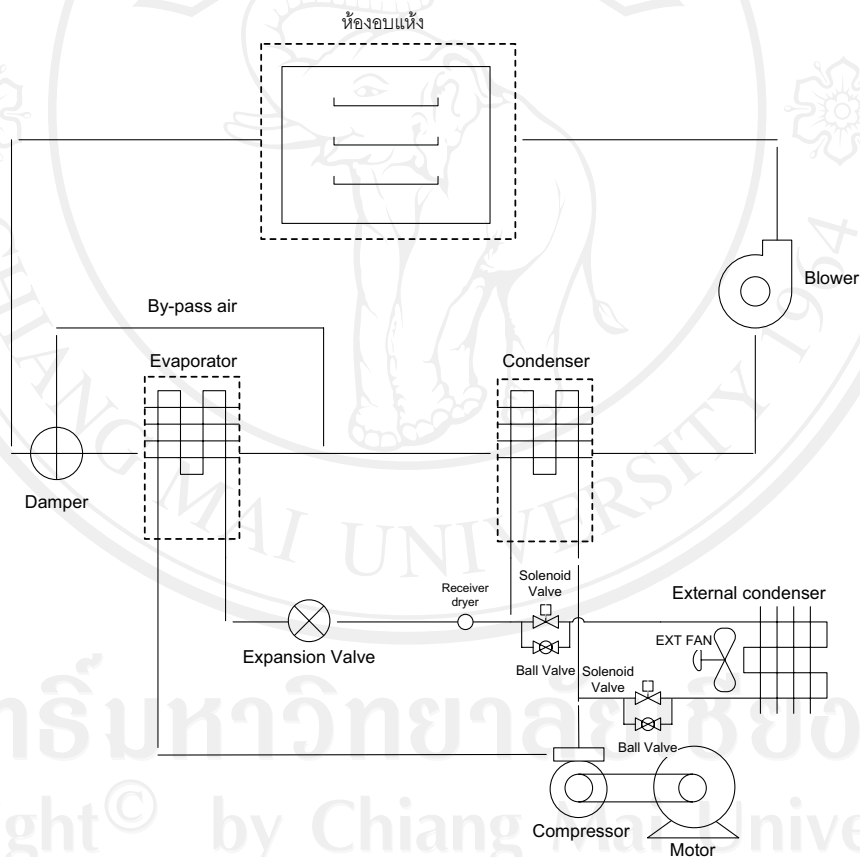
$$\text{หรือ} \quad Q_{ce} \approx W_C + W_s - Q_L \quad (2.22)$$

เมื่อ Q_{ce} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่นชุดนอก, kW

Q_L คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูญเสีย, kW

ΔU_{sys} คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบที่เพิ่มขึ้น, kW

การติดตั้งเครื่องควบแน่นตัวนอกเข้ากับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนโดยใช้วิธีการควบคุมแบบเปิด-ปิด (ON-OFF Control) มาควบคุมการเปิด-ปิดของโซลีนอยด์วาล์ว ที่ปิดกั้นไม่ให้อากาศทำความเย็นไหลผ่านไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก ดังรูปที่ 2.6 เมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งยังไม่ถึงค่าที่กำหนด (Set point) และเปิดทางให้อากาศทำความเย็นส่วนหนึ่งไหลออกไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก (External condenser) เพื่อระบายความร้อนส่วนเกินออกนอกระบบ โดยที่ยังมีอากาศทำความเย็นส่วนหนึ่งไหลผ่านเครื่องควบแน่นตัวใน (Internal condenser) จากนั้นเมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งลดลงต่ำกว่า Set Point ระบบควบคุมจะปิดโซลีนอยด์วาล์ว เพื่อให้อากาศทำความเย็นไหลเข้าเครื่องควบแน่นตัวในเพียงตัวเดียวเพื่อจ่ายความร้อนให้กับห้องอบแห้ง



รูปที่ 2.6 ฟังแสดงการทำงานของระบบอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิแบบ BWF-HPD

2.4.2 การควบคุมอุณหภูมิโดยแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำความเย็นให้เหมาะสมกับภาระทำความร้อน (Variable speed drive heat pump dryer ,VSD-HPD)

อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นได้จาก อุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นและ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่เครื่องควบแน่นมีผลจากการเพิ่มขึ้นของความดันสารทำงาน ซึ่งความดันสารทำงานที่เพิ่มขึ้นมีผลมาจากความเร็วรอบของเครื่องอัดไอ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนให้เครื่องอัดไอทำงานเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังจากภายนอก คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (กฤษฎา วิสวธีรานนท์, 2536) โดยที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไปตามสมการ

$$N = \frac{120f}{p}(1 - S) \quad (2.23)$$

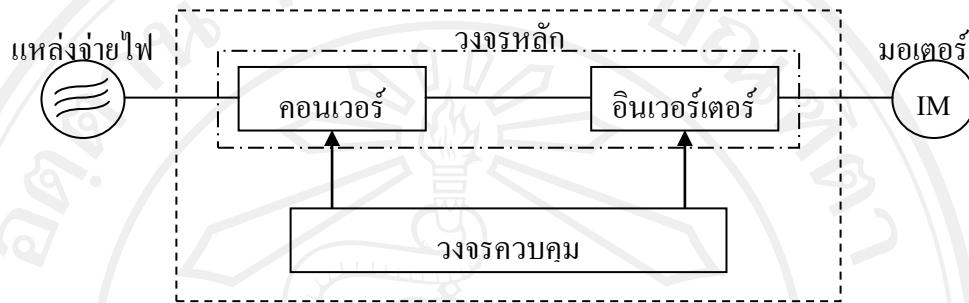
เมื่อ N คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ,rpm
 f คือ ความถี่ไฟฟ้า, Hz
 p คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์ (pole)
 S คือ เปอร์เซ็นต์ความเร็วที่ลดลงอันเนื่องมาจากโหลด (Slip), เศษส่วน
 $\frac{120f}{p}$ เรียกว่า เทอมของความเร็วซิงโครนัส (N_0)

จากสมการที่ (12) จะพบความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นฟังก์ชันกับ ความถี่ไฟฟ้า, จำนวนขั้วของมอเตอร์ (pole) และเปอร์เซ็นต์ความเร็วที่ลดลงอันเนื่องมาจากโหลด (Slip) วิธีที่ง่ายที่สุดในการความเร็วเปลี่ยนแปลงรอบของมอเตอร์คือการเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้า อุปกรณ์ที่เหมาะสมในการเปลี่ยนความถี่ ของมอเตอร์ที่สะดวกและหาซื้อได้ง่ายคืออินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ และแรงดันคงที่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ และแรงดันขนาดต่างๆ แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อน อินพุตให้อินเวอร์เตอร์จะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับทั่วไปที่มีรูปคลื่นเป็นรูปไซน์ (Sine Wave) แต่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีรูปร่างแตกต่างไปจากรูปไซน์ จึงมีฮาร์โมนิก (Harmonics) ปนอยู่ด้วยทำให้กระแสของมอเตอร์มีขนาดมากกว่าปกติ กรณีที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยตรง และมีผลทำให้มอเตอร์ร้อนกว่าปกติด้วยดังนั้นในการเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ทั่วไปขับ มอเตอร์อย่างต่อเนื่อง ผู้ผลิตจึงแนะนำให้ผู้ใช้ลดโหลดของมอเตอร์เหลือ 85%ของพิกัด โดยดูพิกัด จากฉลากบอกขนาดของมอเตอร์ที่ผู้ผลิตกำหนด

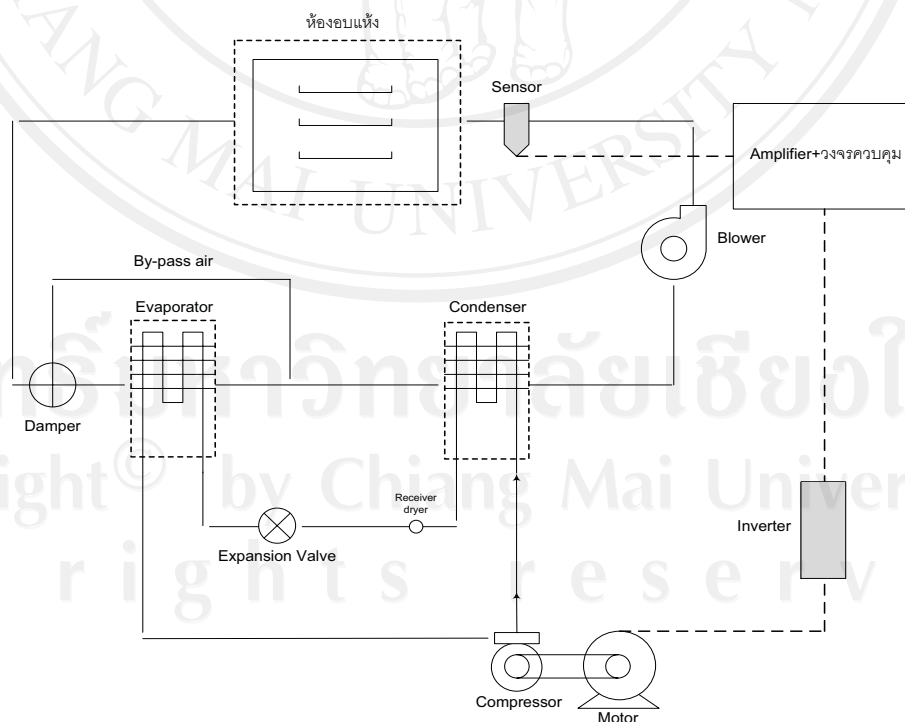
หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ถูกแสดงด้วยรูปที่ 2.7 อินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นไฟฟ้า กระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟ (50 Hz หรือ 60 Hz) ไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้า กระแสตรง โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter) จากนั้นไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่สามารถแปลงขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองส่วนนี้เป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่นและแรงดัน นอกจากนี้ยังมีวงจรควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรทั้งสองส่วนนั้น อินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานทั่วไปจะประกอบไปด้วยส่วนของวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์รวมอยู่ในเครื่องเดียวกันเสมอ

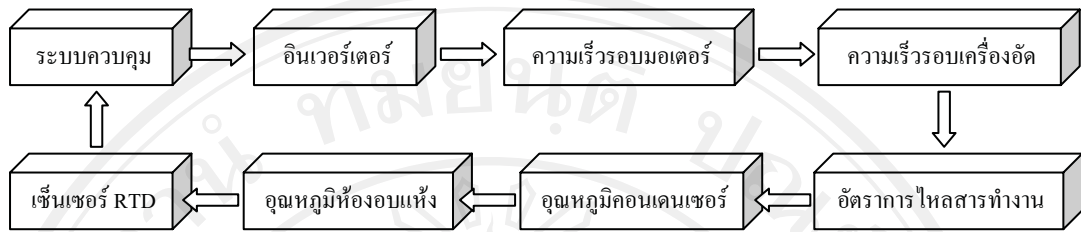


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ (กฤษฎา วิสวธีรานนท์, 2536)

อินเวอร์เตอร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน แบบ VSD-HPD ดังรูปที่ 2.8 โดยมีลักษณะการควบคุมอุณหภูมิของห้องอบแห้ง แสดงด้วยไดอะแกรมแบบกล่อง (Block Diagram) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แผนผังการทำงานของระบบอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD



รูปที่ 2.9 ไคอะแกรมแสดงวิธีการควบคุมอุณหภูมิของห้องอบแห้งโดยใช้อินเวอร์เตอร์

2.5 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์กล้วยน้ำว้า

กล้วยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของไทยและเป็นที่รู้จักกันดีมี 3 ชนิด คือ กล้วยไข่ (AA กรุ๊ป) กล้วยหอม (AAA กรุ๊ป) และกล้วยน้ำว้า (ABB กรุ๊ป) ซึ่งมีชื่อสามัญ คือ Pisang awak และชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Musa sapientum* Linn. Musaceae (Ferris et al., 1999)

กล้วยน้ำว้าสามารถพบได้ในทุกภาคของประเทศไทย มีลักษณะโดยทั่วไป คือ ลำต้นสูงไม่เกิน 3.5 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm กาบลำต้นด้านนอกมีสีเขียวอ่อน มีประดำบ้างเล็กน้อย ก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบ เส้นกลางใบสีเขียว ก้านช่อดอกไม่มีขน ปลีรูปไข่ค่อนข้างป้อม ปลายป้าน ด้านนอกสีแดงอมม่วง ด้านในมีสีแดงเข้ม เครือหนึ่งมีประมาณ 7-10 หวี หวีหนึ่งมี 10-16 ผล ก้านผลยาวเปลือกหนา สุกมีสีเหลืองเนื้อสีขาว รสหวาน ใ้กลางมีสีเหลือง ชมพูหรือขาว ทำให้แบ่งออกเป็นกล้วยน้ำว้าเหลือง กล้วยน้ำว้าแดง และกล้วยน้ำว้าขาว

การสุกของผลไม้รวมทั้งกล้วยน้ำว้าหลังการเก็บเกี่ยวมีการเปลี่ยนแปลงทางสรีระและเคมี การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นตัวกำหนดคุณภาพของผลไม้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ได้แก่ การเปลี่ยนสี การอ่อนตัวของเนื้อเยื่อ การสังเคราะห์น้ำตาล ก๊าซเอทิลีน และมีอัตราการหายใจ เปลี่ยนไป การสุกของผลไม้จะเกี่ยวข้องเฉพาะผลไม้ประเภท Climacteric เท่านั้น ผลไม้สุกส่วนมากเนื้อจะนิ่มเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโมเลกุลต่างๆ ภายในผนังเซลล์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เพกติน นอกจากนั้นยังเกิดจากการที่แป้งซึ่งสะสมไว้ในผลเปลี่ยนเป็นน้ำตาลและเกิดจากการ สูญเสียน้ำออกไปจากผลผลิต

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาทฤษฎีการสุกของกล้วย เพื่อใช้ในการกำหนดเป็นมาตรฐานในการคัดเลือกกล้วยให้มีระยะความสุกใกล้เคียงกันมาใช้งานวิจัย และจากการศึกษา พบว่า CSIRO (1972) ได้จำแนกลักษณะขั้นตอนของการสุกของกล้วย

ออกเป็นระยะต่างๆ ของกล้วยหอม ซึ่งสามารถนำมาอ้างอิงลักษณะการสุกของกล้วยน้ำว้า รูปที่ 2.10 ดังนี้

ระยะที่ 1 เปลือกเขียว ผลแข็ง ไม่มีการสุก

ระยะที่ 2 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองเล็กน้อย

ระยะที่ 3 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองมากขึ้นแต่ยังมีสีเขียวมากกว่าสีเหลือง

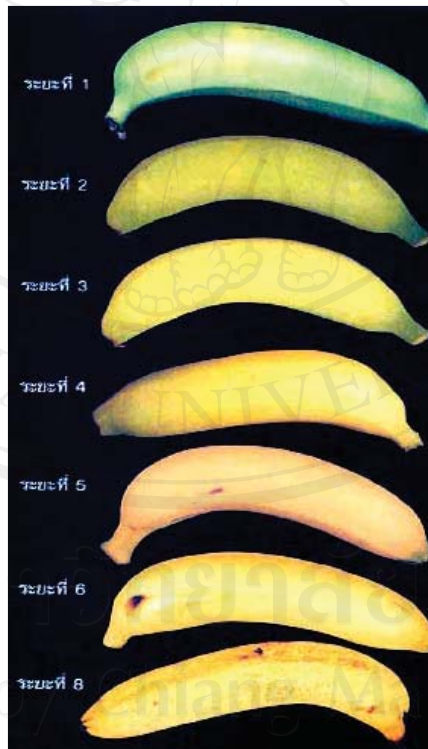
ระยะที่ 4 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองและมีสีเหลืองมากกว่าสีเขียว

ระยะที่ 5 เปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียว

ระยะที่ 6 ทั้งผลมีสีเหลือง (ผลสุก)

ระยะที่ 7 ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาล (สุกเต็มที่ มีกลิ่นหอม)

ระยะที่ 8 ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาลมากขึ้น (สุกมากเกินไป เนื้อเริ่มอ่อนตัว และมึนแรง)



รูปที่ 2.10 ระยะการสุกของผลกล้วย (เบญจมาศ 2545)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กล้วยน้ำว้าที่มีระยะการสุกอยู่ในระยะที่ 4 ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไปในบทที่ 3