ปฏิบัติการกระบวนการปรับอากาศ

เรียบเรียงโดย ธีระชาติ พรพิบูลย์

ความสำคัญของการปรับอากาศ

การปรับอากาศหมายถึงกระบวนการที่ทำให้อากาศเปลี่ยนจากสภาวะหนึ่งกลายเป็นอีกสภาวะหนึ่งตามต้องการ เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น การทำให้อากาศเย็นและแห้งสำหรับการจ่ายอากาศเข้าสู่ภายในห้องปรับอากาศสำหรับภูมิภาคเขตร้อนชื้น การทำให้อากาศร้อนเพื่อใช้อากาศร้อนเหล่านั้นในการอบแห้งแป้งมันสำปะหลังภายหลังกระบวนการสลัดน้ำออกจากมันสำปะหลังที่ได้ทำการบดแล้วซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการผลิตแป้งมันสัมปะหลัง การทำให้อากาศแห้งเพื่อใช้ในการเก็บผลิตภัณฑ์ที่ความชื้นมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อาทิเช่น ผลิตภัณฑ์จากผลิตผลทางด้านการเกษตร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นจึงเห็นว่ากระบวนปรับอากาศมีความสำคัญอย่างมากในทางวิศวกรรม และปฏิบัติการนี้จะเน้นหนักในการทำความเข้าใจทั้งด้านคุณสมบัติของอากาศ และกระบวนการปรับอากาศทั้งในทางทฤษฎีตลอดจนในการปฏิบัติการทดลอง

วัตถุประสงค์ของปฏิบัติการ

ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้ปฏิบัติการนั้นทำความเข้าใจทั้งด้านคุณสมบัติของ อากาศ และกระบวนการปรับอากาศทั้งในทางทฤษฎีตลอดจนในการปฏิบัติการทดลอง

คุณสมบัติของอากาศ

อากาศในบรรยากาศ (Atmospheric air) มีองค์ประกอบระหว่างก๊าซชนิดต่างๆ คือ ไนโตรเจน(N_2) ออกซิเจน(O_2) และก๊าซอื่นๆ เช่น อาร์กอน(Ar) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น โดยมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ประมาณ 75% โดยมวล และออกซิเจนประมาณ 23% โดยมวล และมีไอน้ำ (Moisture) ดังนั้นในทางวิศวกรรมการปรับอากาศจะจำแนกอากาศออกเป็น 2 องค์ประกอบคือ อากาศแห้ง ซึ่งประกอบด้วยก๊าซต่างๆ ข้างต้น ซึ่งเรียกว่า *อากาศแห้ง* (Dry air) และไอน้ำ (Water vapor) โดยที่ปริมาณไอน้ำในอากาศจะมีแน้วโน้มเปลี่ยนแปลงได้จากกระบวนการกลั่นตัว (Condensation) และกระบวนการระเหย (Evaporation) กล่าวคือเมื่อไอน้ำในอากาศมีการกลั่นตัวจะทำให้ปริมาณไอน้ำในอากาศลดลงในทางกลับกันหากไอน้ำในอากาศได้รับการระเหยเพิ่มเติมจากสิ่งแวดล้อม เช่น ระเหยจากแหล่งน้ำในธรรมชาติจะทำให้ปริมาณไอน้ำในอากาศเพิ่มขึ้น

อากาศแห้งในบรรยากาศโดยทั่วไปถือว่ามีมวลคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนไอน้ำอาจมีมวลเปลี่ยนแปลงมากขึ้นหรือน้อยลงได้ขึ้นกับกระบวนการระเหยและกระบวนการกลั่นตัวดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ด้วยเหตุนี้ในทางวิศวกรรมจึงเรียกอากาศในบรรยากาศแทนด้วย *อากาศชื้น* (Moist air) หมายถึงอากาศที่มีองค์ประกอบระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำในอากาศ กล่าวคือ

อากาศชื้น = อากาศแห้ง + ไอน้ำ

เนื่องจากอากาศชื้นแบ่งออกเป็นสองส่วนคืออากาศแห้งและไอน้ำจึงทำให้ความดันของอากาศชื้นจะเท่ากับผลรวมระหว่างความดันเฉพาะส่วนอากาศแห้งและความดันเฉพาะส่วนไอน้ำ ดังนั้น

$$P = P_a + P_v \qquad \text{kPa}$$

โดยที่

P แทน ความดันของอากาศชื้น, kPa

P_a แทน ความดันเฉพาะส่วนอากาศแห้ง , kPa

P_v แทน ความดันเฉพาะส่วนไอน้ำ, kPa

ไอน้ำที่อยู่ในอากาศชื้นอาจถูกเรียกว่า *ความชื้น* (Humidity) สภาวะของไอน้ำในอากาศชื้นโดยปกติจะอยู่ในสภาวะไอน้ำร้อนยิ่งยวด (Superheated steam) แต่ในกรณีที่ไอน้ำเหล่านั้นอยู่ในสภาวะพร้อมกลั่นตัวไอน้ำเหล่านั้นก็จะอยู่ในสภาวะไอน้ำอิ่มตัว (Saturated steam) ซึ่งก็อาจเกิดขึ้นได้ในบางกรณี ดังนั้นการที่เราจะพิจารณาว่าอากาศในสภาวะใดมีความชื้นมากหรือน้อยกว่ากันจะสามารถพิจารณาได้จากปริมาณไอน้ำในอากาศเป็นสำคัญ การอ้างอิงปริมาณไอน้ำในอากาศจะถูกอ้างอิงด้วย *อัตราส่วนความชื้น* (Humidity ratio) หรืออาจเรียกว่า *ความชื้นสมบูรณ์* (Absolute humidity) หรือเรียกว่า *ความชื้นจำเพาะ* (Specific humidity) ทั้งหมดนี้จะมีความหมายเดียวกันคืออัตรส่วนมวลของไอน้ำในอากาศต่อมวลของอากาศแห้งในอากาศนั้น กล่าวคือ

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \qquad kg_v / kg_a$$

โดยที่

ω แทน อัตราส่วนความชื้น, kg_v / kg_a

m_v แทน มวลไอน้ำในอากาศชื้น, kg_v

m_a แทน มวลอากาศแห้ง, kg_a

เนื่องจากอากาศแห้งและไอน้ำอยู่ในสถานะก๊าซและผสมกลมกลืนซึ่งกันและกัน จึงทำให้อุณหภูมิและปริมาตรของไอน้ำและอากาศแห้งจะมีค่าเท่ากันเสมอ ซึ่งเป็นอุณหภูมิของอากาศชื้น ถ้าสมมติฐานให้อากาศแห้งและไอน้ำมีคุณสมบัติเป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal gas) จะทำให้

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V/(R_v T)}{P_a V/(R_a T)} = \frac{R_a}{R_v}\frac{P_v}{P_a} = 0.622\frac{P_v}{P_a}$$

หรือ $\omega = 0.622\frac{P_v}{P - P_v}$

จากความหมายของความชื้นจำเพาะอาจกล่าวได้ว่าในอากาศแห้งซึ่งไม่มีไอน้ำอยู่เลยจะทำให้ความชื้นจำเพาะมีค่าเท่ากับศูนย์ $(m_v = 0)$ และจากสมการสภาวะของก๊าซอุดมคติ (Equation of state of Ideal gas) จะพบว่าความดันเฉพาะส่วนไอน้ำจะเท่ากับศูนย์ด้วย $(P_v = 0)$ หากอากาศแห้งนี้ได้รับไอน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอากาศแห้งเข้าไปจะทำให้ความชื้นจำเพาะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้กลายสภาพจากอากาศแห้งเป็นอากาศชื้นและจะทำให้มวลของไอน้ำและความดันเฉพาะส่วนไอน้ำมีค่าสูงขึ้นหากอากาศชื้นได้รับไอน้ำดังกล่าวต่อไปอีกจนกระทั่งอากาศไม่มีความสามารถรับไอน้ำได้จะทำให้ค่าความชื้นจำเพาะเพิ่มขึ้นจนเพิ่มขึ้นไม่ได้อีกอากาศในสภาพที่ไม่ความสามารถรับไอน้ำได้อีกนี้เรียกว่า *อากาศอิ่มตัว* (Saturated air) หมายความว่าไอน้ำในอากาศอิ่มจะอยู่ในสภาวะที่พร้อมกลั่นตัวเป็นหยดน้ำกล่าวคือไอน้ำในอากาศอิ่มตัวจะอยู่ในสถานะอิ่มตัว (Saturated vapor) ดังนั้นความดันเฉพาะส่วนไอน้ำในสภาวะนี้คือความดันอิ่มตัว(Saturation pressure) ของน้ำที่อุณหภูมิของอากาศในขณะนั้น

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้เราทราบว่าการเกิดอากาศอิ่มตัวได้จะขึ้นกับปริมาณไอน้ำภายในอากาศและสถานะของไอน้ำในอากาศนั้น ดังนั้นการบ่งบอกสภาพของอากาศที่เข้าใกล้สภาวะอากาศอิ่มตัวหรือไม่นั้นจึงสามารถเทียบได้โดยอัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำในอากาศเทียบต่อมวลของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิของอากาศนั้นซึ่งเรียกว่า *ความชื้นสัมพัทธ์* (Relative humidity) กล่าวคือ

$$RH = \frac{m_v}{m_g} \quad , kg_v/kg_g$$

โดยที่

RH แทน ความชื้นสัมพัทธ์

m_v แทน มวลของไอน้ำในอากาศ ที่อุณหภูมิอากาศ T, kg_v

m_g แทน มวลของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิอากาศ T เดียวกัน, kg_g

ดังนั้นจากสมการสภาวะจะได้ว่า

$$RH = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} \quad , kg_v/kg_g$$

โดยที่

$$P_g = P_{sat@T}$$

ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0 อากาศนั้นจะเป็นอากาศแห้ง $(m_v = 0)$ อากาศที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 1 จะเป็นอากาศอิ่มตัว $(m_v = m_g)$

ถ้าอากาศชื้นถูกทำความเย็นที่ความดันคงที่จะทำให้ความดันเฉพาะส่วนไอน้ำ (P_v) คงที่ด้วย ถ้ากระบวนการทำความเย็นนี้เป็นไปอย่างต่อเนื่องจะทำให้ไอน้ำในอากาศจะมีอุณหภูมิลดลง ภายใต้กระบวนการความดันคงที่จนกระทั่งอุณหภูมิไอน้ำลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่ความดันเฉพาะส่วนไอน้ำนั้น จะทำให้ไอน้ำในอากาศจะเริ่มกลั่นตัว เรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature, Td) กล่าวคือ ตัวอย่างปรากฏการณ์นี้ เช่น การเกิดหยดน้ำรอบๆ ผิวด้านนอกของแก้วน้ำที่บรรจุน้ำแข็งอยู่เต็มแก้วหยดน้ำนั้นมาจากไอน้ำในอากาศถูกทำความเย็นโดยพื้นผิวแก้วจนกระทั่งอุณหภูมิอากาศรอบๆแก้วนั้นเข้าใกล้อุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศ จึงทำให้อุณหภูมิของไอน้ำภายในอากาศเข้าใกล้อุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำ ที่ความดันเฉพาะส่วนไอน้ำในอากาศนั้น ในขณะเดียวกันเราจะพบว่าอากาศที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะเป็นอากาศอิ่มตัวและมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 1 เสมอ

เนื่องจากอากาศชื้นเป็นการผสมผสานระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ ดังนั้นเอนทาลปี (Enthalpy) ของอากาศชื้นก็คือผลรวมของเอนทาลปีของอากาศแห้งและไอน้ำกล่าวคือ

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad , kJ$$

โดยที่

H แทน เอนทาลปีของอากาศชื้น, kJ

H_a แทน เอนทาลปีของอากาศแห้ง, kJ

H_v แทน เอนทาลปีของไอน้ำ, kJ

h_a แทน เอนทาลปีจำเพาะ (Specific enthalpy) ของอากาศแห้ง, kJ/kg_a

h_v แทน เอนทาลปีจำเพาะของไอน้ำ, kJ/kg_v

ในทางปฏิบัติมวลของอากาศแห้งจะคงที่แต่มวลของไอน้ำในอากาศอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นเพื่อไม่ให้เป็นการยุ่งยากในทางปฏิบัติเอนทาลปีจำเพาะของอากาศชื้น (h) จึงถูกแสดงอยู่ในรูปต่อหน่วยมวลของอากาศแห้งเสมอแทนที่จะแสดงในรูปต่อหน่วยมวลของอากาศทั้งหมดหรือต่อหน่วยมวลของไอน้ำ กล่าวคือ

$$h = \frac{H}{m_a} = \frac{m_a}{m_a} h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v \quad ,kJ/kg_a$$

$$h = h_a + \omega h_v \quad ,kJ/kg_a$$

อากาศแห้งในช่วงอุณหภูมิ -10°C ถึง 50°C จะมีคุณสมบัติคล้ายก๊าซอุดมคติ และถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิ 0°C เป็นอุณหภูมิอ้างอิงของค่าเอนทาลปี (ที่อุณหภูมิ 0°C เอนทาลปี อากาศแห้งเท่ากับศูนย์) จะทำให้เอนทาลปีของอากาศแห้ง สามารถแสดงได้ดังนี้

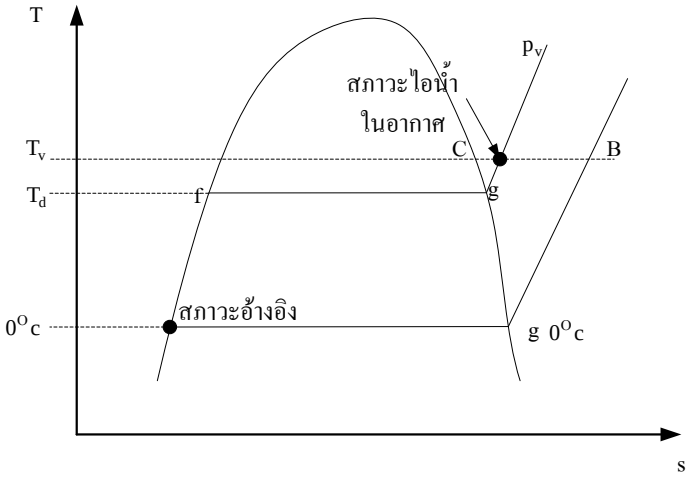
$$h_a = C_{Pa} T = [1.005 kJ/kg\,K]T \quad ,kJ/kg_a$$

โดยที่

T แทน อุณหภูมิของอากาศชื้น , °C

C_{pa} แทน ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง = 1.005 kJ/kg K

ไอน้ำภายในอากาศชื้นโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะไอร้อนยิ่งยวดและอยู่มีคุณสมบัติคล้ายก๊าซอุดมคติเนื่องจากมีคุณสมบัติคล้ายก๊าซอุดมคติจึงทำให้เอนทาลปีของไอน้ำเป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว $h_v = h_v(T)$ ในขณะที่อุณหภูมิ 0°C เอนทาลปีของไอน้ำในสถานะของเหลวอิ่มตัว (Satutrated liquid) จะมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 1. แผนภูมิอุณหภูมิและเอนโทรปี (T-s diagram) ของไอน้ำในอากาศ

ดังนั้นถ้าเราเริ่มต้นให้อุณหภูมิที่ศูนย์องศาเป็นจุดอ้างอิงโดยพิจารณาสภาวะของไอน้ำดังรูปที่ 1. ประกอบกับเราทราบมาแล้วว่าอุณหภมิไอน้ำในอากาศเท่ากับอุณหภูมิอากาศเสมอ $T_v = T$ จะได้ว่า

$$h_v = C_{p_w}(T_d - 0) + (h_{fg})_d + C_{pv}(T - T_d)$$
$$h_v = C_{p_w} T_d + (h_{fg})_d + C_{pv}(T - T_d)$$

โดยที่

C_{pw} แทน ความร้อนจำเพาะของน้ำในสถานะของเหลว

T_d แทน อุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศ

$(h_{fg})_d$ แทน ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของไอน้ำ

C_{pv} แทน ความร้อนจำเพาะของน้ำในสถานะไอ

ในช่วงอุณหภูมิบรรยากาศตั้งแต่ 0°C ถึง 60°C ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในสถานะของเหลวเท่ากับ 4.1868 kJ/kg Kและความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำเท่ากับ 1.88 kJ/kg K ดังนั้น

$$h_v = 4.1868T_d + (h_{fg})_d + 1.88(T - T_d) \quad ,kJ/kg_v$$

ไอน้ำในอากาศจะอยู่ในช่วงความดันต่ำจึงทำให้มีคุณสมบัติคล้ายก๊าซอุดมคติ ทำให้เอนทาลปีของไอน้ำเป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจากรูปที่ 1. จึงทำให้สามารถกล่าวได้ว่าเอนทาลปีของไอน้ำในอากาศ (h_v) เอนทาลปีที่จุด C (h_C) และเอนทาลปีที่จุด B (h_B) มีค่าเท่ากันหากสมมติฐานให้ไอน้ำในอากาศเป็นก๊าซอุดมคติ ดังนั้น

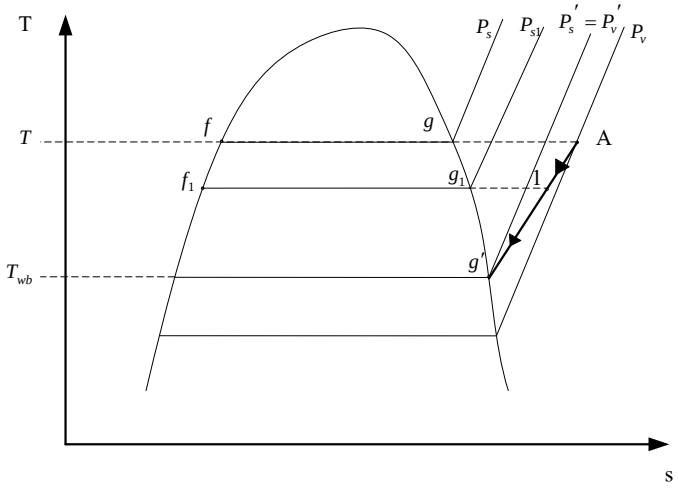
$$h_v = h_C = h_B = h_{g@T}$$

นอกจากนี้ยังพิจารณาได้อีกว่าเอนทาลปีที่จุด B จะเท่ากับ $h_B = h_{g@0^oC} + C_{p_v}(T-0)$ โดยเอนทาลปีของการกลายเป็นไอของน้ำเท่ากับ 2501 kJ/kg จึงทำให้ $h_{g@0^oC} = 2501$ kJ/kg ซึ่งทำให้เอนทาลปีของไอน้ำจะเท่ากับ

$$h_v = 2501 + 1.88T \quad ,kJ/kg_v$$

เอนทาลปีของอากาศชื้นต่อหน่วยมวลของอากาศแห้งในบรรยากาศจะเท่ากับผลรวมระหว่างเอนทาลปีจำเพาะของอากาศแห้งกับเอนทาลปีจำเพาะของไอน้ำ ดังนั้น

$$h = h_a + \omega h_v = 1.005 + \omega(2501 + 1.88T) \quad ,kJ/kg_a$$



รูปที่ 2. กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอน้ำ
ภายใต้นิยามของอุณหภูมิกระเปาะเปียก

การอ้างอิงคุณสมบัติของอากาศชื้นในด้านอุณหภูมิสามารถอ้างอิงได้ 2 ลักษณะ โดย มีความหมายทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่แตกต่างกันกล่าวคือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature) หมายถึงอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยตรงจากอากาศชื้นและ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) คืออุณหภูมิของอากาศอิ่มตัวที่เกิดจากการที่น้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอากาศชื้น ระเหยเข้าไปในอากาศชื้นจนอากาศชื้นนั้นกลายเป็นอากาศอิ่มตัว รูปที่ 2 แสดงกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการระเหยของไอน้ำเข้าสู่อากาศชื้นโดยเริ่มต้นไอน้ำในอากาศอยู่ในสภาวะ ร้อนยิ่งยวดที่จุด A มีความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำเท่ากับ (P_v) และน้ำใน สถานะพร้อมระเหย(สถานะของเหลวอิ่มตัว) ความดันอิ่มตัว (P_s) และมีอุณหภูมิ T เท่ากับ อุณหภูมิของอากาศซึ่งอยู่ในสภาวะที่

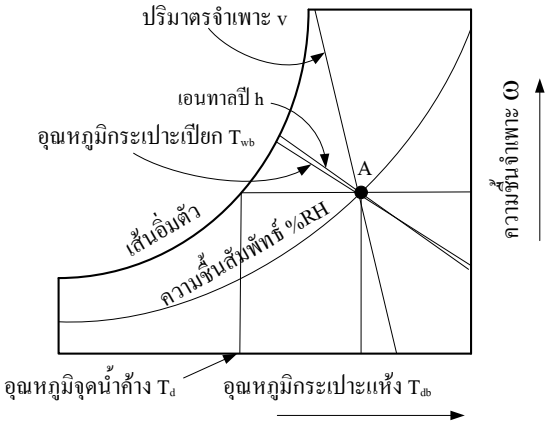
จุด f เมื่อน้ำระเหยเข้าไปในอากาศความดันเฉพาะส่วนไอน้ำ ในอากาศจะมีแน้วโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่อุณหภูมิของอากาศจะมีแนวโน้มลดลงทำให้ไอน้ำในอากาศ อยู่ในสภาวะที่ 1 โดยที่ส่วนน้ำระเหยจะอยู่ในสภาวะ f_1 และมีความดันลดลงเป็น P_{s1} และอุณหภูมิก็จะลดลงด้วย กระบวนการจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งไอน้ำในอากาศอยู่ในสถานะ ไออิ่มตัวที่สภาวะ g' แสดงว่าอากาศชื้นในขณะนั้นจะกลายเป็นอากาศอิ่มตัวและทำให้น้ำระเหย อยู่ในสภาวะ f' จะเห็นได้ว่าความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำในอากาศ P_v' จะเท่ากับความดัน ของน้ำ P_s' และอุณหภูมิของไอน้ำและน้ำระเหยจะเท่ากันซึ่งก็คืออุณหภูมิกระเปาะเปียกของ อากาศ ดังนั้นเส้นกระบวนการ A-1-g' แสดงถึงกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอน้ำในอากาศภายใต้นิยามของอุณหภูมิกระเปาะเปียก

การตรวจวัดค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกจากกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการให้อากาศชื้นที่ต้องการตรวจวัดไหลผ่านเทอร์โมมิเตอร์ที่หุ้มด้วยสำลีเปียก เมื่ออากาศชื้นไหลผ่านโพรงสำลีเปียกก็จะเกิดกระบวนการระเหยของน้ำระเหยสู่อากาศภายในโพรงสำลีในลักษณะเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้อากาศชื้นนั้นกลายเป็นอากาศอิ่มตัวรอบกระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ดังนั้นค่าอุณหภูมิที่วัดได้จึงเป็นอุณหภูมิกระเปาะเปียก

<u>ไซโครเมตริกชาร์ท</u> (Psychometric chart)

จากที่ได้ทำความเข้าใจในพื้นฐานของคุณสมบัติของอากาศมาแล้ว เพื่อความสะดวกใน การวิเคราะห์จึงได้มีการจัดทำแผนภูมิเพื่อใช้ในการหาคุณสมบัติของอากาศดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นไว้ โดยทำการสร้างเส้นแนวโน้มของคุณสมบัติของอากาศต่างๆ ที่ค่าความดันของอากาศคงที่ ค่าหนึ่งโดยแผนภูมินั้นเรียกว่า ไซโครเมตริกชาร์ท ไซโครเมตริกชาร์ทที่พบได้ทั่วไปคือ ไซโครเมตริกชาร์ทที่ความดันบรรยากาศในระดับน้ำทะเลประมาณ 1.01325 บาร์ ลักษณะและการ วางตัวของเส้นคุณสมบัติต่างๆ ใน ไซโครเมตริกชาร์ทจะแสดงดังรูปที่ 3.

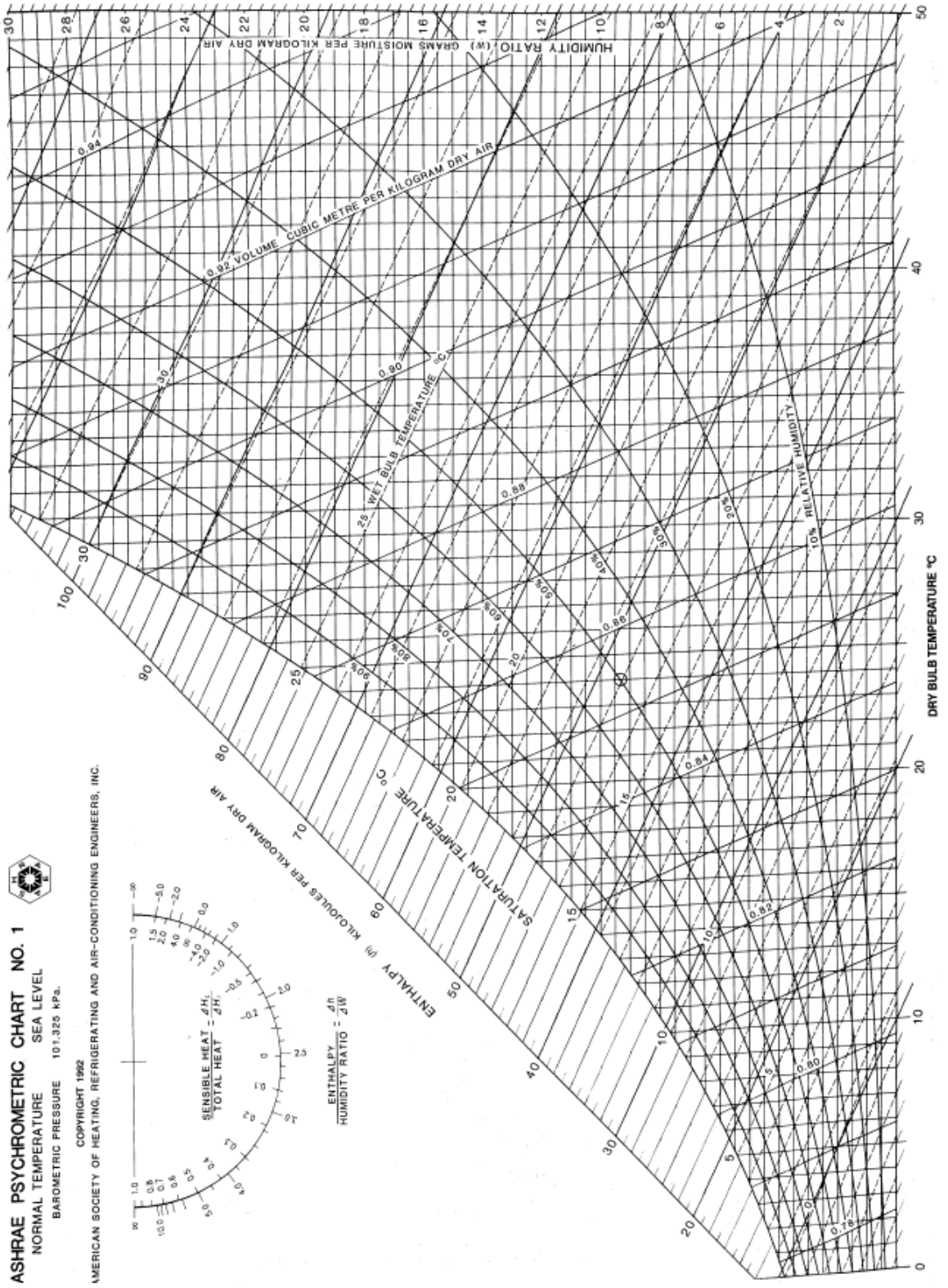
จากรูปที่ 3 จุด A แทนจุดที่พิจารณาคุณสมบัติของอากาศ ซึ่งสังเกตุได้ว่า เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งเป็นเส้นที่เอียงจากแนวดิ่งไปด้านขวามือเล็กน้อย เส้นความชื้นจำเพาะ เป็นเส้นวางตัวในแนวนอน เส้นเอนทาลปีและเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะเป็นเส้นที่มีความลาดเอียงที่ไม่ขนานกัน แต่เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะมีความลาดเอียงกว่าเส้นเอนทาลปีเล็กน้อย เส้นอิ่มตัว (Saturation line) จะแสดงสภาวะของอากาศอิ่มตัว ดังนั้นบนเส้นอิ่มตัวอุณหภูมิ กระเปาะ เปียก อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และ อุณหภูมิจุดน้ำค้างจะสมมูลซึ่งกันและกัน



รูปที่ 3. เส้นแนวโน้มของคุณสมบัติอากาศในไซโครเมตริกชาร์ท

ไซโครเมตริกชาร์ทที่นิยมใช้กันทางวิศวกรรมการปรับอากาศถูกสร้างขึ้นจากหลายองค์กร เช่น ไซโครเมตริกชาร์ทของ ASHRAE ไซโครเมตริกชาร์ทของ Carrier เป็นต้น ซึ่งจะมี ความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยในด้านวิธีการใช้งานและรายละเอียด อย่างไรก็ตามในที่นี้จะขอ กล่าวถึงเฉพาะไซโครเมตริกชาร์ทของ ASHRAE เท่านั้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.

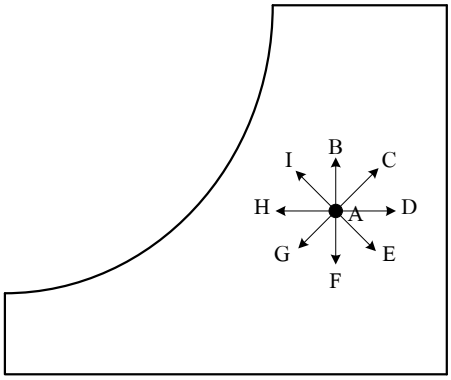
โปรแทคเตอร์ทางด้านมุมซ้ายบนของชาร์ทแสดงถึงอัตราส่วนผลต่างของเอนทาลปีและผลต่างของความชื้นจำเพาะของกระบวนการ และอัตราส่วนความร้อนสัมผัสต่อ ความร้อนรวมของกระบวนการ การใช้งานโปรแทคเตอร์ทำได้โดยสร้างเส้นกระบวนการ ในชาร์ทและให้ทำการสร้างเส้นขนานกับเส้นกระบวนการนั้นบนโปรเทคเตอร์ และให้เส้นดังกล่าว ตัดผ่านศูนย์กลางของโปรแทคเตอร์ จุดตัดของเส้นบนโปรแทคเตอร์จะแสดงถึงอัตราส่วนทั้งสอง



รูปที่ 4. ไซโครเมตริกชาร์ทของ ASHRAE ที่ระดับน้ำทะเล

<u>กระบวนการปรับอากาศ</u>

รูปที่ 5. แสดงทิศทางของกระบวนการปรับอากาศต่างๆ บนไซโครเมตริกชาร์ท โดยที่จุด A เป็นสภาวะของอากาศเริ่มต้น ซึ่งสามารถจำแนกกระบวนการปรับอากาศได้เป็น 8 กระบวนการ ดังนี้



รูปที่ **5.** ทิศของกระบวนการปรับอากาศบนไซโครเมตริกชาร์ท

1. A-B แทน ทิศทางของกระบวนการเพิ่มความชื้น
2. A-C แทน ทิศทางของกระบวนการทำความร้อนและเพิ่มความชื้น
3. A-D แทน ทิศทางของกระบวนการทำความร้อน
4. A-E แทน ทิศทางของกระบวนการทำความร้อนและลดความชื้น
5. A-F แทน ทิศทางของกระบวนการลดความชื้น
6. A-G แทน ทิศทางของกระบวนการทำความเย็นและลดความชื้น
7. A-H แทน ทิศทางของกระบวนการทำความเย็น
8. A-I แทน ทิศทางของกระบวนการทำความเย็นและเพิ่มความชื้น

การวิเคราะห์กระบวนการปรับอากาศจะอาศัยหลักการสมดุลพลังงานและสมดุลมวลของอากาศแห้งและไอน้ำ หากสมมติฐานให้อากาศในระหว่างกระบวนการมีสภาวะคงตัว (Steady state) และการไหลของอากาศในระหว่างกระบวนการเป็นการไหลแบบคงตัว (Steady flow) จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ภายใต้สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์กระบวนการปรับอากาศรูปทั่วไปได้ดังต่อไปนี้

สมดุลพลังงาน :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma \dot{m}_{a,out} h_{out} - \Sigma \dot{m}_{a,in} h_{in}$$

สมดุลมวล

สมดุลมวลของอากาศแห้ง :

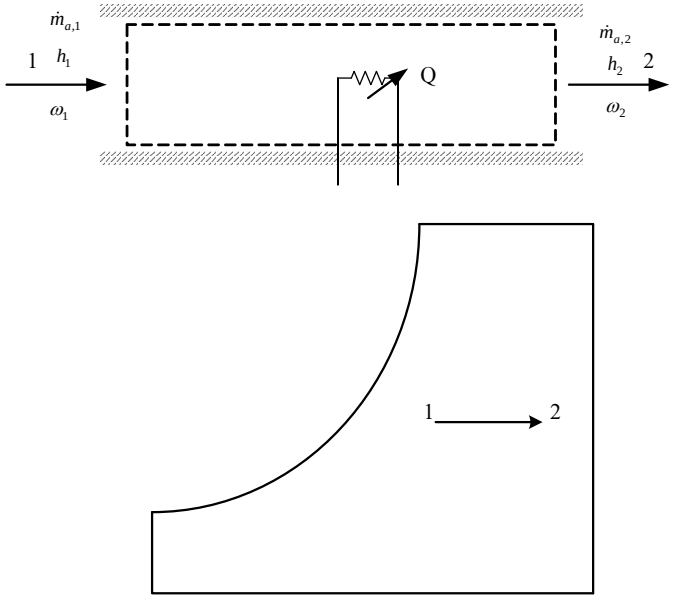
$$\Sigma \dot{m}_{a,in} = \Sigma \dot{m}_{a,out}$$

สมดุลมวลของไอน้ำ :

$$\Sigma \omega_{in} \dot{m}_{a,in} = \Sigma \omega_{out} \dot{m}_{a,out}$$

ตัวอย่าง การวิเคราะห์กระบวนการทำอากาศร้อน

กระบวนการทำอากาศร้อนจะทำให้อุณหภูมิของอากาศเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความชื้นของอากาศจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นกระบวนการนี้จะเป็นการเพิ่มความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ให้กับ อากาศเนื่องจากทำให้อากาศมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและในขณะที่อากาศจะไม่มีการเปลี่ยน แปลงความร้อนแฝง (Latent heat) เนื่องจากความชื้นของอากาศคงที่ตลอดกระบวนการ แสดงดัง รูปที่ 6.



รูปที่ 6. กระบวนการทำอากาศร้อน

สมดุลพลังงาน :

$$\dot{Q} = \dot{m}_{a,2}h_2 - \dot{m}_{a,1}h_1$$

สมดุลมวล

สมดุลมวลของอากาศแห้ง :

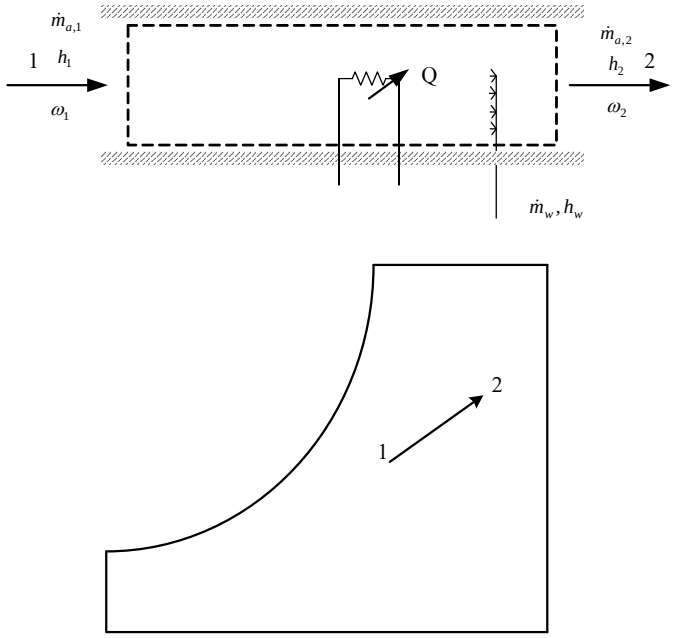
$$\dot{m}_{a,2} = \dot{m}_{a,1}$$

สมดุลมวลของไอน้ำ :

$$\omega_1\dot{m}_{a,1} = \omega_2\dot{m}_{a,2}$$

ตัวอย่าง การวิเคราะห์กระบวนการทำอากาศร้อนและชื้น

การทำให้อากาศร้อนและชื้นจะทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นและทำให้ความชื้นของอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเป็นกระบวนการที่ทำให้ความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของอากาศเพิ่มขึ้น



รูปที่ 7. กระบวนการทำอากาศร้อนและชื้น

สมดุลพลังงาน :

$$\dot{Q} = \dot{m}_{a,2}h_2 - \dot{m}_{a,1}h_1 - \dot{m}_w h_w$$

สมดุลมวล

สมดุลมวลของอากาศแห้ง :

$$\dot{m}_{a,2} = \dot{m}_{a,1}$$

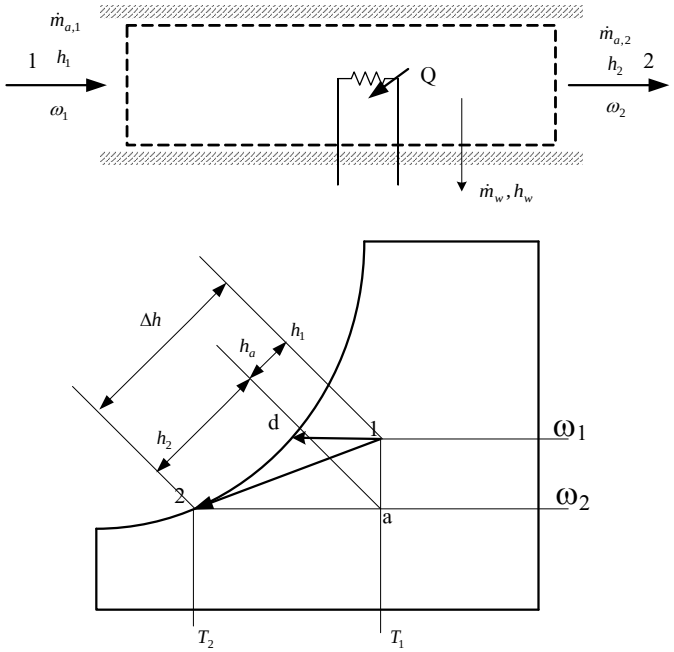
สมดุลมวลของไอน้ำ :

$$\dot{m}_w + \omega_1\dot{m}_{a,1} = \omega_2\dot{m}_{a,2}$$

ตัวอย่าง การวิเคราะห์กระบวนการทำอากาศเย็นและแห้ง

จากกระบวนการดังรูปที่ 8. สามารถพิจารณาได้ว่าจากสภาวะที่ 1 ไอน้ำในอากาศมีสภาวะเป็นไอร้อนยิ่งยวด โดยเริ่มต้นอากาศจะมีอุณหภูมิลดลง ความชื้นจำเพาะคงที่จนกระทั่งอุณหภูมิของอากาศเท่ากับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (ที่จุด d) เส้นกระบวนการในช่วงนี้คือเส้น 1-d และจากนั้นไอน้ำในอากาศก็จะเริ่มกลั่นตัวทำให้ความชื้นในอากาศลดลง ในขณะที่อากาศจะถูกทำความเย็นอย่างต่อเนื่องทำให้อุณหภูมิของอากาศจะลดลงด้วย จึงทำให้ในช่วงนี้กระบวนการปรับอากาศเป็น d-2 บนเส้นอิ่มตัว ซึ่งทำให้สภาวะที่ 2 อากาศจะเป็นอากาศอิ่มตัว และในทางวิศวกรรมจะ

ประมาณว่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ออกจากกระบวนการจะประมาณเท่ากับอุณหภูมิสุดท้ายของกระบวนการ T_2 ด้วย แม้ว่าการกลั่นตัวของไอน้ำจะเกิดขึ้นตลอดกระบวนการ d-2 ก็ตาม ดังนั้น $h_w = h_{f@T_2}$



รูปที่ 8. กระบวนการทำอากาศเย็นและแห้ง

กระบวนการนี้จะทำให้อากาศมีความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงเปลี่ยนแปลง หากพิจารณาความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงต่อหน่วยมวลของอากาศแห้งจะได้ว่าความร้อนรวมของกระบวนการ 1-2 จะเท่ากับ Δh ความร้อนสัมผัสของกระบวนการจะเท่ากับ $h_a - h_2$ และความร้อนแฝงของกระบวนการจะเท่ากับ $h_1 - h_a$

สมดุลพลังงาน :

$$-\dot{Q} = \dot{m}_{a,2}h_2 + \dot{m}_w h_w - \dot{m}_{a,1}h_1$$

สมดุลมวล

สมดุลมวลของอากาศแห้ง :

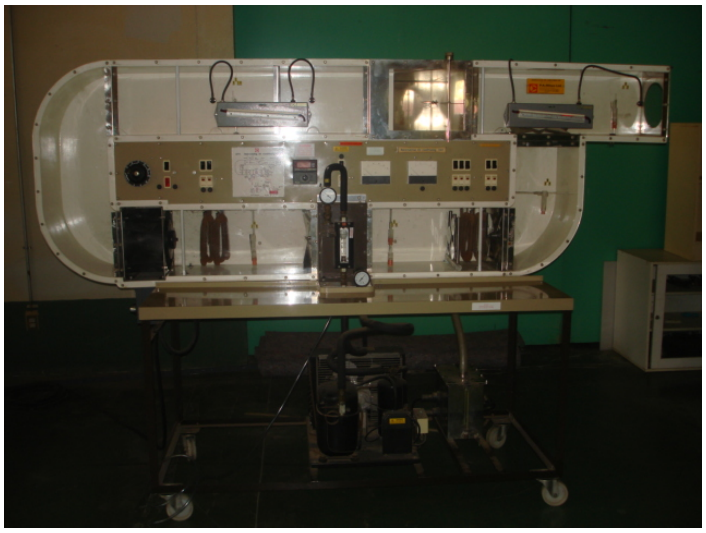
$$\dot{m}_{a,2} = \dot{m}_{a,1}$$

สมดุลมวลของไอน้ำ :

$$\omega_1\dot{m}_{a,1} = \omega_2\dot{m}_{a,2} + \dot{m}_w$$

<u>เครื่องมือทดลอง</u>

เครื่องมือสำหรับการทำปฏิบัติการนี้ผลิตโดยบริษัท P.A.Hilton รุ่น A771 ชื่อ Recalculating Air Conditioning แสดงดังรูปที่ 9.



รูปที่ 9. เครื่องมือสำหรับปฏิบัติการ

เครื่องมือนี้สามารถสร้างกระบวนการปรับอากาศต่างๆ ได้หลากหลายกระบวนการ โดยมีเครื่องทำความร้อนให้กับอากาศจำนวน 2 ชุด คือ Pre-heater และ Re-heater เครื่องพ่นไอน้ำ (Steam injector) 1 ชุด เครื่องทำความเย็นโดยวัฏจักรอัดไอ 1 ชุด และ พัดลมในการดูดอากาศ อุปกรณ์เหล่านี้แสดงดังรูปที่ 10.

เครื่องมือสำหรับวัดอัตราการไหลอากาศมีจำนวน 2 ชุด คือออริฟิซมิเตอร์ (Orifice meter) ด้านทางเข้าและด้านทางออกตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 10. เพื่อใช้หาอัตราการไหลโดยมวลของอากาศแห้ง การประเมินอัตราการไหลของออริฟิซมิเตอร์สามารถหาได้โดย

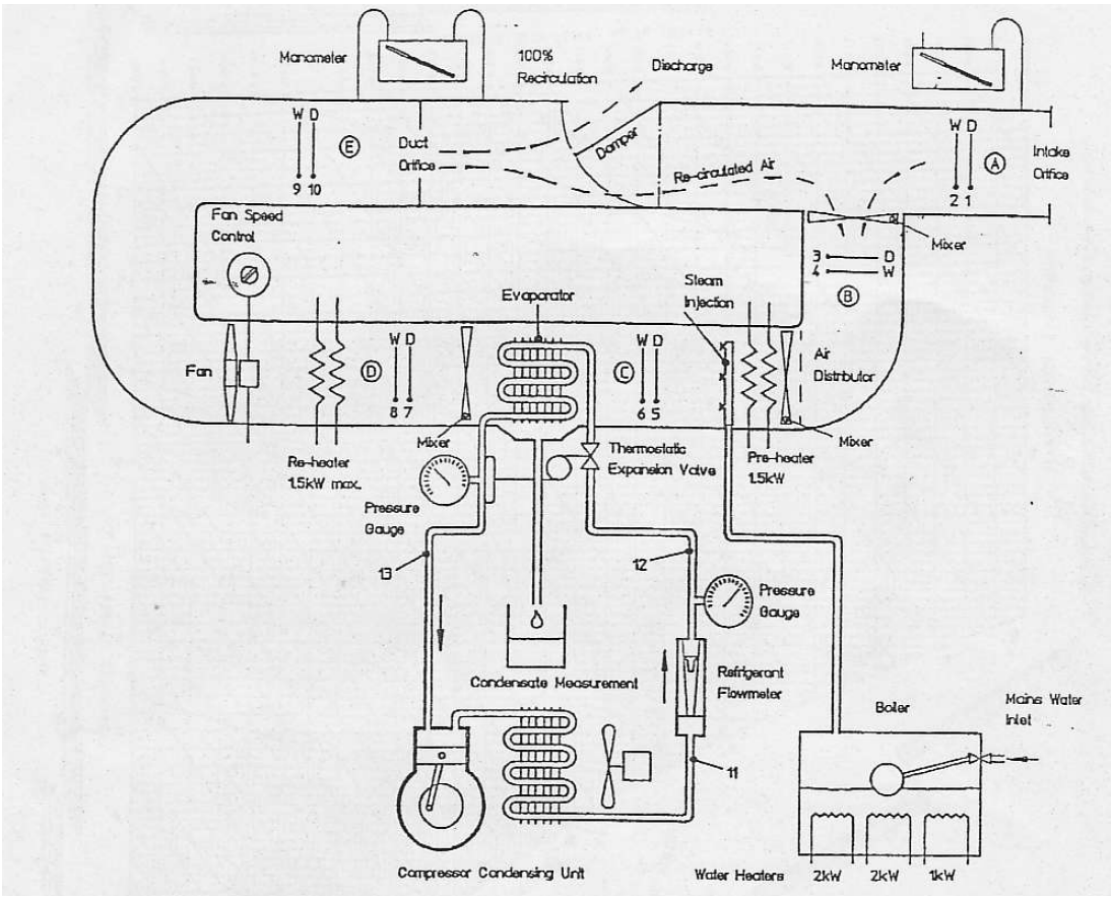
$$\dot{m}_a = 0.0757\sqrt{\frac{z}{v}} \qquad kg_a/s$$

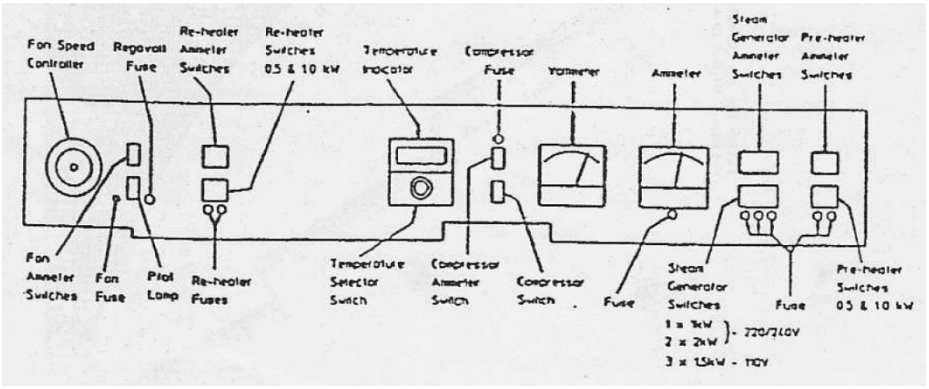
โดยที่

z แทน ระดับความแตกต่างของระดับน้ำของมาโนมิเตอร์(Manometer) ของออริฟิซมิเตอร์

v แทน ปริมาตรจำเพาะของอากาศ m^3/kg_a ซึ่งสามารถหาได้จากไซโครเมตริกชาร์ท

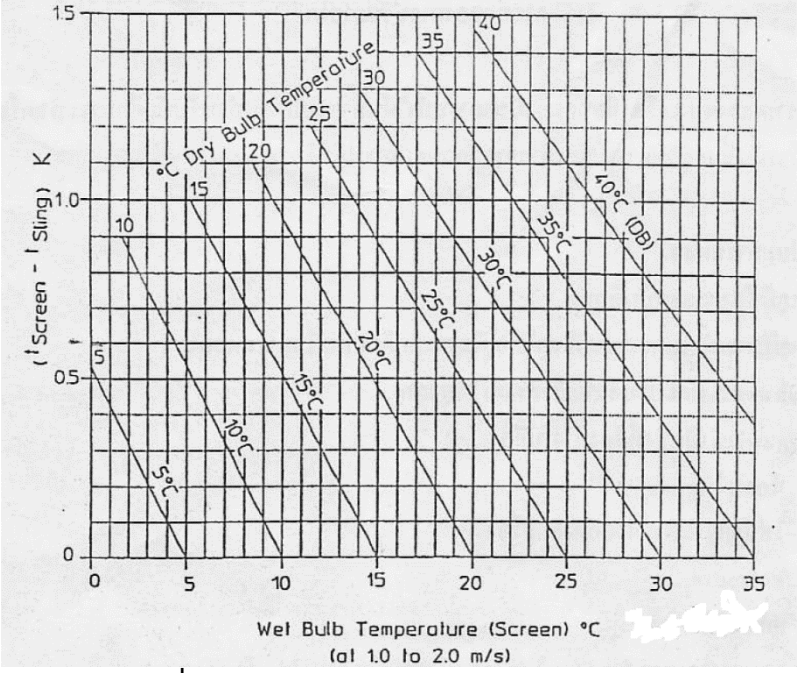
เทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศจะถูกติดตั้งคู่กันที่ด้านทางเข้าและด้านทางออกของอุปกรณ์ปรับอากาศต่างๆ และติดตั้งบริเวณออริฟิซ-มิเตอร์ เพื่อทำให้สามารถทราบถึงสภาวะของอากาศก่อนเข้าอุปกรณ์ และสภาวะอากาศหลังจาก ออกจากอุปกรณ์ได้ โดยนำค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียกที่ได้จากการวัดนี้ไปกำหนด สภาวะอากาศในไซโครเมตริกชาร์ทดังรูปที่ 10. ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์สำหรับการวัด อุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของอากาศจะแสดงด้วยเลข 1 – 10





รูปที่ 10. แบบแปลนของเครื่องมือทดลองและแผงควบคุม

เนื่องจากความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียกของเครื่องมืออยู่ในย่านความเร็วไม่สูงมาก จึงทำให้อุณหภูมิที่วัดค่าได้ไม่เป็นอุณหภูมิกระเปาะเปียก จากคู่มือการใช้เครื่องมือทดลองได้แนะนำว่า ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียกโดยตรงเรียกว่าอุณหภูมิผ่านม่าน (Screen temperature) การหาค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่แท้จริงของอากาศหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผ่านม่านและอุณหภูมิกระเปาะแห้ง แสดงดังรูปที่ 11. แผนภูมิที่แสดงในรูปที่ 11. ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่แท้จริงแทนด้วย Sling temperature



รูปที่ 11. แผนภูมิปรับค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก

สารทำความเย็นที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นโดยวัฏจักรอัดไอเป็นสารทำความเย็นชนิด R-134a มีการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์สำหรับการวัดอุณหภูมิของสารทำความเย็นเลข 11 12 และ 13 โดยที่เลขที่ 11 แทน อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่น (Condenser) เลขที่ 12 แทนอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เข้าสู่วาล์วลดความดัน (Thermostatic expansion valve) เลขที่ 13 แสดงอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องระเหย (Evaporator) เครื่องวัดอัตราการไหลของสารทำความเย็น(Refrigerant flow meter) ถูกติดตั้งด้านทางออกของเครื่องควบแน่น เกจวัดความดันด้านความดันสูงจะถูกติดตั้งระหว่างวาล์วลดความดันและเครื่องวัดอัตราการไหลของสารทำความเย็น เกจความดันด้านต่ำจะถูกติดตั้งระหว่างเครื่องอัดไอ(Compressor) กับเครื่อง ระเหย ตำแหน่งการติดตั้งต่างๆ แสดงดังรูปที่ 10. สำหรับการพิจารณาสารทำความเย็นใน วัฏจักรอัดไอ สารทำความเย็นที่เข้าสู่วาล์วลดความดัน (12) จะมีสถานะเป็นของเหลวดังนั้น

$$h_{12} = h_{f\,@\,T_{12}}$$

เมื่อสารทำความเย็นผ่านกระบวนการลดความดัน ด้วยกระบวนการลดความดันที่เอนทาลปีคงที่จะทำให้เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่เข้าเครื่องระเหยเท่ากับ h_{12} เช่นกัน ส่วนสภาวะของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องระเหย (13) มีสภาวะเป็นไอซึ่งสามารถหาได้จากความดันด้านความดันต่ำและอุณหภูมิ T_{13} จะทำให้เราได้ h_{13} ดังนั้น

$$Q_{evap} = \dot{m}_{ref}\,(h_{13} - h_{12)} \quad ,\text{kW}$$

โดยที่

Q_{evap} แทน ความร้อนที่สารทำความเย็นได้รับจากอากาศ , kW

$\dot{m}_{ref}$ แทน อัตราการไหลของสารทำความเย็น , kg/s

เครื่องมือปฏิบัติการนี้ยังสามารถวัดกำลังงานที่เครื่องอัดไอใช้ในขณะทำการทดลองได้อีกด้วยสามารถหาได้จาก

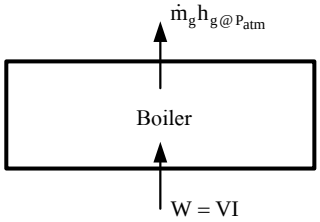
$$W = VI \quad ,kW$$

ดังนั้นจึงสามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ(Coefficient of performance, COP) ของเครื่องทำความเย็นได้จากนิยามของ COP ดังนี้

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W} = \frac{\dot{m}_{ref}(h_{13} - h_{12})}{VI}$$

อย่างไรก็ตามการประเมินสมรรถนะการทำความเย็นและการศึกษาวัฏจักรอัดไอ (Vapor compression cycle) ของการทำความเย็นไม่ใช่วัตถุประสงค์หลักของปฏิบัติการนี้

หม้อไอน้ำ(Boiler) ดังแสดงในรูปที่ 10. มีหน้าที่ในการผลิตไอน้ำโดยอาศัยการต้มน้ำจากเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ภายใน เมื่อเครื่องทำความร้อนทำงานจนกระทั่งน้ำภายในหม้อไอน้ำเริ่มเดือดไอน้ำจะลอยขึ้นโดยวิธีธรรมชาติ



รูปที่ 11. การถ่ายเทพลังงานของหม้อไอน้ำ

ดังนั้นไอน้ำที่ลอยขึ้นจากหม้อต้มจะเป็น ไออิ่มตัวที่ความดันบรรยากาศ และเข้าไปผสมกับอากาศเมื่อไหลออกจากหัวจ่ายไอน้ำ (Steam injection) ทำให้อากาศที่ไหลผ่านร้อนและชื้นขึ้น ถ้าพิจารณาระบบรูปที่ 12. จะพบว่า

$$W = \dot{m}_g h_{g@P_{atm}} \quad ,kW$$

$$\frac{VI}{1000} = \dot{m}_g h_{g@P_{atm}} \quad ,kW$$

โดยที่

$\dot{m}_g$ แทน อัตราการระเหยของไอน้ำ ,kg/s

h_g แทน เอนทาลปีของไอน้ำในสภาวะไออิ่มตัวที่ความดันบรรยากาศ ,kJ/kg

V แทน ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ ,V

I แทน ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ,A

ขั้นตอนการทดลอง

1. เปิดสวิทชหลักของเครื่องมือทดลอง
2. เปิดอุปกรณ์ปรับอากาศ เช่น เครื่องทำความร้อนอากาศแบบไฟฟ้า หม้อต้มไอน้ำ และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ตามที่ผู้ควบคุมการทดลองกำหนด
3. รอให้อากาศอยู่ในสภาวะคงตัว สังเกตุได้จากอุณหภูมิอากาศที่จุดต่างๆ คงที่
4. ตรวจวัดและบันทึกผล
   4.1. วัดและบันทึกค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศทั้งในตำแหน่งทางเข้า และทางออกของอุปกรณ์ปรับอากาศที่ถูกกำหนดให้ทำการทดลอง
   4.2. วัดและบันทึกค่าความดันที่มาโนมิเตอร์ (manometer) ที่ติดตั้งไว้ที่ออริฟิซมิเตอร์
   4.3. วัดและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ปรับอากาศ
   4.4. หากกำหนดให้เปิดเครื่องปรับอากาศในการทดลองด้วยให้ทำการวัดอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่จุดวัดต่างๆ ความดันด้านต่ำ และความดันด้านสูงของสารทำความเย็น และทำการจับเวลาและหาปริมาตรน้ำกลั่นตัวจากเครื่องปรับอากาศด้วย

การนำเสนอ

1. แสดงเส้นกระบวนการปรับอากาศที่ได้ทำการทดลองลงในไซโครเมตริกชาร์ท
2. ทำการหาความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสของอากาศจากกระบวนการปรับอากาศในข้อที่ 1.
3. ทำการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานของกระบวนการปรับอากาศที่ถูกกำหนดให้ทำการทดลอง ในทำนองเดียวกับแนวทางที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนำสภาวะอากาศก่อนเข้า และหลังเข้ากระบวนการไปวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังงานจากสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของกระบวนการปรับอากาศที่ได้ทำการทดลอง
4. เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังงานระหว่างสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของกระบวนการปรับอากาศกับค่าที่ได้จากการวัด

เอกสารอ้างอิง

ภาษาอังกฤษ

1. Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, "**Thermodynamics: An Engineering Approach**", 2nd Edition , McGraw-Hill, 1994.

2. C.P. Arora, "**Refrigeration and Air conditioning**", 3rd Edition, McGraw-Hill, 2009.

3. Wilbert F Stoecker, Jerold W. Jones, "**Refrigeration and Air conditioning**", 2nd Edition, McGraw-Hill, 1982.

4. Hilton Ltd., Experimental, Operating and Maintenance Manual: Recalculating Air Conditioning Unit.

5. ASHRAE, "**ASHRAE Handbooks Fundamentals (SI)**," Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2001.

ภาษาไทย

1. สุรพล พฤกษพานิช, "**การปรับอากาศ**", Physics Center, 2529.

2. กนต์ธร ชำนิประศาสน์, "**คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2**", การทดสอบระบบปรับอากาศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.