การปรับอากาศ 1

Air Conditioning

Edition 2

นพรัตน์ เกตุขาว

Keep learning

การปรับอากาศ Air Conditioning 1

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ เกตุขาว

ราคา 649 บาท

หนังสือเล่มนี้สงวนสิทธิ์ตาม พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2558
ห้ามผู้ใดพิมพ์ซ้ำ ลอกเลียน ส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรเท่านั้น

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

นพรัตน์ เกตุขาว.

การปรับอากาศ 1 = Air Conditioning 1.-- พะเยา : ม.ป.พ., 2566.
714 หน้า.

1. การปรับอากาศ. I. ชื่อเรื่อง

697.93

ISBN (e-book) 978-616-603-243-7

แก้ไขครั้งที่ 1 : เปลี่ยนบทที่ 2

จัดทำโดย

นพรัตน์ เกตุขาว ที่อยู่ 125/4 หมู่ 5 ต.วังทองแดง อ.เมือง จ.สุโขทัย 64210

คำนำ

จากประสบการณ์สอนที่ผ่านมา ผู้เขียนพบว่า ผู้เรียนสมัยนี้เริ่มมีการเรียนรู้ที่เปลี่ยนแปลงไป ผู้เรียนมักขาดสมาธิในการนั่งเรียนนาน ๆ ไม่ชอบจด ไม่บันทึกเนื้อหาระหว่างเรียน ปัญหาเหล่านี้ไม่ใช่ปัญหาของผู้เรียนเพียงอย่างเดียว ผู้สอนต้องปรับเปลี่ยนวิธีการสอน เพื่อที่จะทำให้การเรียนมีความน่าสนใจมากขึ้น และจะต้องสร้างแรงบันดาลใจในการเรียนรู้ให้กับผู้เรียนให้ได้ แต่นั่นก็ไม่ใช่สิ่งที่จะทำได้ง่าย ๆ สำหรับอาจารย์ระดับมหาวิทยาลัยในสายวิศวกรรม ที่ไม่ได้มีทักษะ หรือมีความรู้เกี่ยวกับจิตวิทยาในการสอน แต่ผู้เขียนพบว่า มีสิ่งหนึ่งที่ยังใช้ได้ผลดีกับการเรียนการสอนก็คือ การมีตำราหรือหนังสือที่ดี มีตัวอย่างเพียงพอที่จะทำให้ผู้เรียนนำไปศึกษาด้วยตนเองได้ ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาในการเรียนในห้องเรียนได้ดีในระดับหนึ่ง

หนังสือ หรือตำราการปรับอากาศที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดในปัจจุบันก็คือ ASHRAE Handbooks ซึ่งเป็นหนังสือที่มีเนื้อหาที่ดีมาก แต่จะมีเฉพาะภาษาอังกฤษเท่านั้น ส่วนตำราภาษาไทยนั้นยังมีอยู่น้อย และไม่ค่อยเป็นปัจจุบัน ผู้เขียนจึงตั้งใจเขียนหนังสือเล่มนี้ขึ้นมาเพื่อที่จะให้ผู้เรียนได้อ่านหนังสือภาษาไทย ที่อ้างอิงเนื้อหาของ ASHRAE Handbooks เป็นหลัก ซึ่งผู้เขียนได้เขียนผ่านประสบการณ์ทำงานออกแบบ ประสบการณ์การสอน ทั้งนักศึกษา และบุคคลภายนอก โดยในหนังสือมีตัวอย่างประกอบเนื้อหาที่จะช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจได้มากขึ้น สามารถที่จะเรียนรู้นอกห้องเรียนได้เป็นอย่างดี

หนังสือเล่มนี้จะมีภาษาอังกฤษปะปนเยอะอยู่ค่อนข้างมาก; เนื่องจากเรามักคุ้นเคยกับ ASHRAE Handbooks ทำให้เรานิยมพูดทับศัพท์ หรือสื่อสารเป็นภาษาอังกฤษกันเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น หนังสือเล่มนี้จึงพยายามใช้ภาษาอังกฤษปะปนไปในเอกสารบ้าง เพื่อให้ผู้อ่านคุ้นเคยกับคำศัพท์เหล่านี้

ทำไมต้องมี 2 หน่วย; งานปรับอากาศในบ้านเรานั้น จะพบการใช้หน่วยที่หลากหลายมาก ซึ่งหน่วยที่ใช้ก็จะมาจากทั้งยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่น บางครั้ง แบบชุดเดียวกัน ก็ยังมีการใช้หน่วยผสมกัน ผู้เขียนจึงเห็นความสำคัญที่จะเขียนสมการออกมาทั้งหน่วย SI และ I-P เพื่อให้ผู้อ่านได้เห็นความแตกต่าง และสามารถนำไปใช้ทำงานได้หลากหลายมากขึ้น

ตัวเลขผลลัพธ์จากตัวอย่างในหนังสือเล่มนี้ อาจจะคลาดเคลื่อนเล็กน้อยกับการคำนวณด้วยเครื่องคิดเลข เนื่องจากผู้เขียนใช้วิธีผูกโยงสมการในโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมจะไม่มีการปัดเศษ จึงทำให้ผลลัพธ์อาจคลาดเคลื่อนได้บ้าง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ เกตุขาว

กิตติกรรมประกาศ

หนังสือเล่มนี้ เกิดขึ้นได้จากแรงผลักดันของทีมงานผู้ดูแลกลุ่มเฟซบุ๊ก “แบ่งปันความรู้งานปรับอากาศและสุขาภิบาล” นายพัฒนะ เมฆขำ นายสุวัจชัย จูงจิตรดำรงค์ นายณัฐพงษ์ มีมา นายจักรพงษ์ พร้อมมูล นายเอกกุล คำชนะ นายฉัตรชัย ชุติมาทร นางสาวรินทร์ลภัส ทัพพ์ดิเรกลาภ นายพีรศุษม์ ไชยศรีมณีพรรณ และนายวันเฉลิม พีรพัฒนภูมิ ผู้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ช่วยชี้แนะแนวทางในการเขียนหนังสือ ผู้เขียนขอขอบคุณน้อง ๆ ทีมงานทุกคน ผู้เขียนขอบูชาคุณพ่อดิลก คุณแม่เฉลียว เกตุขาว ผู้ให้โอกาสทางการศึกษา และให้ชีวิตกับผู้เขียน ขอบูชาครูอาจารย์ คุณสามารถ เมธนาวิน พี่คีรี ธีระสินธุ์ พี่อติพงศ์ นันทพันธุ์ และอดีตหัวหน้างานทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านงานปรับอากาศกับผู้เขียน ขอบคุณเพื่อนร่วมงาน ครอบครัว ภรรยาและบุตรที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุน ทำให้งานเขียนนี้เกิดความสำเร็จขึ้นได้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ เกตุขาว

เมษายน 2566

สารบัญ

บทที่ **หน้า**

บทที่ 1 ไซโครเมตริก และสภาวะสบาย

1.1 อากาศแห้งและอากาศชื้น (Dry air and moist air) 1

1.2 บรรยากาศมาตรฐาน (Standard atmosphere) 2

1.3 ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Water vapor saturation pressure) 3

1.4 ก๊าซอุดมคติ (Ideal gas) 4

1.5 คุณสมบัติอากาศชื้น (Properties of moist air) 5

1.5.1 ความดันรวม (Total barometric pressure, p) 5

1.5.2 อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio or mixing ratio, W) 5

1.5.3 อัตราส่วนความชื้นอิ่มตัว (Saturation humidity ratio, W_s) 6

1.5.4 ความชื้นจำเพาะ (Specific humidity, γ) 6

1.5.5 ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity, d_v) 6

1.5.6 ความหนาแน่น (Density, ρ) 6

1.5.7 ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, v) 7

1.5.8 องศาการอิ่มตัว (Degree of saturation, μ) 7

1.5.9 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, ϕ) 8

1.5.10 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point temperature, t_d) 8

1.5.11 เอนทาลปีของอากาศชื้น (Enthalpy of moist air, h) 9

1.5.12 อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Wet bulb temperature, t^*) 10

1.5.13 แนวทางการคำนวณหาค่าคุณสมบัติของอากาศชื้น 12

1.6 แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric Chart) 17

1.7 กระบวนการพื้นฐานของอากาศ 25

1.7.1 ความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝง (Sensible and latent heat) 25

1.7.2 กระบวนการทำอากาศร้อน หรือเย็นแบบความร้อนสัมผัส (Sensible heating or cooling process) 28

บทที่ **หน้า**

1.7.3 กระบวนการทำความเย็น (Cooling process) 31
1.7.4 กระบวนการผสมอากาศสองกระแสแบบอะเดียแบติก (Adiabatic mixing of two air-streams)..... 35
1.7.5 กระบวนการพ่นน้ำหรือไอน้ำเข้าไปในอากาศแบบอะเดียแบติก (Adiabatic mixing of water injected into moist air) 39
1.7.6 กระบวนการให้ความร้อน และเพิ่มความชื้นในอากาศแบบอะเดียแบติก (Heating and humidification process)..... 47
1.7.7 กระบวนการให้ความร้อนและเพิ่มความชื้นในห้องปรับอากาศ (Space heat absorption and moist air moisture gains) 51
1.7.8 กระบวนการลดความชื้นในอากาศแบบอะเดียแบติกด้วยสารเคมี (Chemical or desiccants humidification) 53
1.7.9 กระบวนการที่คอยล์ของเครื่องปรับอากาศ (Cooling coil process)..... 58
1.7.10 สรุปกระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบปรับอากาศบนแผนภูมิไซโครเมตริก..... 61
1.8 อากาศมาตรฐานกับกระบวนการทำความเย็น 61
1.9 การวิเคราะห์กระบวนการปรับอากาศในระบบปรับอากาศ 66
1.9.1 ห้องปรับอากาศทั่วไปที่นำอากาศภายนอกเข้าที่เครื่อง 66
1.9.2 การเพิ่มความร้อนสัมผัสในห้องปรับอากาศที่มีความชื้นมาก (Over cooling and reheat)..... 77
1.9.3 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื่องจากพัดลม (Fan temperature rise)..... 82
1.9.4 ห้องปรับอากาศที่ต้องการอากาศภายนอกทั้งหมด (All outside air system)..... 84
1.9.5 ห้องปรับอากาศความดันลบ ที่ต้องการอากาศภายนอกทั้งหมด (All outside air system and Negative room pressure) 86
1.9.6 ห้องปรับอากาศทั่วไปที่ไม่นำอากาศภายนอกเข้าเครื่อง 92
1.9.7 ระบบเติมอากาศภายนอกแบบอิสระ (Dedicated outdoor air system, DOAS) . 94
1.9.8 ห้องปรับอากาศที่มีระบบทำความเย็นขั้นต้น (Pre-cooling outdoor air system) . 99
1.10 การควบคุมความชื้นในช่วงภาระบางส่วนของระบบปรับอากาศทั่วไป 103
1.10.1 วิธีแปรผันปริมาณลมจ่าย (Variable air volume, VAV) 106
1.10.2 วิธีบายพาสอากาศที่คอยล์เย็น (Face and bypass) 107
1.11 อุปกรณ์นำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (Air to air energy recovery) 110

บทที่ **หน้า**

1.11.1 ท่อความร้อน (Heat pipe) 111
1.11.2 ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (Run around coil) 113
1.11.3 วงล้อความร้อน (Rotary heat wheel) 114
1.12 สภาวะสบายของผู้อยู่อาศัย (Thermal comfort) 120
1.12.1 การจัดการอุณหภูมิในร่างกายมนุษย์ 120
1.12.2 ปัจจัยด้านความสบายของผู้อยู่อาศัย 123
1.12.3 การจำลองภาวะสบายของผู้อยู่อาศัย 130
เอกสารอ้างอิง 136
สมการสำคัญ 138
คำถามท้ายบท 142

บทที่ 2 การคำนวณภาระทำความเย็น

2.1 บทนำ 145
2.2 หลักการคำนวณภาระทำความเย็น 146
2.3 การจัดเตรียมข้อมูลเบื้องต้นในการคำนวณ 148
2.4 สภาวะออกแบบ (Outdoor and Indoor Design Criteria) 149
2.4.1 สภาวะอากาศภายนอก (Outdoor Design Criteria) 149
2.4.2 สภาวะอากาศภายใน (Indoor Design Criteria) 152
2.5 คุณสมบัติของวัสดุประกอบอาคาร 153
2.5.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ 153
2.5.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของวัสดุ 154
2.6 การคำนวณภาระทำความเย็นด้วยวิธี RTS ที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัย 156
2.6.1 รังสีดวงอาทิตย์สำหรับท้องฟ้าใส (Clear-Sky Solar Radiation) 160
2.6.1.1. ตำแหน่งดวงอาทิตย์ 167
2.6.1.3. มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ที่กระทำกับพื้นผิว 171
2.6.1.4. ปริมาณรังสีที่ตกกระทบกับพื้นผิว 174

บทที่ **หน้า**

2.6.2 ความร้อนผ่านผิวภายนอกอาคาร (Heat gain through exterior surfaces) 177
2.6.3 การนำความร้อนผ่านผนังกั้นห้อง พื้น เพดาน และกระจก ภายในอาคาร 184
2.6.4 ความร้อนผ่านกระจกภายนอก (Heat gain through fenestration) 185
2.6.5 ความร้อนจากคน 188
2.6.6 ความร้อนจากระบบไฟส่องสว่าง 190
2.6.7 ความร้อนจากมอเตอร์ 192
2.6.8 ความร้อนจากอุปกรณ์ 196
2.6.8.1 อุปกรณ์ประกอบอาหาร (Cooking appliances) 197
2.6.8.2 อุปกรณ์ทางการแพทย์และห้องปฏิบัติการ (Hospital and laboratory equipment) 199
2.6.8.3 อุปกรณ์สำนักงาน (Office equipment) 200
2.6.8.4 ความร้อนจากอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า 202
2.6.8.5 ห้องเครื่องลิฟต์ 203
2.6.9 ความร้อนสูญเสียจากท่อส่งลม (Supply duct loss) 204
2.6.10 ความร้อนจากอากาศรั่วเข้า และอากาศภายนอก 204
2.6.10.1 ความร้อนจากอากาศรั่วเข้า (Infiltration) 204
2.6.10.2 ความร้อนจากอากาศภายนอก 204
2.6.10.3 ปริมาณอากาศภายนอก 207
2.6.11 การคำนวณภาระความเย็น 219
2.7 Diversity 223
2.8 โปรแกรมคำนวณค่าภาระทำความเย็นด้วยวิธี RTS 224
2.9 การคำนวณภาระทำความเย็นสำหรับที่อยู่อาศัย 253
เอกสารอ้างอิง 229
สมการสำคัญ 231
คำถามท้ายบท 233
ตารางท้ายบทที่ 2 235

บทที่ **หน้า**

บทที่ 3 การกระจายลมเย็นและหน้ากากลม

3.1 บทนำ 239

3.2 นิยาม 240

3.3 ประเภทหัวจ่าย 242

3.4 การออกแบบหัวจ่าย 247

3.4.1 เลือกตามระยะการจ่ายลม (Throw) 247

3.4.2 เลือกตามระยะตก (Drop) 252

3.4.3 เลือกด้วยวิธี ADPI 252

3.4.4 ข้อจำกัดเรื่องเสียงที่หัวจ่าย 262

3.5 การจ่ายลมสำหรับงานอุตสาหกรรม 268

3.5.1 การจ่ายลมความเร็วสูง (Velocity Cooling) 268

3.5.2 การจ่ายลมเย็นแบบอื่นๆ 271

3.6 หน้ากากลมกลับ (Return air grille) 272

3.7 หน้ากากลมระบายอากาศในห้อง และหน้ากากลมภายนอก 277

เอกสารอ้างอิง 280

สมการสำคัญ 281

คำถามท้ายบท 283

บทที่ **หน้า**

บทที่ 4 การออกแบบท่อลม

4.1 สมการแบร์นูลลี 285
4.2 เฮด และความดัน 288
4.3 การเปลี่ยนแปลงความดันในระบบท่อลม 291
4.4 ความดันรวมสูญเสีย 295
4.4.1 ความดันสูญเสียจากแรงเสียดทาน 305
4.4.2 ความดันสูญเสียแบบไดนามิกส์ 305
4.4.2.1 ความดันสูญเสียของข้อต่อ (Fitting loss) 305
4.4.2.2 ความดันสูญเสียของหน้ากากลม 315
4.4.2.3 ความดันสูญเสียของอุปกรณ์อื่น ๆ 321
4.4.2.4 ความดันสูญเสียจากการต่อพัดลมกับท่อลม 322
4.4.2.5 ผลการเปลี่ยนแปลงความดันสูญเสียเมื่อความหนาแน่นเปลี่ยน 329
4.4.3 ความดันสูญเสียของระบบท่อสาขา 329
4.5 การออกแบบท่อลม 334
4.5.1 รูปทรงท่อลม 334
4.5.2 ข้อแนะนำในการออกแบบ 335
4.5.3 ประเภท และความเร็วในท่อลม 336
4.5.4 วิธีออกแบบท่อลม 339
4.5.5 การออกแบบขนาดท่อลม 342
4.5.6 การดูดอากาศทิ้งในงานอุตสาหกรรม 352
4.6 ฉนวนท่อลม 355
4.7 บทสรุปเพิ่มเติม 359
เอกสารอ้างอิง 361
สมการสำคัญ 362
คำถามท้ายบท 365

บทที่ หน้า

บทที่ 5 พัดลมและระบบท่อลม

5.1 ระบบท่อลม 367

5.1.1 เส้นโค้งระบบท่อลม 367

5.1.2 เส้นโค้งรวมของระบบท่อลม 368

5.1.3 เส้นโค้งระบบ (System curve) 370

5.2 พัดลม 376

5.2.1 ประเภทของพัดลม 377

5.2.2 กำลังของพัดลม 387

5.2.3 การทดสอบสมรรถนะของพัดลม 392

5.2.4 กฎของความคล้าย (Affinity laws) 395

5.3 การต่อพัดลมเข้ากับท่อลม 399

5.3.1 ความดันของพัดลม และระบบท่อลม 399

5.3.2 จุดทำงานของพัดลม (Operating point) 401

5.3.3 System effect 405

5.3.3.1 System effect ที่ปากพัดลม 407

5.3.3.2 System effect ที่ทางดูดพัดลม 413

5.3.3.3 System effect ของอุปกรณ์ที่มาจากผู้ผลิต 420

5.4 การเลือกพัดลม 423

5.5 การต่อพัดลมหลายตัว 427

5.5.1 การรวมเส้นสมรรถนะของพัดลม 427

5.5.2 จุดทำงานเมื่อมีการต่อพัดลมแบบขนาน 428

5.5.3 จุดทำงานเมื่อมีการต่อพัดลมแบบอนุกรม 430

5.6 การจัดวางพัดลม 431

เอกสารอ้างอิง 434

สมการสำคัญ 435

คำถามท้ายบท 436

บทที่ **หน้า**

บทที่ 6 การออกแบบท่อน้ำ

6.1 สมการแบร์นูลลี เฮด และความดัน 437

6.2 ความดัน และเฮดสูญเสีย 440

6.2.1 ความดัน และเฮดสูญเสียจากแรงเสียดทาน 440

6.2.2 ความดัน และเฮดสูญเสียของอุปกรณ์ 449

6.3 ระบบท่อน้ำ 462

6.3.1 ประเภทของระบบท่อน้ำ 462

6.3.2 ระบบจ่ายน้ำเย็น 463

6.3.3 วิธีการเดินท่อจ่ายน้ำ 469

6.3.4 อุปกรณ์สำคัญในระบบท่อน้ำ 473

6.3.4.1 วาล์ว และอุปกรณ์ 473

6.3.4.2 เครื่องส่งลมเย็น 478

6.3.4.3 เครื่องทำน้ำเย็น 479

6.3.4.4 หอผึ่งเย็น 480

6.3.4.5 ถังขยายตัว และการควบคุมความดันในระบบท่อ 483

6.3.4.6 ถังบัฟเฟอร์ (Buffer tank) 493

6.4 การออกแบบท่อน้ำ 494

6.4.1 สมการพื้นฐาน 494

6.4.2 อัตราการไหลของน้ำเย็น 495

6.4.3 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 499

6.4.4 การออกแบบท่อน้ำเย็น และท่อน้ำระบายความร้อน 501

6.4.5 ระบบท่อน้ำทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ 509

6.5 ฉนวนท่อน้ำเย็น 512

6.6 ปริมาณน้ำเติมระบบน้ำระบายความร้อน และระบบท่อน้ำเย็น 514

เอกสารอ้างอิง 517

สมการสำคัญ 519

บทที่ **หน้า**

บทที่ 7 เครื่องสูบน้ำและระบบท่อ

7.1 ระบบท่อน้ำ 523

7.1.1 เส้นโค้งระบบท่อ (Pipe system curve) 523

7.1.2 เส้นโค้งรวมของระบบท่อ 524

7.1.3 เส้นโค้งระบบ (System curve) 527

7.2 เครื่องสูบน้ำชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal pump) 531

7.2.1 ประเภทของเครื่องสูบน้ำ 531

7.2.2 กำลังของเครื่องสูบน้ำ 534

7.2.3 สมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ 538

7.2.4 กฎของความคล้าย (Affinity laws) 540

7.3 การต่อเครื่องสูบน้ำเข้ากับท่อน้ำ 543

7.3.1 จุดทำงานของเครื่องสูบน้ำ (Operating point) 543

7.3.2 คาวิเตชัน (Cavitation) และ Net Positive Suction Head (NPSH) 553

7.3.3 ภาระความร้อนที่เกิดจากเครื่องสูบน้ำ 561

7.4 การเลือกเครื่องสูบน้ำ 563

7.5 การต่อเครื่องสูบน้ำหลายตัว 565

7.5.1 การรวมเส้นสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ 565

7.5.2 จุดทำงานเมื่อมีการต่อเครื่องสูบน้ำแบบขนาน 566

7.5.3 จุดทำงานเมื่อมีการต่อเครื่องสูบน้ำแบบอนุกรม 571

7.5.4 การเลือกจำนวนเครื่องสูบน้ำ 571

7.6 การควบคุมการทำงานของระบบจ่ายน้ำเย็น 572

7.7 การติดตั้งเครื่องสูบน้ำ 577

เอกสารอ้างอิง 580

สมการสำคัญ 581

คำถามท้ายบท 583

บทที่ **หน้า**

บทที่ 8 การระบายอากาศ

8.1 บทนำ 585

8.2 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการระบายอากาศ 586

8.2.1 เกณฑ์คุณภาพอากาศภายใน และภายนอกอาคาร 586

8.2.2 นิยาม และความหมายเกี่ยวกับการระบายอากาศ 587

8.2.3 การเจือจางมลพิษเพื่อสุขอนามัย 590

8.2.4 การเจือจางมลพิษเพื่อป้องกันการระเบิดของสารเคมี 591

8.2.5 การควบคุมอุณหภูมิด้วยการระบายอากาศ 593

8.2.6 ลมภายนอก และการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ 595

8.2.7 การระบายอากาศด้วยวิธี Stack effect 598

8.3 การระบายอากาศเพื่อการอยู่อาศัยทั่วไป 602

8.3.1 การระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 62.1 602

8.3.1.1 ปริมาณอากาศภายนอก 602

8.3.1.2 ปริมาณการดูดอากาศทิ้ง (Exhaust air) 607

8.3.1.3 การพิจารณาปริมาณการเติมอากาศ และการดูดอากาศทิ้งด้วยหลักของความดัน (Pressurization) 608

8.3.2 การระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 62.2 609

8.3.2.1 ปริมาณอากาศภายนอก (Total ventilation rate) 610

8.3.2.2 การดูดอากาศเฉพาะที่ (Local exhaust) 610

8.3.2.3 ข้อกำหนดอื่น ๆ 612

8.3.3 การระบายอากาศตามกฎหมาย 615

8.4 การระบายอากาศเบื้องต้นสำหรับสถานพยาบาล 618

8.4.1 ปริมาณการเติมอากาศภายนอก และการหมุนเวียนอากาศ 618

8.4.2 อากาศรั่วเนื่องจากความดันแตกต่าง 619

8.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณอากาศเติม อากาศหมุนเวียนและอากาศภายนอก 621

8.4.4 การกรองอากาศ 625

บทที่ **หน้า**

8.5 ตำแหน่งของช่องนำเข้า และช่องระบายอากาศทิ้ง 625
8.6 การระบายอากาศสำหรับห้องเครื่องจักร 628
8.6.1 การควบคุมอุณหภูมิในห้องเครื่องจักร 628
8.6.2 ห้องเครื่องทำความเย็น 628
8.6.3 ห้องเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 630
8.6.4 ห้องเครื่องอัดอากาศ 634
8.7 ห้องครัวพาณิชย์ 635
8.7.1 ข้อมูลเบื้องต้น 635
8.7.2 ครอบดูดลม และอัตราการดูดลม 636
8.7.3 การแทนที่อากาศในห้องครัว (Replacement air) 641
เอกสารอ้างอิง 647
สมการสำคัญ 649
คำถามท้ายบท 650
ตารางท้ายบทที่ 8 652

บทที่ 9 ประสิทธิภาพและการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ

9.1 ประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ 667
9.2 การปรับแก้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศและเครื่องทำน้ำเย็น 671
9.3 การใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ 674
เอกสารอ้างอิง 682
คำถามท้ายบท 683

ภาคผนวก

ภาคผนวก หน่วยและตารางแปลงหน่วย 685
ดัชนี 688

บทที่ 1

ไซโครเมตริกและสภาวะสบาย

Psychrometrics and Thermal comfort

ไซโครเมตริก (Psychrometrics) คือการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศเพื่อประยุกต์ใช้คุณสมบัติเหล่านี้กับกระบวนการทำความเย็น ทำความร้อน และการปรับอากาศ ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศชื้น กระบวนการพื้นฐานในระบบปรับอากาศต่าง ๆ รวมถึงการศึกษาสภาวะสบายของคนต่อสภาวะอากาศ (Thermal comfort) และปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้คนรู้สึกสบาย

1.1 อากาศแห้งและอากาศชื้น *(Dry air and moist air)*

โดยปกติ อากาศที่อยู่รอบตัว จะเป็นอากาศที่มีไอน้ำปะปนอยู่ หรือเรียกว่า เป็นอากาศที่ผสมกันระหว่างอากาศแห้ง (Dry air) กับไอน้ำ (Water vapor) จึงเรียกอากาศนี้ว่า อากาศชื้น (Moist air) โดยอากาศชื้นจะมีไอน้ำได้สูงสุดจนถึงสภาวะอิ่มตัว ถ้ามีการฉีดน้ำฝอยเข้าไปในอากาศที่สภาวะนี้อีก น้ำฝอยจะไม่ระเหยเข้าไปในอากาศ แต่จะตกลงสู่พื้นหรือลอยเป็นละอองน้ำ (Mist) ในอากาศ ซึ่งหากทำให้อากาศอิ่มตัวนี้มีอุณหภูมิลดลงเล็กน้อย ก็จะทำให้ไอน้ำในอากาศกลั่นตัวออกมาในรูปของหมอก (Fog) หรือน้ำค้าง (Dew)

อากาศและไอน้ำ มีพฤติกรรมที่เป็นอิสระจากกัน และภายใต้สภาวะแวดล้อมทั้งหมดที่พบบนพื้นโลกนั้น อากาศแห้งจะอยู่ในรูปของก๊าซ และไม่สามารถทำให้เป็นของเหลวได้ด้วยความดันเพียงอย่างเดียว ทำให้เราสามารถใช้สมการของก๊าซอุดมคติในการวิเคราะห์อากาศแห้งได้ ส่วนไอน้ำนั้นสามารถพบได้ทั้งในรูปของเหลวหรือของแข็ง และสามารถทำให้เป็นของเหลวได้ด้วยความดันเพียงอย่างเดียว ดังนั้น คุณสมบัติของไอน้ำจึงมีความซับซ้อนมากกว่าและสามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

อากาศแห้ง (Dry air) คือ อากาศที่ไม่มีไอน้ำและสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ คุณสมบัติของอากาศแห้งและไอน้ำจะเปลี่ยนไปตามระดับความสูง อุณหภูมิ และความดันของส่วนผสม โดยทั่วไปแล้ว อากาศแห้ง

จะมีส่วนประกอบของไนโตรเจน 78.084%, ออกซิเจน 20.947% อาร์กอน 0.934%, คาร์บอนไดออกไซด์ 0.0314%, นีออน 18.2 ppm, ฮีเลียม 5.2 ppm, มีเทน 2.0 ppm, คริปทอน 1.1 ppm, ไฮโดรเจน 0.05 ppm, ซีนอน 0.009 ppm, โอโซน 0.007 ppm, ไนโตรเจนไดออกไซด์ 0.002 ppm, ไอโอดีน 0.001 ppm, คาร์บอนมอนอกไซด์ และแอมโมเนีย (Harrison, 1965)

1.2 บรรยากาศมาตรฐาน *(Standard atmosphere)*

อุณหภูมิและความดันอากาศนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความสูง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าบรรยากาศมาตรฐานขึ้นมา เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณหาค่าที่ระดับความสูงอื่น ๆ จากระดับน้ำทะเล โดยที่ระดับน้ำทะเลนั้น อากาศจะถูกกำหนดให้มีอุณหภูมิ 15˚C (59˚F) และมีความดัน 101.325 kPa (14.696 psia) โดยอุณหภูมิจะมีค่าลดลง เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติดังกล่าว สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความดัน อุณหภูมิ และความสูงได้ดังนี้ (ASHRAE Handbook, 2021)

$$p = 101.325(1 - 2.25577\times10^{-5}Z)^{5.2559} \quad \text{SI} \quad (1)$$

$$p = 14.696(1 - 6.8754\times10^{-6}Z)^{5.2559} \quad \text{IP} \quad (1)$$

$$t = 15 - 0.0065Z \quad \text{SI} \quad (2)$$

$$t = 59 - 0.0035662Z \quad \text{IP} \quad (2)$$

โดย p คือ ความดัน (Barometric pressure) , kPa (psia)

Z คือ ความสูงจากระดับน้ำทะเล, m (ft)

t คือ อุณหภูมิ, ˚C (˚F)

สมการที่ 1 และ 2 นั้น จะมีความแม่นยำเฉพาะในช่วงความสูง -5000 m (-15000 ft) ถึง 11000 m (33000 ft) จากระดับน้ำทะเลเท่านั้น ซึ่งความดันที่เปลี่ยนไปตามความสูงจากสมการนี้จะมีประโยชน์ในการนำไปคำนวณหาคุณสมบัติของอากาศชื้นต่อไป

1.3 ความดันไอน้ำอิ่มตัว *(Water vapor saturation pressure)*

การหาคุณสมบัติของอากาศชื้นจำเป็นต้องทราบความดันไอน้ำอิ่มตัว (Water vapor saturation pressure) ก่อน โดยการนำค่าอุณหภูมิของอากาศชื้นไปอ่านค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวได้จากตารางไอน้ำตามที่เคยเรียนมาแล้วในวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ หรืออาจคำนวณโดยใช้สมการดังต่อไปนี้ (Hyland and Wexler, 1983)

ที่อุณหภูมิ –100°C ถึง 0°C (–148°F ถึง 32°F);

$$\ln p_{ws} = C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7\ln T \qquad \text{SI and IP} \qquad (3)$$

เมื่อ:

หน่วย SI			หน่วย IP		
p_{ws}	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัว, Pa	p_{ws}	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัว, psia
T	คือ	อุณหภูมิ, K = °C + 273.15	T	คือ	อุณหภูมิ, °R = °F + 459.67
C_1	=	-5.6745359×10^{3}	C_1	=	-1.0214165×10^{4}
C_2	=	6.3925247	C_2	=	-4.8932428
C_3	=	-9.677843×10^{-3}	C_3	=	$-5.3765794 \times 10^{-3}$
C_4	=	6.2215701×10^{-7}	C_4	=	1.9202377×10^{-7}
C_5	=	2.0747825×10^{-9}	C_5	=	$3.5575832 \times 10^{-10}$
C_6	=	$-9.484024 \times 10^{-13}$	C_6	=	$-9.0344688 \times 10^{-14}$
C_7	=	4.1635019	C_7	=	4.1635019

ที่อุณหภูมิ 0° ถึง 200°C (32°F ถึง 392°F);

$$\ln p_{ws} = C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13}\ln T \qquad \text{SI and IP} \qquad (4)$$

เมื่อ:

หน่วย SI			หน่วย IP		
C_8	=	-5.8002206×10^{3}	C_8	=	-1.0440397×10^{4}
C_9	=	1.3914993	C_9	=	-1.1294650×10^{1}
C_{10}	=	$-4.8640239 \times 10^{-2}$	C_{10}	=	$-2.7022355 \times 10^{-2}$
C_{11}	=	4.1764768×10^{-5}	C_{11}	=	1.2890360×10^{-5}
C_{12}	=	$-1.4452093 \times 10^{-8}$	C_{12}	=	-2.478068×10^{-9}
C_{13}	=	6.5459673	C_{13}	=	6.5459673

ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัว (Water vapor saturation pressure, p_{ws}) นี้ เป็นความดันอิ่มตัวของไอน้ำที่ไม่มีอากาศผสมอยู่ (ไอน้ำบริสุทธิ์) ความดันนี้จะแปรผันตามอุณหภูมิเท่านั้น และจะมีค่าแตกต่างจากค่าความดันไอน้ำจริงในอากาศชื้นอิ่มตัว (Vapor pressure, p_s) ที่อุณหภูมิเดียวกันเล็กน้อย ดังนั้น หากเราทราบความดันไอน้ำจริงของอากาศอิ่มตัว ก็สามารถนำมาหาคุณสมบัติอื่น ๆ ของไอน้ำได้

1.4 ก๊าซอุดมคติ *(Ideal gas)*

ในการวิเคราะห์อากาศชื้นนั้น เราสามารถนำสมการของก๊าซอุดมคติ (ก๊าซสมบูรณ์) มาคำนวณส่วนประกอบของอากาศแห้ง ไอน้ำ และส่วนผสมของอากาศชื้นได้ค่อนข้างแม่นยำโดยเฉพาะในช่วงที่ความดันใกล้กับความดันบรรยากาศ สำหรับส่วนผสมของก๊าซอุดมคติ กฎของดาลตันระบุว่าโมเลกุลของก๊าซและไอระเหยทั้งหมดจะมีปริมาตรเท่ากัน และความดันรวมของส่วนผสมคือ ผลรวมของความดันของส่วนประกอบแต่ละส่วน ดังนั้น ความดันอากาศชื้นจะเท่ากับความดันเฉพาะส่วนของอากาศแห้งรวมกับความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำ

เมื่ออากาศและไอน้ำทำหน้าที่เป็นก๊าซอุดมคติ กฎของก๊าซอุดมคติและกฎของดาลตันสามารถอธิบายพฤติกรรมของส่วนผสมดังกล่าวได้ดังนี้

อากาศแห้ง (Dry air, *da*);	$p_{da}V = n_{da}R_{da}T$	SI and IP	(5)
ไอน้ำ (Water vapor, *w*);	$p_wV = n_wR_wT$	SI and IP	(6)

เมื่อ p คือ ความดันเฉพาะส่วน (Partial pressure) ของอากาศแห้งหรือไอน้ำ, kPa (psia)

V คือ ปริมาตรของอากาศชื้น, m^3 (ft^3)

n คือ จำนวนโมลของอากาศแห้ง หรือไอน้ำ

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8314.472 J/kmol·K, (1545.349 ft·lb_f/lb mol·°R)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K (°R)

1.5 คุณสมบัติอากาศชื้น *(Properties of moist air)*

จากสมการก๊าซอุดมคติและสมการความดันอิ่มตัวของไอน้ำ ASHRAE Handbook (2021) ได้แสดงวิธีการหาคุณสมบัติอื่น ๆ ของอากาศชื้นไว้ดังนี้

1.5.1 ความดันรวม (Total barometric pressure, p)

ในการวัดความดันของอากาศชื้นทั่วไปนั้น ค่าที่ได้จะเป็นค่าความดันรวม (Total barometric pressure) ซึ่งมีค่าเท่ากับความดันเฉพาะส่วนของอากาศแห้งรวมกับความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำ ดังสมการต่อไปนี้

$$p = p_{da} + p_w \qquad \text{SI and IP} \qquad (7)$$

แทนค่าดังกล่าวลงในสมการของก๊าซอุดมคติจะได้ค่าคุณสมบัติของอากาศชื้น ดังต่อไปนี้

$$(p_{da} + p_w)V = (n_{da} + n_w)RT \qquad \text{SI and IP} \qquad (8)$$

เมื่อ $n_{da} + n_w$ คือ จำนวนโมลรวมในอากาศชื้น

จากสมการที่ 5 ถึง 8 จะได้เศษส่วนโมล (Mole fraction, x) ของอากาศแห้งและอากาศชื้นดังนี้

$$x_{da} = p_{da}/(p_{da} + p_w) = p_{da}/p \qquad \text{SI and IP} \qquad (9)$$

$$x_w = p_w/(p_{da} + p_w) = p_w/p \qquad \text{SI and IP} \qquad (10)$$

1.5.2 อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio or mixing ratio, W)

อัตราส่วนความชื้นของอากาศ คือ อัตราส่วนของมวลไอน้ำ (M_w) ต่อมวลอากาศแห้ง (M_{da}) ดังสมการต่อไปนี้

$$W = M_w/M_{da} \qquad \text{SI and IP} \qquad (11)$$

อัตราส่วนความชื้น (W) มีหน่วยเป็น kg_w/kg_{da} (lb_w/lb_{da} ในหน่วย IP) และมีค่าเท่ากับอัตราส่วนเศษส่วนโมล (x_w/x_{da}) คูณด้วยอัตราส่วนมวลโมเลกุล (18.015268/28.966) ดังสมการต่อไปนี้

$$W = 0.621945\ x_w/x_{da} \qquad \text{SI and IP} \qquad (12)$$

จากสมการที่ 9, 10 และ 12 จะได้ค่าอัตราส่วนความชื้น คือ

$$W = 0.621945\ p_w/p_{da} = 0.621945\frac{p_w}{p - p_w} \qquad \text{SI and IP} \qquad (13)$$

1.5.3 อัตราส่วนความชื้นอิ่มตัว (Saturation humidity ratio, W_s)

อัตราส่วนความชื้นอิ่มตัว คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศอิ่มตัวเมื่อเทียบกับน้ำหรือน้ำแข็งที่อุณหภูมิ และความดันเท่ากัน ซึ่งจะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$W_s = 0.621945\ \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} \qquad \text{SI and IP} \qquad (14)$$

1.5.4 ความชื้นจำเพาะ (Specific humidity, γ)

ความชื้นจำเพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำต่อมวลของอากาศชื้น ดังสมการต่อไปนี้

$$\gamma = M_w/(M_w + M_{da}) \qquad \text{SI and IP} \qquad (15)$$

หรือเขียนในรูปของอัตราส่วนความชื้นได้ดังนี้

$$\gamma = W/(1 + W) \qquad \text{SI and IP} \qquad (16)$$

1.5.5 ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity, d_v)

ความชื้นสัมบูรณ์หรือเรียกอีกชื่อว่า ความหนาแน่นของไอน้ำ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำต่อปริมาตรของอากาศชื้น ดังสมการต่อไปนี้

$$d_v = M_w/V \qquad \text{SI and IP} \qquad (17)$$

1.5.6 ความหนาแน่น (Density, ρ)

ความหนาแน่นมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมวลอากาศชื้นต่อปริมาตรของอากาศชื้น (V) ดังสมการต่อไปนี้

$$\rho = (M_w + M_{da})/V = (1/v)(1 + W) \qquad \text{SI and IP} \qquad (18)$$

เมื่อ v คือ ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น มีหน่วยเป็น m^3/kg_{da} (ft^3/lb_{da} ในหน่วย IP)

1.5.7 ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, v)

ปริมาตรจำเพาะมีค่าเท่ากับปริมาตรของอากาศชื้นต่อมวลของอากาศแห้ง ดังสมการต่อไปนี้

$$v = V/M_{da} = V/(28.966 n_{da}) \qquad \text{SI and IP} \qquad (19)$$

จากสมการของก๊าซอุดมคติ สมการที่ 5 และสมการความดันรวม สมการที่ 7 จะได้สมการดังนี้

$$v = \frac{RT}{28.966(p - p_w)} = \frac{R_{da}T}{p - p_w} \qquad \text{SI and IP} \qquad (20)$$

จากสมการที่ 9 จะได้

$$v = \frac{RT(1 + 1.607858W)}{28.966p} = \frac{R_{da}T(1 + 1.607858W)}{p - p_w} \qquad \text{SI and IP} \qquad (21)$$

แทนค่า R ลงในสมการ จะได้สมการดังนี้

$$v = 0.287042(t + 273.15)(1 + 1.607858W)/p \qquad \text{SI} \qquad (22)$$

$$v = 0.370486(t + 459.67)(1 + 1.607858W)/p \qquad \text{IP} \qquad (22)$$

เมื่อ v คือ ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น, m^3/kg_{da} (ft^3/lb_{da})

t คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ, °C (°F)

W คือ อัตราส่วนความชื้น, kg_w/kg_{da} (lb_w/lb_{da})

p คือ ความดันรวม, kPa (psia)

1.5.8 องศาการอิ่มตัว (Degree of saturation, μ)

องศาการอิ่มตัว คือ อัตราส่วนระหว่าง อัตราส่วนความชื้นจริง (W) ต่ออัตราส่วนความชื้นของไออิ่มตัว (W_s) ที่อุณหภูมิและความดันเดิม ดังสมการต่อไปนี้

$$\mu = W/W_s \qquad \text{SI and IP} \qquad (23)$$

สำหรับอากาศแห้งใด ๆ จะมีองศาการอิ่มตัวและความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับศูนย์

1.5.9 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, ϕ)

ความชื้นสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างเศษส่วนโมลของไอน้ำกับเศษส่วนโมลของไอน้ำอิ่มตัว และเท่ากับความดันไอน้ำจริง (Actual water vapor partial pressure) ต่อความดันไออิ่มตัว (Saturation pressure of vapor) ที่ความดันและอุณหภูมิกระเปาะแห้งเดียวกัน ดังสมการต่อไปนี้

$$\phi = x_w/x_{ws} = p_w/p_{ws} \qquad \text{SI and IP} \qquad (24)$$

หรือเขียนในรูปขององศาการอิ่มตัวได้ดังนี้

$$\phi = \frac{\mu}{1-(1-\mu)(p_{ws}/p)} \qquad \text{SI and IP} \qquad (25)$$

1.5.10 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point temperature, t_d)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง คือ อุณหภูมิที่อากาศจะอิ่มตัวที่ความดันขณะนั้น ที่อุณหภูมิดังกล่าวไอน้ำในอากาศจะเริ่มกลั่นตัวเป็นน้ำ เราสามารถพบตัวอย่างการเกิดหยดน้ำค้างได้ง่าย ๆ เช่น การเกิดหยดน้ำที่ผิวแก้วน้ำแข็ง เนื่องจากผิวแก้วมีอุณหภูมิต่ำมากทำให้อากาศชื้นบริเวณผิวแก้วมีอุณหภูมิลดลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้างและส่งผลให้ไอน้ำในอากาศเกิดการกลั่นตัว

สำหรับความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ($p_{ws}(t_d)$) นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$p_{ws}(t_d) = p_w = (p/W)(0.621945 + W) \qquad \text{SI and IP} \qquad (26)$$

เมื่อ p_w คือ ความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำ

$p_{ws}(t_d)$ คือ ความดันอิ่มตัวของไอน้ำที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง

เราสามารถหาความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ($p_{ws}(t_d)$) ได้จากสมการที่ 3 และ 4 ส่วนอุณหภูมิจุดน้ำค้างนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการของ Peppers (1988) ดังนี้

ที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 0°C ถึง 93°C (32°F ถึง 200°F);

$$t_d = C_{14}+C_{15}\alpha+C_{16}\alpha^2+C_{17}\alpha^3+C_{18}\,p_w^{0.1984} \qquad \text{SI and IP} \qquad (27)$$

ที่อุณหภูมิจุดน้ำค้างต่ำกว่า 0°C;

$$t_d = 6.09+12.608\alpha+0.4959\alpha^2 \qquad \text{SI} \qquad (28)$$

$$t_d = 90.12+26.142\alpha+0.8927\alpha^2 \qquad \text{IP} \qquad (28)$$

เมื่อ: หน่วย SI

t_d	คือ	อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, °C
α	คือ	$\ln p_w$
p_w	คือ	ความดันเฉพาะส่วน, kPa
C_{14}	=	6.54
C_{15}	=	14.526
C_{16}	=	0.7389
C_{17}	=	0.09486
C_{18}	=	0.4569

หน่วย IP

t_d	คือ	อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, °F
α	คือ	$\ln p_w$
p_w	คือ	ความดันเฉพาะส่วน, psia
C_{14}	=	100.45
C_{15}	=	33.193
C_{16}	=	2.319
C_{17}	=	0.17074
C_{18}	=	1.2063

1.5.11 เอนทาลปีของอากาศชื้น (Enthalpy of moist air, *h*)

เอนทาลปีของอากาศชื้นนั้น เป็นผลรวมของเอนทาลปีของอากาศแห้ง กับเอนทาลปีของไอน้ำ ดังสมการต่อไปนี้

$$h = h_{da} + Wh_g \qquad \text{SI and IP} \qquad (29)$$

เมื่อ h_{da} คือ เอนทาลปีจำเพาะของอากาศแห้ง, kJ/kg$_{da}$ (Btu/lb$_{da}$)

h_g คือ เอนทาลปีจำเพาะของไออิ่มตัว, kJ/kg$_{da}$ (Btu/lb$_{da}$)

โดย ASHRAE Handbook (2021) ได้แสดงสมการ สำหรับการประมาณค่าเอนทาลปีของอากาศแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไว้ดังนี้

$$h_{da} \approx 1.006t \qquad \text{SI} \qquad (30)$$

$$h_{da} \approx 0.240t \qquad \text{IP} \qquad (30)$$

สำหรับไอน้ำที่ 0°C (32°F) จะมีค่าเอนทาลปีเท่ากับ 2501 kJ/kg (1075 Btu/lb_w) และมีค่าความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ 1.86 kJ/kg·K (0.444 Btu/lb_w·F) ดังนั้น ในการประมาณค่าเอนทาลปีของไอน้ำสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$h_g \approx 2501 + 1.86t \qquad \text{SI} \qquad (31)$$

$$h_g \approx 1075 + 0.444(t - 32) \qquad \text{IP}$$

$$h_g \approx 1061 + 0.444t \qquad \text{IP} \qquad (31)$$

เมื่อ t คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง°C (°F)

แทนค่า h_{da} และ h_g ลงในสมการจะได้เอนทาลปีจำเพาะของอากาศชื้น ดังสมการต่อไปนี้

$$h = 1.006t + W(2501 + 1.86t) \qquad \text{SI} \qquad (32)$$

$$h = 0.240t + W(1061 + 0.444t) \qquad \text{IP} \qquad (32)$$

1.5.12 อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Wet bulb temperature, t^*)

เราสามารถอธิบายกระบวนการเกิดอุณหภูมิกระเปาะเปียกให้เห็นภาพได้ง่าย โดยเริ่มจากการพิจารณาอากาศชื้นที่ไหลเข้าไปในท่อที่มีน้ำบรรจุอยู่ โดยท่อมีความยาวมากและหุ้มฉนวน ในระหว่างที่อากาศไหลไปในท่อ น้ำจะระเหยเข้าไปในอากาศ ทำให้ค่าอัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปีของอากาศเพิ่มขึ้น จนทำให้อากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกับน้ำ โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อน กระบวนการนี้เป็นกระบวนการอากาศอิ่มตัวแบบอะเดียแบติก (Adiabatic saturation) โดยอากาศอิ่มตัวจะไหลออกที่อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำ ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวนี้เรียกว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเทอร์โมไดนามิกส์ (t^*)

เมื่อพิจารณาตามกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้

$$h + (W_s^* - W)h_w^* = h_s^* \qquad \text{SI and IP} \qquad (33)$$

เมื่อ W_s^*, h_w^* และ h_s^* คือคุณสมบัติที่อุณหภูมิ t^* และ h_w^* คือ เอนทาลปีของน้ำ ที่ระเหยเข้าไปในอากาศ

การวัดค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกด้วยไซโครมิเตอร์ โดยให้อากาศไหลผ่านปลายกระเปาะที่ชุ่มด้วยน้ำนั้น น้ำจะระเหยเข้าสู่อากาศ โดยดึงความร้อนจากน้ำและกระเปาะออกไป ทำให้กระเปาะมีอุณหภูมิลดลง กระบวนการดังกล่าวไม่ใช่กระบวนการอากาศอิ่มตัวแบบอะเดียแบติก (Adiabatic saturation) เพราะยังคงมีการถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมอยู่ เราจึงเรียกค่าที่วัดได้ว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกไซโครมิเตอร์ การวัดค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกด้วยไซโครมิเตอร์แบบเหวี่ยงนั้นควรจะเหวี่ยงให้อากาศไหลผ่านกระเปาะด้วยความเร็วประมาณ 0.45 m/s (90 fpm) เป็นระยะเวลาที่นานพอ จนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล

ในทางปฏิบัติพบว่า อากาศชื้นที่ความดันใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศจะมีอุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเทอร์โมไดนามิกส์ ใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกไซโครมิเตอร์ ดังนั้นสมการที่ 33 ยังคงมีประโยชน์ในการนำไปหาคุณสมบัติอื่น ๆ ของอากาศได้

เอนทาลปีของน้ำนั้นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยน้ำที่ 0°C (32°F) จะมีเอนทาลปีเท่ากับศูนย์ และมีความร้อนจำเพาะประมาณ 4.186 kJ/kg·K (1.0 Btu/lb$_w$·°F) ดังนั้น เอนทาลปีของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะมีค่าโดยประมาณ ดังนี้

$$h_w^* \approx 4.186t^* \qquad \text{SI} \quad (34)$$

$$h_w^* \approx t^* - 32 \qquad \text{IP} \quad (34)$$

จากสมการที่ 33 และ 34 สามารถหาค่าอัตราส่วนความชื้นได้ดังนี้

$$W = \frac{\left(2501 - 2.326t^*\right)W_S^* - 1.006(t - t^*)}{2501 + 1.86t - 4.18t^*} \qquad \text{SI} \quad (35)$$

$$W = \frac{\left(1093 - 0.556t^*\right)W_S^* - 0.240(t - t^*)}{1093 + 0.444t - t^*} \qquad \text{IP} \quad (35)$$

เมื่อ t คือ อุณหภูมิอากาศ, °C (°F)

t^* คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก, °C (°F)

เราสามารถใช้สมการที่ 35 มาหาค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกได้ แต่จะเห็นว่า สมการไม่ได้เป็นสมการเชิงเส้น การแก้สมการจะต้องอาศัยกระบวนการทำซ้ำ (Iteration) จนกว่าจะได้ค่าที่ต้องการ ซึ่งเราสามารถใช้คำสั่ง Goal Seek ในโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล (Microsoft excel) มาช่วยในกระบวนการทำซ้ำได้ ซึ่งโปรแกรมสามารถคำนวณหาค่าได้อย่างรวดเร็ว

Roland Stull (2011) ได้นำเสนอสมการหาอุณหภูมิกระเปาะเปียก ที่ขึ้นกับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ ดังสมการที่ 36 ซึ่งสมการดังกล่าวใช้ได้กับอากาศชื้น ที่มีความดัน 101.325 kPa โดยสมการจะมีความแม่นยำ ถ้าอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 5%RH ถึง 99%RH และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -20˚C ถึง 50˚C โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ –1˚C ถึง +0.65˚C และผลการคำนวณจะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean absolute error) น้อยกว่า 0.3˚C

$$t^* = t\,\mathrm{atan}\,[0.151977\,(\mathrm{RH\%}+8.313659)^{1/2}] + \mathrm{atan}\,(t+\mathrm{RH\%}) - \mathrm{atan}(\mathrm{RH\%}-1.676331)$$
$$+0.00391838(\mathrm{RH\%})^{3/2}\,\mathrm{atan}(0.023101\mathrm{RH\%}) - 4.686035 \qquad \mathrm{SI} \qquad (36)$$

เมื่อ t^* คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก, ˚C

t คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, ˚C

RH% คือ ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ (100ϕ)

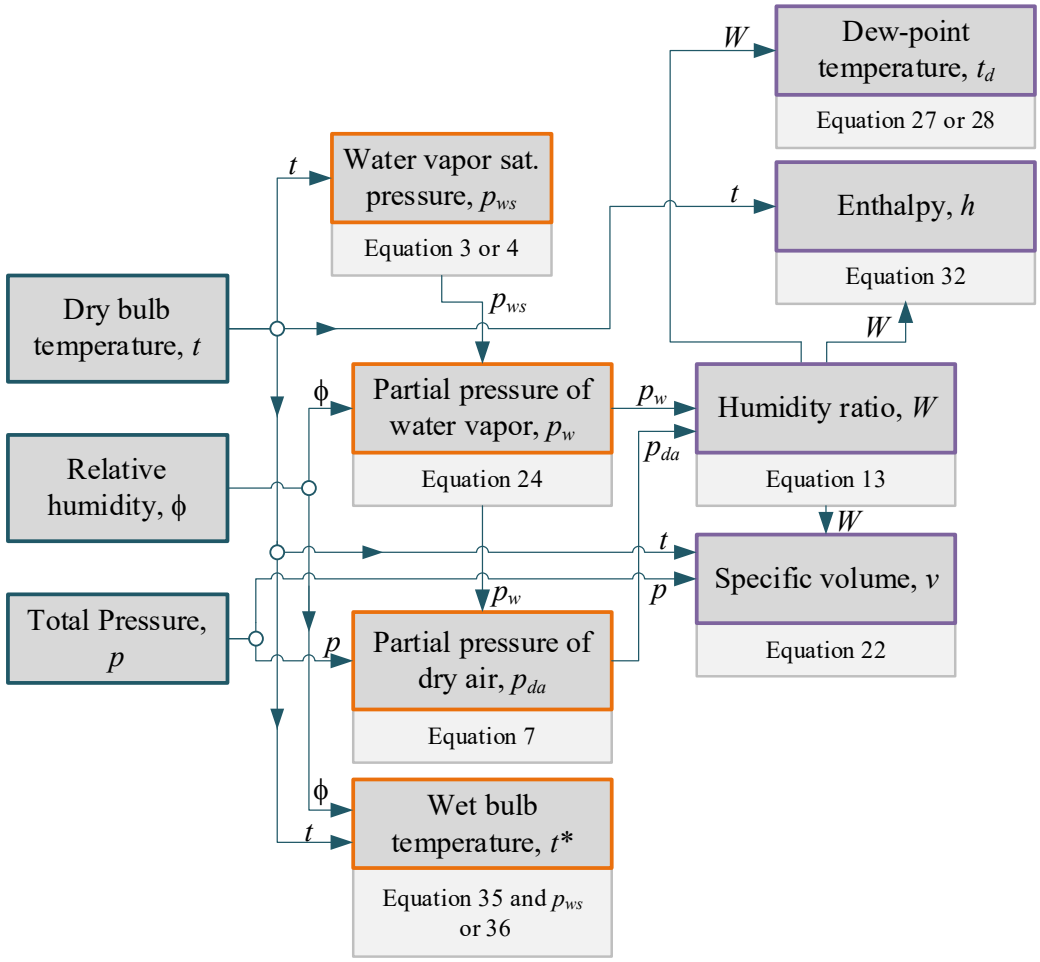
atan คือ ฟังก์ชันของ arctan ในหน่วยของเรเดียน

อุณหภูมิกระเปาะเปียก จะมีค่าได้สูงสุดเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออากาศนั้นเป็นอากาศอิ่มตัว

1.5.13 แนวทางการคำนวณหาค่าคุณสมบัติของอากาศชื้น

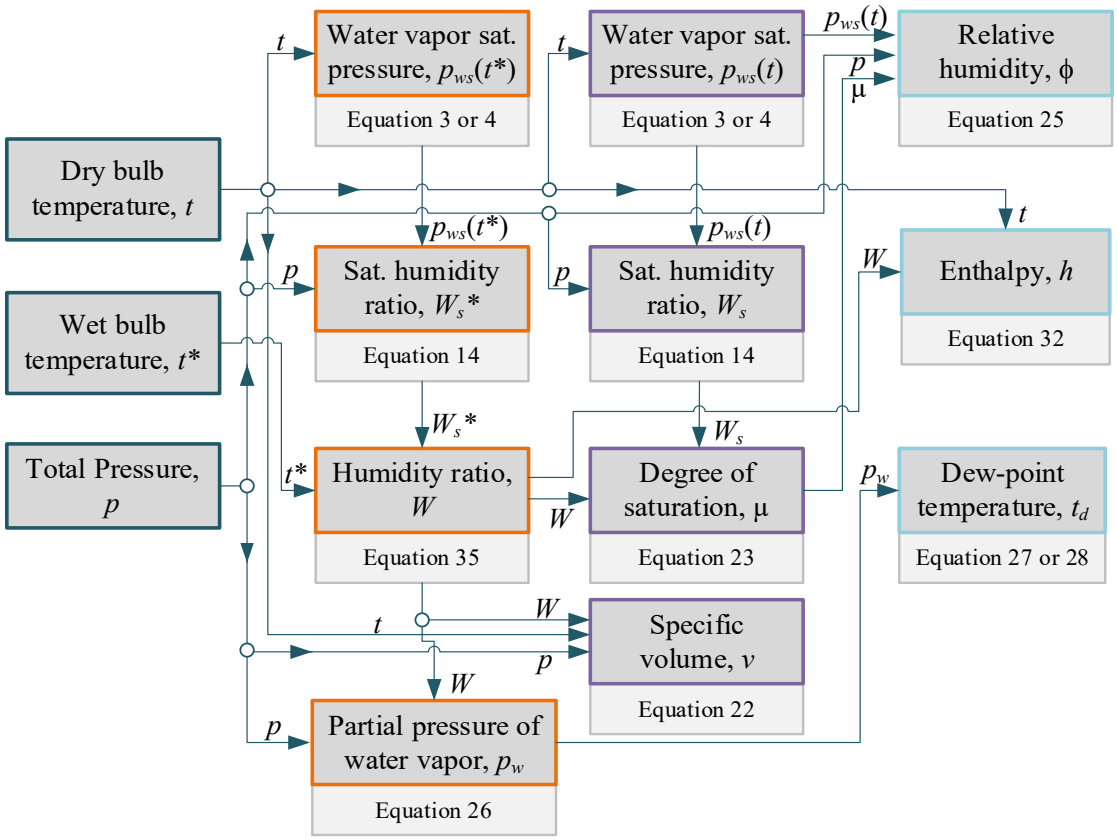
คุณสมบัติของอากาศชื้นนั้น จะมีความสัมพันธ์กัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมด หากเราทราบคุณสมบัติของอากาศอย่างน้อยสองค่าจะทำให้สามารถหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศที่เหลือได้ ซึ่งจากสมการที่กล่าวมาทั้งหมดนี้สามารถสรุปเป็นแนวทางในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติของอากาศชื้นเมื่อทราบค่าคุณสมบัติบางตัวได้ 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 หากทราบอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t) ความชื้นสัมพัทธ์ (ϕ) และความดันอากาศ (p) สามารถคำนวณคุณสมบัติที่เหลือได้ตามแผนภูมิในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภูมิการคำนวณคุณสมบัติอากาศชื้นเมื่อทราบ t, ϕ และ p
ที่มา : ผู้เขียน (2566)

วิธีที่ 2 หากทราบอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (t^*) และความดันอากาศ (p) สามารถคำนวณคุณสมบัติที่เหลือได้ตามแผนภูมิในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แผนภูมิการคำนวณคุณสมบัติอากาศชื้นเมื่อทราบ t, t^* และ p
ที่มา : ผู้เขียน (2566)

จากทั้ง 2 แผนภูมิ เราสามารถนำไปเขียนเป็นสมการคำนวณ ด้วยโปรแกรมสเปรดชีต (Spread sheet) หรือโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล (Microsoft excel) ได้ไม่ยาก ซึ่งเราสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณกระบวนการพื้นฐานในระบบปรับอากาศได้ ในเบื้องต้น ผู้เขียนได้จัดทำเป็นไฟล์คำนวณด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซลไว้แล้ว หากผู้อ่านสนใจสามารถดาวน์โหลดไปใช้ได้ ตามลิงก์ https://bit.ly/3rjOuCT

ตัวอย่างที่ 1.1 วัดค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ความดัน 101.325 kPa ได้ 25°C (298.15 K) และวัดความชื้นสัมพัทธ์ได้ 50%RH (ϕ =0.5) ให้หาคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศชื้นดังกล่าว

<u>โจทย์กำหนด</u> t = 25°C (298.15 K), ϕ =0.5 และ p = 101.325 kPa

<u>โจทย์ให้หา</u> คุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศชื้นที่เหลือ

<u>วิธีทำ</u> หาคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศชื้นที่เหลือ ตามแนวทางในแผนภูมิ ในรูปที่ 1.1 ได้ดังนี้

- **ความดันไอน้ำอิ่มตัว** (p_{ws})**;** จากสมการที่ 4 แทนค่า T ที่ 298.15 K จะได้

$$\ln p_{ws}=C_8/298.15+C_9+C_{10}298.15+C_{11}\,298.15^2+C_{12}298.15^3+C_{13}\ln 298.15$$

แทนค่า C จะได้ $\ln p_{ws} = 8.06124$

และ $p_{ws} = e^{\ln pws} = e^{8.06124} = 3169$ Pa

- **ความดันไอของอากาศชื้น** (p_w) จากสมการที่ 24 แทนค่า ϕ = 0.5 จะได้

$$p_w = 0.5p_{ws} = 0.5\times3169 = 1584.6 \text{ Pa}$$

- **ความดันไอของอากาศแห้ง** (p_{da})**;** จากสมการที่ 7 แทนค่า p = 101.325 kPa และค่า p_w = 1.5846 kPa จะได้

$$p_{da} = p - p_w = 101.325 - 1.5846 = 99.74 \text{ kPa}$$

- **อัตราส่วนความชื้น** (W)**;** จากสมการที่ 13 แทนค่า p = 101.325 kPa และค่า p_w =1.5846 kPa จะได้

$$W = 0.621945\frac{p_w}{p-p_w} = 0.621945\frac{1.5846}{101.325-1.5846}$$

$$W = 0.01 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$$

- **ปริมาตรจำเพาะ** (v); จากสมการที่ 22 แทนค่า t = 25°C, W = 0.01 $\text{kg}_w/\text{kg}_{da}$ และ p = 101.325 kPa จะได้

$$v = 0.287042(t + 273.15)(1 + 1.607858W)/p$$

$$v = 0.287042(25 + 273.15)(1 + 1.607858\times0.01)/101.325$$

$$v = 0.8582 \text{ m}^3/\text{kg}_{da}$$

- **อุณหภูมิจุดน้ำค้าง** (t_d); จากสมการที่ 27

$$t_d = C_{14}+C_{15}\alpha+C_{16}\alpha^2+C_{17}\alpha^3+C_{18}\, p_w^{0.1984}$$

จาก p_w = 1.5846 kPa แทนค่าเพื่อหา α จะได้

$$\alpha = \ln p_w = 0.4603$$

แทนค่า C, p_w และ α ลงในสมการจะได้

$$t_d = C_{14}+C_{15}0.4603+C_{16}0.4603^2+C_{17}0.4603^3+C_{18}1.5846^{0.1984}$$

$$t_d = 13.89^\circ\text{C}$$

- **เอนทาลปีของอากาศชื้น** (h); จากสมการที่ 32

$$h = 1.006t + W(2501+1.86t)$$

แทนค่า $t = 25^\circ$C และ $W = 0.01$ kg_w/kg_{da} จะได้

$$h = 1.006\times25+ 0.01(2501+1.86\times25)$$

$$h = 50.614 \text{ kJ}/kg_{da}$$

- **อุณหภูมิกระเปาะเปียก** (t^*); หาได้จากสมการที่ 36 โดยแทนค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ลงในสมการจะได้

$$t^* = t\,\text{atan}\,[0.151977\,(\text{RH\%}+8.313659)^{1/2}]+ \text{atan}\,(t+\text{RH\%}) - \text{atan}(\text{RH\%}-1.676331) + +0.00391838(\text{RH\%})^{3/2}\,\text{atan}(0.023101\text{RH\%}) -4.686035$$

$$t^* = 25\,\text{atan}\,[0.151977\,(50+8.313659)^{1/2}]+ \text{atan}(25+50) - \text{atan}(50-1.676331) + 0.00391838(50)^{3/2}\,\text{atan}(0.023101\times50) - 4.686035$$

$$t^* = 18.00^\circ\text{C}$$

จากข้อมูลในแผนภูมิไซโครเมตริกของ ASHRAE ที่สภาวะเดียวกันพบว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะอยู่ที่ 17.88°C จะเห็นว่าแตกต่างกันที่ 0.67%

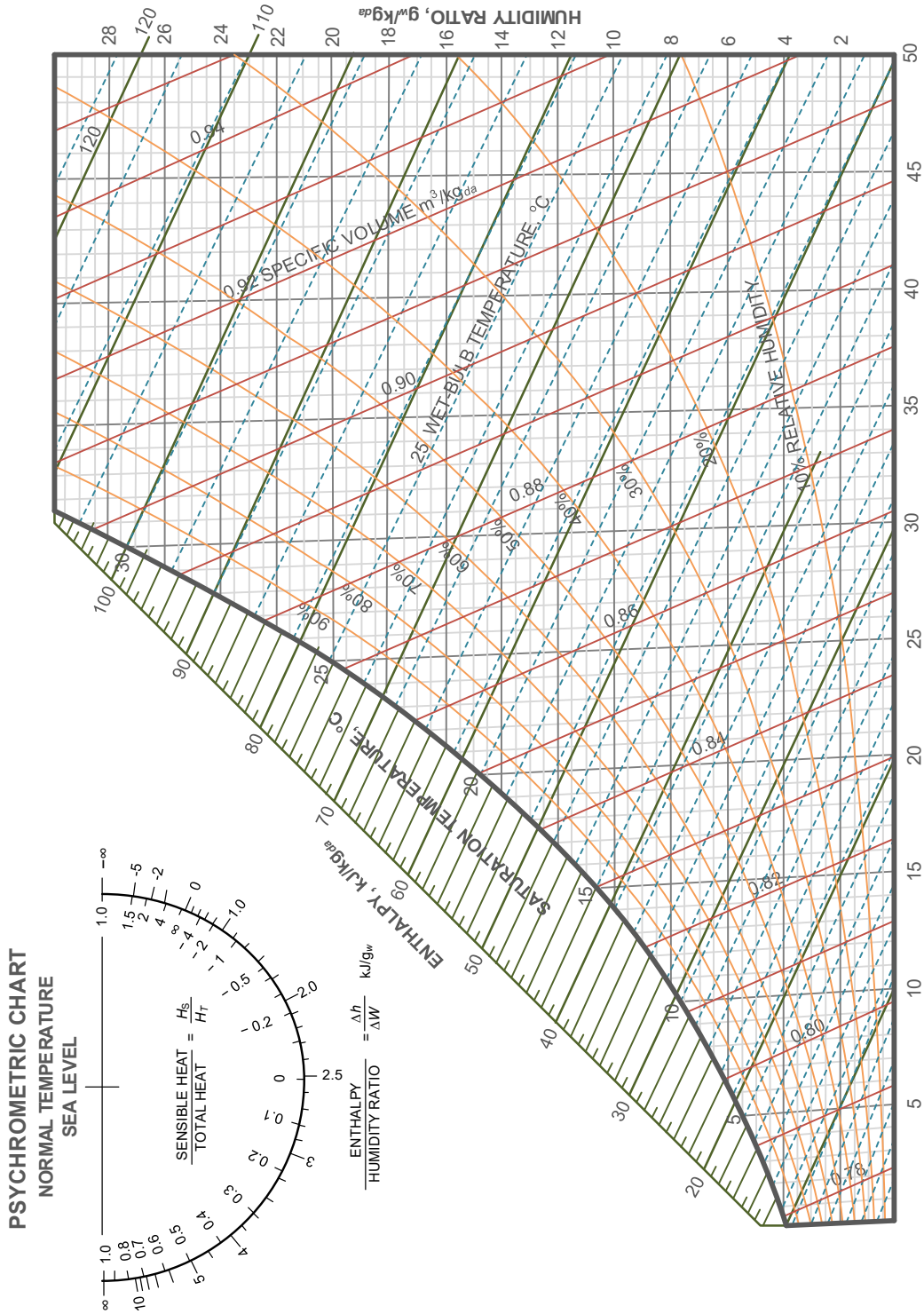
1.6 แผนภูมิไซโครเมตริก (*Psychrometric Chart*)

แผนภูมิ Psychrometric มีจุดเริ่มต้นจากความต้องการวิเคราะห์พฤติกรรมของอากาศชื้นในระบบปรับอากาศอย่างเป็นระบบ โดยผู้วางรากฐานสำคัญคือ Willis H. Carrier ซึ่งในปี 1911 ได้เผยแพร่เอกสารชื่อ “Rational Psychrometric Formulae” ซึ่งถือเป็นการรวมสูตรและแนวคิดอุณหพลศาสตร์เข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ พร้อมนำเสนอแผนภูมิกราฟิกที่แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ เอนทัลปี และปริมาตรจำเพาะในรูปแบบที่ใช้งานได้จริงในภาควิศวกรรม

ต่อมาในช่วงกลางศตวรรษที่ 20 วิศวกรและนักวิจัยหลายคน เช่น Palmatier, Haines และ Rohsenow ได้พัฒนาแผนภูมิให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่หลากหลาย เช่น ความดันบรรยากาศที่ต่างกัน หรือระดับความสูงต่าง ๆ ขณะเดียวกัน ASHRAE เองได้มีบทบาทในการปรับปรุงความแม่นยำของคุณสมบัติของอากาศชื้น โดยเฉพาะจากงานวิจัยของ Hyland & Wexler (1983) และ Nelson & Sauer (2002) ซึ่งนำไปสู่การสร้างแผนภูมิสำหรับอุณหภูมิสูงถึง 200˚C (600°F) ที่ความดันบรรยากาศที่ต่างกัน

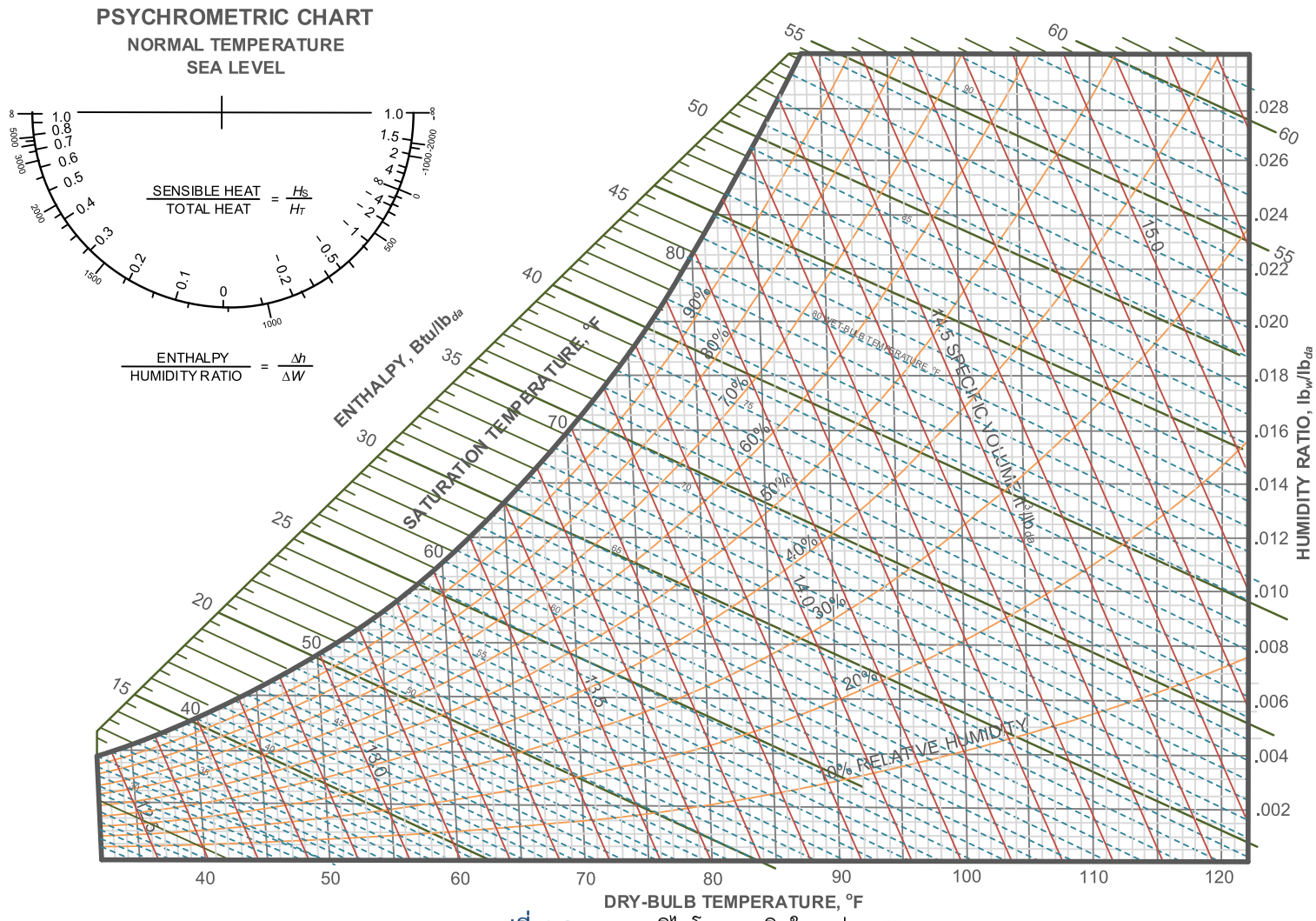
ปัจจุบันแผนภูมิ Psychrometric ยังคงเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในการออกแบบ วิเคราะห์ และควบคุมระบบปรับอากาศ โดยแสดงข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์หลายมิติในแผ่นเดียว ซึ่งสะท้อนถึงการบูรณาการของวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการใช้งานจริงที่เริ่มต้นจากแนวคิดของ Carrier กว่า 100 ปีก่อน และได้รับการพัฒนาต่อเนื่องโดยชุมชนวิศวกรรม HVAC จนถึงปัจจุบัน

โดยทั่วไปแล้ว แผนภูมิไซโครเมตริก 1 ภาพ จะใช้ได้สำหรับความดันคงที่ใด ๆ ค่าหนึ่ง ซึ่งทั่วไปจะใช้กับความดันที่ระดับน้ำทะเล ในปัจจุบัน แผนภูมิไซโครเมตริกนั้น มีหลายรูปแบบแตกต่างกันไปตามแหล่งผู้ผลิต โดย ASHRAE เอง ได้พัฒนาแผนภูมิขึ้นมาหลายชุด มีทั้งแผนภูมิที่ระดับน้ำทะเล ที่ระดับความสูง 750 m (2500 ft), 1500 m (5000 ft), 2250 m (7500 ft) จากระดับน้ำทะเล และมีให้เลือกใช้หลายช่วงอุณหภูมิ เช่น ช่วงอุณหภูมิปกติ 0-50˚C (32-120˚F) ช่วงอุณหภูมิต่ำ -40-10˚C (-40-50˚F ในรูปแบบหน่วย IP) ช่วงอุณหภูมิสูง 10-120˚C (60-250˚F) และช่วงอุณหภูมิสูงมาก 100-200˚C (400-600˚F ในรูปแบบหน่วย IP)



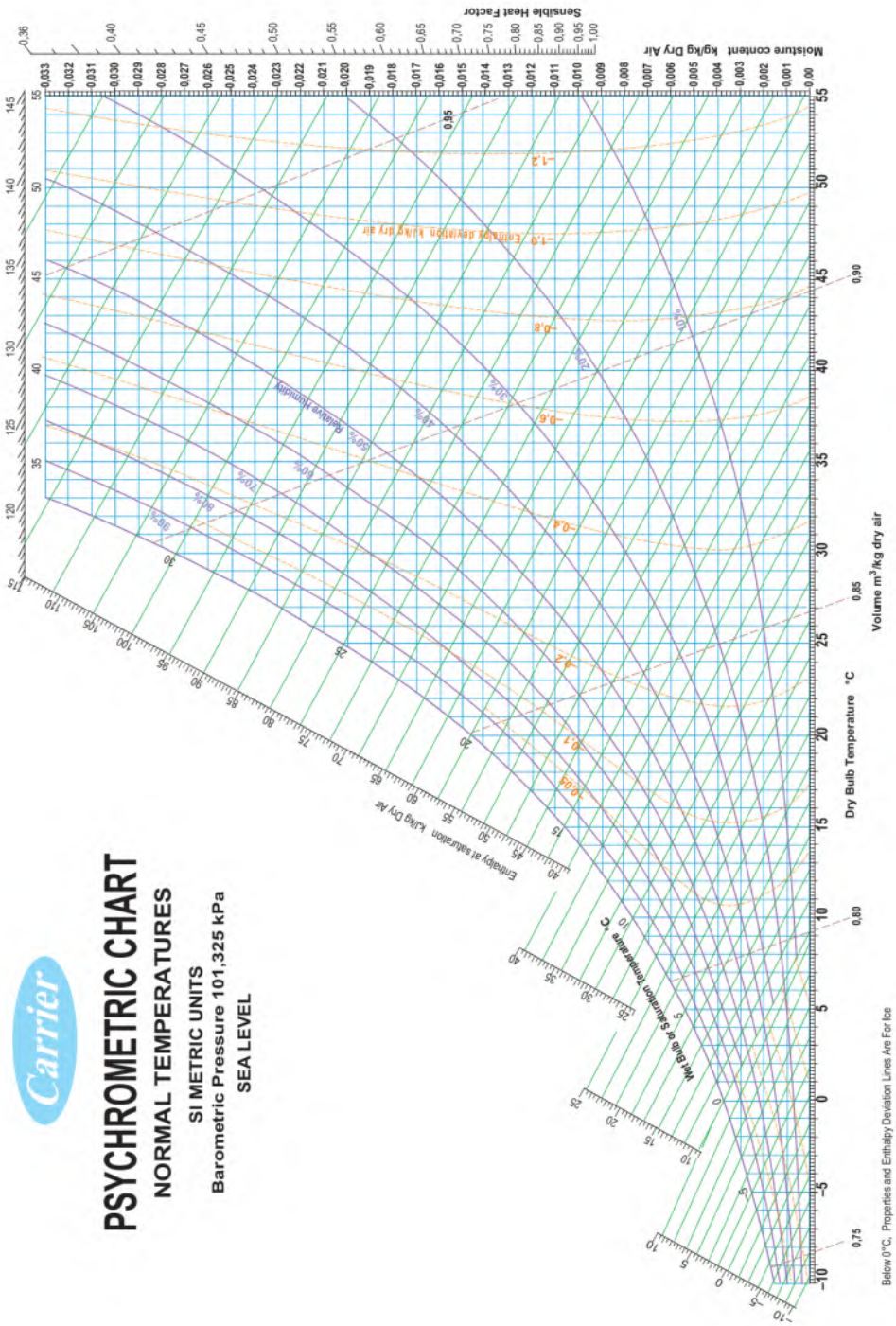
รูปที่ 1.3ก แผนภูมิไซโครเมตริกในหน่วย SI

ที่มา : ดัดแปลงจาก ASHRAE Handbook (2021)



รูปที่ 1.3ข แผนภูมิไซโครเมตริกในหน่วย IP

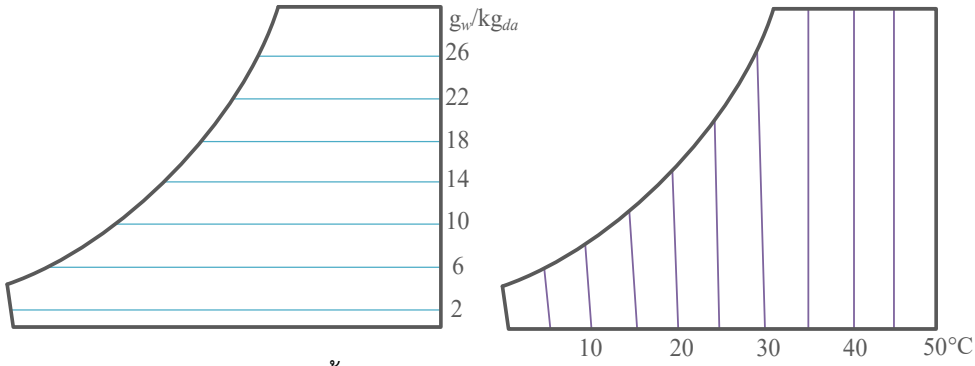
ที่มา : ดัดแปลงจาก ASHRAE Handbook (2021)



รูปที่ 1.4 แผนภูมิไซโครเมตริกในหน่วย SI ของ Carrier

ที่มา : Carrier (2022)

แผนภูมิที่นิยมใช้ในงานปรับอากาศส่วนใหญ่นั้น เป็นแผนภูมิอุณหภูมิปกติ ที่ระดับน้ำทะเล ดังแสดงในรูปที่ 1.3 แต่หากความดันไม่ตรงกับที่ระบุในแผนภูมิ เราก็ใช้สมการในหัวข้อคุณสมบัติอากาศชื้นมาคำนวณได้ จากรูปที่ 1.3 แกนตั้งด้านขวามือของแผนภูมิ จะแสดงค่าอัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio, W) โดยมีค่าตั้งแต่ 0-30 g_w/kg_{da} (0-0.03 lb_w/lb_{da}) ส่วนแกนนอน เป็นเส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature, t) แต่ค่าจะไม่ขนานกัน ซึ่งจะเอียงไปทางซ้ายเล็กน้อยจากแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 1.5



(ก) อัตราส่วนความชื้น (ข) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

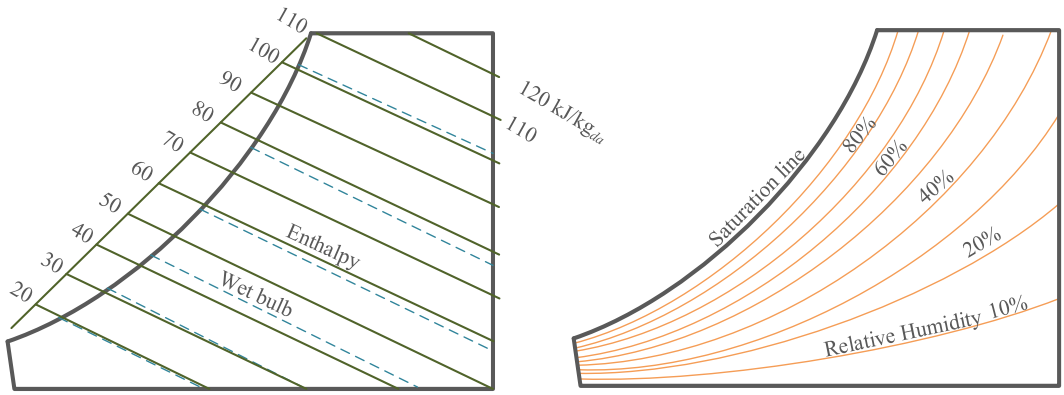
รูปที่ 1.5 เส้นอัตราส่วนความชื้น และเส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ในหน่วย SI

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

เส้นเอนทาลปี (Enthalpy, h) เป็นเส้นเฉียงพาดผ่านแผนภูมิที่ขนานกันทุกเส้น ส่วน**เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก** (Wet bulb temperature, t^*) จะเป็นเส้นประเฉียง แนวเดียวกับเส้นเอนทาลปี แต่จะไม่ขนานกันดังแสดงในรูปที่ 1.6 แต่สำหรับแผนภูมิไซโครเมตริกของ Carrier นั้น จะมีวิธีการอ่านค่าเอนทาลปี แตกต่างไปจากแผนภูมิของ ASHRAE เล็กน้อย เนื่องจากของ Carrier จะแสดงเป็นค่าเอนทาลปีของอากาศอิ่มตัว ซึ่งไม่ใช่เอนทาลปีที่สภาวะจริง ดังนั้น เส้นเอนทาลปีจึงขนานไปกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกตลอดทั้งแผนภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 1.4

ค่าเอนทาลปีของอากาศอิ่มตัวจากแผนภูมิของ Carrier นั้น จะแตกต่างจากเอนทาลปีที่สภาวะจริง ไม่เกิน 2% แต่หากต้องการค่าที่แม่นยำ เราจะต้องปรับแก้ด้วยค่าความเบี่ยงเบนของเอนทาลปีที่อยู่บนเส้น “Enthalpy Deviation” (เส้นโค้งในแนวดิ่งในรูปที่ 1.4) เช่น ที่อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 10%RH จากรูปที่ 1.4 อ่านค่าเอนทาลปีได้ 44.5 kJ/kg_{da} และค่าอ่านค่า “Enthalpy Deviation” ได้ประมาณ -0.52 kJ/kg_{da} (อยู่ระหว่าง -0.4 ถึง -0.6) ดังนั้น ค่าเอนทาลปีจริงจึงมีค่าเท่ากับ 44.5 kJ/kg_{da} ลบด้วย 0.52 kJ/kg_{da} หรือเท่ากับ 43.98 kJ/kg_{da} นั่นเอง

เส้นความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) จะแสดงเป็นเส้นโค้งห่างกันช่วงละ 10% ส่วนเส้นโค้งอากาศอิ่มตัว (Saturation line) คือ เส้นที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100%RH ในขณะที่เส้นแนวนอนคือ เส้นที่อัตราส่วนความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับศูนย์ (อากาศแห้ง) ดังแสดงใน รูปที่ 1.6ข



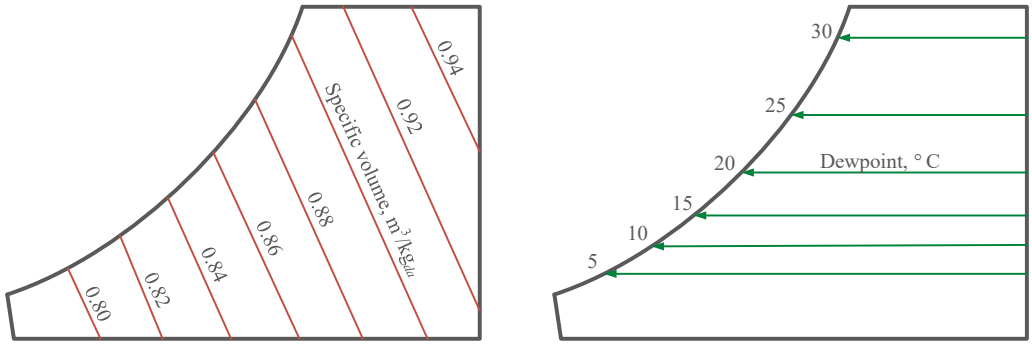
(ก) เอนทาลปีและอุณหภูมิกระเปาะเปียก (ข) ความชื้นสัมพัทธ์

รูปที่ 1.6 เส้นเอนทาลปี อุณหภูมิกระเปาะเปียก และเส้นความชื้นสัมพัทธ์ ในหน่วย SI

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

เส้นปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) เป็นเส้นตรงในแนวเฉียง ที่ค่อนข้างจะขนานกัน ดังรูปที่ 1.7ก ส่วน**อุณหภูมิจุดน้ำค้าง** (Dewpoint temperature) นั้นจะไม่มีเส้นปรากฏอยู่บนแผนภูมิ แต่จะใช้วิธีการลากเส้นแนวนอนไปหาเส้นอากาศอิ่มตัวเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ดังแสดงในรูปที่ 1.7ข บนเส้นโค้งอิ่มตัวนั้นจะมีตัวเลขอุณหภูมิที่ใช้อ่านได้ทั้งอุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิจุดน้ำค้างเพราะบนเส้นโค้งอิ่มตัวจะมีค่าอุณหภูมิเท่ากันทั้งหมด ทำให้ง่ายต่อการอ่านค่ามากขึ้น

พื้นที่แคบเหนือเส้นโค้งอิ่มตัวจะถูกเรียกว่าเขตหมอก บริเวณนี้จะเป็นส่วนผสมของอากาศชื้นอิ่มตัวและน้ำเหลวที่แขวนลอยในอากาศที่อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน โดยเส้นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ในบริเวณเขตหมอกจะตรงกับส่วนขยายของเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก



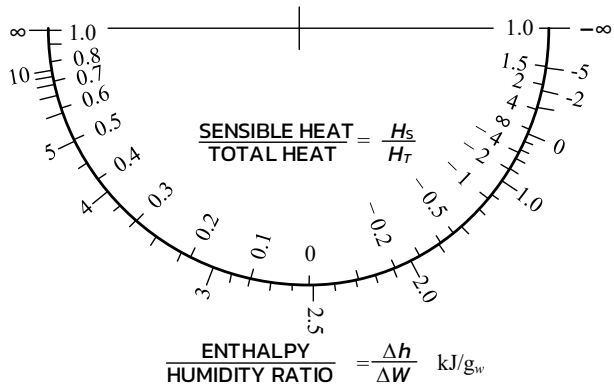
(ก) ปริมาตรจำเพาะ (ข) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง

รูปที่ 1.7 เส้นปริมาตรจำเพาะ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ในหน่วย SI

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

บนแผนภูมิไซโครเมตริก จะมี**สเกลครึ่งวงกลม** (Protractor) อยู่ด้านบนซ้ายของแผนภูมิ โดยสเกลด้านในคือ อัตราส่วนของความร้อนสัมผัส (Sensible heat ratio, SHR) ส่วนสเกลด้านนอกคือ อัตราส่วนของความแตกต่างระหว่างเอนทาลปีกับความแตกต่างของอัตราส่วนความชื้น ($\Delta h/\Delta W$) มีหน่วยเป็น kJ/g (Btu/lb$_w$) ดังแสดงในรูปที่ 1.8

แผนภูมิของ Carrier นั้นจะแสดงเฉพาะสเกลอัตราส่วนของความร้อนสัมผัส (Sensible heat factor, SHF) ที่ด้านขวามือของแผนภูมิ โดยมีจุดอ้างอิงอยู่ที่ “Alignment circle” หรือที่อุณหภูมิ 24˚CDB และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 50%RH ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.8 ตัวอย่างสเกล SHR และ $\Delta h/\Delta W$ บนแผนภูมิไซโครเมตริกในหน่วย SI

ที่มา : ASHRAE Handbook (2021)

สเกลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ เพื่อเป็นเส้นนำทางของกระบวนการบนแผนภูมิ โดยกระบวนการใดที่มีอัตราส่วนของความร้อนสัมผัส (SHR) หรือมีค่า $\Delta h/\Delta W$ เท่ากัน กระบวนการนั้นก็จะมีเส้นกระบวนการขนานกัน และจะมีประโยชน์มากกับการวิเคราะห์กระบวนการในระบบปรับอากาศ ซึ่งจะได้แสดงเป็นตัวอย่างในหัวข้อต่อ ๆ ไป

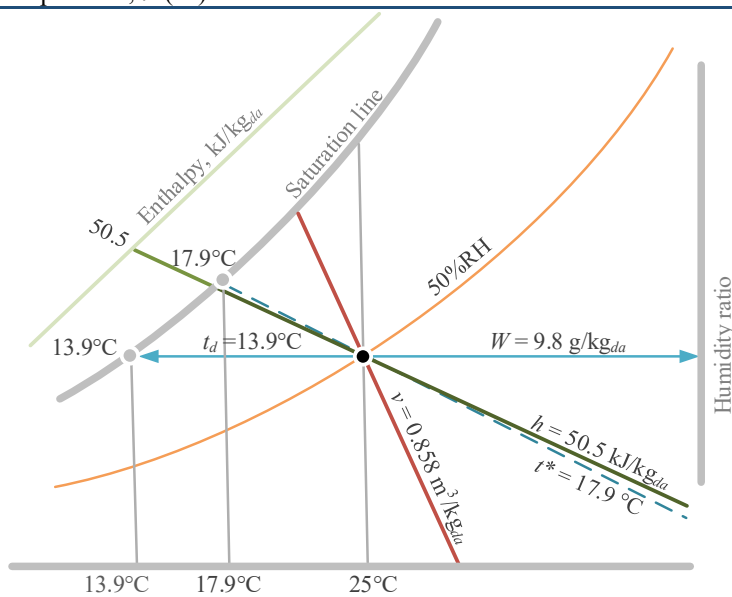
ตัวอย่างที่ 1.2 จากตัวอย่างที่ 1.1 วัดค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ความดัน 101.325 kPa ได้ 25˚C (298.15 K) และวัดความชื้นสัมพัทธ์ได้ 50%RH ($\phi = 0.5$) ให้หาคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศชื้นดังกล่าว

<u>โจทย์กำหนด</u> $t = 25$˚C (298.15 K), $\phi = 0.5$ และ $p = 101.325$ kPa

<u>โจทย์ให้หา</u> คุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศชื้นที่เหลือ

<u>วิธีทำ</u> จากการอ่านค่าบนแผนภูมิไซโครเมตริกของ ASHRAE ที่ความดัน 101.325 kPa ดังแสดงใน<u>รูปที่ 1.9</u> เทียบกับการคำนวณจะได้คุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

คุณสมบัติ	จากการคำนวณ	จากการอ่านแผนภูมิ
Humidity ratio, W(kg$_w$/kg$_{da}$)	0.01	0.0098
Specific Volume, v (m^3/kg$_{da}$)	0.8582	0.858
Dew-point temperature, t_d (˚C)	13.89	13.87
Enthalpy, h (kJ/kg$_{da}$)	50.614	50.5
Wet bult temperature, t^* (˚C)	18.00	17.9



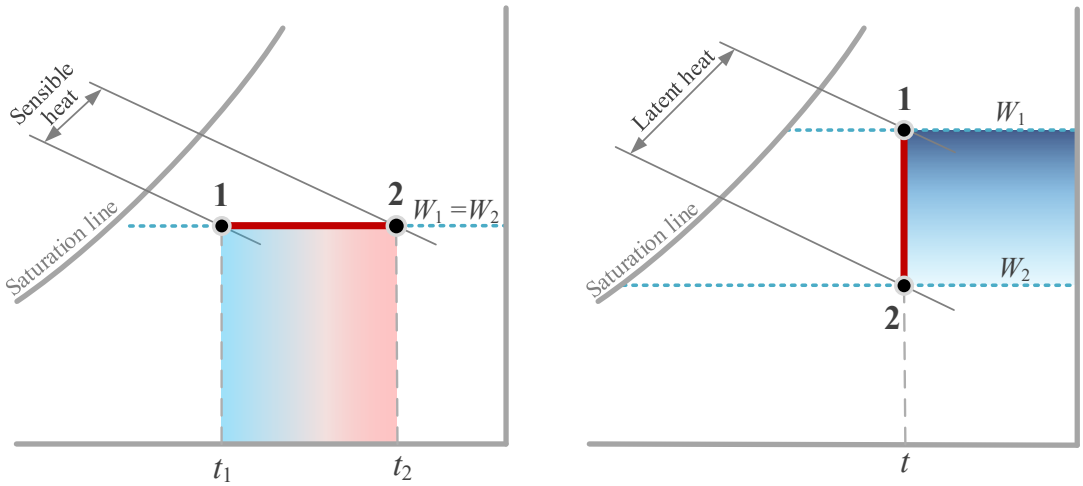
รูปที่ 1.9 ตัวอย่างการอ่านค่าบนแผนภูมิไซโครเมตริก

1.7 กระบวนการพื้นฐานของอากาศ

1.7.1 ความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝง (Sensible and latent heat)

จากนิยามทางเทอร์โมไดนามิกส์ ความร้อนสัมผัสคือ ความร้อนที่สสารได้รับ แล้วสสารนั้นมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงโดยไม่มีการเปลี่ยนสถานะ ส่วนความร้อนแฝงคือ ความร้อนที่สสารได้รับแล้วสสารนั้นมีการเปลี่ยนสถานะโดยอุณหภูมิยังคงที่ สำหรับกระบวนการในระบบปรับอากาศนั้น จะมีความร้อนเกิดขึ้นทั้งความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝง โดยความร้อนสัมผัสจะเกิดขึ้น เมื่ออากาศมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ส่วนความร้อนแฝงจะเกิดขึ้น เมื่อไอน้ำในอากาศมีการเปลี่ยนสถานะ เช่น การกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ หรือมีการระเหยของน้ำเข้าไปในอากาศ

เมื่อพิจารณากระบวนการบนแผนภูมิไซโครเมตริกจะพบว่าความร้อนสัมผัสก็คือความร้อนที่ทำให้เกิดกระบวนการจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 หรือจากจุดที่ 2 มาจุดที่ 1 ตามรูปที่ 1.10(ก) ส่วนความร้อนแฝงคือความร้อนที่ทำให้เกิดกระบวนการจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 หรือจากจุดที่ 2 มาจุดที่ 1 ตามรูปที่ 1.10(ข)



(ก) ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) (ข) ความร้อนแฝง (Latent heat)

รูปที่ 1.10 ความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝงบนแผนภูมิไซโครเมตริก

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

ความร้อนสัมผัสของอากาศชื้น จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ความร้อนสัมผัสของอากาศชื้นจะมีค่าดังสมการ

$$q_s = \dot{m}_{da}\Delta h \qquad \text{SI and IP} \qquad (37)$$

เนื่องจากความร้อนสัมผัสของอากาศชื้น เป็นผลรวมของ ความร้อนสัมผัสของอากาศแห้ง และความร้อนสัมผัสของไอน้ำ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการความร้อนสัมผัสได้ดังนี้

$$q_s = \dot{m}_{da}\Delta h = c_{pda}\dot{m}_{da}\Delta t + c_{pw}\dot{m}_w\Delta t \qquad \text{SI and IP} \qquad (38)$$

เมื่อ q_s คือ ความร้อนสัมผัสของอากาศ, kW (Btu/hr)

c_{pda} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, 1.006 kJ/kg·K (0.24 Btu/lb$_{da}$·°F)

c_{pw} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ, 1.86 kJ/kg·K (0.444 Btu/lb$_w$·°F)

$\dot{m}_{da}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง, kg/s (lb$_{da}$/hr)

$\dot{m}_w$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำในอากาศ, kg/s, (lb$_w$/hr)

t คือ อุณหภูมิของอากาศ, °C (°F)

แทนค่า c_p และ $\dot{m}_w = \dot{m}_{da}\,W$ ลงในสมการ จะได้ **ความร้อนสัมผัสของอากาศชื้น** ดังนี้

$$q_s = \dot{m}_{da}\,(1.006 + 1.86W)\Delta t \qquad \text{SI} \qquad (39)$$

$$q_s = \dot{m}_{da}\,(0.24 + 0.444W)\Delta t \qquad \text{IP} \qquad (39)$$

ทั้งนี้ อาจเรียกเทอม 1.006 + 1.86W (หรือ 0.24 + 0.444W) ในสมการว่า ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น (Specific heat capacity of moist air, c_s) (Don and Marylee, 2019)

ความร้อนแฝงของอากาศชื้น; เป็นความร้อนที่ทำให้น้ำระเหยเข้าไปในอากาศหรือทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการกลั่นตัว สามารถคำนวณได้เหมือนกับสมการที่ 37 หรือจะแยกวิเคราะห์เฉพาะส่วนของไอน้ำก็ได้ ดังนี้

$$q_l = \dot{m}_{w1}h_{g1} - \dot{m}_{w2}h_{g2} \qquad \text{SI and IP} \qquad (40)$$

เมื่อ q_l คือ ความร้อนแฝงของอากาศ, kW (Btu/hr)

h_g คือ เอนทาลปีของไอน้ำ, kJ/kg$_{da}$ (Btu/lb$_{da}$)

เมื่อ $\dot{m}_w = \dot{m}_{da}W$ แทนค่า $h_g \approx 2501+1.86t$ (1061+0.444t, ในหน่วย IP) ลงในสมการจะได้

$$q_l = \dot{m}_{da}[W_1(2501 + 1.86t_1) - W_2(2501 + 1.86t_2)] \quad \text{SI}$$

$$q_l = \dot{m}_{da}[W_1(1061 + 0.444t_1) - W_2(1061 + 0.444t_2)] \quad \text{IP}$$

$$q_l = \dot{m}_{da}[2501\Delta W + 1.86(t_1W_1 - t_2W_2)] \quad \text{SI}$$

$$q_l = \dot{m}_{da}[1061\Delta W + 0.444(t_1W_1 - t_2W_2)] \quad \text{IP}$$

เมื่อ $\Delta W = W_1 - W_2$

จากสมการ กำหนดให้ $1.86(t_1W_1 - t_2W_2) \approx 1.86t_m\Delta W$ (ฤชากร จิรกาลวสาน, 2561) เมื่อ t_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างกระบวนการ จะได้ **ความร้อนแฝงของอากาศชื้น** ดังนี้

$$q_l = \dot{m}_{da}\Delta W\,[2501 + 1.86t_m] \quad \text{SI} \quad (41)$$

$$q_l = \dot{m}_{da}\Delta W\,[1061 + 0.444t_m] \quad \text{IP} \quad (41)$$

อัตราการไหลของอากาศ; ในระบบปรับอากาศ จะนิยมบอกอัตราการไหลของอากาศเป็นเชิงปริมาตร เช่น ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (m^3/s) หรือลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (cfm) โดยอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ จะมีค่าดังนี้

$$\dot{m}_{da} = Q/v \quad \text{SI} \quad (42)$$

$$\dot{m}_{da} = 60Q/v \quad \text{IP} \quad (42)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, m^3/s (cfm)

v คือ ปริมาตรจำเพาะของอากาศ, m^3/kg_{da} (ft^3/lb_{da})

60 คือ ตัวเลขแปลงหน่วยจากวินาทีเป็นนาที

"ข้อควรระวัง: การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\dot{m}_{da}$) จะต้องใช้ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรและปริมาตรจำเพาะของอากาศ (v) ณ จุดวัดเดียวกัน"

การวิเคราะห์ระบบปรับอากาศ; สามารถวิเคราะห์ได้ 2 แบบคือ วิเคราะห์จากคุณสมบัติของอากาศชื้น หรือวิเคราะห์แยกกันระหว่างไอน้ำกับอากาศแห้ง โดยทั่วไปแล้วจะนิยมวิเคราะห์จากอากาศชื้นโดยใช้มวลอากาศแห้งมาคำนวณ เนื่องจากข้อมูลคุณสมบัติอากาศชื้นที่มีการจัดทำกันไว้นั้น ส่วนใหญ่จะเป็นคุณสมบัติต่อมวลอากาศแห้ง ซึ่งข้อมูลคุณสมบัติอากาศชื้นนี้จะพบได้ในแผนภูมิไซโครเมตริกหรือในตารางคุณสมบัติอากาศของ ASHRAE Handbook-Fundamental นอกจากนี้ ในระบบปรับอากาศทั่วไป มวลอากาศแห้งมักจะมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการ ต่างกับมวลอากาศชื้นที่อาจจะเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีไอน้ำเข้าหรือออกจากระบบ ทั้งนี้อาจพบหนังสือบางเล่มที่ระบุว่า มวลไอน้ำในกระบวนการปรับอากาศมีปริมาณน้อยมากจนสามารถตัดออกได้เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณ

เราอาจจะวิเคราะห์คุณสมบัติของอากาศชื้นแยกกันระหว่างไอน้ำกับอากาศแห้งก็ได้ แต่คุณสมบัติที่ใช้ในการคำนวณนั้นจะต้องเป็นคุณสมบัติที่ถูกต้อง เช่น ค่าเอนทาลปี ต้องใช้เอนทาลปีของอากาศแห้งหรือเอนทาลปีของไอน้ำแยกกัน

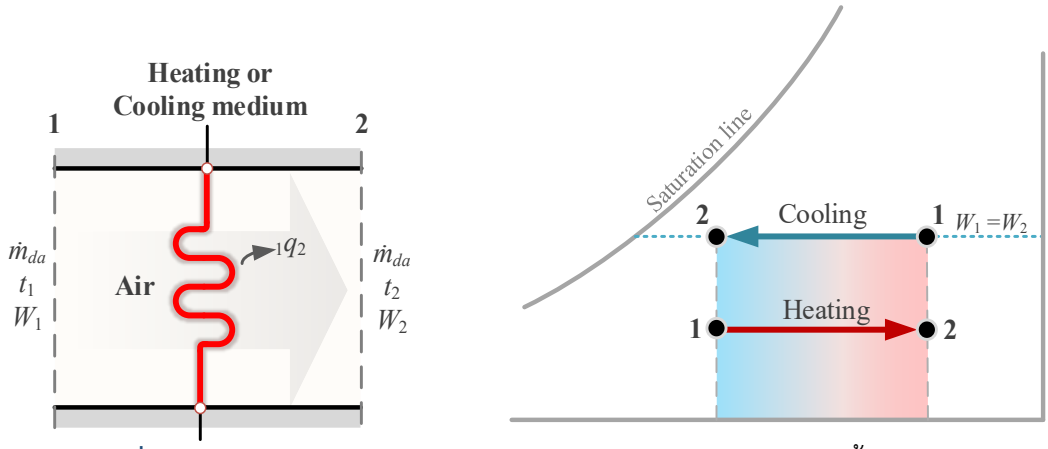
1.7.2 กระบวนการทำอากาศร้อน หรือเย็นแบบความร้อนสัมผัส (Sensible heating or cooling process)

ในระบบปรับอากาศ เราจะพบกระบวนการทำให้อากาศร้อนได้ทั่วไป เช่น การให้ความร้อนด้วยคอยล์ร้อนไฟฟ้า คอยล์ไอน้ำ หรือคอยล์น้ำมันร้อน หรือการถ่ายเทความร้อนที่คอยล์ร้อนของเครื่องปรับอากาศ กระบวนการเหล่านี้เป็นการให้ความร้อนโดยที่ปริมาณไอน้ำในอากาศยังเท่าเดิม (อัตราส่วนความชื้นคงเดิม) ส่วนการทำให้อากาศเย็น โดยอัตราส่วนความชื้นคงเดิมนั้นพบได้ในคอยล์ทำความเย็นที่ผู้ผลิตมักเรียกว่าคอยล์แห้ง (Dry coil) กระบวนการเหล่านี้จะเกิดขึ้นภายใต้ความดันคงที่ตลอดกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 1.11

จากกฎสมดุลมวล

มวลอากาศแห้ง: $\dot{m}_{da1} = \dot{m}_{da2}$ SI and IP (43)

มวลไอน้ำ: $\dot{m}_{da1}W_1 = \dot{m}_{da2}W_2$ SI and IP (44)



รูปที่ 1.11 กระบวนการทำให้อากาศร้อนหรือเย็นโดยอัตราส่วนความชื้นคงเดิม

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

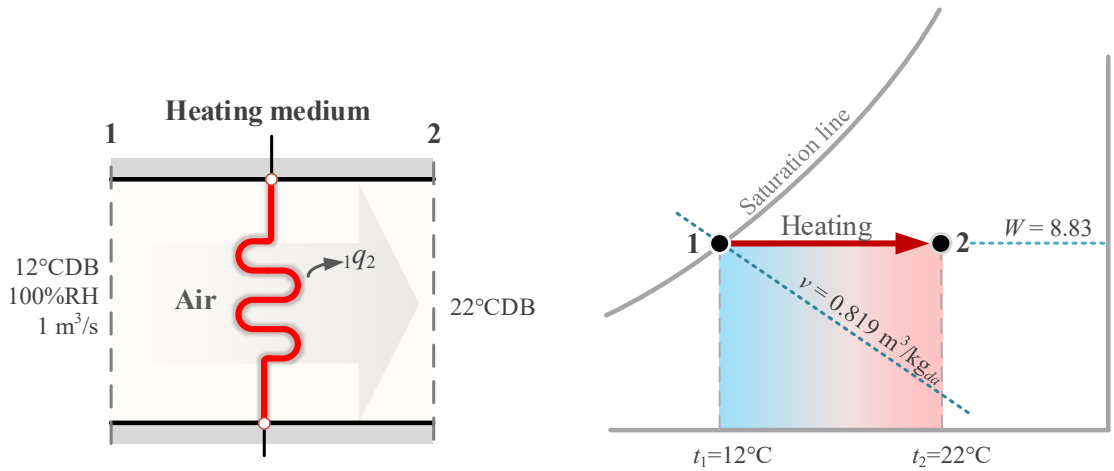
จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์

วิเคราะห์จากคุณสมบัติอากาศชื้น จะได้

$$_1q_2 = \dot{m}_{da}\,(h_2 - h_1) \qquad \text{SI and IP} \qquad (45)$$

สมการที่ 45 เป็นสมการที่มีเฉพาะความร้อนสัมผัสเท่านั้น ดังนั้นสมการดังกล่าว จึงให้ผลลัพธ์ที่เท่ากับสมการที่ 39

ตัวอย่างที่ 1.3 อากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 12˚C ไหลเข้าคอยล์ร้อนด้วยอัตราการไหล 1 m^3/s และไหลออกที่อุณหภูมิ 22˚C ให้หาความร้อนที่อากาศได้รับจากคอยล์ร้อน



รูปที่ 1.12 ประกอบตัวอย่างที่ 1.3

<u>โจทย์กำหนด</u> t_1 = 12°C และอากาศอิ่มตัว (100%RH), Q = 1 m^3/s, t_2 = 22°C

<u>โจทย์ให้หา</u> ${}_1q_2$

<u>กำหนดให้</u> p = 101.325 kPa

<u>วิธีทำ</u> คำนวณหา $\dot{m}_{da}$ จากคุณสมบัติของอากาศที่จุดที่ 1 (เนื่องจากทราบอัตราการไหลที่จุด 1)

- หาค่า p_{ws} โดยแทนค่า T = 273.15+12 = 285.15 K ลงในสมการที่ 3

$$\ln p_{ws} = C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13}\ln T$$

  จะได้ p_{ws} = 1417.8 Pa ซึ่งจะเท่ากับ p_w เนื่องจากเป็นอากาศอิ่มตัว

- หาค่า W จากสมการที่ 13 จะได้

$$W = 0.621945\ \frac{1.4178}{101.325 - 1.4178} = 0.00883\ \text{kg}_w/\text{kg}_{da}$$

- หาค่า v โดยการแทนค่า t_1, W และ p ลงในสมการที่ 22 จะได้

$$v = 0.287042(t + 273.15)(1 + 1.607858W)/p$$

$$v = 0.287042(12 + 273.15)(1 + 1.607858\times0.00883)/101.325$$

$$v = 0.81926 \quad \text{m}^3/\text{kg}_{da}$$

- หาค่า $\dot{m}_{da}$ โดยการแทนค่า v ลงในสมการที่ 42 จะได้

$$\dot{m}_{da} = Q/v = 1/0.81926 = 1.22\ \text{kg/s}$$

- แทนค่าลงในสมการที่ 39 จะได้

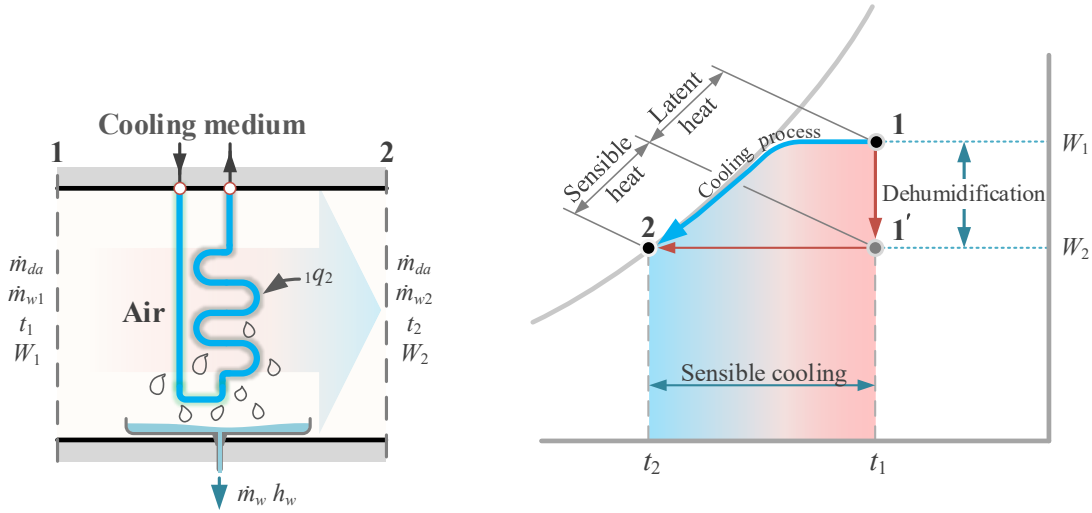
$${}_1q_2 = \dot{m}_{da}(1.006 + 1.86W)\Delta t$$

$${}_1q_2 = 1.2206(1.006 + 1.86\times0.00883)(22\text{-}12)$$

$${}_1q_2 = 12.48\ \text{kW}$$

1.7.3 กระบวนการทำความเย็น (Cooling process)

ในระบบปรับอากาศ จะพบกระบวนการทำความเย็นได้ที่คอยล์เย็น (Cooling coil) ของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งอากาศที่ไหลผ่านคอยล์เย็นจะมีอุณหภูมิลดลง จนกระทั่งอุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้างของสภาวะเดิม ไอน้ำในอากาศจะกลั่นตัวออกมาเป็นหยดน้ำ ทำให้สภาวะของอากาศเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ และไอน้ำจะกลั่นตัวไปจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายของกระบวนการ โดยน้ำที่ไหลออกจากคอยล์จะมีอุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิสุดท้าย กระบวนการทั้งหมดนี้ มีชื่อเรียกอีกชื่อ คือ การทำความเย็นและลดความชื้น (Cooling and dehumidification) ดังแสดงในรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 กระบวนการทำความเย็นให้กับอากาศ

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

จากกฎสมดุลมวล

มวลอากาศแห้ง: $\dot{m}_{da1} = \dot{m}_{da2} = \dot{m}_{da}$ SI and IP (46)

มวลไอน้ำ: $\dot{m}_{da1}W_1 = \dot{m}_{da2}W_2 + \dot{m}_w$ SI and IP (47)

จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์

วิเคราะห์จากคุณสมบัติอากาศชื้น จะได้

$$\dot{m}_{da}\,h_1 = \dot{m}_{da}\,h_2 + {}_1q_2 + \dot{m}_w\,h_w$$

$${}_1q_2 = \dot{m}_{da}\,[(h_1 - h_2) - (W_1 - W_2)h_w] \qquad \text{SI and IP} \qquad (48)$$

จากรูปที่ 1.13 จะเห็นว่า ${}_1q_2$ เป็นความร้อนรวมระหว่างความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสของอากาศแห้ง และหักออกด้วยพลังงานของน้ำเหลวที่กลั่นตัว ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$ {}_1q_2 = q_s + q_l - \dot{m}_w h_w \qquad \text{SI and IP} \qquad (49) $$

นำสมการที่ 39, 41 และ $h_w \approx 4.186t$ ($t - 32$ ในหน่วย IP) มาแทนลงในสมการที่ 49 จะได้

$$ {}_1q_2 = \dot{m}_{da}[(1.006 + 1.86W_m)\Delta t + (2501 + 1.86t_m)\Delta W - 4.186t_2\Delta W] \qquad \text{SI} \qquad (50) $$

$$ {}_1q_2 = \dot{m}_{da}[(0.24 + 0.444W_m)\Delta t + (1061 + 0.444t_m)\Delta W - (t_2 - 32)\Delta W] \qquad \text{IP} \qquad (50) $$

เมื่อ $\Delta t = t_1 - t_2$ และ $\Delta W = W_1 - W_2$ ส่วน t_m และ W_m เป็นคุณสมบัติเฉลี่ยระหว่างกระบวนการ

สมมติฐานของระบบปรับอากาศ

1) กระบวนการปรับอากาศทั่วไป จะมีค่า $t_m \approx 24^\circ$C (75°F), 55%RH และ $W_m \approx 0.01$
2) จุดที่ 2 ของกระบวนการปรับอากาศทั่วไป จะมีค่า $t_2 \approx 10^\circ$C (50°F)

จากสมมุติฐาน แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ 50 จะได้**ความร้อนรวมในกระบวนการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ** ดังนี้

$$ {}_1q_2 = \dot{m}_{da}[(1.006 + 1.86\times0.01)\Delta t + (2501 + 1.86\times24 - 4.186\times10)\Delta W] $$

$$ {}_1q_2 = \dot{m}_{da}[(0.24 + 0.444\times0.01)\Delta t + (1061 + 0.444\times75 - (50 - 32)\times\Delta W] $$

$$ {}_1q_2 = \dot{m}_{da}(1.025\Delta t + 2504\Delta W) \qquad \text{SI} \qquad (51) $$

$$ {}_1q_2 = \dot{m}_{da}(0.244\Delta t + 1076\Delta W) \qquad \text{IP} \qquad (51) $$

จากสมการจะเห็นว่า เทอมที่ 1 ของฝั่งขวามือก็คือ ความร้อนสัมผัส ส่วนเทอมที่ 2 ก็คือความร้อนแฝงที่หักออกด้วยพลังงานของน้ำที่กลั่นตัว แต่เพื่อความสะดวกจึงมักเรียกเทอมที่ 2 ว่าความร้อนแฝงเท่านั้น

ข้อสังเกต; กระบวนการจริงของระบบปรับอากาศนั้น จะมีอากาศบางส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับคอยล์เย็น เราเรียกอากาศนี้ว่า อากาศเลี่ยง (Bypass air) ซึ่งจะทำให้เส้นกระบวนการแตกต่างไปจากในรูปที่ 1.13 โดยจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อต่อ ๆ ไป

ตัวอย่างที่ 1.4 อากาศที่อุณหภูมิ 30°C, 50%RH ไหลเข้าคอยล์เย็นด้วยอัตราการไหล 5 m^3/s และไหลออกที่อุณหภูมิ 10°C ที่สภาวะอิ่มตัว ให้หาการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการ และหาอัตราการไหลของน้ำกลั่นตัว

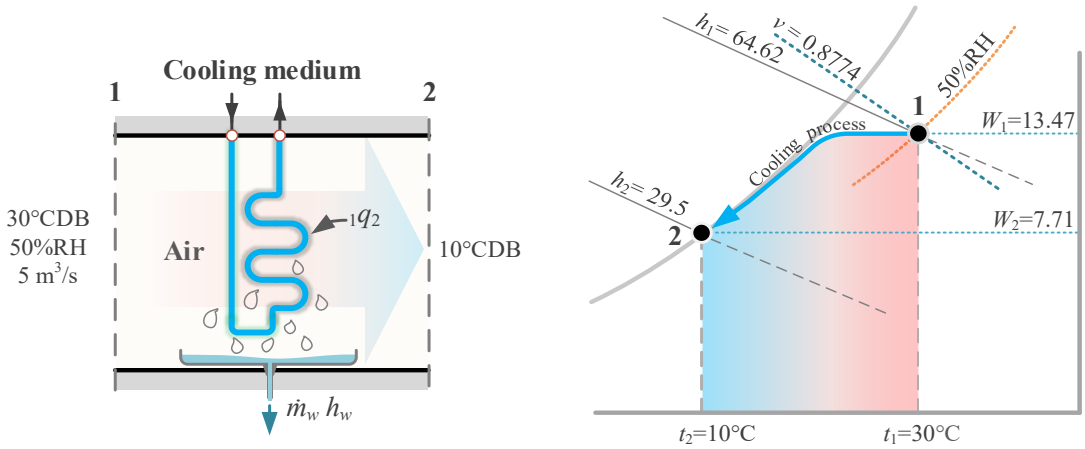
<u>โจทย์กำหนด</u> t_1 = 30°C, 50%RH, Q_1 = 5 m^3/s, t_2 = 10°C และอากาศอิ่มตัว (100%RH)

<u>โจทย์ให้หา</u> ${}_1q_2$ และ $\dot{m}_w$

<u>กำหนดให้</u> p = 101.325 kPa

<u>วิธีทำ</u> เนื่องจากในปัจจุบันสามารถใช้คอมพิวเตอร์หรือโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล (Microsoft excel) คำนวณคุณสมบัติอากาศได้ง่าย ในตัวอย่างนี้จึงไม่ขอแสดงตัวอย่างการคำนวณหาคุณสมบัติอากาศอีก

- จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ ได้ค่า v_1 = 0.8774 m^3/kg_{da}, W_1 = 13.47 g/kg_{da}, W_2 = 7.71 g/kg_{da}, h_1 = 64.62 kJ/kg_{da}, h_2 = 29.5 kJ/kg_{da}



รูปที่ 1.14 ประกอบตัวอย่างที่ 1.4

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

- หาค่า $\dot{m}_{da}$ โดยการแทนค่า v_1 ลงในสมการที่ 42 จะได้

$$\dot{m}_{da} = Q_1/v_1 = 5/0.8774 = 5.699 \text{ kg/s}$$

- จากสมการที่ 34 จะได้

$$h_{w2} = 4.186t = 4.186\times10 = 41.86 \text{ kJ/kg}_w$$

- แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ 48 จะได้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการ ดังนี้

$$\begin{aligned} {}_1q_2 &= \dot{m}_{da}\,[(h_1 - h_2) - (W_1 - W_2)h_{w2}] \\ &= 5.699[(64.62 - 29.5) - (13.47 - 7.71)/1000\times41.86] \\ &= 198.8 \text{ kW} \end{aligned}$$

- จากสมการที่ 47 จะได้อัตราการไหลของน้ำกลั่นตัว

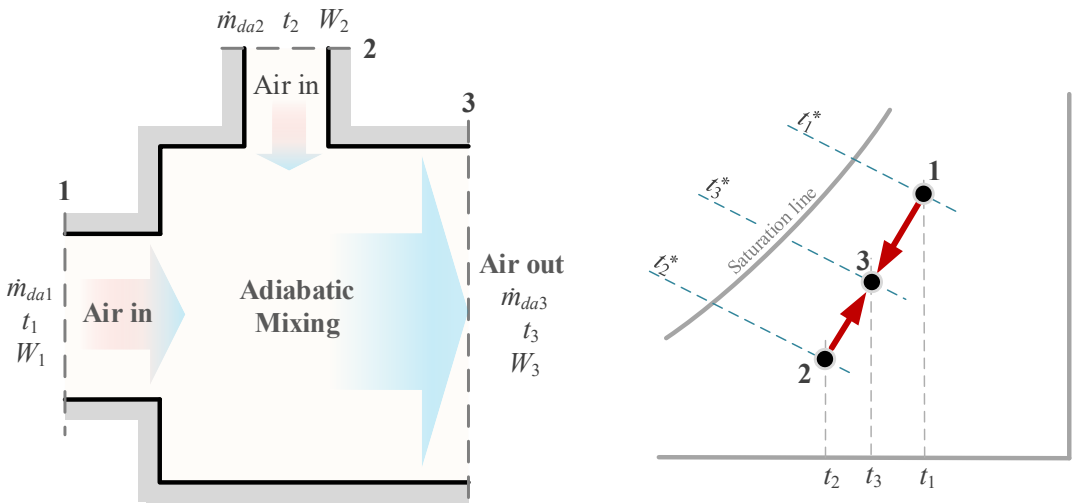
$$\dot{m}_w = \dot{m}_{da}(W_1 - W_2)$$

$$\dot{m}_w = 5.699\times(13.47 - 7.71)/1000$$

$$\dot{m}_w = 0.0328 \text{ kg/s}$$

1.7.4 กระบวนการผสมอากาศสองกระแสแบบอะเดียแบติก (Adiabatic mixing of two air-streams)

ในระบบปรับอากาศ จะพบกระบวนการผสมอากาศได้ในช่องผสมอากาศ (Mixing chamber) หรือช่องอากาศกลับ (Return air chamber) ของเครื่องส่งลมเย็น (Air Handling Unit, AHU) ซึ่งเป็นการผสมกันของอากาศภายนอก (Outdoor air) กับอากาศที่กลับจากภายในห้อง (Return air) จากรูปที่ 1.15 อากาศสภาวะที่ 1 จะเข้ามาผสมกับอากาศสภาวะที่ 2 จนออกมาเป็นอากาศสภาวะที่ 3 ดังรูป



รูปที่ 1.15 กระบวนการผสมอากาศสองกระแสแบบอะเดียแบติก
ที่มา : ผู้เขียน (2566)

จากกฎสมดุลมวล

มวลอากาศแห้ง: $\dot{m}_{da1} + \dot{m}_{da2} = \dot{m}_{da}$ SI and IP (52)

มวลไอน้ำ: $\dot{m}_{da1}W_1 + \dot{m}_{da2}W_2 = \dot{m}_{da3}W_3$ SI and IP (53)

จากกฎที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์

วิเคราะห์จากคุณสมบัติอากาศชื้น โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อน จะได้

$$\dot{m}_{da1}h_1 + \dot{m}_{da2}h_2 = \dot{m}_{da3}h_3 \quad \text{SI and IP} \quad (54a)$$

แทนค่า $\dot{m}_{da3}$ จะได้

$$\frac{h_2\text{-}h_3}{h_3\text{-}h_1} = \frac{W_2\text{-}W_3}{W_3\text{-}W_1} = \frac{m_{da1}}{m_{da2}} \qquad \text{SI and IP} \quad (54b)$$

หรือ

$$\frac{h_2\text{-}h_3}{W_2\text{-}W_3} = \frac{h_3\text{-}h_1}{W_3\text{-}W_1} \qquad \text{SI and IP} \quad (54c)$$

จะเห็นว่า สมการที่ 54 จะอยู่ในรูปของ $\Delta h/\Delta W$ ซึ่งเป็นเส้นตรงที่แสดงไว้ในสเกลครึ่งวงกลมบนแผนภูมิไซโครเมตริก ดังนั้น เส้นกระบวนการจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 3 และเส้นกระบวนการจากจุดที่ 2 ไปจุดที่ 3 จึงขนานกัน และเนื่องจากทั้งสองกระบวนการมีจุดที่ 3 ร่วมกัน ดังนั้น จุดที่ 1, 2 และ 3 จึงอยู่บนเส้นตรงเดียวกันบนแผนภูมิไซโครเมตริก ดังรูปที่ 1.15 โดยจุดที่ 3 จะอยู่ใกล้กับจุดที่มีอัตราการไหลเชิงมวลมากกว่าเสมอ

จากสมการที่ 53 จัดรูปสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$W_3 = \frac{\dot{m}_{da1}W_1 + \dot{m}_{da2}W_2}{\dot{m}_{da3}} \qquad \text{SI and IP} \quad (55)$$

แทนค่า h ของอากาศชื้นจากสมการที่ 32 ลงในสมการที่ 54a จะได้

$$\dot{m}_{da1}[(1.006t_1 + W_1(2501 + 1.86t)] + \dot{m}_{da2}[1.006t_2 + W_2(2501 + 1.86t)] = \dot{m}_{da3}[1.006t_3 + W_3(2501 + 1.86t_3)]$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$t_3 = \frac{\dot{m}_{da1}(1.006+1.86W_1)t_1 + \dot{m}_{da2}(1.006+1.86W_2)t_2}{\dot{m}_{da3}(1.006+1.86W_3)} \qquad \text{SI} \quad (56)$$

$$t_3 = \frac{\dot{m}_{da1}(0.24+0.444W_1)t_1 + \dot{m}_{da2}(0.24+0.444W_2)t_2}{\dot{m}_{da3}(0.24+0.444W_3)} \qquad \text{IP} \quad (56)$$

จากสมการที่ 56 สามารถหา t_3 ได้ด้วยการแทนค่า W แต่ในระบบปรับอากาศโดยทั่วไปนั้น ค่า W จะมีค่าน้อยมาก จึงประมาณให้เทอม $1.006+1.86W$ (หรือ $0.24+0.444W$ ในหน่วย IP) มีค่าเท่ากัน และตัดกันออกได้ ดังนั้น จะได้ค่า t_3 โดยประมาณดังนี้

$$t_3 = \frac{\dot{m}_{da1} t_1 + \dot{m}_{da2} t_2}{\dot{m}_{da3}} \qquad \text{SI and IP} \qquad (57)$$

เมื่อได้ค่าอุณหภูมิ t_3 หรือ W_3 เราสามารถนำไปคำนวณคุณสมบัติอื่น ๆ ของอากาศชื้นที่จุดที่ 3 ได้ แต่ก็ค่อนข้างยาก และซับซ้อน ดังนั้น เราจึงนิยมใช้ประโยชน์จากเส้นตรงเชื่อมระหว่างจุดที่ 1 และจุดที่ 2 บนแผนภูมิไซโครเมตริก โดยการลากเส้น W_3 หรือ t_3 (ถ้าใช้ W_3 จะมีความแม่นยำกว่าใช้ t_3 เพราะเป็นค่าประมาณ) ไปตัดกับเส้นตรงเชื่อมจุดที่ 1 และจุดที่ 2 จะได้จุดที่ 3 ดังรูปที่ 1.15 จากนั้นจึงอ่านคุณสมบัติของอากาศที่เหลือได้

ในกรณีที่จุด 1 และ 2 ห่างกันไม่มาก ค่าปริมาตรจำเพาะจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อแทนค่า $\dot{m}_{da}$ จากสมการที่ 42 ลงในสมการที่ 55 และ 57 จะได้ **อุณหภูมิ และอัตราส่วนความชื้นของอากาศผสม**โดยประมาณ ดังนี้

$$t_3 = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2}{Q_3} \qquad \text{SI and IP} \qquad (58a)$$

$$W_3 = \frac{Q_1 W_1 + Q_2 W_2}{Q_3} \qquad \text{SI and IP} \qquad (58b)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, m^3/s (cfm)

t คือ อุณหภูมิของอากาศ, $^\circ C$ ($^\circ F$)

W คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, kg_w/kg_{da} (lb_w/lb_{da})

ตัวอย่างที่ 1.5 อากาศภายนอกที่ 35˚CDB, 60%RH ปริมาณ 720 m^3/hr และอากาศภายในห้องที่อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 25˚C, 50%RH ปริมาณ 5400 m^3/hr ไหลมาผสมกันที่ช่องผสมอากาศ (Mixing chamber) แบบอะเดียแบติกของเครื่องส่งลมเย็น (AHU) ให้หาอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผสม

<u>โจทย์กำหนด</u> t_1 = 35˚C, 60%RH,

Q_1 = 720/3600 = 0.2 m^3/s, t_2 = 25˚C, 50%RH, Q_2 = 5400/3600 = 1.5 m^3/s

<u>โจทย์ให้หา</u> t_2 และ ϕ_2

<u>กำหนดให้</u> p = 101.325 kPa

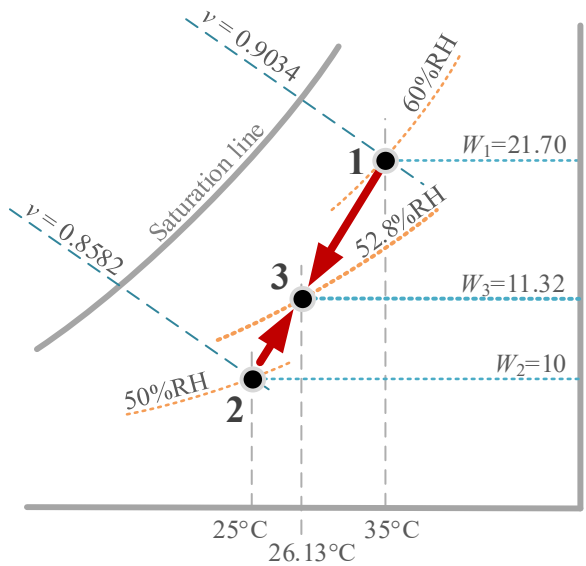
<u>วิธีทำ</u> จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ได้ ค่า v_1 = 0.9034 m^3/kg_{da}, W_1 = 21.7 g/kg_{da}, และ v_2 = 0.8582 m^3/kg_{da}, W_2 = 10.0 g/kg_{da}

- หาค่า $\dot{m}_{da}$ โดยการแทนค่า v จะได้

$\dot{m}_{da1} = Q_1/v_1$ = 0.2/0.9034 = 0.2214 kg/s

$\dot{m}_{da2} = Q_2/v_2$ = 1.5/0.8582 = 1.7478 kg/s

$\dot{m}_{da3} = \dot{m}_{da1} + \dot{m}_{da2}$ = 0.2214 + 1.7484 = 1.9692 kg/s



รูปที่ 1.16 ประกอบตัวอย่างที่ 1.5

- หาค่า W_3 จากสมการที่ 55 จะได้

$$W_3 = \frac{\dot{m}_{da1}W_1 + \dot{m}_{da2}W_2}{\dot{m}_{da3}} = \frac{0.2214\times21.7+1.7478\times10.0}{1.9692} = 11.32\ \text{g/kg}_{da}$$

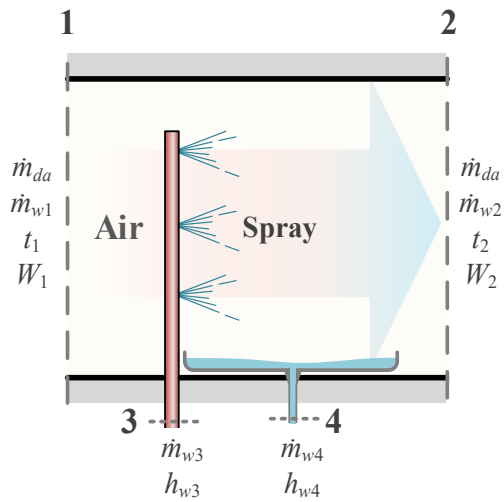
- หาค่า t_3 จากสมการที่ 57 จะได้

$$t_3 = \frac{\dot{m}_{da1}t_1 + \dot{m}_{da2}t_2}{\dot{m}_{da3}} = \frac{0.2214\times35+1.7478\times25}{1.9692} = 26.13^{\circ}\text{C}$$

จากการคำนวณซ้ำด้วยคอมพิวเตอร์ที่ $t_3 = 26.13^{\circ}$C และ $W_3 = 11.32$ g/kg$_{da}$ จะได้ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดที่ 3 เท่ากับ 52.8%RH และจากแผนภูมิไซโครเมตริก เมื่อลากเส้น W_3 ไปตัดกับเส้นตรงจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 สามารถอ่านค่า t_3 และความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดที่ 3 บนแผนภูมิได้ใกล้เคียงกันกับที่คำนวณได้

1.7.5 กระบวนการพ่นน้ำหรือไอน้ำเข้าไปในอากาศแบบอะเดียแบติก (Adiabatic mixing of water injected into moist air)

เราอาจพบกระบวนการพ่นไอน้ำเข้าไปในอากาศได้ ในระบบปรับอากาศที่ต้องการเพิ่มความชื้น เช่น การพ่นไอน้ำเข้าไปในท่อลมของเครื่องปรับอากาศ ส่วนการพ่นน้ำในอากาศนั้น พบได้ในเครื่องล้างอากาศ (Air washer) ในโรงงานทอผ้า ที่ต้องการอุณหภูมิต่ำแต่ความชื้นสูง ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.17



รูปที่ 1.17 กระบวนการพ่นน้ำหรือไอน้ำแบบอะเดียแบติก

จากกฎสมดุลมวล

มวลอากาศแห้ง: $\dot{m}_{da1} = \dot{m}_{da2} = \dot{m}_{da}$ SI and IP (59)

มวลไอน้ำ: $\dot{m}_{w3} + \dot{m}_{da}W_1 = \dot{m}_{w4} + \dot{m}_{da}W_2$

$$\dot{m}_{w2} - \dot{m}_{w1} = \dot{m}_{w3} - \dot{m}_{w4} = \dot{m}_{da}(W_2 - W_1) \quad \text{SI and IP} \quad (60)$$

จากกฎที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์

วิเคราะห์จากคุณสมบัติอากาศชื้น โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อน จะได้

$$\dot{m}_{da1}h_1 + \dot{m}_{w3}h_{w3} = \dot{m}_{da2}h_2 + \dot{m}_{w4}h_{w4}$$

$$\dot{m}_{da}(h_2 - h_1) = \dot{m}_{w3}h_{w3} - [\dot{m}_{w3} - \dot{m}_{da}(W_2 - W_1)]h_{w4}$$

$$\dot{m}_{da}(h_2 - h_1) = \dot{m}_{w3}(h_{w3} - h_{w4}) + \dot{m}_{da}(W_2 - W_1)h_{w4} \quad \text{SI and IP} \quad (61)$$

กระบวนการพ่นน้ำ; ในกระบวนการพ่นน้ำนั้น อากาศจะถูกทำให้ร้อน หรือเย็นลง หรืออาจจะถูกทำให้ชื้น หรือแห้งก็ได้ ขึ้นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวหยดน้ำที่นำมาพ่น (Mean surface temperature of water droplets, t_s) สำหรับผิวหยดน้ำนั้น เป็นผิวเปียกที่สามารถถ่ายเทได้ทั้งความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝง โดยทิศทางของกระบวนการพ่นน้ำนั้น จะขึ้นกับอุณหภูมิ และความดันไอน้ำ เมื่อพิจารณากระบวนการพ่นน้ำบนแผนภูมิไซโครเมตริกในรูปที่ 1.18 จะเกิดกระบวนการดังต่อไปนี้

กระบวนการ 1-2a: เพิ่มความร้อน และความชื้น (Heating and humidification) ($t_s > t_1$)

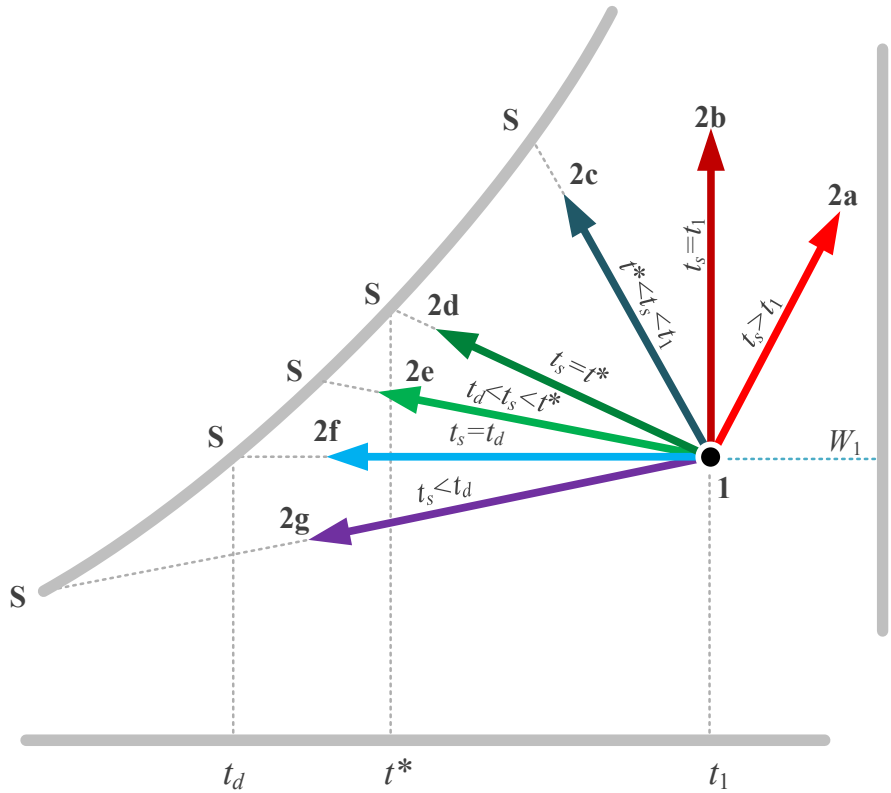
เมื่ออุณหภูมิ t_s มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศที่จุดที่ 1 น้ำจะถ่ายเทความร้อนสัมผัส และจะระเหยกลายเป็นไอน้ำเข้าไปในอากาศทำให้อากาศร้อนและชื้นขึ้น

กระบวนการ 1-2b: เพิ่มความชื้น (humidification) ($t_s = t_1$)

เมื่ออุณหภูมิ t_s มีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศที่จุดที่ 1 น้ำจึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนสัมผัส แต่จะระเหยกลายเป็นไอน้ำเข้าไปในอากาศและทำให้อากาศชื้นขึ้น

กระบวนการ 1-2c: ทำความเย็นและเพิ่มความชื้น (Cooling and humidification) ($t^* < t_s < t_1$)

เมื่ออุณหภูมิ t_s มีค่าระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ (t^*) กับอุณหภูมิอากาศที่จุดที่ 1 น้ำจะถ่ายเทความร้อนสัมผัส (Sensible cooling) และระเหยกลายเป็นไอน้ำเข้าไปในอากาศ ทำให้อากาศเย็นลง และชื้นขึ้น โดยอากาศสุดท้ายจะมีเอนทาลปีสูงขึ้น



รูปที่ 1.18 กระบวนการพ่นน้ำแบบอะเดียแบติก

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

กระบวนการ 1-2d: ทำความเย็น และเพิ่มความชื้น (Cooling and humidification) ($t_s = t^*$)

เมื่ออุณหภูมิ t_s เท่ากับกระเปาะเปียกของอากาศ (t^*) ที่จุดที่ 1 อากาศจะเย็นลง และชื้นขึ้น เช่นเดียวกับกระบวนการก่อนหน้า โดยเส้นนำทางกระบวนการจะเป็นเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่

กระบวนการ 1-2e: ทำความเย็นและเพิ่มความชื้น (Cooling and humidification) ($t_d < t_s < t^*$)

เมื่ออุณหภูมิ t_s มีค่าระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศ (t_d) กับกระเปาะเปียกของอากาศ (t^*) ที่จุดที่ 1 กระบวนการจะเหมือนกับกระบวนการ 1-2c แต่อากาศที่สภาวะสุดท้ายจะมีเอนทาลปีลดลง

กระบวนการ 1-2f: ทำความเย็น (Cooling) ($t_s = t_d$)

เมื่ออุณหภูมิ t_s มีค่าเท่ากับอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศ (t_d) ที่จุดที่ 1 น้ำจะถ่ายเทความร้อนสัมผัสให้กับอากาศ และจะไม่ระเหยสู่อากาศ

กระบวนการ 1-2g: ทำความเย็นและลดความชื้น (Cooling and dehumidification) ($t_s < t_d$)

เมื่ออุณหภูมิ t_s ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศ (t_d) ที่จุดที่ 1 น้ำจะถ่ายเทความร้อนสัมผัสให้กับอากาศ และจะทำให้ไอน้ำในอากาศกลั่นตัวกลายเป็นหยดน้ำ ทำให้อากาศเย็น และแห้ง คล้ายกับกระบวนการทำความเย็น

กระบวนการพ่นน้ำฝอย (Evaporative cooling) หรือไอน้ำ (Steam humidification); ในกรณีที่เป็นการพ่นไอน้ำ หรือการพ่นน้ำฝอยเข้าไปในอากาศด้วยหัวฉีด ที่สามารถทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอได้ทั้งหมดนั้น เมื่อตัดเทอมของมวลน้ำขาออกทิ้งไป สมการที่ 60 และ 61 จึงสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{da}(h_2 - h_1) = \dot{m}_w h_w = \dot{m}_{da}(W_2 - W_1)h_{w3}$$

จากสมการ หากเราทราบสภาวะอากาศขาเข้า และ $\dot{m}_w$ ก็สามารถหาค่า W_2 และ h_2 ได้ จากนั้น ก็นำไปหาจุดตัดบนแผนภูมิไซโครเมตริก ก็จะหาคุณสมบัติของอากาศขาออกได้ แต่ในหลายกรณี เราอาจทราบแค่อุณหภูมิ หรือความชื้นที่สภาวะสุดท้าย โดยที่ไม่ทราบ $\dot{m}_w$ ซึ่งในกรณีนี้จะคำนวณด้วยสมการได้ยาก จึงต้องอาศัยสเกลครึ่งวงกลมมาช่วย

จากสมการที่ 60 และ 61 จะได้

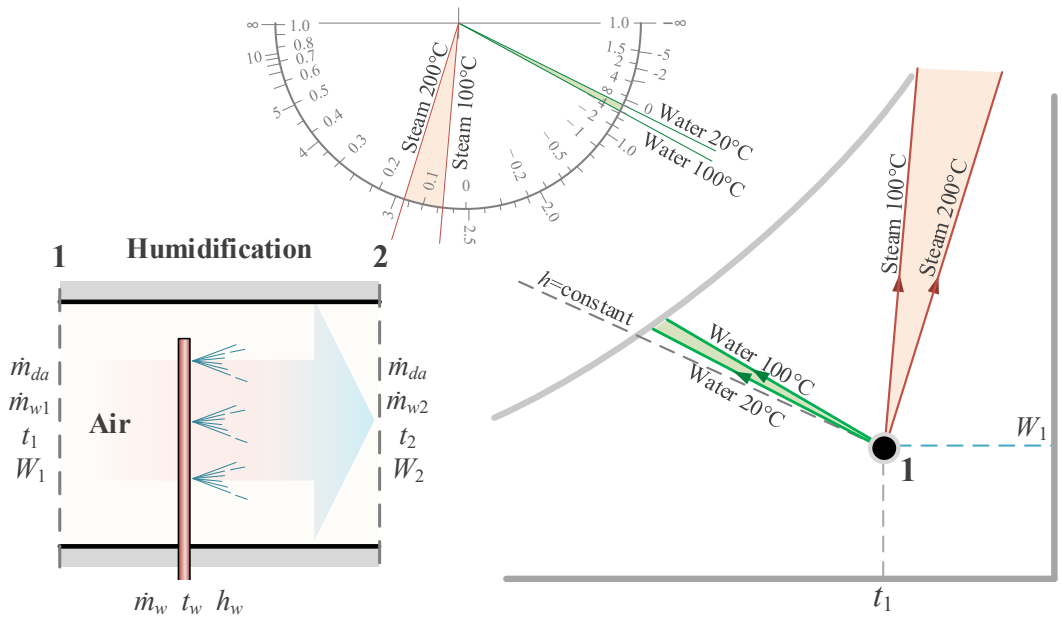
$$\frac{h_2\text{-}h_1}{W_2\text{-}W_1} = h_w$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูป $\Delta h/\Delta W$ ได้ดังนี้

$$\frac{\Delta h}{\Delta W} = h_w \qquad \text{SI and IP} \qquad (62)$$

จากสมการจะเห็นว่า ค่า h_w มีค่าเท่ากับ $\Delta h/\Delta W$ ซึ่งค่า $\Delta h/\Delta W$ นั้น เป็นค่าที่แสดงอยู่บนสเกลครึ่งวงกลม ในแผนภูมิไซโครเมติก ดังนั้น หากเราทราบค่าคุณสมบัติของน้ำหรือไอน้ำที่นำมาพ่นก็สามารถนำไปลากเส้นบนสเกลครึ่งวงกลมเพื่อเป็นเส้นนำทางของกระบวนการได้ กรณีที่นำน้ำมาพ่นกระบวนการก็จะใกล้เคียงกับกระบวนการ 1-2d ในรูปที่ 1.18 แต่ถ้าเป็นการนำไอน้ำที่มีค่า h_g สูงมากมาพ่น ก็จะทำให้เส้นนำทางเอียงตามกระบวนการ 1-2a ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 1.19

จากสมการที่ 62 กรณีที่นำน้ำมาพ่นเข้าสู่ระบบ เมื่อนำค่า h_w ซึ่งมีค่าประมาณ $4.186t$ (หรือ $t - 32$ ในหน่วย IP) มาคูณกับค่า ΔW ซึ่งก็มีค่าน้อยมาก ก็จะได้ Δh น้อยมาก หรือ h_2 และ h_1 มีค่าใกล้เคียงกัน ($h \approx$ constant) นั่นเอง ซึ่งก็จะคล้ายกับกระบวนการอุณหภูมิกระเปาะเปียก ดังนั้น อุณหภูมิกระเปาะเปียกของกระบวนการพ่นน้ำจึงมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับพัดลมไอน้ำที่พ่นน้ำเข้าไปในอากาศนั้น สามารถลดอุณหภูมิ และเพิ่มความชื้นให้กับอากาศได้ แต่จะไม่ใช่กระบวนการแบบอะเดียแบติก เพราะมีการถ่ายเทความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมระหว่างกระบวนการ



รูปที่ 1.19 ตัวอย่างเส้นนำทางกระบวนการพ่นน้ำ หรือไอน้ำ แบบอะเดียแบติก

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

ในกรณีต้องการประมาณค่า t_2 นั้น เราสามารถนำสมการเอนทาลปีจำเพาะของอากาศชื้น (สมการที่ 32) มาแทนลงในสมการที่ 61 จะได้

$$1.006t_2 + W_2(2501 + 1.86t_2) - (1.006t_1 + W_1(2501 + 1.86t_1)) = \Delta W h_w \qquad \text{SI}$$

$$1.006(t_2 - t_1) + 2501\Delta W + 1.86(t_2W_2 - t_1W_1) = \Delta W h_w \qquad \text{SI}$$

$$0.240t_2 + W_2(1061 + 0.444t_2) - (0.240t_1 + W_1(1061 + 0.444t_1) = \Delta W h_w \qquad \text{IP}$$

$$0.240(t_2 - t_1) + 1061\Delta W + 0.444(t_2W_2 - t_1W_1) = \Delta W h_w \qquad \text{IP}$$

เมื่อ $\Delta W = W_2 - W_1$

สำหรับการประมาณค่า t_2 จะกำหนดให้ $1.86(t_2W_2 - t_1W_1) \approx 1.86t_m\Delta W$ (หรือ $0.444(t_2W_2 - t_1W_1) \approx 0.444t_m\Delta W$ ในหน่วย IP) และในระบบปรับอากาศทั่วไป จะกำหนดให้ $t_m \approx 24^\circ$C (75°F) แทนค่าทั้งหมดลงในสมการ จะได้

$$t_2 \approx t_1 + (h_w - 2546)\Delta W \qquad \text{SI} \qquad (63)$$

$$t_2 \approx t_1 + (h_w - 1094)\Delta W/0.24 \qquad \text{IP} \qquad (63)$$

ค่าที่ได้จากสมการ เป็นค่าประมาณในเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งค่าที่ได้จะไม่สามารถใช้งานได้ ถ้าจุดที่ 2 เลยจุดอิ่มตัวของอากาศไปแล้ว

ตัวอย่างที่ 1.6 อากาศภายนอกที่ 44°CDB, 24%RH ปริมาณ 3600 m^3/hr ไหลผ่านพัดลมไอน้ำที่พ่นน้ำเข้าไปในอากาศ ถ้าต้องการลดอุณหภูมิอากาศลงเหลือ 28°C จะต้องพ่นน้ำที่ปริมาณเท่าใด

<u>โจทย์กำหนด</u> $t_1 = 44^\circ$C, 24%RH, $Q_1 = 3600/3600 = 1.0$ m^3/s, $t_2 = 28^\circ$C

<u>โจทย์ให้หา</u> $\dot{m}_w$

<u>กำหนดให้</u> $p = 101.325$ kPa และอุณหภูมิน้ำที่พ่น (t_w) = 27°C และสมมุติให้เป็นกระบวนการอะเดียแบติก

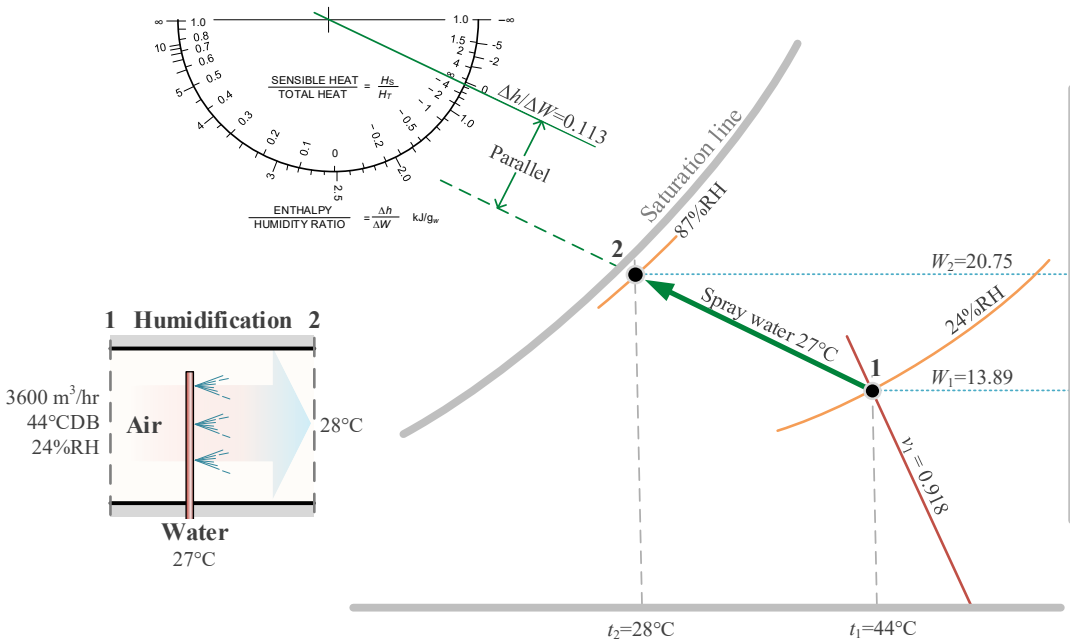
<u>วิธีทำ</u> จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ได้ค่า $v_1 = 0.918$ m^3/kg$_{da}$, $W_1 = 13.89$ g/kg$_{da}$, $h_1 = 80.13$ kJ/kg$_{da}$,

○ หา h_w และ $\dot{m}_{da}$ ขาเข้าได้ดังนี้

$$h_w = 4.186t_w = 4.186\times27 = 113.0 \text{ kJ/kg}_w \text{ หรือ } 0.113 \text{ kJ/g}_w$$

$$\dot{m}_{da} = Q_1/v_1 = 1/0.918 = 1.089 \text{ kg/s}$$

จากสมการที่ 62 จะได้ $\Delta h/\Delta W = h_w = 0.113$ kJ/g$_w$ นำไปลากเส้นนำทางบนสเกลครึ่งวงกลม จากนั้นลากเส้นตรงจากจุดที่ 1 ขนานกับเส้นนำทาง ไปตัด $t_2 = 28^\circ$C บนแผนภูมิไซโครเมตริก จะได้กระบวนการ ดังรูปที่ 1.20



รูปที่ 1.20 ประกอบตัวอย่างที่ 1.6

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

○ จากแผนภูมิไซโครเมตริก ค่า $W_2 = 20.75$ g/kg$_{da}$, ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 87%RH นำไปหาปริมาณการพ่นน้ำจากสมการที่ 60 จะได้

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{da}(W_2 - W_1) = 1.089(20.75 - 13.89)$$

$$\dot{m}_w = 7.47 \text{ g/s}$$

ตัวอย่างที่ 1.7 อากาศที่ 24˚CDB, 30%RH ปริมาณ 3600 m^3/hr ต้องการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้กับอากาศที่ 50%RH ด้วยการพ่นไอน้ำ 110˚C เข้าสู่ระบบ ให้หาปริมาณการพ่นไอน้ำ และอุณหภูมิสุดท้าย

<u>โจทย์กำหนด</u> $t_1 = 24$˚C, $\phi_1 = 30$%RH, $Q_1 = 3600/3600 = 1.0$ m^3/s, $\phi_2 = 50$%RH, $t_w = 110$˚C

<u>โจทย์ให้หา</u> $\dot{m}_w$ และ t_2

<u>กำหนดให้</u> $p = 101.325$ kPa

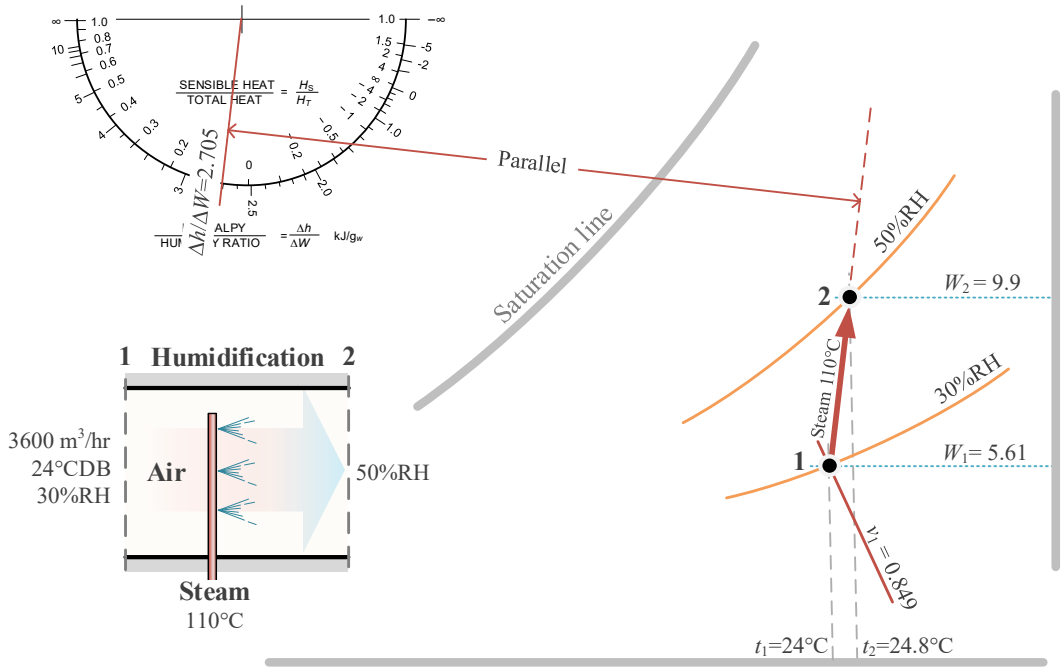
<u>วิธีทำ</u> จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ได้ ค่า $v_1 = 0.849$ m^3/kg_{da}, $W_1 = 5.61$ g/kg_{da}, $h_1 = 38.42$ kJ/kg_{da}

- จากสมการ

$$h_w = h_g = 2501+1.86t_w$$
$$= 2501+1.86\times110$$
$$= 2705 \text{ kJ/kg}_w \text{ หรือ } 2.705 \text{ kJ/g}_w$$
$$\dot{m}_{da} = Q_1/v_1 = 1/0.849 = 1.177 \text{ kg/s}$$

- จากสมการที่ 62 จะได้ $\Delta h/\Delta W = h_g = 2.705$ kJ/g_w นำไปลากเส้นนำทางบนสเกลครึ่งวงกลม จากนั้นลากเส้นตรงจากจุดที่ 1 ขนานเส้นกับนำทาง ไปตัดความชื้นสัมพัทธ์ที่ $\phi_2 = 50$%RH บนแผนภูมิไซโครเมตริก จะได้เส้นกระบวนการดัง<u>รูปที่ 1.21</u>
- จากแผนภูมิไซโครเมตริก ค่า $t_2 = 24.8$˚C, $W_2 = 9.9$ g/kg_{da}, นำไปหาปริมานการพ่นไอน้ำด้วยสมการที่ 60 จะได้

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{da}(W_2 - W_1) = 1.177(9.9 - 5.61)$$
$$\dot{m}_w = 5.051 \text{ g/s}$$



รูปที่ 1.21 ประกอบตัวอย่างที่ 1.7

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

1.7.6 กระบวนการให้ความร้อน และเพิ่มความชื้นในอากาศแบบอะเดียแบติก (Heating and humidification process)

เราจะพบกระบวนการให้ความร้อน และเพิ่มความชื้นในอากาศ ได้ในระบบปรับอากาศที่ต้องการความแม่นยำสูง ซึ่งอาจจะต้องมีการชดเชยความร้อน และความชื้นในช่วงภาระบางส่วน (Part load) กระบวนการดังกล่าว สามารถวิเคราะห์แยกกันระหว่างกระบวนการให้ความร้อน กับการพ่นไอน้ำ หรือจะวิเคราะห์รวมกันก็ได้ ในกรณีที่เราวิเคราะห์รวม จะได้สมการดังต่อไปนี้

จากกฎสมดุลมวล

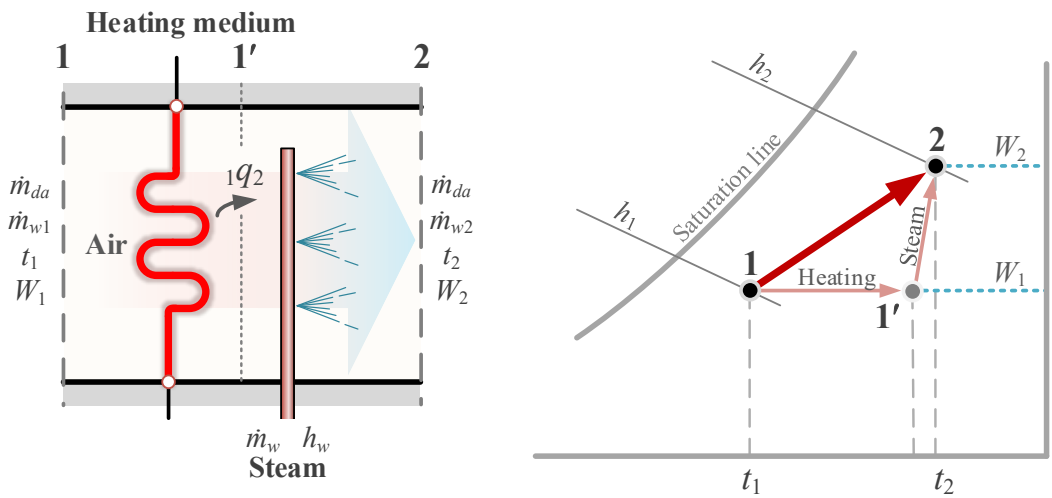
มวลอากาศแห้ง: $\dot{m}_{da1} = \dot{m}_{da2} = \dot{m}_{da}$ SI and IP (64)

มวลไอน้ำ: $\dot{m}_{da1}W_1 + \dot{m}_w = \dot{m}_{da2}W_2$ SI and IP (65)

จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์

วิเคราะห์จากคุณสมบัติอากาศชื้น จะได้

$$\dot{m}_{da1}h_1 + \dot{m}_w h_w + {}_1q_2 = \dot{m}_{da2}h_2 \qquad \text{SI and IP} \qquad (66)$$



รูปที่ 1.22 กระบวนการให้ความร้อนและเพิ่มความชื้นในอากาศ

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

จากสมการที่ 64, 65 และ 66 จัดรูปใหม่ จะได้

$$\frac{\Delta h}{\Delta W} = {}_1q_2/\dot{m}_w + h_w \qquad \text{SI and IP} \qquad (67)$$

จากสมการจะเห็นว่า สมการที่ 67 ก็ยังคงจัดให้อยู่ในรูปของ $\Delta h/\Delta W$ บนสเกลครึ่งวงกลมของแผนภูมิไซโครเมตริกได้

ตัวอย่างที่ 1.8 อากาศที่ 13°CDB, 90%RH ปริมาณ 7200 m^3/hr ไหลผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อนและเพิ่มความชื้นด้วยการพ่นไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 110°C จนอากาศมีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง 20°C, 65%RH ให้หาปริมาณการพ่นไอน้ำ ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ และอุณหภูมิอากาศที่ออกจากคอยล์ร้อน

<u>โจทย์กำหนด</u> $t_1 = 13$°C, $\phi_1 = 90$%RH, $Q_1 = 7200/3600 = 2.0$ m^3/s, $t_2 = 20$°C, $\phi_2 = 65$%RH, $t_w = 110$°C

<u>โจทย์ให้หา</u> $\dot{m}_w$, ${}_1q_2$ และ $t_{1'}$

<u>กำหนดให้</u> $p = 101.325$ kPa

<u>วิธีทำ</u> จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ได้ ค่า $v_1 = 0.822$ m^3/kg_{da}, $W_1 = 8.48$ g/kg_{da}, $h_1 = 34.49$ kJ/kg_{da}, $W_2 = 9.58$ g/kg_{da}, $h_2 = 44.44$ kJ/kg_{da}

- จากสมการ

$$h_w = h_g = 2501 + 1.86t_w = 2501 + 1.86\times110 = 2705 \text{ kJ/kg}_w \text{ หรือ } 2.705 \text{ kJ/g}_w$$

$$\dot{m}_{da} = Q_1/v_1 = 2/0.822 = 2.43 \text{ kg/s}$$

- จากสมการที่ 65 หาอัตราการพ่นไอน้ำได้ดังนี้

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{da}(W_2 - W_1) = 2.43(9.58 - 8.48) = 2.68 \text{ g/s หรือ } 0.00268 \text{ kg/s}$$

- จากสมการที่ 66 หาอัตราการให้ความร้อนกับอากาศ ได้ดังนี้

$${}_1q_2 = \dot{m}_{da2}h_2 - \dot{m}_{da1}h_1 - \dot{m}_w h_w = 2.43(44.44 - 34.49) - 0.00268\times2705$$

$${}_1q_2 = 16.96 \text{ kW}$$

- จากสมการความร้อนสัมผัส สมการที่ 39 จะได้

$${}_1q_2 = q_s = \dot{m}_{da}\,(1.006 + 1.86W)(t_{1'} - t_1)$$

$$t_{1'} = 13 + 16.96/[2.43\times(1.006+1.86\times8.48/1000)]$$

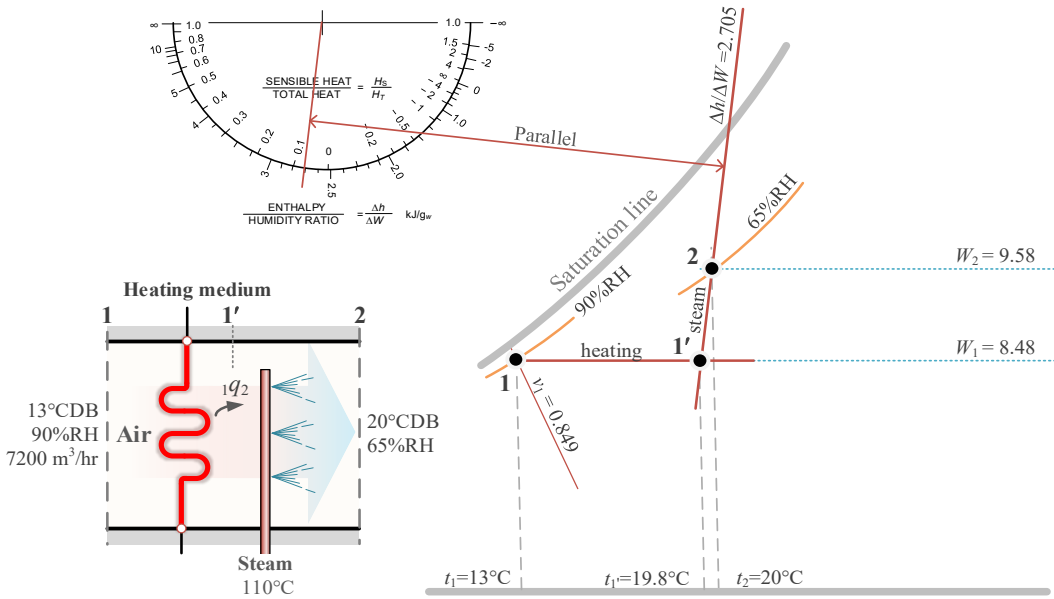
$$t_{1'} = 19.82°\text{C}$$

เราสามารถหาอุณหภูมิ $t_{1'}$ แบบรวดเร็วได้อีกวิธีหนึ่ง โดยอาศัยสเกลครึ่งวงกลมร่วมกับการพิจารณากระบวนการให้ความร้อนและกระบวนการพ่นไอน้ำแยกออกจากกัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ลากเส้นนำทางที่ $\Delta h/\Delta W = h_g = 2.705$ kJ/g_{da} แล้วลากเส้นกระบวนการพ่นไอน้ำจากจุดที่ 2 ให้ขนานกับเส้นนำทาง ดังแสดงใน<u>รูปที่ 1.23</u>

2) ลากเส้นกระบวนการความร้อนสัมผัสจากจุดที่ 1 ไปทางขวามือ จนตัดกับเส้นกระบวนการพ่นไอน้ำ ซึ่งจุดตัดที่ได้คือจุด 1′ ดังแสดงในรูปที่ 1.23

3) อ่านค่า $t_{1'}$ เพื่อไปคำนวณหา ${}_1q_2$ ด้วยสมการที่ 39



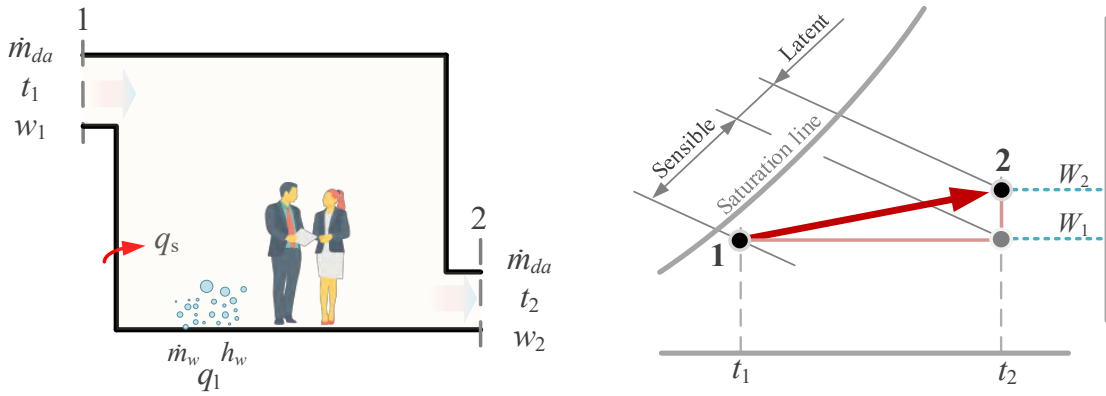
รูปที่ 1.23 ประกอบตัวอย่างที่ 1.7

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

จากรูป จะเห็นว่า เราสามารถหาจุด 1′ ได้ไม่ยาก เหมาะสำหรับคนที่ชอบใช้แผนภูมิเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อเราได้ค่า $t_{1'}$ แล้ว เราสามารถหาค่า ${}_1q_2$ ได้โดยไม่ต้องหาเอนทาลปีของอากาศ แต่ค่าที่ได้อาจจะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากเป็นการอ่านค่าบนแผนภูมิ

1.7.7 กระบวนการให้ความร้อนและเพิ่มความชื้นในห้องปรับอากาศ (Space heat absorption and moist air moisture gains)

ในห้องปรับอากาศนั้น เรามักจะต้องหาปริมาณลมจ่ายและสภาวะอากาศที่จ่ายเข้าไปในห้องปรับอากาศเพื่อดูดซับความร้อนและความชื้นในห้องปรับอากาศ กระบวนการในห้องปรับอากาศนั้นจะเหมือนกับกระบวนการให้ความร้อนและเพิ่มความชื้นให้กับอากาศในหัวข้อที่ผ่านมา ดังแสดงในรูปที่ 1.24 สำหรับสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น เราจะใช้สมการเดียวกับสมการของกระบวนการให้ความร้อนและเพิ่มความชื้นในอากาศ แต่จะแสดงให้อยู่ในเทอมของความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงแทน



รูปที่ 1.24 กระบวนการในห้องปรับอากาศ

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

จากสมการที่ 66 เขียนให้อยู่ในรูปของความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝง ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{da}h_1 + q_s + \Sigma(\dot{m}_w h_w) = \dot{m}_{da}h_2$$

$$q_s + q_l = \dot{m}_{da}(h_2 - h_1)$$

หรือ

$$q_t = q_s + q_l \qquad \text{SI and IP} \qquad (68)$$

เมื่อ q_t คือ ความร้อนรวมที่อากาศได้รับ (Total heat) โดย $q_t = \dot{m}_{da}\,(h_2 - h_1)$

q_s คือ ความร้อนสัมผัส (Sensible heat)

q_l คือ ความร้อนแฝง (Latent heat) โดย $q_l = \Sigma(\dot{m}_w\, h_w)$

จัดรูปให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนความร้อนสัมผัสจะได้

$$\frac{H_s}{H_t} = q_s/(q_s + q_l) \qquad \text{SI and IP} \qquad (69)$$

เมื่อ H_s/H_t คือ อัตราส่วนความร้อนสัมผัสของห้อง (Room sensible heat ratio, RSHR)

จากสมการจะเห็นว่า เราสามารถใช้สเกลครึ่งวงกลมบนแผนภูมิไซโครเมตริกมาช่วยวิเคราะห์กระบวนการได้เช่นเดียวกัน (ในหนังสือของ Carrier จะใช้คำว่า factor แทนคำว่า ratio)

ตัวอย่างที่ 1.9 มีความร้อนสัมผัสเข้ามาในห้องปรับอากาศ 9 kW และมีความร้อนแฝงเข้ามาในห้อง 3.83 kW ต้องการนำอากาศเย็นเข้ามาในห้องที่ 15°CDB เพื่อทำให้ห้องปรับอากาศมีอุณหภูมิ 25°CDB, 56%RH ให้หาอัตราการจ่ายอากาศเข้ามาในห้องปรับอากาศ

<u>โจทย์กำหนด</u> t_1 = 15°C, t_2 = 25°CDB, ϕ_2 = 56%RH, q_s = 9 kW, q_l = 3.83 kW

<u>โจทย์ให้หา</u> $\dot{m}_{da}$ และอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) ของอากาศ

<u>กำหนดให้</u> p = 101.325 kPa

<u>วิธีทำ</u> จากสมการที่ 69 จะได้

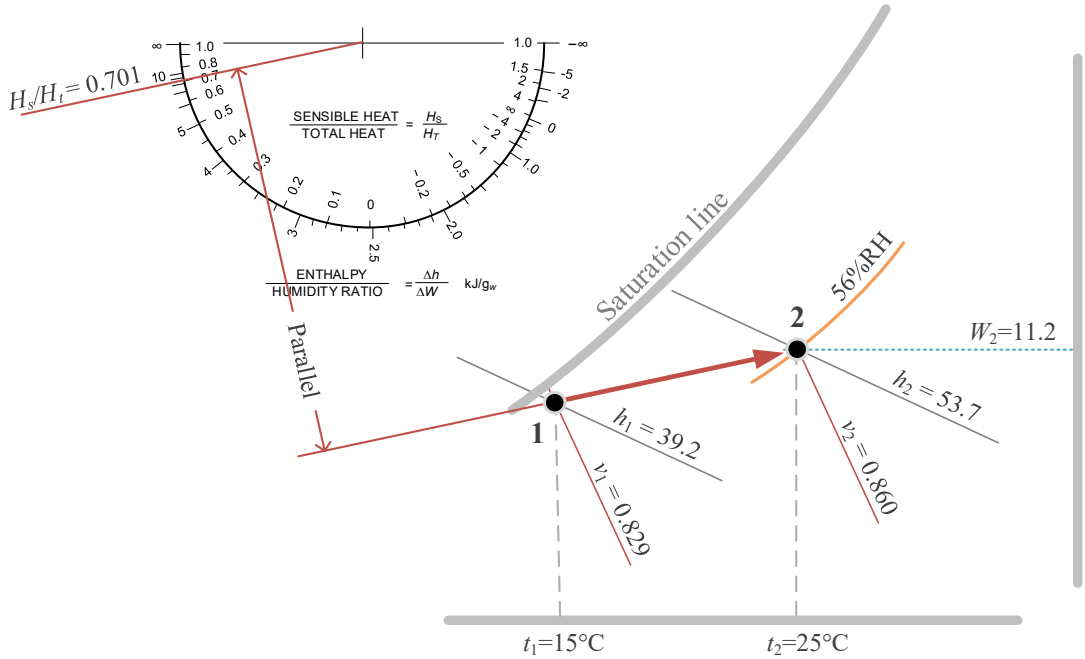
$$\frac{H_s}{H_t} = q_s/(q_s + q_l) = 9/(9 + 3.83) = 0.701$$

- นำค่าที่ได้ ไปลากเส้นนำทางบนสเกลครึ่งวงกลม จากนั้นลากเส้นตรงจากจุดที่ 2 ขนานไปกับเส้นนำทาง ไปตัด t_1 = 15°C บนแผนภูมิไซโครเมตริกจะได้เส้นกระบวนการ ดังรูปที่ 1.25
- จากแผนภูมิไซโครเมตริก อ่านค่า v_1 = 0.829 m^3/kg$_{da}$, h_1 = 39.2 kJ/kg$_{da}$, v_2 = 0.860 m^3/kg$_{da}$, h_2 = 53.7 kJ/kg$_{da}$ และสามารถหาค่า $\dot{m}_{da}$ ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{da} = (q_s + q_l)/(h_2 - h_1) = (9 + 3.83)/(53.7 - 39.2) = 0.885 \text{ kg/s}$$

- หาอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) ของอากาศเข้าห้อง ได้ดังนี้

$$Q_1 = \dot{m}_{da} v_1 = 0.885 \times 0.829 = 0.732 \text{ m}^3/\text{s หรือ } 2636 \text{ cmh}$$



รูปที่ 1.25 รูปประกอบตัวอย่างที่ 1.9

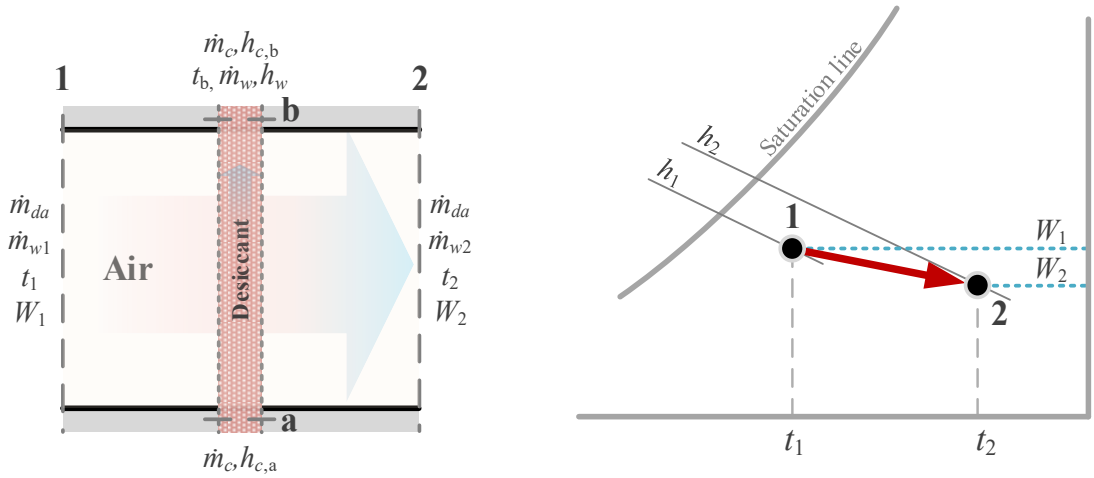
ที่มา : ผู้เขียน (2566)

1.7.8 กระบวนการลดความชื้นในอากาศแบบอะเดียแบติกด้วยสารเคมี (Chemical or desiccants humidification)

กระบวนการนี้ พบได้ในเครื่องดูดความชื้นแบบใช้สารเคมี (Desiccant type humidifier) โดยใช้สารดูดความชื้น เช่น ซิลิกาเจล แคลเซียมซัลเฟต หรือลิเทียมคลอไรด์ สารดูดความชื้นนั้นแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แบบที่ดูดซับความชื้นแล้วเก็บไว้ที่ช่องว่างระหว่างผิวของสาร สารดูดความชื้นเหล่านี้เรียกว่า ตัวดูดซับชนิดของแข็ง (Solid adsorbent) เช่น ซิลิกาเจล เป็นต้น ส่วนอีกประเภทเป็นของเหลวหรือจากของแข็งซึ่งเปลี่ยนเป็นของเหลวเมื่อดูดซับความชื้น สารดูดความชื้นเหล่านี้จะถูกเรียกว่า สารดูดซับ (Absorbent) เช่น ลิเทียมคลอไรด์ โซเดียมคลอไลด์ หรือเกลือแกง

เครื่องดูดความชื้นแบบนี้ จะดูดความชื้นได้มาก โดยสามารถลดอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศได้ถึง -15°C (5°F) ซึ่งจะใช้ได้ดีกับระบบปรับอากาศ ที่ต้องการความชื้นต่ำมาก ๆ เช่น งานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการผลิตยา แต่เครื่องแบบนี้จะมีราคาค่อนข้างแพง

กระบวนการลดความชื้นในอากาศนั้นจะเกิดขึ้นเมื่ออากาศชื้นไหลผ่านสารดูดความชื้น ไอน้ำในอากาศจะถูกดูดออกไปพร้อมกับสารดูดทำให้อัตราส่วนความชื้นขาออกลดลง โดยสารดูดความชื้นจะคายพลังงานให้กับอากาศจนอากาศขาออกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.26



รูปที่ 1.26 กระบวนการลดความชื้นในอากาศด้วยสารเคมี

ที่มา : ผู้เขียน (2566)

เมื่อวิเคราะห์กระบวนการดังกล่าวจะได้สมการดังนี้

จากกฎสมดุลมวล

มวลอากาศแห้ง: $\dot{m}_{da1} = \dot{m}_{da2} = \dot{m}_{da}$ SI and IP (70)

มวลไอน้ำ: $\dot{m}_{da1}W_1 + \dot{m}_w = \dot{m}_{da2}W_2$ SI and IP (71)

มวลสารดูดความชื้น: $\dot{m}_{c,a} = \dot{m}_{c,b} = \dot{m}_c$ SI and IP (72)

จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\dot{m}_{da1}h_1 + \dot{m}_c h_{c,a} = \dot{m}_{da2}h_2 + \dot{m}_c h_{c,b} + \dot{m}_w h_w \quad \text{SI and IP} \quad (73)$$

จากสมการที่ 70 ถึง 73 จัดรูปใหม่ โดยให้น้ำที่ออกไปกับสารดูดความชื้น มีอุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิอากาศขาออก จะได้

$$\frac{\Delta h}{\Delta W} = h_w - h_c \quad \text{SI and IP} \quad (74)$$

เมื่อ $h_c = h_{c,a} - h_{c,b}$ หรือเรียกว่า ค่าการดูดซับความร้อน (Adsorption heat) มีหน่วยเป็น kJ/kg (Btu/lb ในหน่วย IP)

จากสมการที่ 74 จะเห็นว่า สมการยังคงจัดให้อยู่ในรูปของ $\Delta h/\Delta W$ เช่นเดิม ดังนั้นเราจึงสามารถใช้สเกลครึ่งวงกลม เป็นตัวช่วยในการออกแบบได้เช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา

ในกรณีต้องการประมาณค่า t_2 เราสามารถนำค่าเอนทาลปีจำเพาะของอากาศชื้นจากสมการที่ 32 และเอนทาลปีของน้ำที่ถูกดูดออกไป $h_w \approx 4.186t$ ($h_w \approx t - 32$ ในหน่วย IP) มาแทนลงในสมการที่ 73 จะได้

$$1.006t_2 + W_2(2501 + 1.86t_2) - (1.006t_1 + W_1(2501 + 1.86t_1)) = \Delta W(4.186t_b - h_c) \quad \text{SI}$$

$$1.006(t_2 - t_1) + 2501\Delta W + 1.86(t_2W_2 - t_1W_1) = \Delta W(4.186t_b - h_c) \quad \text{SI}$$

$$0.240t_2 + W_2(1061 + 0.444t_2) - (0.240t_1 + W_1(1061 + 0.444t_1) = \Delta W(t_b - 32 - h_c) \quad \text{IP}$$

$$0.240(t_2 - t_1) + 1061\Delta W + 0.444(t_2W_2 - t_1W_1) = \Delta W(t_b - 32 - h_c) \quad \text{IP}$$

เมื่อ $\Delta W = W_2 - W_1$ และ t_b คืออุณหภูมิของสารดูดความชื้นขาออก

สำหรับการประมาณค่า t_2 จะกำหนดให้ $1.86(t_2W_2 - t_1W_1) \approx 1.86t_m\Delta W$ (หรือ $0.444\ (t_2W_2 - t_1W_1) \approx 0.444t_m\Delta W$ ในหน่วย IP) ซึ่งในระบบปรับอากาศทั่วไป จะกำหนดให้ $t_m \approx 24^\circ$C (75°F) จากนั้นแทนค่าทั้งหมดลงในสมการจะได้

$$t_2 \approx t_1 + \Delta W(4.186t_b - 2546 - h_c)/1.025 \quad \text{SI} \quad (75)$$

$$t_2 \approx t_1 + \Delta W(t_b - 1062 - h_c)/0.24 \quad \text{IP} \quad (75)$$

ปัจจัยที่จะทำให้ $\Delta h/\Delta W$ บนสเกลครึ่งวงกลมเบี่ยงเบนมากคือ ค่าการดูดซับความร้อน (Adsorption heat, h_c) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประเภทของสารดูดความชื้น และความชื้นเริ่มต้นของสารดูดความชื้น โดยทั่วไปแล้ว สารดูดความชื้นจะมีค่า h_c ประมาณ 100 – 800 kJ/kg ตัวอย่างเช่น จากข้อมูลของบริษัทมุนเตอร์ส (Munters) ที่ผลิตเครื่องดูดความชื้นแบบรวงผึ้งหมุน (Rotary Honeycomb) ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารดูดความชื้น มีความเร็วของอากาศผ่านสารเท่ากับ 2.5 m/s (500 fpm) และมีอุณภูมิของอากาศ ที่นำมาระบายความชื้นให้กับสารดูดความชื้น (Reactivation temperature) ประมาณ 120 – 150°C จะมีค่า h_c ประมาณ 700 kJ/kg แต่ถ้าอากาศที่นำมาระบายความชื้น มีอุณหภูมิประมาณ 90°C ก็จะมีค่า h_c ประมาณ 400 kJ/kg (Munters, 2022) เท่านั้น