การนำเครื่องเติมอากาศแบบ DOAS มาใช้งานในระบบปรับอากาศและระบายอากาศ (DEDICATED OUTDOOR AIR SYSTEM (DOAS) FOR HVAC SYSTEM)

ผู้เขียนบทความ

นายเอกมล เจียรประดิษฐ
กรรมการวิชาการ สมาคมปรับอากาศแห่งประเทศไทย

นายวนา อนุตรอำไพ Wana Anuttaraumphi
Managing Director Climate Innovation Co., Ltd.
CAI Engineering Co., Ltd.

เนื่องจากระบบ HVAC มีความจำเป็นต้องเติมอากาศจากภายนอกอาคารเข้าสู่พื้นที่ใช้งานในอาคาร ด้วยเหตุผลหลัก 3 ประการ ได้แก่

1) ให้เป็นไปตาม มาตรฐานการระบายอากาศทั้งมาตราฐานสากล เช่น ASHRAE 62.1 หรือตามกฎหมายของแต่ละประเทศ เช่น พรบ. ควบคุมอาคาร เรื่องการระบายอากาศ สำหรับประเทศไทย เป็นต้น

2) เพื่อชดเชยอากาศให้เพียงพอกับการระบายอากาศทิ้งออกจากพื้นที่ พร้อมทั้งทำให้เกิดการควบคุมความดันภายในพื้นที่นั้นๆ เช่น ห้องปฏิบัติการ (Laboratory) เป็นต้น

การเติมอากาศในข้อ 1) , 2) ทำให้เกิดการระบายอากาศ เพื่อให้ได้คุณภาพอากาศภายในอาคาร ให้มีคุณภาพดีเป็นที่ยอมรับได้ หรือเพื่อความปลอดภัยของผู้อยู่อาศัย, ผู้ทำงานในพื้นที่เป็นหลัก ด้วยการเติมอากาศจากภายนอกเข้ามาผสมกับอากาศในพื้นที่ เพื่อเป็นการเจือจาง, ลดความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนในอากาศ (Dilution)

3) เพื่อทำความเย็นในรูปแบบ Total heat (Latent heat and Sensible heat) เมื่อต้องใช้ควบคู่กับระบบปรับอากาศที่มีการเลือกใช้อุปกรณ์ที่ไม่สามารถรับภาระความชื้น (Latent load) ในพื้นที่ปรับอากาศได้ เช่น อุปกรณ์ Radiant Panel , Chilled Beam เป็นต้น

สำหรับการเติมอากาศจากภายนอกอาคารให้กับพื้นที่ปรับอากาศ โดยเฉพาะพื้นที่ที่ต้องควบคุมความชื้น และความดันภายในห้องนั้น การเติมอากาศจำเป็นต้องมีทั้งอัตราการเติมที่ถูกต้องตามการออกแบบ พร้อมกับการปรับสภาพ, สภาวะของอากาศเติมนี้ (MAKE UP AIR) ให้เหมาะสมกับสภาวะของพื้นที่ในอาคาร และยังต้องคำนึงถึงเรื่องความสะอาดของอากาศเติม เนื่องจากมลพิษและฝุ่นจากทางอากาศภายนอกอาคาร และรวมถึงเรื่องการประหยัดพลังงานจากส่วนการเติมอากาศเอง ก็เป็นเรื่องสำคัญที่ต้องมีการจัดการ เพื่อตอบสนองต่อเรื่องการลดสภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นเรื่องสำคัญในระดับสากล

DEDICATED OUTDOOR AIR SYSTEM (DOAS) เป็นอุปกรณ์การเติมอากาศภายนอกเข้าสู่อาคาร ที่ถูกนำมาใช้ เพื่อตอบสนองต่อความจำเป็นของการเติมอากาศดังกล่าว ซึ่ง DOAS มีหน้าที่ในการจัดการกับอากาศภายนอก เมื่อจะต้องถูกเติมเข้าสู่อาคาร ดังนี้

1. เติมอากาศด้วยอัตราการเติมอากาศให้เป็นไปตามค่าที่ออกแบบไว้

2. ปรับสภาวะของอากาศเติม ให้เป็นไปตามค่าตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งมักถูกกำหนดให้เป็นค่า Dew point ที่ต่ำกว่า Room dew point จึงจะสามารถรับ moisture load ในพื้นที่ได้ ทั้งนี้ก็เพื่อควบคุมระดับความชื้นในพื้นที่ให้ได้ตามต้องการ

3. กรองอากาศให้มีความสะอาดของอากาศเพียงพอที่จะป้องกันผู้อยู่ในอาคารให้ปลอดภัยจากมลพิษนอกอาคาร ด้วยการเลือกติดตั้งแผ่นกรองอากาศ(air filter) ให้สามารถกรองฝุ่นออกจากอากาศภายนอกก่อนเติมเข้าสู่อาคาร ซึ่งมีคำแนะนำจากผู้ผลิต ให้ติดตั้ง air filter ระดับ pre filter (G4, MERV 7) ร่วมกับ fine filter, medium filter (F8, MERV14) เพื่อกรองฝุ่น PM 2.5

ดังนั้น DOAS จึงเข้ามาทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เติมอากาศ สำหรับระบบปรับอากาศ โดยการเติมอากาศเข้าไปในอาคารไม่ว่าจะเป็นการจ่ายโดยตรงไปยังพื้นที่ที่ต้องการอากาศเติม หรือจ่ายไปให้กับระบบปรับอากาศโดยผ่านเครื่องปรับอากาศในพื้นที่ ซึ่งมีข้อแนะนำการจ่ายลมในรูปแบบต่างๆในลำดับถัดไป

การเติมอากาศภายนอกเข้าไปในอาคารที่มีการปรับอากาศ จำเป็นจะต้องปรับสภาวะของอากาศภายนอก(outdoor air condition)เสียก่อน จนกระทั่งได้ค่าถูกต้องตามที่ออกแบบ ก่อนจะเติมเข้าไปในอาคาร แต่ด้วยความที่สภาวะอากาศภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างกว้าง เช่น ความแตกต่างของสภาวะอากาศ อันได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นของช่วงกลางวันและกลางคืน และรวมถึงความแตกต่างของแต่ละฤดูกาลในรอบปี ดังนั้นการออกแบบ และเลือกขนาดความสามารถการทำความเย็น (Cooling capacity) ของอุปกรณ์DOAS จึงจะต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าว เพื่อให้DOAS สามารถจ่ายอากาศเติมให้ได้ค่า dew point ตามที่ออกแบบ ได้ในทุกช่วงเวลาของวัน ตลอดทั้งปี

คุณสมบัติที่ดีของ DOAS ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานในระบบปรับอากาศ

1. สามารถควบคุมความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ลดความยุ่งยากในการออกแบบ และการควบคุม
3. ประหยัดพลังงาน

1. สามารถควบคุมความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การเติมอากาศภายนอกเข้าสู่อาคารในส่วนของงานปรับอากาศและระบายอากาศ จำเป็นจะต้องทำการปรับสภาพโดยการลดความชื้น(Latent load, moisture load) ของอากาศภายนอกทั้งหมดก่อนจะเติมเข้าอาคาร ซึ่งLatent load ส่วนของอากาศภายนอกนี้เป็นสัดส่วนมากที่สุด มีอัตราส่วนเป็น 80% ของภาระLatent loadทั้งหมดของระบบปรับอากาศ ส่วนอีก 20% เป็นLatent load จากภายในอาคารรวมกับอากาศที่รั่วเข้ามาในอาคารทั้งจากผนังอาคารและประตูเข้าออกอาคาร

ดังนั้นเมื่อ DOAS สามารถจัดการ Latent Load ของอากาศภายนอกได้ดี จึงทำให้การควบคุมระดับความชื้นในพื้นที่ให้อยู่ในกรอบที่ต้องการเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

2. ลดความยุ่งยากในการออกแบบและควบคุม

แนวคิดการออกแบบที่นำDOASมาเป็นส่วนประกอบในระบบปรับอากาศนั้น ภารกิจหลักของ DOAS คือการจัดการ Latent Load ของอากาศเติม โดยยังไม่ต้องคำนึงถึง Sensible Load ในพื้นที่

ดังนั้นการควบคุม DOAS จึงลดความซับซ้อนเพราะได้รับมอบหมายให้ทำหน้าที่จัดการเฉพาะ Latent load แต่เพียงอย่างเดียว ด้วยการกำหนดเป็นค่า Dew point ทำให้สามารถที่จะจ่ายอากาศเติมให้ตรงตามความต้องการไม่ว่าสภาวะอากาศภายนอก (Outdoor) จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ส่วนการเรื่องอุณหภูมิในพื้นที่ คือ Sensible load จะถูกจัดการด้วยเครื่องปรับอากาศหรืออุปกรณ์ประเภท Radiant cooling, Chilled beam จึงทำให้การควบคุมค่าความชื้นและค่าอุณหภูมิทำได้อย่างแม่นยำ เพราะมีอุปกรณ์แยกกันควบคุมแต่ละค่าที่เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งการทำงานของระบบปรับอากาศที่แยกการควบคุม Latent load และ Sensible load ออกจากกันเช่นนี้ ถูกเรียกว่า Decoupling

3. ประหยัดพลังงาน

การเติมอากาศเป็นเรื่องที่ต้องใช้พลังงานสูง จากการที่ต้องลด MOISTURE LOAD ของ OUTDOOR AIR ลงเป็นจำนวนมากจนได้อากาศที่แห้งพอที่จะจ่ายเข้าสู่อาคาร จึงเป็นจุดที่ถูกพิจารณาเรื่องการประหยัดพลังงานอยู่เสมอๆ ซึ่งจุดที่สามารถประหยัดพลังงานมีดังนี้

3.1) นอกเหนือจากการเติมอากาศในอัตราคงที่ให้ได้ตามค่าที่ถูกตามแบบไว้แล้ว DOAS ยังสามารถปรับลดอัตราการเติมอากาศให้เป็นไปตามความต้องการใช้งานที่แท้จริง (Demand control ventilation; DCV) เช่นเมื่อจำนวนผู้ใช้งานลดลงก็สามารถลดอัตราการเติมอากาศตามจำนวนผู้ใช้งานในพื้นที่ ก็เพราะ DOAS มีความสามารถในการควบคุม Dew Point ให้คงที่ได้ แม้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการเติมอากาศ ซึ่งการปรับลดอัตราการเติมอากาศจะเป็นจุดที่ช่วยประหยัดพลังงานได้ส่วนหนึ่ง

3.2) การกำจัด Latent load ออกจากอากาศเติมเป็นงานที่ต้องใช้พลังงานสูง ซึ่งการนำเทคโนโลยี Heat Recovery มาใช้งานจึงเป็นทางออกที่ดีสำหรับการประหยัดพลังงานในส่วนนี้ โดยการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่าง อากาศภายนอกที่ต้องนำมาเติม กับอากาศที่ต้องระบายทิ้ง ซึ่งอุปกรณ์ประหยัดพลังงานเหล่านั้นได้แก่ TOTAL ENERGY WHEEL , AIR TO AIR PLATE HEAT EXCHANGER, HEAT PIPE เป็นต้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงในลำดับถัดไป

3.3) เมื่อทำการ Decoupling ระหว่าง Latent load กับ Sensible load ได้สำเร็จแล้ว ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ต้องรับภาระเฉพาะ Sensible load ในพื้นที่ เช่น เครื่องปรับอากาศ (AHU, FCU) ชนิดคอยล์น้ำเย็น (Chilled water cooling coil) สามารถใช้น้ำเย็นขาเข้าคอยล์เย็นที่อุณหภูมิ 12 - 15 ℃ ก็เป็นการเพียงพอที่จะรับภาระ sensible load ในพื้นที่ได้แล้ว ซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงานจากการทำน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูงขึ้นจากค่ามาตรฐานที่ 7 ℃ เพราะเดิมอุปกรณ์นี้ต้องรับภาระทั้ง Latent load พร้อมกับ Sensible load ในแบบ CONVENTIONAL DESIGN อีกทั้งอุณหภูมิของอากาศเติมที่ต่ำเพื่อควบคุมและรักษาระดับความชื้นในพื้นที่ให้ได้ตามที่ต้องการนี้ ก็จะสามารถจัดการกับ Sensible Load ในพื้นที่ได้ด้วยกัน ซึ่งจะเป็นการลดภาระของระบบปรับอากาศภายในพื้นที่ได้อีกด้วย

การคำนวณค่า Latent Load, moisture load สำหรับ DOAS

ประกอบด้วย Latent load หลัก ดังนี้

1. Latent load ของอากาศที่รั่วเข้ามาภายในพื้นที่ (Infritration moisture load)

2. Latent load ของความชื้นที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ (Internal moisture load) ซึ่งในที่นี้จะแสดงการคำนวณLatent load ที่เกิดจากคนในพื้นที่ (Occupant) และในบางสถานการณ์อาจจะมี Latent load, moisture load จากอุปกรณ์ใช้งานอื่นๆ เช่น ถาดน้ำร้อน ในห้องปฏิบัติการ เป็นต้น ซึ่งจะต้องหาข้อมูลMoisture load ของอุปกรณ์เหล่านั้นมาใช้ในการคำนวณประกอบกันทั้งหมด แต่ Latent load ส่วนนี้มักจะเป็นสัดส่วนที่ไม่มาก ซึ่งตัวอย่าง

การคำนวณครั้งนี้จึงจะแสดงไว้เฉพาะส่วนที่เกิดจากคนในพื้นที่เท่านั้น

3. Latent load ของความชื้นที่ต้องกำจัดออกจากอากาศภายนอกก่อนจะเติมเข้าไปในพื้นที่ (Ventilation moisture load)

นอกจากนี้ยังมีLatent load จากแหล่งอื่นๆ อันได้แก่ อากาศที่รั่วเข้ามาในอาคารจากการเปิด-ปิดประตูที่ใช้เข้าออกอาคาร, กิจกรรมและอุปกรณ์ที่ให้กำเนิดความชื้น แต่เมื่อรวมกันแล้วก็ยังเป็นสัดส่วนที่น้อย และบางกรณีก็เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว จึงไม่ได้นำมาแสดงในตัวอย่างการคำนวณนี้

การคำนวณ Latent load ที่ต้องถูกกำจัดออกจากอากาศตามตัวอย่างด้านล่าง จะใช้การกำหนดเป็นค่า Absolute Humidity หรือ Humidity ratio โดยระบุเป็นหน่วย g/kg หรือ gr/lb เพื่อให้สามารถกำหนดเป็นค่า Dew point ของอากาศเติมได้

สำหรับ Latent load ทั้ง 3 ข้อดังกล่าว จะแสดงการคำนวณไว้ในตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

1. ค่าตัวแปลงหน่วย

1,076 Btu/h of latent work = 1 lb/h water vapor removal

7,000 grains water vapor (gr) = 1 lb of water 1gr/lb = 0.143 g/kg

2. ค่าคงที่สำหรับตัวแปลงหน่วย

เมื่อกำหนดให้ เงื่อนไขสภาวะของ Latent heat คงที่ ที่ 70F, 50%RH และแทนค่าในสมการเพื่อหา ค่าคงที่ ดังนี้

[60 min/h/specific volume (70 ℉, 50% RH)] × [specific heat (Δh_{vap})/7,000 gr/1b] (60/13.5) × (1,076/7,000) = 0.68

ประมาณค่า Latent load ต่อคน ของคนในพื้นที่ = 200 Btu/h- person (Q_L) กำหนดให้สภาวะของอากาศในพื้นที่ (IDA) มีค่าอุณหภูมิ และความชื้นเท่ากับ 75 ℉/65% RH จึงมีค่า Humidity ratio = 84.8 gr, Dew point = 62 ℉

3. การคำนวณLatent load ที่เกิดจากคนในพื้นที่ (Occupant)

การคำนวณด้านล่าง แสดงค่า Latent load ต่อคน (gr/lb) ที่ต้องถูกกำจัด ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง การกำจัด Latent loadนี้ กระทำด้วยอัตราการระบายอากาศต่อคน (ในที่นี้คือการเติมอากาศจาก DOAS) ที่กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 13 CFM ต่อคน

Δ gr/lb = (Q_L) / (0.68 x ventilation rate$_{cfm}$)

Δ gr/lb = (200 Btu/h/person) / (0.68 × 13 cfm/person) = 22.6 gr/lb

Δ gr/lb = 22.6 gr/1b, ซึ่งเป็นการคำนวณค่าเป็นหน่วยต่อชั่วโมง (hourly)

Latent load (moisture load) ของแต่ละคนจะต้องถูกกำจัดโดยอากาศเติม 13cfm ต่อคน ที่ถูกจ่ายมาจากDOAS

IDA - Δ gr/lb = 84.8 gr/lb - 22.6 gr/lb = 62.2 gr/lb

เมื่อกำหนดให้ใน พื้นที่มีจำนวนคนเท่ากับ 25 คน

25 x200 Btu/h = 5,000 Btu/h , 75 ℉ Dry-Bulb Temperature

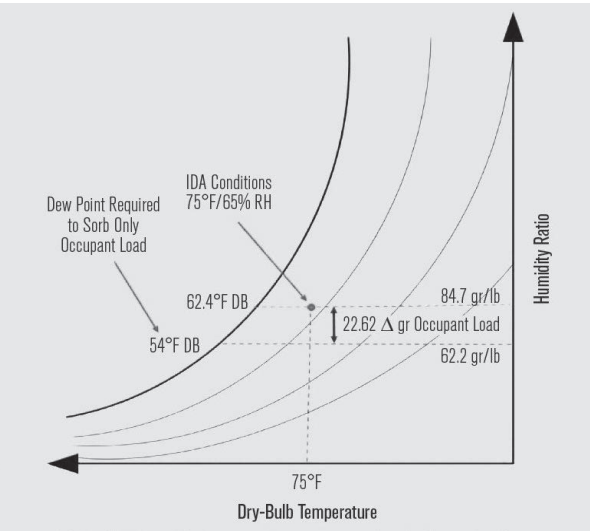


FIGURE 3 แสดงให้เห็นบน Psychrometric chart ว่า Latent load จากคนทั้งหมดในพื้นที่ ถูกกำจัดโดยอากาศเติมที่แห้ง จาก DOAS ที่มีค่า Dew point ต่ำกว่า 54F นั้น เพียงพอแค่เพื่อรักษาระดับความชื้นสัมพัทธ์ในพื้นที่ให้ต่ำกว่า 65%RH ที่ 75 FDB โดยไม่รวม latent load จาก อุปกรณ์ที่สามารถสร้าง latent load และยังไม่รวมถึง latent load จากinfiltration

4. การคำนวณ Latent load จาก Infiltration

เนื่องจากอาคารทุกอาคารจะต้องมีการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่อาคาร แม้แต่อาคารที่สามารถจัดการให้ความดันในอาคารเป็นบวกได้ เพราะความดันที่เกิดจากแรงลมพัดด้านนอกอาคารนั้นมีค่ามากกว่าความดันบวกภายในอาคารในระดับที่สูง เช่น ลมที่มีอัตราความเร็ว 24 กม/ชม มี velocity pressure เท่ากับ 27.5 Pa ซึ่งปกติเราจะสร้างความดันบวกในอาคารต่ำกว่านั้นมาก

The U.S. Department of Energy (DOE) ได้กำหนดค่าอัตราการรั่ว (infiltration rate) สำหรับอาคารทั่วไป ที่อัตราความเร็วลม 16 กม/ชม ซึ่งถูกนำมาใช้กับตัวอย่างการคำนวณนี้

พื้นที่รวมของผนังด้านนอกอาคาร [sq. ft] x อัตราการรั่ว = infiltration in cfm (อากาศที่รั่วไหลเข้าในอาคาร)

300 sq.ft x 0.2016 cfm/sq.ft = 60.5 cfm infiltration

Δ gr/lb = (Infiltration air gr/1b - IDA gr/1b) = (144.5 gr/1b -84.8 gr/1b) = 59.7 Δ gr/lb

Q_L = 0.68 x cfm x Δ gr/lb = 0.68 x 60.5 x 59.7 = 2,456 Btu/h

5. การคำนวณLatent load จาก Outdoor Air Ventilation

13 cm/person × 25 students/classroom = 325 cfm

325 cfm× 0.68 × Δ gr/lb = Btu/h

Δ gr/lb = (OA gr/1b-IDA gr/lb) = (144.5 gr/lb-84.8 gr/lb) = 59.7 Δ gr/lb

Q_L = 0.68 x cfm × Δ gr/lb = 0.68 × 325 x 59.7 = 13,194 Btw/h

รวม Latent load ทั้งหมด = Occupants + Infiltration + Ventilation = 20,650 Btu/h

การคำนวณค่า gr/lb หรือ dew point ของอากาศเติมที่จ่ายออกจาก DOAS

เพื่อให้สามารถกำจัด Latent load ทั้งหมด (Occupants + Infiltration + Ventilation) จากการจ่ายอากาศเติมจาก DOAS ให้ทำการคำนวณดังนี้

Q_L = 0.68 x cfm x Δ gr/lb

20,650 Btu/h = 0.68 x 325 cfm× Δ gr/lb

Δ gr/lb = 20,880/(0.68 × 325) = 93.4 gr/lb

Δ 0A gr/lb = (144.5 gr/1b-93.4 gr/lb) = 51.1 gr/lb (dew point = 49 °F)

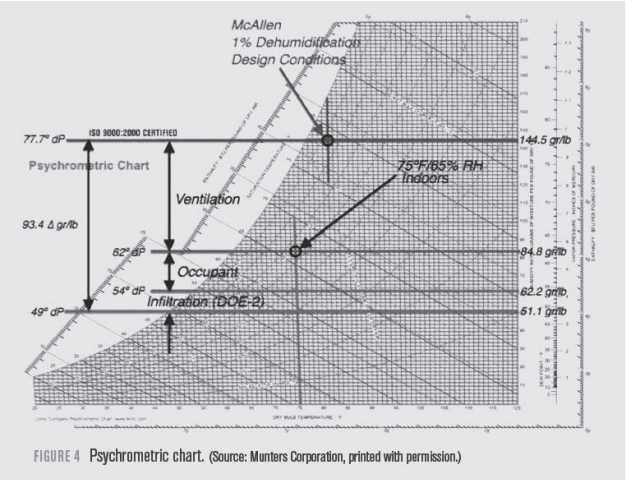


FIGURE 4 Psychrometric chart. (Source: Munters Corporation, printed with permission.)

FIGURE 4 เป็นการแสดงผลการคำนวณด้านบนลงใน Psychrometric chart สำหรับพื้นที่ที่มีค่าสภาวะอากาศในพื้นที่คือความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 65% RH และอุณหภูมิ 75 °FDB [24 °C] ค่าสภาวะอากาศนี้ถูกกำหนดโดยวิศวกร ซึ่งจะทำให้หาค่า dew point ของพื้นที่(ห้อง)ได้อีกด้วย

Latent load ของคนในพื้นที่(occupant) ถูกแสดงไว้เป็นส่วนที่อยู่ด้านล่างของ dew pointของพื้นที่ ส่วน Latent load ของอากาศที่รั่วเข้าในอาคาร (infiltration) จะถูกเพิ่มเข้าไปต่อจากนั้นอีกที, ส่วน Latent load ของอากาศเติม (ventilation) คือส่วนที่อยู่ระหว่างค่าสภาวะอากาศภายนอก (outdoor) กับค่าสภาวะอากาศในพื้นที่(ห้อง) (สภาวะอากาศในที่นี้

ถูกแสดงด้วยค่า humidity ratio; gr/lb) ซึ่งส่วน Latent load ของอากาศเติม(ventilation) คือค่าปริมาณความชื้น(moisture) ของ outdoor air ที่ต้องถูกกำจัดก่อนเติมเข้าสู่อาคาร

ผลรวมของทั้งสามส่วนนี้ (Occupants + Infiltration + Ventilation) ก็คือ ปริมาณความชื้น (moisture) ที่ DOAS สามารถกำจัดได้ทั้งหมด หรือเรียกว่าค่าความสามารถในการกำจัดความชื้น (moisture removal capacity) ซึ่งจากตัวอย่างการคำนวณนี้ DOAS จะต้องเติมอากาศที่มี dew point = 49 ℉ (51.1 gr/lb) จึงจะสามารถกำจัด Latent load ได้ทั้งหมด และจะทำให้รักษาระดับความชื้นในพื้นที่ให้ได้ 65%RH ที่อุณหภูมิ 75 ℉DB, dew point = 62 ℉ ตามที่ต้องการ

NOTE ;

1) การควบคุมระดับความชื้นในพื้นที่ ด้วยวิธีการ Decoupling โดยเฉพาะส่วนที่เป็น Latent load นั้น คือการที่ DOAS ต้องจ่ายอากาศเติมให้แห้งกว่าอากาศในพื้นที่ ซึ่งหมายถึงค่าdew point ของอากาศเติม จะต้องต่ำกว่า ค่าdew point ที่ต้องการในพื้นที่ลงไปอีก เป็นค่าเท่ากับผลรวมของ latent load, moisture load ของ occupant และinfiltration (ดูภาพ figure 4 ประกอบ) เพื่อให้อากาศเติมที่แห้งกว่านี้สามารถดูดซับความชื้นส่วนเกินที่อยู่ภายในพื้นที่ได้ทั้งหมด จนทำให้ dew point ของอากาศที่ถูกผสมเข้ากันแล้วระหว่างอากาศในพื้นที่กับอากาศเติม (mixing air = air in space + make up air) มีค่า dew point ที่ต่ำกว่าค่า dew point ของพื้นที่ที่ต้องการ, หรือที่ถูกออกแบบไว้

2) dew point (℃, ℉) หรือ latent load, moisture load, humidity ratio (g/kg, gr/lb) คือการระบุค่าระดับความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) เป็นค่าที่ไม่สัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิ ซึ่งแตกต่างจากที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) เป็น

หลังจากที่ทำความรู้จักกับ DOAS และทราบถึงการคำนวณค่าdew point ของอากาศเติมจากDOASไปแล้ว จากนี้ไปจะได้กล่าวถึงการนำ DOAS ไปใช้กับระบบปรับอากาศและระบายอากาศ และยังจะกล่าวถึงอุปกรณ์สำคัญนอกเหนือไปจากอุปกรณ์ประกอบปกติที่ติดตั้งในDOAS คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงาน (Air-to-Air Energy Recovery) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับการประหยัดพลังงาน โดยนำเสนอเป็นหัวข้อดังนี้

1) รูปแบบการการเติมอากาศจากDOAS ให้กับระบบHVAC

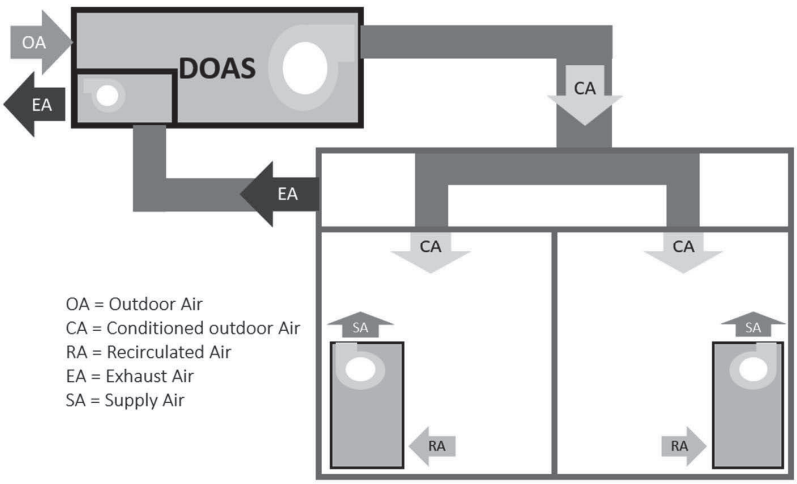
2) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงาน (Air-to-Air Energy Recovery)

รูปแบบการการเติมอากาศจากDOAS ให้กับระบบ HVAC

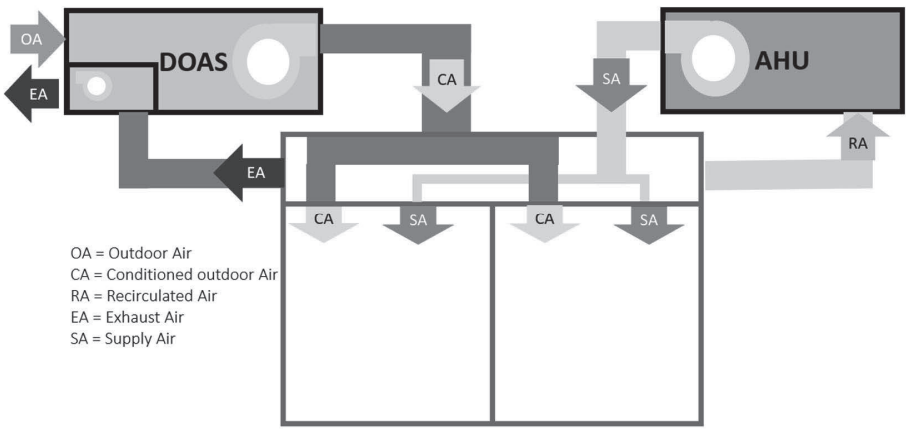
เราสามารถรวมระบบ DOAS เข้ากับระบบ HVAC เกือบทุกประเภทได้ เพื่อรักษาอุณหภูมิและความชื้นในพื้นที่ การเลือกประเภท DOAS ที่ถูกต้องเป็นสิ่งสำคัญ แต่ละประเภทของ DOAS อาจจะไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในบางเงื่อนไข เครื่อง DOAS เป็นเครื่องที่ดูดอากาศภายนอก (OA) แล้วปรับสภาพอากาศนั้นให้เหมาะสมแล้วจ่ายเข้าสู่ภายในอาคาร โดยทั่วไปแล้ว เครื่อง DOAS จะถูกวางท่อลมแยกจากกันในแต่ละโซนทั่วทั้งอาคาร แต่มีหลายทางเลือกเกี่ยวกับวิธีการส่งอากาศภายนอก (OA) ไปยังแต่ละโซน ต่อไปนี้คือ รูปแบบของการออกแบบระบบ DOAS ทั่วไปที่น่าจะมีแนวโน้มเหมาะสมกับการใช้งานของประเทศไทย

1. จ่ายตรงไปยังแต่ละโซน (Conditioned Outdoor Air Supplied Directly to Each Zone)

แบบนี้ เครื่อง DOAS จะจ่ายอากาศภายนอกที่ปรับสภาพแล้วโดยตรงไปยังแต่ละโซนผ่านระบบท่อลม เครื่อง DOAS จำเป็นต้องออกแบบขนาดให้พอดีกับ



รูป 1.1 Conditioned Outdoor Air Supplied Directly to Each Zone (Local Units)



รูป 1.2 Conditioned Outdoor Air Supplied Directly to Each Zone (Central AHU)

อากาศภายนอกและโหลดความชื้นภายในอาคาร และใช้งานร่วมกับ เครื่องปรับอากาศหลักแบบอื่น เช่น Local Units หรือ Central Units ข้อได้เปรียบที่ของแนวทางนี้คือ ง่ายต่อการตรวจสอบให้แน่ใจว่ากระแสลมภายนอกอาคารที่ต้องการเข้าถึงแต่ละโซนเนื่องจากสามารถวัดได้ผ่านตัวกระจายอากาศเฉพาะระหว่างกระบวนการเริ่มต้นและการปรับสมดุล ข้อเสียเปรียบหลักของแบบนี้คือ ต้องมีการติดตั้งท่อเพิ่มเติมและหัวจ่ายแยกต่างหาก ส่งผลให้ต้นทุนของวัสดุเพิ่มขึ้น แบบนี้จะไม่เหมาะสมกับการปรับปรุงอาคารที่ไม่ได้เตรียมพื้นที่วางงานท่อลมของ DOAS แต่หากจะสามารถทำได้ในกรณีโครงการก่อสร้างใหม่มากกว่า แบบนี้เราสามารถแบ่ง โซนได้เป็น 2 ประเภทได้แก่

1.1 จ่ายตรงไปยังแต่ละเครื่องย่อย (Local Units) ตามรูป (1.1)

แบบนี้ประกอบด้วย DOAS ที่เป็นส่วนกลางและเครื่องปรับอากาศแบบ Local ซึ่งจะทำหน้าที่หมุนเวียนอากาศเฉพาะจุด อันได้แก่ FCU, VRF, Radiant Panels หรือ Chilled Beam แบบ Passive Type นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้หากมีการติดตั้งอุปกรณ์ในพื้นที่ในช่องฝ้าบนเพดาน เป็นต้น

1.2 จ่ายตรงไปยังแต่ละเครื่องปรับอากาศส่วนกลาง (Central AHU) ตามรูป (1.2)

แบบนี้ประกอบด้วย เครื่องจ่ายลมเย็นส่วนกลาง (AHU) และ เครื่อง DOAS ส่วนกลาง โดยมีการเดินท่อลมแต่ละเครื่องแยกอิสระแล้วจ่ายไปทั่วทั้งอาคาร อาจจะใช้ติดต่อควบคู่กับระบบ VAV ได้

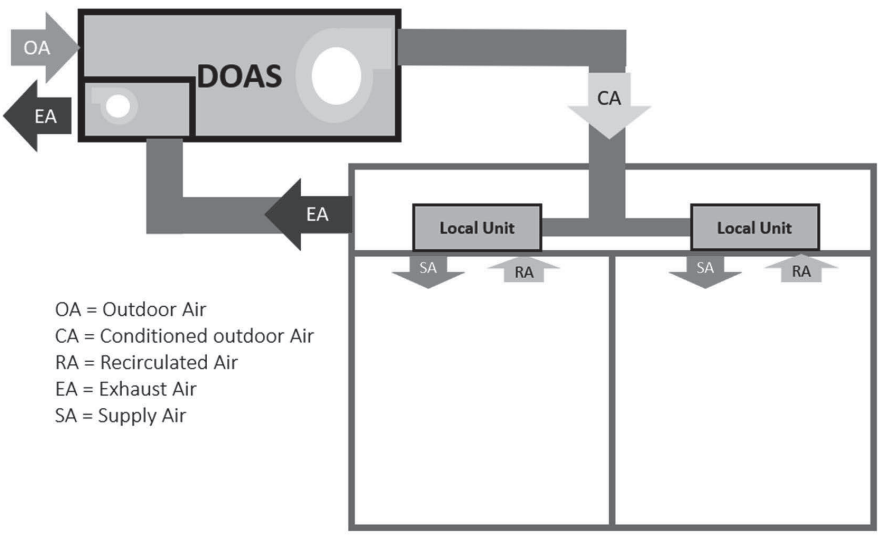
2. จ่ายไปยังด้านดูดของเครื่องย่อย (Conditioned Outdoor Air Supplied to Intake of Local Units) ตามรูป (1.3)

แบบนี้เครื่อง DOAS จะส่งอากาศภายนอก (OA) เข้าไปในแต่ละเครื่องย่อย (Local) โดยที่อากาศภายนอกจะผสมกับอากาศหมุนเวียนจากพื้นที่ปรับอากาศ จากนั้นเครื่องย่อย (Local) จะปรับสภาพอากาศอีกครั้งแล้วส่งไปยังพื้นที่

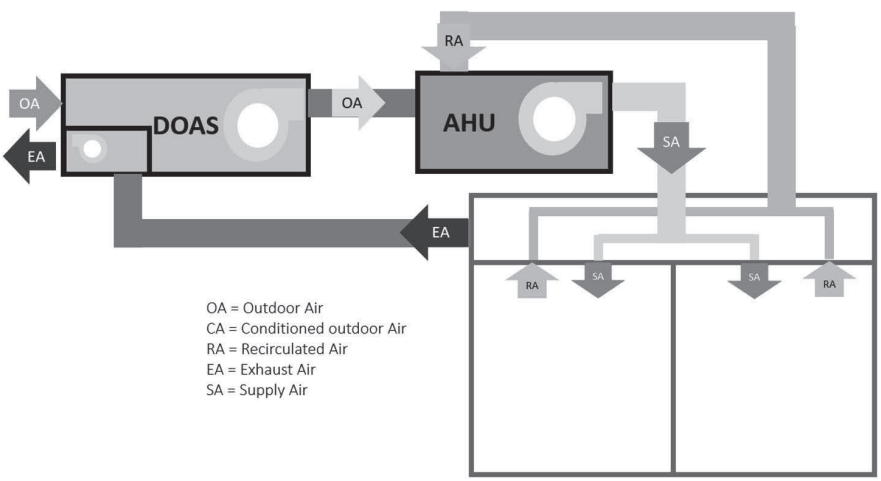
วิธีนี้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและพื้นที่บางส่วนที่จำเป็นในการติดตั้งท่อลม รวมถึงหัวจ่ายลม อย่างไรก็ตาม เครื่อง DOAS จำเป็นต้องทำงานตลอดเวลาเพื่อส่งอากาศภายนอก (OA) ไปยังพื้นที่ การเปิดและปิดพัดลมของเครื่อง DOAS หรือเปลี่ยนความเร็วรอบของพัดลม จะส่งผลกระทบความดันภายในห้อง ตัวอย่างแบบนี้ได้แก่ Active Chilled Beam

3. จ่ายไปยังด้านดูดของเครื่องปรับอากาศส่วนกลาง (Conditioned Outdoor Air Supplied to Intake of Central AHU) ตามรูป (1.4)

แบบนี้เหมือนกับแบบที่ 2 ต่างกันเพียงเครื่อง DOAS จะส่งอากาศภายนอก (OA) เข้าไปในแต่ละเครื่องปรับอากาศส่วนกลาง (Central AHU) วิธีนี้นิยมใช้เยอะมากในอุตสาหกรรมห้องสะอาด (Cleanrooms) หรือห้องที่ต้องการควบคุมความดันของพื้นที่



รูป 1.3 Conditioned Outdoor Air Supplied to Intake of Local Units



รูป 1.4 Conditioned Outdoor Air Supplied to Intake of Central AHU

การออกแบบอุปกรณ์ประกอบภายในเครื่อง DOAS

เครื่อง DOAS สามารถออกแบบใส่ส่วนประกอบได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับความต้องการของแต่ละพื้นที่ โดยส่วนประกอบอุปกรณ์อาจจะมีทั้งหมดหรือบางส่วน อันได้แก่

- พัดลมด้านจ่าย / พัดลมด้านดูด (Supply / Exhaust fans)
- ระบบแปรปันรอบมอเตอร์ (Variable Speed Drives)
- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงาน (Air-to-Air Energy Recovery)
- อุปกรณ์ลดความชื้นแบบเคมี (Desiccant Dehumidification Wheels)
- คอลล์เย็นทั้งแบบน้ำและน้ำยา (DX Coil, Chilled Water Coil)
- คอลล์ร้อน (Heating Coils etc, Hot Water, Electric Heater)
- อุปกรณ์เพิ่มความชื้น (Humidifiers)
- ตัวปรับปริมาณลม (Motorized Dampers)
- แผ่นกรองอากาศ (Filters)

จากอุปกรณ์ข้างบน จะมีอยู่เพียงหนึ่งเดียวที่เป็นพระเอกของระบบ DOAS เพื่อลดพลังงานของเครื่อง หากระบบ DOAS มีการดูดอากาศภายในพื้นออกไปทิ้งภายนอก (EA) แล้วจำเป็นต้องเติมอากาศภายนอก (OA) เพื่อลดการสูญเสียความเย็นที่ทิ้งไป นั้นคืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงาน (Air-to-Air Energy Recovery)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงาน (Air-to-Air Energy Recovery)

การนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ เป็นกระบวนการนำความร้อนหรือ/และความชื้นกลับมาใช้ใหม่ระหว่างกระแสลมสองแหล่งที่มีอุณหภูมิและความชื้นต่างกัน กระบวนการนี้ช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน สามารถแบ่งประเภทออกมาดังนี้

- Fixed Plate Heat
- Membrane Plate Heat
- Energy Wheel
- Sensible Heat Wheel
- Heat Pipe
- Runaround Coil Loop

รูป 1.5 รูปแบบต่างๆ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงาน (Air-to-Air Energy Recovery)

	Fixed Plate	Membrane Plate	Energy Wheel	Sensible Heat Wheel	Heat Pipe	Runaround Coil Loop
Airflow arrangements	Counterflow Cross-flow	Counterflow Cross-flow	Counterflow Parallel flow	Counterflow	Counterflow Parallel flow	-
Equipment size (CMH)	90 and up	90 and up	90 to 125,000 and up	90 to 125,000 and up	180 and up	180 and up
Typical sensible effectiveness ($m_s = m_e$) , %	50 to 80	50 to 75	50 to 85	50 to 85	45 to 65	45 to 65
Typical latent effectiveness, %		45 to 72	50 to 85	0		
Total effectiveness, %		45 to 73	50 to 85			
Face velocity, m/s	1 to 5	1 to 3	2.5 to 5	2 to 5	2 to 4	1.5 to 3
Pressure Drop, Pa	100 to 1000	100 to 500	100 to 300	100 to 300	150 to 500	150 to 500
EATR : Exhaust air transfer ratio, %	0 to 2	0 to 5	0.5 to 10	0.5 to 10	0 to 1	0
OACF : Outdoor air correction factor	0.97 to 1.06	0.97 to 1.06	0.99 to 1.1	1 to 1.2	0.99 to 1.01	1
Temperature range, °C	-60 to 800	-40 to 50	-55 to 800	-55 to 800	-40 to 40	-40 to 500
Advantages	No moving parts, low pressure drop, easily cleaned	No moving parts, low pressure drop, Moisture transfer	Moisture transfer, Compact design, low pressure drop	Compact design, low pressure drop, easily cleaned	No moving, allowable pressure differential up to 15kPa	Separated SA from EA
Limitations	Large size at higher flow rates	Few suppliers, long-term maintenance unknown	Some EATR without purge, Cross-Contamination	Some EATR without purge, Cross-Contamination	Effectiveness limited by pressure drop and cost	Predicting performance requires
Control methods	Bypass Damper	Bypass Damper	Wheel Control Speed	Wheel Control Speed	Solenoid Valve	Control Valve, VFD Pump

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ Air-to-Air Energy Recovery

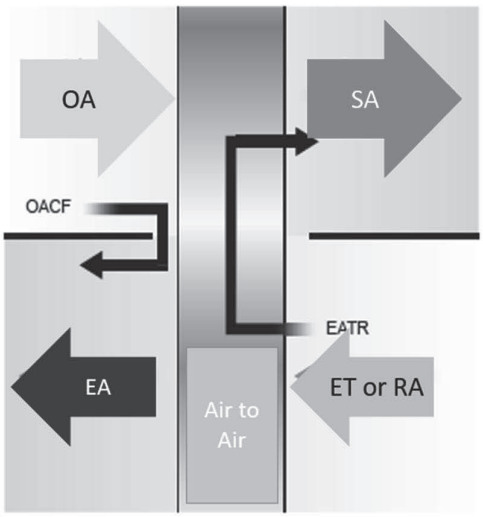
อุปกรณ์นี้สามารถนำพลังงานที่สูญเสียจากการทิ้งมาใช้ใหม่ในระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง DOAS ได้อย่างดีเยียม นอกจากนี้ยังช่วยลดขนาดของเครื่องทำน้ำเย็นหลัก (Chillers) และทำความร้อนที่อาจจะต้องปรับสภาพอากาศภายนอกอาคาร ส่งผลให้ลดต้นทุนครั้งแรกโดยประมาณ 20% ถึง 30% (อ้างอิงจาก Harriman และ Lstiburek 2009) โดยการใช้อุปกรณ์นี้มีหลักเกณฑ์อยู่หลายมาตรฐาน เช่น ANSI/ASHRAE/ASHRAE 90.1 (ASHRAE 2016b) และ International Green Construction Code (ICC 2012) แต่หากอ้างอิงถึงตารางของ ASHRAE Handbook — HVAC systems and Equipment Chapter : Air-to-Air Recovery Equipment สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 1

EATR vs OACF

จากตารางที่ 1 จะสังเกตุว่าจะมีค่าตัวแปรที่น่าสนใจของอุปกรณ์ Air-to-Air Energy Recovery คือ EATR และ OACF

ซึ่งมันคือค่าบ่งชี้ถึงอุปกรณ์นี้ว่ามีอากาศรั่วไหลเข้าหากันระหว่างลมจ่าย (ในที่นี้จะเรียกว่า OA, อากาศดี) กับลมดูดทิ้งหรือลมกลับ (ในที่นี้จะเรียกว่า ET หรือ RA, อากาศทิ้ง) สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังรูปที่ 1.6

หากเปอร์เซ็นของ EATR เท่ากับ 0% แสดงว่าไม่มีอากาศเสียหรืออากาศดูดทิ้งย้อนกลับไปทางอากาศดี ในทางวิศวกรรมเภสัชจะเรียกว่า Zero Cross-Contamination, หากสัดส่วน OACF เท่ากับ 1 แสดงว่าไม่มีอากาศดีหรือการเติมอากาศบริสุทธ์สูยเสียรั่วไหลออกไปทางอากาศทิ้งเลย ในกรณีของ Energy Wheel และ Sensible Heat Wheel เราจะพยายามหลีกเลียงมาให้อากาศเสียรั่วไหลของสู่อากาศดีทำได้โดยการใส่ Purge Sector ตามรูปที่ 1.7 นั้นจะทำให้ EATR = 0% และ OACF > 1



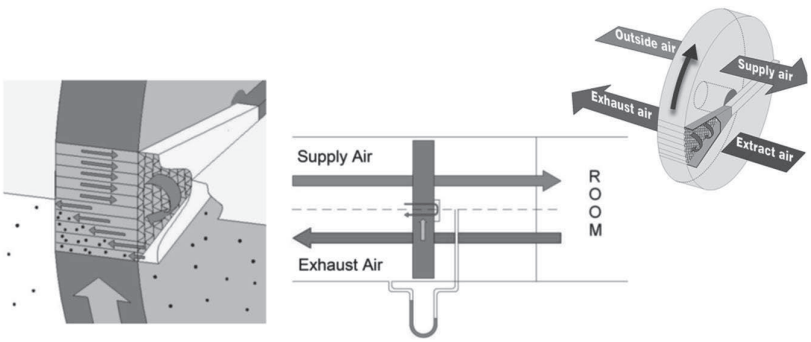
EATR : Exhaust air transfer ratio, %
is used to measure this carry over effect

$$EATR = (SA - SA_{net}) / SA$$

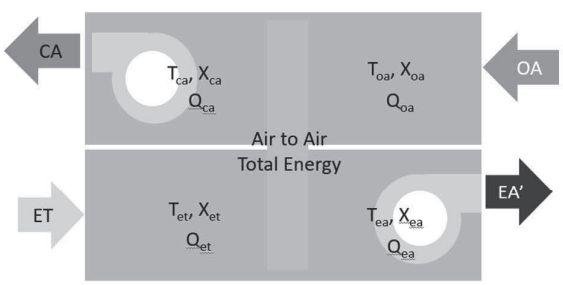
OACF : Outdoor air correction factor
is the leakage between air ducts

$$OACF = OA / SA$$

รูป 1.6 รูปแสดงการหาค่า EATR และ OACF



รูป 1.7 Purge Sector



Temperature efficiency)	$= (T_{ca} - T_{oa}) / (T_{et} - T_{oa})$	Sensible effectiveness	$= (Q_{oa}/Q_{min}) * (T_{ca} - T_{oa}) / (T_{et} - T_{oa})$
Humidity efficiency	$= (X_{ca} - X_{oa}) / (X_{et} - X_{oa})$	Latent effectiveness	$= (Q_{oa}/Q_{min}) * (X_{ca} - X_{oa}) / (X_{et} - X_{oa})$
Total (Enthalpy) efficiency	$= (H_{ca} - H_{oa}) / (H_{et} - H_{oa})$	Total (Enthalpy) effectiveness	$= (Q_{oa}/Q_{min}) * (H_{ca} - H_{oa}) / (H_{et} - H_{oa})$

รูป 1.8 Efficiency vs Effectiveness

ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงาน (Efficiency vs Effectiveness)

การเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงานมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิผล (Effectiveness) มากกว่าประสิทธิภาพ (Efficiency) เพราะว่าประสิทธิผล(Effectiveness) จะนำเอาค่าปริมาณลมของฝั่งอากาศเย็นและอากาศร้อนมาคำนวณหาค่าของอุปกรณ์นั้นๆ ดังสมการในรูปที่ 1.8

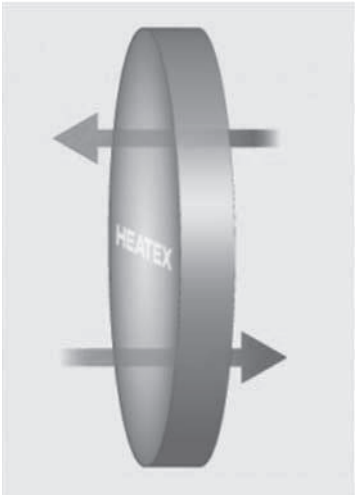
หลายๆ ครั้งเราต้องการให้มีการแลกเปลี่ยนพลังงานความเย็นกลับมาใช้ให้มากที่สุดแต่ปริมาณลมเย็นนั้นน้อยเกินไปหรือไม่เยอะมากพอเพื่อไปแลกเปลี่ยนกับลมร้อนค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) จะได้น้อยตามไปด้วย และนั้นไม่ได้ความว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงานนั้นไม่ดี หากเพียงแต่เราไม่สามารถออกแบบให้มีความเย็นมาแลกเปลี่ยนไปเหมาะสมกับความร้อนเท่านั้น

ในบทความนี้เราจะกล่าวถึงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงาน (Air-to-Air Energy Recovery) แบบ Energy Recovery Wheel และ Fixed Plate Heat เท่านั้น เนื่องจากว่าทั้ง 2 ตัวนี้เป็นตัวที่นิยมเอามาประกอบกับระบบ DOAS อีกทั้งคุ้มค่าต่อการลงทุนในแง่ประสิทธิภาพ, ราคา และการบำรุงรักษา

Energy Recovery Wheel

วงล้อแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยเมทริกซ์รังผึ้งทรงกลมของวัสดุดูดซับความร้อน ซึ่งจะหมุนช้าๆ ระหว่าง 12 -25 RPM เป็นการแลกเปลี่ยนลมเย็นกับลมร้อนซึ่งกันและกัน โดยที่กระแสลมทั้ง 2 จะเข้าวงล้ออย่างละครึ่งวงกลมในทางตรงกันข้ามกัน ขณะที่วงล้อหมุนความเย็นจะถูกดักจับจากกระแสลมในครึ่งหนึ่งของการหมุนและปล่อยสู่กระแสอากาศลมร้อนในอีกครึ่งหนึ่งของการหมุน ดังนั้นพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปจากกระแสลมจะถูกถ่ายโอนไปยังวัสดุเมทริกซ์และจากนั้นจากวัสดุเมทริกซ์ไปยังกระแสอากาศเย็น

เมทริกซ์การถ่ายเทความร้อนอาจเป็นอะลูมิเนียม พลาสติก หรือเส้นใยสังเคราะห์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็กและระบบขับเคลื่อนด้วยสายพาน มอเตอร์มักจะถูกควบคุมด้วยความเร็วของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ควบคุมอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกได้ดีขึ้น หากไม่ต้องการการแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถหยุดมอเตอร์ได้ทั้งหมด

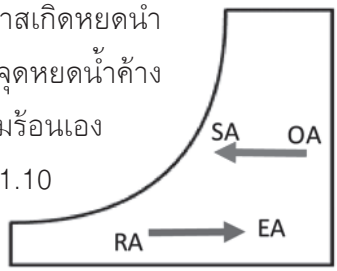


รูป 1.9 Energy Recovery Wheel

Energy Recovery Wheel สามาถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. Sensible Heat Wheel
2. Total Energy Wheel

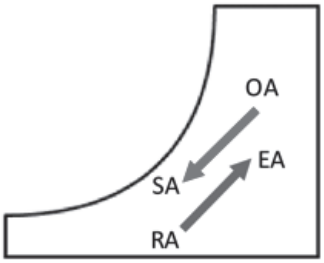
Sensible Heat Wheel จะสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้เฉพาะ “ความร้อนสัมผัส” เท่านั้น กล่าวคือมันจะถ่ายเทอุณหภูมิเท่านั้น ไม่มีการถ่ายเทความชื้น และมันมีโอกาสเกิดหยดน้ำในฝั่งลมร้อนได้หากถึงจุดหยดน้ำค้าง (Dew Point) ของตัวลมร้อนเอง แสดงแผนภูมิได้ดังรูป 1.10



รูป 1.10 Sensible Heat Wheel

Total Energy Wheel จะสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ทั้ง “ความร้อนสัมผัส” และ “ความร้อนแฝง (Latent Heat)” กล่าวคือมันจะถ่ายเทอุณหภูมิและความชื้นซึ่งกันและกัน แสดงแผนภูมิได้ดังรูป 1.11 โดยจะมีการเคลือบสารดูดความชื้นในตัวเมทริกซ์รังผึ้งทรงกลม ซึ่งได้แก่ Silica Gel, Molecular Sieve 3 Å หรือ ตัว Zeolite อื่นๆ เป็นต้น บางครั้งสามารถเรียก วงล้อแบบนี้ได้หลายชื่อ ได้แก่

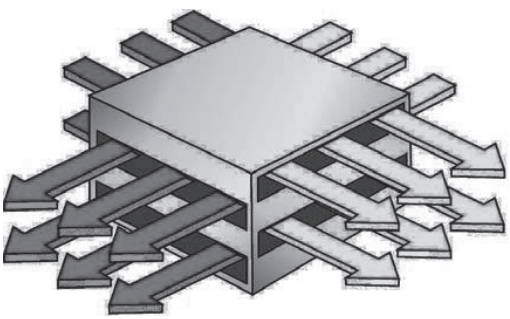
- Thermal Wheel
- Enthalpy Wheel
- Sorption Wheel
- Total Energy Wheel
- Heat Recovery Wheel
- Rotary Heat Exchanger



รูป 1.11 Total Heat Wheel

Fixed Plate Heat

ในที่นี้จะกล่าวถึงตัวที่เป็น Sensible Fixed Plate Heat เท่านั้น (เพราะว่าตัว Membrance Plate ยังเป็นสินค้าที่ถูกผลิตน้อยและยังติด Patent อีกด้วย) คุณลักษณะพิเศษของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น คือ การเอาแผ่นการถ่ายเทความร้อนหลายๆแผ่นมาวางเรียงกันให้มีระยะห่างอย่างคงที่แล้วให้กระแสลมเย็นและลมร้อนวิ่งไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นในลักษณะที่สลับกันช่องเว้นช่อง วัสดุที่เอามาทำแผ่นนี้ได้แก่ Aluminum, Stainless เป็นต้น มันสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้เฉพาะ “ความร้อนสัมผัส” เท่านั้น เหมือน Sensible Heat Wheel ประสิทธิภาพอาจจะสู้ Wheel ไม่ได้ แต่ก็มีข้อดีคือไม่เกิดการปนเปื้อนระหว่างลมทั้ง 2 ฝั่ง



รูป 1.12 Fixed Plate Heat

Fixed Plate Heat สามาถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. Cross Flow
2. Counter Flow

Conclusion: Which technology?

จากข้างบนจะเห็นได้ว่ามี 2 ชนิด แล้วเราจะเลือกชนิดไหนที่ดีกว่าและเหมาะสมที่สุด โดยมีแนวความคิดดังนี้

1. มีการกังวลเรื่องลมออก (เย็น) มาปนเปื้อนกลับลมดี(ร้อน) หรือไม่? ถ้าใช่ เลือก Fixed Plate Heat ตัวอย่างได้แก่
   a. ห้องที่ไม่อนุญาตให้ Return Air กลับมา AHU
   b. ลมจาก Fume Hood
   c. ลมออกจาก Isolation Room, AIIR room
   d. ลมที่มีการปนเปื้อนสารพิษ, สารระเหย
2. ต้องการประสิทธิภาพสูงสุดโดยไม่ได้กังวลหรือมีกฎใดๆ ห้ามการปนเปื้อนแบบ 100% เลือก Energy Recovery Wheel
3. คำถามที่พบบ่อย

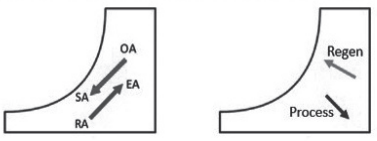
Q1 : หากใช้ Energy Recovery Wheel มาแลกเปลี่ยน โดยที่เอาลมเย็นจากห้องน้ำแล้ว จะมีกลิ่นจากห้องน้ำเข้าไปในลมดีหรือไม่?

A1 : สามารถใช้ Energy Recovery Wheel ได้แบบเคลือบสาร Molecular Sieve 3 Å ได้เพราะว่ากลิ่นหรือ VOC gas ก็ดีจะไม่สามารถทะลุผ่านสารที่เคลือบไปได้

Q2 : Energy Recovery Wheel กับ Desiccant Wheel ต่างกันหรือเหมือนกัน

A2 : ทั้ง 2 ตัวต่างกันโดนสิ้นเชิงทั้ง Physical และกระบวนการ Psychrometric Process ดังรูป 1.13

	Air-to-Air Rotor Wheel	Desiccant Wheel
Substrate Material	**Aluminum**	**Glass fiber paper**
Substrate Thickness (microns)(est.)	15	75
Substrate Conductivity (W/m*k)	**237**	**0**
Desiccant Material	3 Å Molecular Sieve Silica Gel	Molecular Sieve Silica Gel Silica gel blended with zeolites
Desiccant Thickness (microns)(est.)	25	65
Desiccant Conductivity (W/m*k)	0	0



รูป 1.13

Q3 : เราควรกำหนดความสามารถของ Energy Recovery Wheel โดยค่าใด จะดีที่สุด

A3 : คำนึงถึงประสิทธิผล(Effectiveness) มากกว่าประสิทธิภาพ(Efficiency) เพราะว่าประสิทธิผล(Effectiveness) จะนำเอาค่าปริมาณลมของฝั่งอากาศเย็นและอากาศร้อนมาคำนวณหาค่าของอุปกรณ์นั้นๆ ด้วย

References

(1) ASHRAE DESIGN GUIDE for Dedicated Outdoor Air Systems, RP-1712
(2) Heatex Model E Technical Specification, 2021-08-23 Version 16
(3) Calculating Dew-Point Design for DOAS ; ASHRAE JOURNAL DECEMBER 2015, by H.W. HOLDER, MICHAEL LARRAÑAGA, PH.D, PE., PATRICK SMITH, EDGAR A. STACY III, MIKE KRISMER
(4) ASHRAE Humidity Control Design Guide ; Chapter 11 Estimating Dehumidifier Loads, by Lew Harriman, Geoff Brundrett, Reinhold Kittler