



การศึกษาผลกระทบของสภาวะอากาศของประเทศไทยต่อการ ทำงานของระบบปรับอากาศห้องผ่าตัด

The Influence of Thailand’s Weather Condition on The Operation of Operating Room Air Conditioning Systems

ณัฐนันท์ ปิติพัทธนันท์¹ และ ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ²

NATTHANAN PITIPHATTHANAN¹ and PRAKOB SURAWATTANAWAN²

¹ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (วิทยาเขตบางเขน)

ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10240

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (วิทยาเขตบางเขน)

ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10240

Department of Safety engineering, Faculty of Engineering

Kasetsart University, Ngamwongwan Rd, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

*E-mail: natthanan.pi@ku.th, Tel. 02-797-0999, Fax. 02-579-2775

บทคัดย่อ

ห้องผ่าตัด เป็นห้องที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการรักษาชีวิตผู้ป่วย ซึ่งระบบปรับอากาศเป็นตัวแปรหลักที่เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และความชื้นสัมพัทธ์ หากระบบปรับอากาศในห้องผ่าตัดมีปัญหา อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คนไข้เกิดการติดเชื้อจากการผ่าตัด ถึงแม้จำนวนเปอร์เซ็นต์อาจจะไม่สูงมากนัก แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้ว อาจทำให้การผ่าตัดล้มเหลว คนไข้สูญเสียอวัยวะ หรือเสียชีวิตได้ อีกทั้งอาจจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในชีวิตของทั้งผู้ป่วย แพทย์ และเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานในห้องผ่าตัดได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมต่อสภาวะการทำงานของระบบปรับอากาศของห้องผ่าตัดแห่งหนึ่ง ได้ถูกใช้เป็นตัวอย่งในการวิเคราะห์ ประเภทของภาระการทำความเย็น (Cooling load) ได้มีการเปรียบเทียบทั้งในส่วน of ความร้อนแฝง (Latent heat) และ ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) และจากการวิเคราะห์พบว่า ภาระทำความเย็นของระบบปรับอากาศ (Ventilation cooling load) มีค่าสูงสุด คิดเป็น 53% ของ Cooling load ทั้งหมด Conduction in building และ ภาระความร้อนจากอุปกรณ์ในห้องผ่าตัด มีค่ารองลงมา ซึ่งผลกระทบของการเติมอากาศบริสุทธิ์จากภายนอก (Outdoor air, OA) ส่งผลให้ mixed air (MA) เปลี่ยนแปลงในช่วง (68.00 - 69.44 deg F) 20-20.80 deg C (ค่าเฉลี่ย 68.63 deg F) (ค่าเฉลี่ย 20.35 deg C) และส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity ratio, W) เปลี่ยนแปลงในช่วง 56.28 - 62.08 gr.w/lb.da (ค่าเฉลี่ย 60.28 %RH) ผลกระทบของการเติมอากาศบริสุทธิ์

จากภายนอก (Outdoor air, OA) ส่งผลให้ Supply air (SA) เปลี่ยนแปลงในช่วง 46.83 – 49.74 deg F (8.24-9.85 deg C) (ค่าเฉลี่ย 48.47 deg F) (ค่าเฉลี่ย 9.15 deg C) และส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity ratio, W) เปลี่ยนแปลงในช่วง 80.67 – 89.98 %RH (ค่าเฉลี่ย 84.65 %RH) และผลการ Simulation ตลอดทั้งปีของสภาวะอากาศในประเทศไทย จะเห็นได้ว่า ระบบทำความเย็น (Cooling coil) ของเครื่องปรับอากาศในห้องผ่าตัด จะสามารถทำงานภายใต้ความแตกต่างของความชื้นในอากาศตกคร่อม Cooling coil 14.73 – 23.03 gr.w/lb.da ได้ โดยระบบทำความเย็น (Cooling coil) และระบบพัดลม (Fan) จะสามารถทำงานโดยมีค่า Coil sensible heat gain ration (Coil SHR) อยู่ในช่วง 0.59 - 0.67 จึงจะสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในห้องผ่าตัดได้

คำสำคัญ : ความปลอดภัยในห้องผ่าตัด; ระบบปรับอากาศ; ระบายอากาศ; การควบคุมความชื้น

ABSTRACT

Operating room is a very important room to maintain patient life. The air conditioning system is the main variable that controls temperature, pressure, and relative humidity. If there is a problem with the air conditioning system in the operating room, it may be one of the reasons that the patient has an infection from surgery. Although the percentage may not be very high. But when it happened may cause surgery to fail dismembered patient or die. It may also affect the safety of life of patients, doctors and staff working in the operating room.

In this research, the effects of changes in ambient conditions on the operating conditions of air conditioning systems are studied. Cooling load types were compared in terms of latent heat and sensible heat. The analysis revealed that the Ventilation cooling load was the highest, accounting for 53% of the total cooling load. Conduction in building and Heat load from equipment were the second and third highest cooling load value respectively. The effect of outdoor air (OA) results in mixed air (MA) changes in the 68.00 - 69.44 deg F (20-20.80 deg C) (average value is 68.63 deg F) (average value is 20.35 deg C) and results in humidity ratio (W) changes in the 56.28 - 62.08 gr.w/lb.da F (average value is 60.28 %RH). The effect of outdoor air (OA) results in supply air (SA) changes in the range of 46.83 – 49.74 deg F (8.24-9.85 deg C) (average value is 48.47 deg F) (average value is 9.15 deg C) and results in RH changes in the range of 80.67 – 89.98 gr.w/lb.da (average value is 84.65 %RH). From the simulation results all year round for the weather conditions in Thailand, the cooling coil system of the operating room air conditioner must be able to operate under the difference in air humidity across the cooling coil 14.73 – 23.03 gr.w/lb.da. The cooling coil system and the fan system must be able to operate with a coil sensible heat gain ration (Coil SHR) in the range of 0.59 - 0.67 to be able to control the temperature and humidity in the operating room.

Keywords: safety in operating room; air conditioning; ventilation; humidity control

1. บทนำ

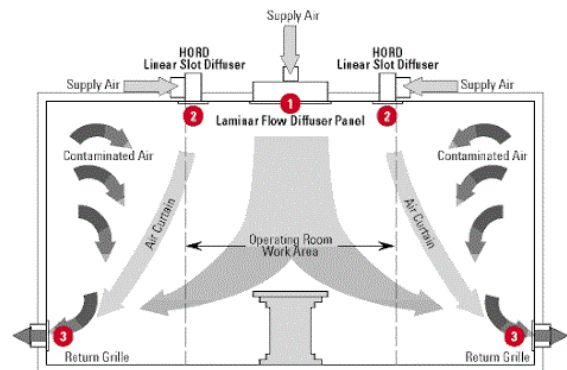
ห้องผ่าตัด โดยนิยามของกระทรวงสาธารณสุข หมายถึง ห้องที่ให้การบำบัดรักษาผู้ป่วยด้วยวิธีการผ่าตัด โดยการผ่า การตัด การต่ออวัยวะ เส้นเอ็น เนื้อเยื่อ กระดูก รวมทั้งโครงสร้างของร่างกายอื่น ๆ อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเจ็บป่วยหรือเกิดโรค ห้องผ่าตัดเป็นห้องที่มีความสำคัญมาก ในการรักษาชีวิตผู้ป่วย สำหรับโรงพยาบาล โดยมีลักษณะทางกายภาพคือ พื้นที่ว่างเตี้ยพร้อมเครื่องมือ/อุปกรณ์ช่วยชีวิตต่าง ๆ 1 เตี้ยต่อ 1 ห้อง อยู่ในเขตปลอดเชื้อ (Sterile Area) ขนาดพื้นที่ไม่น้อยกว่า 25 ตารางเมตร โดยมีส่วนที่แคบที่สุดไม่น้อยกว่า 5 เมตร วัสดุปูพื้น และวัสดุบุผนัง มีผิวเรียบ ไม่มีเหลี่ยมคม ไม่มีรอยต่อหรือรอยต่ออ่อนโยน ไม่สะสมสิ่งสกปรก ฝุ่นละออง เชื้อโรค ทนความชื้น ฝ้าเพดานเรียบไม่มีรอยต่อ ไม่มีรูพรุน ไม่สะสมสิ่งสกปรก ฝุ่นละออง เชื้อโรค ทนความชื้น ความสูงฝ้าเพดานของห้องผ่าตัดไม่น้อยกว่า 3 เมตร ประตูห้องผ่าตัดมีช่องว่างให้อากาศรั่วไหลน้อยที่สุด เพื่อควบคุมอุณหภูมิและรักษาแรงดันอากาศภายในห้องผ่าตัด หน้าต่างและช่องแสงสามารถป้องกันสัตว์และแมลงที่เป็นพาหะของเชื้อโรคได้



รูปที่ 1 สภาพการทำงานในห้องผ่าตัด (©William Scavone)

ระบบปรับอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ส่งผลอย่างมากต่อการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในห้องผ่าตัด [1], [2] ระบบปรับอากาศของห้องผ่าตัดเป็นระบบพิเศษที่แตกต่างจากระบบปรับอากาศเพื่อความสบายทั่วไป เพราะมีผลกระทบ

ต่อความปลอดภัยในชีวิตของทั้งผู้ป่วย แพทย์ และเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานในห้องผ่าตัด อีกทั้งเป็นระบบปรับอากาศที่ใช้พลังงานมากกว่าระบบปรับอากาศแบบทั่วไป [3]-[5] มาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดการออกแบบระบบระบายอากาศสำหรับห้องผ่าตัดคือ ASHRAE standard 170 ข้อกำหนดที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับระบบปรับอากาศ ประกอบไปด้วย ระบบปรับอากาศสามารถควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 62.6 deg F (17 deg C) ถึง 80.6 deg F (27 deg C) ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 45%RH ถึง 55%RH ความดันในห้องต้องมากกว่าพื้นที่ข้างเคียงไม่น้อยกว่า 2.5 Pa อัตราการหมุนเวียนอากาศภายในห้อง (Recirculation air) เป็น 20 เท่าของปริมาตรห้องต่อชั่วโมง และมีการเติมอากาศบริสุทธิ์จากภายนอก (Outdoor air, OA) ไม่น้อยกว่า 4 เท่าของปริมาตรห้องต่อชั่วโมง ลมส่งด้าน Supply air ความจะเป็น Unidirectional จ่ายตรงเป็นแนวตั้งลงมาด้วยความเร็วระหว่าง 25-35 fpm การระบายอากาศที่ได้ตามมาตรฐานจะช่วยลดโอกาสการติดเชื้อเนื่องจาก การปนเปื้อนทางอากาศ, ไวรัส, และ แบคทีเรียได้



รูปที่ 2 รูปแบบการหมุนเวียนอากาศในห้องผ่าตัด (กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ, กระทรวงสาธารณสุข)

การจ่ายลมเข้าภายในห้องผ่าตัดควรจ่ายจากเพดาน และดูดกลับที่ใกล้ระดับพื้นโดยมีหน้ากากรับลมกลับอย่างน้อย 2 จุดและต้องอยู่ตรงข้ามกัน [6]-[8] ติดตั้งให้ขอบล่างอยู่สูงจากพื้นอย่างน้อย 75 มิลลิเมตร การไหลของอากาศให้เป็นแบบราบเรียบมีทิศทางการไหลจากบนลงล่าง และมีหน้ากากดูดอากาศเสียทิ้งจากภายในห้อง (Exhaust Air

Grille) อย่างน้อย 1 จุด ติดตั้งให้ขอบล่างอยู่สูงจากพื้นอย่างน้อย 75 มิลลิเมตร อากาศเป็นตัวหลักในการพาความร้อน ความชื้น สิ่งปนเปื้อน และ อนุภาคในอากาศ ในห้องผ่าตัด การกระจายของ Supply air และ เส้นทางการไหลของอากาศ ส่งผลต่อความเร็วการไหล อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อน และเส้นทางการไหลของอนุภาคในอากาศ (Airborne particulate) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในห้อง การกระจายลมดังกล่าว ส่งผลต่อ สภาวะอยู่สบาย (Thermal comfort) คุณภาพอากาศ และศักยภาพในการส่งผ่านของ อนุภาคในอากาศ [9]-[11] โดยหลักการของห้องผ่าตัด Supply air (SA) ควรจะไหลผ่าน เขตปราศจากเชื้อ (Sterile zone) และ ไหลออกจากห้องผ่านหน้ากากดูดอากาศเสียทิ้งจากภายในห้อง (Exhaust Air Grille) แบบผ่านครั้งเดียว (Single pass) โดยที่ไม่มีการหมุนวน (Recirculation) และผสมกับ Supply airstream

ความสะอาดภายในห้องผ่าตัด เมื่อทำการตรวจวัด จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 14644-1 ไม่เกินระดับความสะอาด (Class Number) ISO 7 อากาศบริสุทธิ์ และ อากาศหมุนเวียนต้องผ่านการกรองทั้งหมด ด้วยแผงกรองอากาศไม่น้อยกว่า 3 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นแผงกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพไม่น้อยกว่า 25 - 30 % ชั้นที่ 2 เป็นแผงกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพไม่น้อยกว่า 90 - 95% และชั้นที่ 3 เป็นแผงกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง High Efficiency Particulate Air Filter (HEPA Filter) ไม่น้อยกว่า 99.97% ที่อนุภาคขนาด 0.3 μm ประตูดังกล่าว ประตูห้องผ่าตัดต้องปิดสนิท ต้องเป็นชนิดที่มีซีล (Seal) กันอากาศรั่วทุกด้าน เพื่อควบคุมความดันอากาศภายในห้องได้ ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและแสดงผลค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, ความดันห้อง และความดันแตกต่างของแผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูงทุกห้อง

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้ภูมิอากาศของประเทศไทยมีลักษณะเป็นแบบร้อนชื้น อุณหภูมิอยู่ในช่วง 82.4 - 89.6 deg F (28 - 32 deg C) และความชื้นอยู่ในช่วง 64 - 78 %RH การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นอยู่ในช่วงที่กว้าง ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพสิ่งแวดล้อมต่อ

สภาวะการทำงานของระบบปรับอากาศของห้องผ่าตัด โดยใช้ห้องผ่าตัดตัวอย่างแห่งหนึ่ง ตั้งอยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ใช้เป็นตัวอย่งในการวิเคราะห์

2. การวิเคราะห์ Cooling load สำหรับห้องผ่าตัด

อากาศที่อยู่ภายในห้องรับความร้อนมาจากหลายแหล่ง ภาระความร้อนเหล่านี้ (Heat gain) จะต้องถูกเคลื่อนย้ายออกไปจากห้อง เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และสภาวะความสบายได้ ภาระความร้อนที่จะต้องเคลื่อนย้ายออกด้วยระบบทำความเย็นเรียกว่า Cooling load นี้จะต้องถูกวิเคราะห์ให้มีความถูกต้อง เพื่อเป็นหลักเกณฑ์ในการเลือกเครื่องปรับอากาศ ระบบกระจายลม อีกทั้งข้อมูลนี้ยังใช้ในการวิเคราะห์ด้านพลังงาน และการอนุรักษ์พลังงานอีกด้วย

ห้องผ่าตัดตัวอย่าง มีขนาดกว้าง 8 m ยาว 8 m สูง 3 m ค่าภาระความร้อน (Heat gain) ประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ 1.) Conduction through interior structure
2.) Equipment and Lighting
3.) People
4.) Ventilation

ห้องผ่าตัดตัวอย่างอยู่ชั้นในของอาคาร ไม่มีส่วนใดของผนังห้องรับภาระจากแสงแดดโดยตรง (Conduction through exterior structure and radiation) ส่งผลให้มี Heat transfer จาก Conduction แบบโครงสร้างภายใน (Conduction through interior structure) แต่เพียงอย่างเดียว ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า Sensible heat เท่ากับ 25,382 BTU/hr

Equipment and lighting ในห้องผ่าตัด มีอุปกรณ์ทำงานต่าง ๆ อยู่หลายชนิด แต่ละชนิดสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นภายในห้องแตกต่างกัน อุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบไปด้วย ECG/RESP, Electro surgery, Blanket warmer, Blood warmer, Optical microscope, Anesthesia system, Blood pressure meter, Pulse oximetry, Vacuum suction, X-ray system (C-arm) จาก การ

วิเคราะห์ค่าภาระความร้อนของ Equipment โดยรวมที่มีการใช้งาน พบว่ามีค่าเท่ากับ 22,090 BTU/hr ส่วนค่าภาระความร้อนของ Lighting พบว่ามีค่าเท่ากับ 4,896 BTU/hr

ภาระความร้อนที่มาจากคน ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ 1.) Sensible heat และ 2.) Latent heat ความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับกิจกรรมของแต่ละบุคคลด้วย ห้องผ่าตัดมีเตียงผ่าตัดกลางห้อง ผู้ป่วย 1 คน, แพทย์ผ่าตัด 2 คน, พยาบาล 3 คน, ผู้ช่วยพยาบาล 3 คน วิสัญญีแพทย์ (Anesthesiologist) 1 คน รวมเป็น 10 คน จากการวิเคราะห์สภาพการทำงานของแพทย์ และคณะทำงาน พบว่ามี Sensible heat มีค่าเท่ากับ 2,750 BTU/hr, Latent heat มีค่าเท่ากับ 4,750 BTU/hr, Total heat มีค่าเท่ากับ 7,500 BTU/hr

3. การวิเคราะห์ Psychrometric ของอากาศ สำหรับห้องผ่าตัด

สมการ Sensible heat ประยุกต์ใช้กับอากาศชื้น (Moist air) ได้คือ

$$Q_s = (0.24 m_a \times TC) + (0.45 m_w \times TC)$$

เมื่อ

Q_s = Sensible heat ถูกเพิ่มเข้าไปหรือถูกดึงออกไปจากอากาศ, BTU/hr

m_a = อัตราการไหลของมวลอากาศ, lb/hr

m_w = อัตราการไหลของมวลไอน้ำ, lb/hr

$TC = t_2 - t_1$ = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง, deg F

ความร้อนจำเพาะของอากาศเป็น 0.24 และของไอน้ำเป็น 0.45

เทอมแรกในสมการ แสดง Enthalpy ที่เปลี่ยนแปลงของอากาศแห้ง (Dry air) และเทอมที่สองแสดง Enthalpy ที่เปลี่ยนแปลงของไอน้ำ (Water vapor) สำหรับคำนวณการปรับอากาศโดยประมาณ เทอมที่สองจะมีขนาดน้อยมาก ดังนั้นสามารถตัดออกได้ และสมการ Sensible heat เขียนได้เป็น

$$Q_s = 0.24 m_a \times TC$$

ในงานปรับอากาศ อัตราการไหลของอากาศ มักแสดงในหน่วย CFM มากกว่าหน่วย lb/hr เนื่องจากเครื่องมือวัดส่วนมากอ่านค่าเป็นหน่วย CFM การแปลงหน่วย ระหว่างทั้งสองหน่วยนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เมื่อกำหนดขนาด Capacity อุปกรณ์ เช่น พัดลม คอยล์ AHU เมื่อนำมาใช้ งาน ณ สภาวะอุณหภูมิและความดันที่แตกต่างกัน อากาศจะมีค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและความดัน ส่งผลให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปถึงแม้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลจะคงที่ก็ตาม ดังนั้น เพื่อให้เป็นมาตรฐานในแนวทางเดียวกัน อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอุปกรณ์มักจะแสดง ณ สภาวะอากาศมาตรฐาน (Standard air condition) คำว่า อากาศมาตรฐาน หมายถึง มีปริมาตรจำเพาะ 13.3 ft³/lb d.a. (ความหนาแน่น 0.075 lb/ft³ d.a.) สภาวะนี้ประยุกต์ใช้ ณ 68 deg F (20 deg C) และ 29.92 in. Hg. การประยุกต์การปรับอากาศ ช่วงของอุณหภูมิ จะเป็นช่วงซึ่งปริมาตรจำเพาะมีค่าใกล้เคียงกับอากาศมาตรฐาน มีความผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนน้อยมาก หากนำเอาค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศมาตรฐานไปใช้ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศ หน่วย lb/hr และอัตราการไหลของอากาศ หน่วย ft³/min หรือ CFM ใช้สภาวะอากาศมาตรฐาน ได้เป็น

$$m_a \frac{\text{lb}}{\text{hr}} = \text{CFM} \frac{\text{cu ft}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{1 \text{ lb}}{13.3 \text{ ft}^3}$$

$$m_a = 4.5 \times \text{CFM}$$

แทนค่านี้ลงไปใน Sensible heat equation และสมมติ Typical average moisture content ของอากาศ เป็น 0.01 lb w./lb d.a. (lb of water vapor per lb of dry air) สำหรับกระบวนการปรับอากาศ ได้ผลลัพธ์เป็น

$$Q_s = 1.1 \times \text{CFM} \times TC$$

$$= 1.1 \times \text{CFM} \times (t_2 - t_1)$$

นี่คือรูปแบบที่สะดวกของสมการ Sensible heat นำมาใช้ทั่วไประบบปรับอากาศ

ปริมาณไอน้ำที่เพิ่มเข้าไปหรือดึงออกจากอากาศ ในกระบวนการ Humidifying หรือ Dehumidifying คือ

$$m_w = m_a(W_2 - W_1)$$

เมื่อ

m_w = ไอน้ำถูกเพิ่มเข้าไปหรือดึงออกจากอากาศ, lb w./hr

m_a = อัตราการไหลของมวลอากาศ, lb/hr

$W_2 - W_1$ = การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นของอากาศ, lb w./lb d.a.

ด้วยกระบวนการ Sensible heating process มักจะสมมติว่าอากาศอยู่ในสภาวะมาตรฐาน ถ้าอัตราการไหลของปริมาตรอากาศมีหน่วยเป็น CFM แทนค่าในสมการ จะได้

$$m_w = 4.5 \times \text{CFM} (W_2 - W_1)$$

หรือ ถ้า สัดส่วนความชื้น ให้มาในรูป gr w./lb d.a. (lb of water vapor per lb of dry air) ทหารด้วย 7000 gr/lb

$$m_w = \frac{\text{CFM} (W_2 - W_1)}{1556}$$

เมื่อ

$W_2 - W_1$ = การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้น, gr w./lb d.a.

การเปลี่ยนแปลง Latent heat วิเคราะห์ได้จาก การระเหยของน้ำต้องการความร้อน Latent heat ของการระเหยของน้ำ ณ อุณหภูมิปรับอากาศทั่วไปมีค่าประมาณ 1,055 BTU/lb

$$Q_l = 1055 \times m_w = 1055 \times \frac{\text{CFM} (W_2 - W_1)}{1556}$$

$$Q_l = 0.68 \times \text{CFM} (W_2 - W_1)$$

เมื่อ

Q_l = latent heat เปลี่ยนแปลง, BTU/hr

$W_2 - W_1$ = การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้น, gr w./lb d.a.

ในกระบวนการระบบปรับอากาศทั้งหลาย อากาศจะพบกับทั้งการเปลี่ยนแปลง Sensible heat และ Latent heat ไปพร้อมกัน การปรับอากาศเพื่อความสบายของคนต้องการกระบวนการซึ่งทั้ง Sensible และ Latent heat ถูกดึงออกไปจากอากาศ นั่นคือ อากาศถูกทำให้เย็นลงและ Dehumidified โดยดึง Sensible heat ออกไปก่อนและตามด้วยการดึง Latent heat ผลรวม, $Q_t = Q_s + Q_l$ คือ Total heat ที่ถูกดึงสำหรับกระบวนการ

อัตราส่วนระหว่าง Sensible heat ต่อ Total heat (sensible + latent) เรียกว่า RSHR (room sensible heat ratio) ค่านี้มีความสำคัญอย่างมาก ต่อการออกแบบระบบปรับอากาศ เป็นตัวเลขบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ของ Sensible heat และ Latent heat หรือความชื้นในห้อง ถ้าห้องมีความชื้นต่ำหรือปริมาณไอน้ำในอากาศต่ำ ค่านี้จะมีค่าสูงในทางตรงข้าม ถ้าห้องมีความชื้นสูงหรือปริมาณไอน้ำในอากาศสูง ค่านี้จะมีค่าต่ำ เช่น ห้องที่มี RSHR = 0.6 ก็จะมีปริมาณไอน้ำในอากาศสูงกว่าห้องที่มี RSHR = 0.8 เป็นต้น สำหรับในกรณีห้องผ่าตัดนี้ มีค่า Room sensible heat เท่ากับ 55,568 BTU/hr มีค่า Room latent heat เท่ากับ 4,750 BTU/hr และสามารถวิเคราะห์หาค่า RSHR ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{RSHR} &= \frac{Q_s}{Q_s + Q_l} \\ &= \frac{55,568}{55,568 + 4,750} = 0.92 \end{aligned}$$

จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าบ่งชี้ของความชื้นในห้องไม่สูง เนื่องจากมีความชื้นจากคนที่อยู่ในห้องผ่าตัดเท่านั้น และการพิจารณาในส่วนนี้ ยังไม่ได้รวมผลจากการ Ventilation เนื่องจาก Outdoor air requirement ตามมาตรฐานการออกแบบห้องผ่าตัด

4. การวิเคราะห์ Psychrometric ของอากาศ ร่วมกับ Outdoor air ventilation สำหรับห้องผ่าตัด

จากกรณีศึกษาตัวอย่างในที่นี่ ตามมาตรฐานของห้องผ่าตัด ASHRAE 170 (Ventilation of Health Care Facilities) มีการใช้การหมุนเวียนอากาศ เท่ากับ 25 ACH และมีการใช้ Outdoor air เท่ากับ 5 ACH เมื่อประเมินจากห้องผ่าตัดตัวอย่าง ขนาดกว้าง 8 เมตร ยาว 8 เมตร สูง 3 เมตร มีปริมาตรเท่ากับ 192 m³ พบว่าห้องผ่าตัดตัวอย่างนี้ ต้องการการหมุนเวียนอากาศ เท่ากับ 2,875 CFM (4,800 CMH) มีการใช้ Outdoor air เท่ากับ 575 CFM (960 CMH) มีการใช้ Return air เท่ากับ 2,300 CFM (3,840 CMH) มีการปรับตั้ง Outdoor air ให้สูงมากกว่า Exhaust air เพื่อรักษาความดัน Positive สำหรับห้องผ่าตัด สภาวะภายในห้องปรับอากาศออกแบบไว้ที่ 64.4 deg F (18 deg C), Relative humidity 50% RH, Specific humidity 44.99 gr/lb สภาวะภายนอกอาคารออกแบบไว้ที่ 89.6 deg F (32 deg C), Relative humidity 81.2% RH, Specific humidity 173.35 gr/lb

ภาระความร้อนที่มาจาก Outdoor ventilation ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ 1) Sensible heat และ 2) Latent heat โดยสามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$Q_s = 1.1 \times \text{CFM} \times (t_2 - t_1)$$

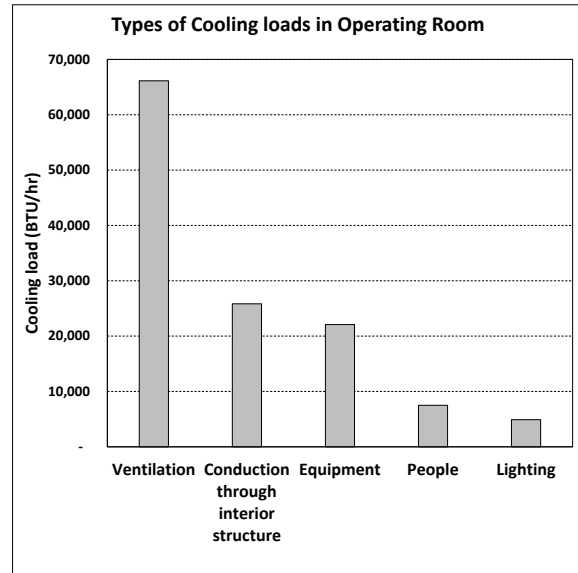
$$Q_s = 1.1 \times 575 \times (89.6 - 64.4) = 15,939 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$$Q_l = 0.68 \times \text{CFM} (W_2 - W_1)$$

$$Q_l = 0.68 \times 575 (173.35 - 44.99) = 50,189 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

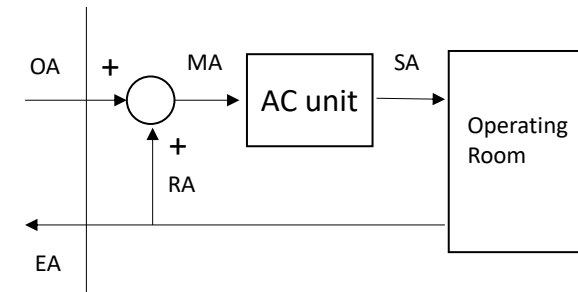
จากการวิเคราะห์สภาวะออกแบบสภาพแวดล้อมสำหรับประเทศไทย พบว่า Outdoor air มี Sensible heat มีค่าเท่ากับ 15,939 BTU/hr Latent heat มีค่าเท่ากับ 50,189 BTU/hr Total heat มีค่าเท่ากับ 66,128 BTU/hr

ภาระความร้อนทั้ง 5 หมวดประกอบไปด้วย 1) Conduction through interior structure 2) Equipment 3) Lighting 4) People 5) Outdoor air ventilation ได้ถูกนำมา plot เปรียบเทียบแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 3 เปรียบเทียบ Cooling load

จะเห็นได้ว่าภาระความร้อนที่มาจาก Ventilation จะมีค่าสูงสุด เนื่องจากมาตรฐานบังคับทางด้านการออกแบบห้องผ่าตัดที่ต้องการ Outdoor air ในอัตราการไหลที่มาก ประกอบกับประเทศไทยมีสภาวะอากาศที่ร้อนชื้นส่งผลให้ค่าภาระความร้อนทั้งทางด้าน Sensible และ Latent heat ที่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Latent heat ที่สูงมากกว่า Sensible heat ถึง 3.2 เท่า



รูปที่ 4 Schematic diagram ของระบบหมุนเวียนอากาศของห้องผ่าตัด

Air mixing process เกิดขึ้นจากการผสมกันระหว่าง Return air และ Outdoor air โดยใช้หลักการ Conservation of energy principle และ Conservation of mass ของไอน้ำก่อนและหลังการผสม และให้ Outdoor air เป็นจุดที่ 1 Return air เป็นจุดที่ 2 และ Mixing air เป็นจุดที่ 3 จะได้ว่า

$$DB_3 = \frac{(CFM_1 \times DB_1) + (CFM_2 \times DB_2)}{CFM_3}$$

$$DB_3 = \frac{(575 \times 89.6) + (2300 \times 64.4)}{2875}$$

$$= 69.4 \text{ deg F}$$

$$W_3 = \frac{(CFM_1 \times W_1) + (CFM_2 \times W_2)}{CFM_3}$$

$$W_3 = \frac{(575 \times 173.4) + (2300 \times 50)}{2875}$$

$$= 70.7 \frac{\text{gr}}{\text{lb}}$$

จากเงื่อนไขที่ต้องใช้การหมุนเวียนอากาศเท่ากับ 25 ACH เทียบเท่ากับ 2,875 CFM จุดที่ 1 เป็นสภาวะ Supply air condition (t_1, W_1) จุดที่ 2 เป็นสภาวะภายในห้อง (t_2, W_2) ทำให้สามารถวิเคราะห์หา Supply air conditions ได้ว่า สภาวะภายในห้อง

$$Q_s = 1.1 \times CFM \times TC$$

$$= 1.1 \times CFM \times (t_2 - t_1)$$

$$t_1 = t_2 - \left\{ \frac{Q_s}{1.1 \times CFM} \right\}$$

$$= 64.4 - \left\{ \frac{55,568}{1.1 \times 2,875} \right\} = 46.83 \text{ deg F}$$

$$Q_l = 0.68 \times CFM \times (W_2 - W_1)$$

$$W_1 = W_2 - \left\{ \frac{Q_l}{0.68 \times CFM} \right\}$$

$$= 50.0 - \left\{ \frac{4,750}{1.1 \times 2,875} \right\} = 42.56 \frac{\text{gr}}{\text{lb}}$$

แบบทางคณิตศาสตร์ทั้งหมดได้ถูกนำมาสร้างเป็น Block diagram เพื่อการวิเคราะห์ห้อย่างเป็นระบบ โดยใช้ อักษรย่อต่อไปนี้

CFMr = volume flowrate of return air

CFMm = volume flowrate of mixed air

To = dry bulb temperature of outdoor air

Tr = dry bulb temperature of outdoor air

Ts = dry bulb temperature of supply air

Tm = dry bulb temperature of mixed air

W'o = humidity ratio of outdoor air

W'r = humidity ratio of return air

W's = humidity ratio of supply air

W'm = humidity ratio of mixed air

Qs = sensible heat for room load

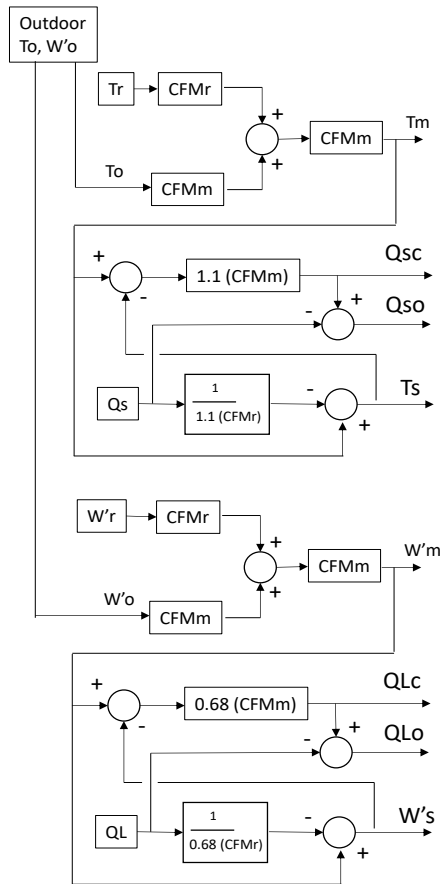
Qsc = sensible heat for cooling coil

Qso = sensible heat for outdoor air

QL = latent heat for room load

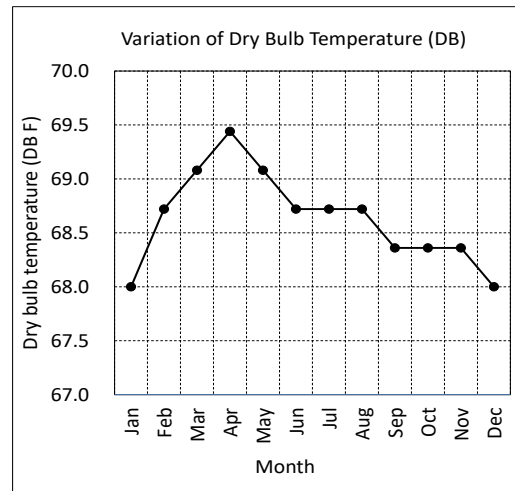
QLc = latent heat for cooling coil

QLo = latent heat for outdoor air



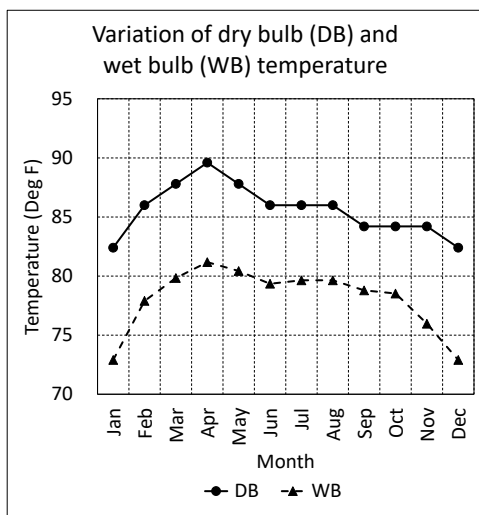
รูปที่ 5 Block diagram ของระบบหมุนเวียนอากาศของห้องผ่าตัด

สภาวะอากาศและความชื้นของอากาศภายนอกโดยเฉลี่ยแต่ละเดือน [6] จะใช้เป็น Input สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นได้ว่าสภาวะอากาศของประเทศไทย อุณหภูมิอยู่ในช่วง 82.4-89.6 deg F (28-32 deg C) และความชื้นอยู่ในช่วง 64-78 %RH [7], [8] การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นในช่วงที่กว้าง เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้ภูมิอากาศของประเทศไทยมีลักษณะเป็นแบบร้อนชื้น

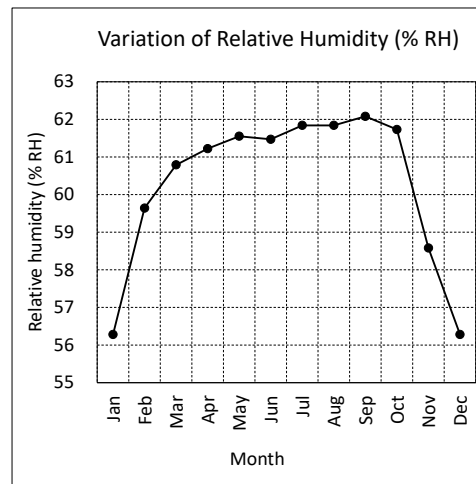


รูปที่ 7 ผลการ Simulation ของ Dry bulb temperature สำหรับ Mixed air

5. ผลวิเคราะห์จากจาก Simulation

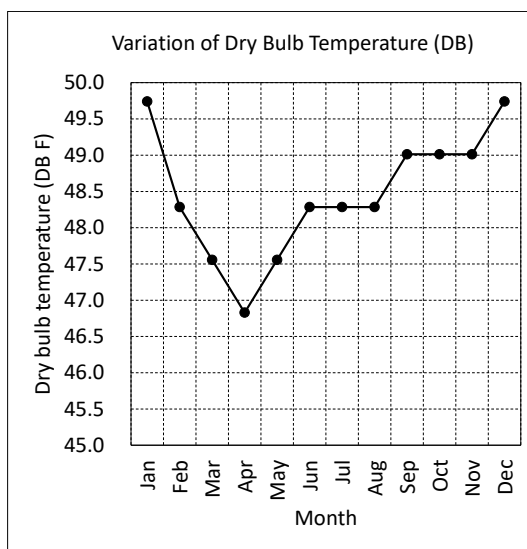


รูปที่ 6 สภาวะ Dry bulb temperature และ Wet bulb temperature ของเดือนต่าง ๆ โดยเฉลี่ยของประเทศไทย

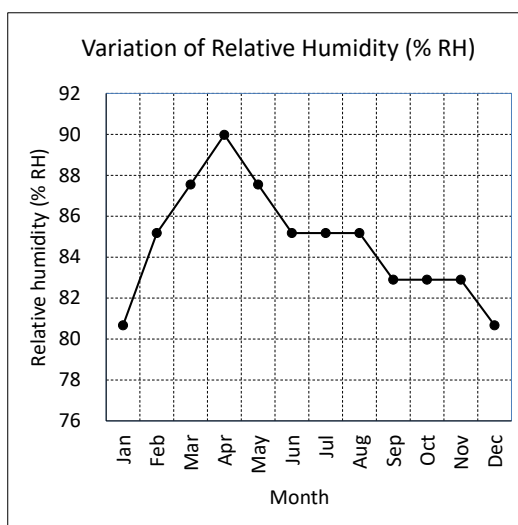


รูปที่ 8 ผลการ Simulation ของ Relative humidity สำหรับ Mixed air

จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ค่าของ Dry bulb temperature สำหรับ Mixed air เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 68.00 - 69.44 deg F (20-20.80 deg C) ค่าต่ำสุดเกิดขึ้นในเดือนมกราคม ค่าสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนเมษายน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 68.63 deg F [7] ค่าของ Relative humidity สำหรับ Mixed air เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 56.28 - 62.08 %RH ค่าต่ำสุดเกิดขึ้นในเดือนมกราคม ค่าสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนกันยายน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 60.28 %RH [8]

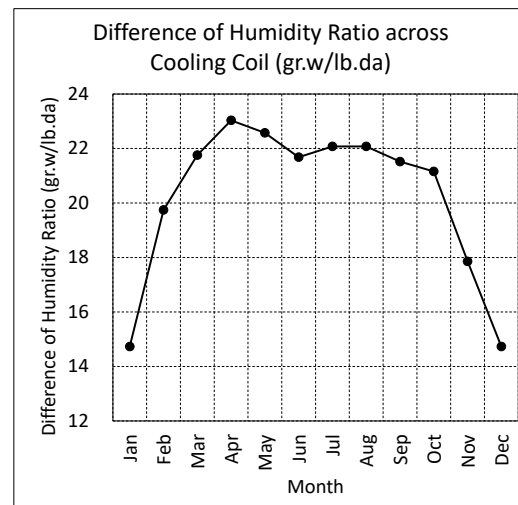


รูปที่ 9 ผลการ Simulation ของ Dry bulb temperature สำหรับ Supply air



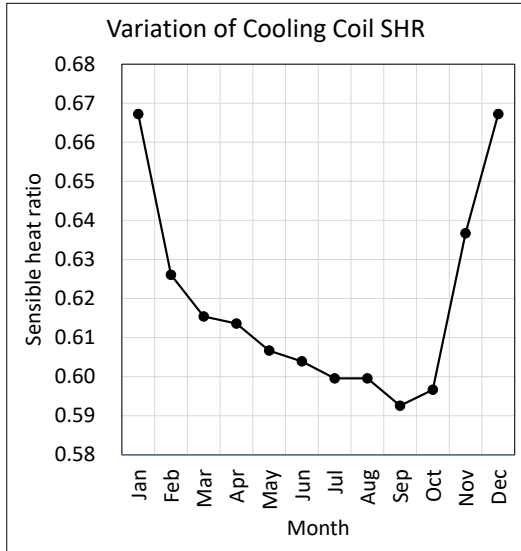
รูปที่ 10 ผลการ Simulation ของ Relative humidity สำหรับ Supply air

จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ค่าของ Dry bulb temperature สำหรับ Supply air เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 46.83 - 49.74 deg F ค่าต่ำสุดเกิดขึ้นในเดือนเมษายน ค่าสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนมกราคม มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 48.47 deg F [9] ค่าของ Relative humidity สำหรับ Supply air เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 80.67 - 89.98 %RH ค่าต่ำสุดเกิดขึ้นในเดือนธันวาคม ค่าสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนเมษายน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 84.65 %RH [10]



รูปที่ 11 ผลการ Simulation สำหรับ Difference of Humidity ratio across Cooling coil

จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ค่าของ Difference of Humidity ratio across Cooling coil เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 14.73 - 23.03 gr.w/lb.da ค่าต่ำสุดเกิดขึ้นในเดือนมกราคม ค่าสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนเมษายน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 20.25 gr.w/lb.da [11]



รูปที่ 12 ผลการ Simulation ของ SHR (Sensible heat ratio) สำหรับ Cooling coil

จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ค่าของ Sensible heat ratio ของ Cooling coil เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.59 – 0.67 ค่าต่ำสุดเกิดขึ้นในเดือนกันยายน ค่าสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.62 [12]

6. บทสรุป

- ประเภทของภาระทำความเย็น (Cooling load) ได้มีการเปรียบเทียบทั้งในส่วนของความร้อนแฝง (Latent heat) และ ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) จากการวิเคราะห์พบว่า Ventilation cooling load มีค่าสูงสุด คิดเป็น 53% ของ Cooling load ทั้งหมด Conduction in building และ ภาระความร้อน (Heat load) จากอุปกรณ์ในห้องผ่าตัด มีค่ารองลงมา
- ผลกระทบของการเติมอากาศบริสุทธิ์จากภายนอก (Outdoor air, OA) ส่งผลให้ Mixed air (MA)

เปลี่ยนแปลงในช่วง 68.00 - 69.44 deg F (20-20.80 deg C) (ค่าเฉลี่ย 68.63 deg F) (ค่าเฉลี่ย 20.35 deg C) และส่งผลให้ Humidity ratio (W) เปลี่ยนแปลงในช่วง 56.28 - 62.08 gr.w/lb.da (ค่าเฉลี่ย 60.28 %RH)

- ผลกระทบของการเติมอากาศบริสุทธิ์จากภายนอก (Outdoor air, OA) ส่งผลให้ Supply air (SA) เปลี่ยนแปลงในช่วง 46.83 – 49.74 deg F (8.24-9.85 deg C) (ค่าเฉลี่ย 48.47 deg F) (ค่าเฉลี่ย 9.15 deg C) และส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เปลี่ยนแปลงในช่วง 80.67 – 89.98 %RH (ค่าเฉลี่ย 84.65 %RH)
- การเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศภายนอก ทำให้สภาวะอากาศภายในยังอยู่ในช่วงของค่ามาตรฐาน

จากผลการ Simulation ตลอดทั้งปีของสภาวะอากาศในประเทศไทย จะเห็นได้ว่าระบบทำความเย็น (Cooling coil) ของเครื่องปรับอากาศในห้องผ่าตัดจะสามารถทำงานภายใต้ความแตกต่างของความชื้นในอากาศ ต่กรวม Cooling coil 14.73 – 23.03 gr.w/lb.da ได้ โดยระบบทำความเย็น (Cooling coil) และระบบพัดลม (Fan) จะสามารถทำงานโดยมีค่า Coil sensible heat gain ration (Coil SHR) อยู่ในช่วง 0.59-0.67 จึงจะสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในห้องผ่าตัดได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์เทคโนโลยีความปลอดภัยสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Sadrizadeh et al., “ A systematic review of operating room ventilation,” Journal of Building Engineering, vol. 40, Aug., 2021.
- [2] M. A. Melhado, “ Review of ventilation systems in operating rooms in view of infection control” , in Postgraduate Research Conf. in the Built and Human Environment, Technische Universiteit Delft, BuHu, University of Salford, pp. 478-487.
- [3] C. R. Antón et al., “Assessing the Energy Demand Reduction in a Surgical Suite by Optimizing the HVAC Operation During Off-Use Periods,” Applied Sciences, vol. 10, no. 7, Mar., pp. 2233, 2020.
- [4] C. A. Balaras, E. Dascalaki, and A. Gaglia, “ HVAC and indoor thermal conditions in hospital operating rooms,” Energy and Buildings, vol. 39, no. 4, Apr., pp. 454 - 470, 2007.
- [5] “Operating Room Ventilation Systems Best Practices Guide for Energy Efficiency,” in A GREENING HEALTH CARE RESEARCH PROJECT, Nov., 2017.
- [6] F. Memarzadeh “ Comparison of Operating Room Ventilation Systems in the Protection of the Surgical Site,” ASHRAE Transactions, Jan., 2004.
- [7] T. Gormley et al., “ Cost- benefit analysis of different air change rates in an operating room environment,” American Journal of Infection Control, vol. 45, no. 12, Dec., pp. 1318–1323, 2017.
- [8] K. Khankari “ Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of Hospital Operating Room Ventilation Systems Part I: Analysis of Air Change Rates,” ASHRAE journal, vol. 60, no. 5, May., 2018.
- [9] F. Memarzadeh “ Comparison of Operating Room Ventilation Systems in the Protection of the Surgical Site,” ASHRAE Transactions, Jan., 2002.
- [10] Z. Liu, H. Liu, H. Yin, R. Rong, G. Cao and Q. Deng, “Prevention of surgical site infection under different ventilation systems in operating room environment,” Frontiers of Environmental Science & Engineering, vol. 15, no. 3, pp. 36, 2021.