

# คืนสมรรถนะให้ระบบปรับอากาศ ด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต ฆ่าเชื้อโรคบนคอยล์เย็น

เขียนโดย: **Timothy Leach, Member ASHRAE** และ **Graham Taylor, PE, Member ASHRAE**  
ตีพิมพ์ในวารสาร ASHRAE Transactions, vol. 123, no. 1, 2017



แปลและเรียบเรียงโดย: ผศ.ดร. พลกฤต กฤษไมตรี Email: k.pollakrit@gmail.com  
กรรมการวิชาการ สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย

## บทคัดย่อ

คอยล์เย็นของระบบปรับอากาศเป็นแหล่งเก็บสะสมจุลินทรีย์ จุลินทรีย์เหล่านี้นอกจากจะทำให้คุณภาพอากาศภายในอาคารไม่ดีแล้วยังสร้างฟิล์มชีวภาพ (biofilm) บนผิวคอยล์เย็นซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของระบบปรับอากาศต่ำ สมรรถนะที่ลดลงเกิดจากการไหลของอากาศลดลง ความดันตกเพิ่มขึ้น และการไหลของอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ คู่มือการออกแบบระบบปรับอากาศสำหรับโรงพยาบาลและคลินิก 2013 ของ ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) ระบุว่า “การกระจายความเร็วของอากาศที่ไม่สม่ำเสมอผ่านหน้าคอยล์เย็นอาจส่งผลให้สูญเสียขนาดการทำความเย็น เกิดการส่งผ่านความชื้น หรือทำให้เกิดน้ำแข็งจับ” ASHRAE ตระหนักว่าการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตฆ่าเชื้อโรค (Ultraviolet Germicidal

Irradiation, UVGI) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟิล์มชีวภาพบนผิวคอยล์เย็น โดยคู่มือ ASHRAE สำหรับงานด้านการปรับอากาศ การระบายอากาศ และการทำความร้อน (ASHRAE Handbook for HVAC Applications) แนะนำว่าค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตซี (Ultraviolet C, UVC) ในช่วง  $50-100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ที่ผิวคอยล์สามารถรักษาสภาพคอยล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (หมายเหตุ UVC คือรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 100 - 280 นาโนเมตร ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญพันธุ์ของเชื้อโรคได้จึงมักเรียกว่า UVGI) อย่างไรก็ตามเอกสารดังกล่าวไม่ได้ระบุถึงประสิทธิภาพหรือความเข้มของ UVC ที่จำเป็นสำหรับการส่งผ่านเข้าไปในคอยล์ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างของครีบหรือความลึกของคอยล์ บทความนี้จะนำเสนอข้อมูลจากการสร้างแบบ

จำลองทางห้องปฏิบัติการและการวัดค่าความเข้มของ UVC ที่พื้นผิวของคอยล์ทั่วไปในระบบปรับอากาศ เพื่อทำความเข้าใจว่า UVC ฉายผ่านช่องว่างของคอยล์ได้ดีเพียงใด โดยทำการวัดที่ผิวของคอยล์ลึก 2 นิ้ว และ 4 นิ้ว ตามลำดับ ความเข้มของรังสี UVC ถูกวัดและบันทึกด้วยเครื่องวัดรังสีที่ปรับเทียบแล้ว ซึ่งสามารถสร้างผลลัพธ์ที่ตรวจสอบย้อนกลับไปยัง National Institute of Standards and Technology (NIST) และผ่านไปยัง International System of Units (SI), ANSI/NCSI Z540.1 - 1994 และ ANSI/NCSI Z540.3 - 2006 ได้

การนำเสนอผลการลดฟิล์มชีวภาพเชิงทฤษฎีบนผิวคอยล์ทั่วไปจะแสดงสำหรับค่าความเข้มของ UVC ที่ต่างกันที่ความลึกของคอยล์ที่ต่างกัน การวิเคราะห์เปรียบเทียบแสดงให้เห็นที่ความเข้มตั้งแต่ 50 - 1,000  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  การเปรียบเทียบนี้ขึ้นอยู่กับทฤษฎีการวัดทางห้องปฏิบัติการ ข้อมูลที่ดีพิมพ์ และข้อมูลจากการศึกษาภาคสนามที่นำมาใช้หาปริมาณความเข้มข้นของจุลินทรีย์บนพื้นผิวของคอยล์เย็น [Leach and Scheir 2014; Ryan, et al., 2011] ข้อมูลภาคสนามนำเสนอจากกรณีศึกษาของโรงพยาบาลระดับตติยภูมิ (โรงพยาบาลศูนย์) สองแห่ง โรงพยาบาลทั้งสองแห่งประสบปัญหาในระบบปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพต่ำ หลังจากทำความสะอาดคอยล์ด้วยสารเคมีซ้ำ ๆ

ผลจากการศึกษาพบว่าโรงพยาบาลทั้งสองแห่งสามารถลดฟิล์มชีวภาพบนคอยล์และพื้นฟูสมรรถนะของระบบได้อย่างดีโดยใช้ความเข้มของรังสี UVC บนผิวหน้าคอยล์ตั้งแต่ 1,000  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ขึ้นไป นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์การปนเปื้อนจากคอยล์ก่อนและหลังการติดตั้ง UVGI จากข้อมูลเหล่านี้สามารถกำหนดมาตรฐานสำหรับความเข้มของรังสี UVC ขั้นต่ำเพื่อรักษาสภาพของคอยล์เย็นที่ความลึกและระยะห่างของครีบต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งหมายถึงการรักษาสมรรถนะของระบบปรับอากาศนั่นเอง

## บทนำ

การปนเปื้อนเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราในคอยล์เย็นของระบบปรับอากาศเป็นปรากฏการณ์ที่แพร่หลายซึ่งนำไปสู่ปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality, IAQ) ที่ไม่ดี [Huegenholtz 1992; Levitin et al., 2001; Apter 1994] และการติดเชื้อในโรงพยาบาล (Hospital Acquired Infections, HAIs) [Walter 1969; Ryan et al., 2011] โดยทั่วไปช่วงท่ายหรือด้านส่งออกของคอยล์เย็นจะมีความเข้มข้นของจุลินทรีย์สูงสุดอยู่ในช่วง  $10^5 - 10^6$  หน่วยการก่อรูปเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ (colony forming units, CFUs) ต่อตารางเซนติเมตรของพื้นที่ผิวคอยล์ [Huegenholtz and Fuerst 1992; Ryan et al., 2011 Leach and Scheir 2014] นอกเหนือจากการที่มีคุณภาพอากาศภายในที่ไม่ดีแล้วฟิล์มชีวภาพที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวคอยล์เย็นอาจทำให้ระบบปรับอากาศมีสมรรถนะต่ำซึ่งเป็นผลมาจากการไหลของอากาศลดลง ความดันตกเพิ่มขึ้น และการไหลของอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ [ASHRAE 2013; Kowalski 2011; Sigel and Nazaroff 2002]

การฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตฆ่าเชื้อโรคได้รับการยอมรับว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟิล์มชีวภาพที่เติบโตขึ้นบนผิวคอยล์เย็น [ASHRAE 2015; ASHRAE 2016 Leach and Scheir 2014; Ryan et al., 2011] คู่มือ ASHRAE สำหรับงานด้านการปรับอากาศ การระบายอากาศ และการทำความร้อนแนะนำว่าค่าความเข้มรังสี UVC ในช่วง 50 - 100  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ที่ผิวคอยล์สามารถรักษาคอยล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามเอกสารดังกล่าวไม่ได้ระบุถึงประสิทธิภาพหรือความเข้มของ UVC ที่จำเป็นสำหรับการส่งผ่านคอยล์ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างของครีบหรือความลึกของคอยล์ บทความนี้จะนำเสนอข้อมูลจากการสร้างแบบจำลองทางห้องปฏิบัติการและการวัดค่าความเข้มของ UVC ที่พื้นผิวของคอยล์ทั่วไปในระบบปรับอากาศ การวิเคราะห์เพิ่มเติมจะ

นำเสนอเพื่อแสดงให้เห็นถึงการฉายผ่านที่มีประสิทธิภาพของรังสี UVC ผ่านช่องว่างของคอยล์และการลดจุลินทรีย์ทางทฤษฎีบนพื้นผิวคอยล์

มีสองวิธีในการตรวจสอบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการขจัดคราบและการฆ่าเชื้อบนคอยล์ ได้แก่ (ก) การสุ่มตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา ก่อนกับหลังการขจัดคราบและการฆ่าเชื้อบนคอยล์ หรือ (ข) พิจารณาว่าลักษณะการทำงาน (สมรรถนะ) ของคอยล์กลับสู่สภาวะที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ [Kowalski 2011] บทความนี้แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์โดยใช้วิธีการตรวจสอบทั้งสองและสรุปรวมกับการนำเสนอข้อมูลภาคสนามจากกรณีศึกษาของโรงพยาบาลระดับตติยภูมิ (โรงพยาบาลศูนย์) สองแห่ง โรงพยาบาลทั้งสองแห่งประสบปัญหาหระบบปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพต่ำ หลังจากทำความสะอาดคอยล์ด้วยสารเคมีซ้ำๆ ผลจากการศึกษาพบว่าโรงพยาบาลทั้งสองแห่งสามารถลดฟิล์มชีวภาพบนคอยล์และพื้นฟูสมรรถนะของระบบได้อย่างดีโดยใช้ความเข้มของรังสี UVC ตั้งแต่  $1,000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ขึ้นไป นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์การปนเปื้อนจากคอยล์ก่อนและหลังการติดตั้ง UVGI จากข้อมูลเหล่านี้สามารถกำหนดมาตรฐานสำหรับความเข้มของรังสี UVC ขั้นต่ำเพื่อรักษาสภาพของคอยล์เย็นที่ความลึกและระยะห่างของครีบบ้างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งหมายถึงการรักษาสมรรถนะของระบบปรับอากาศนั่นเอง

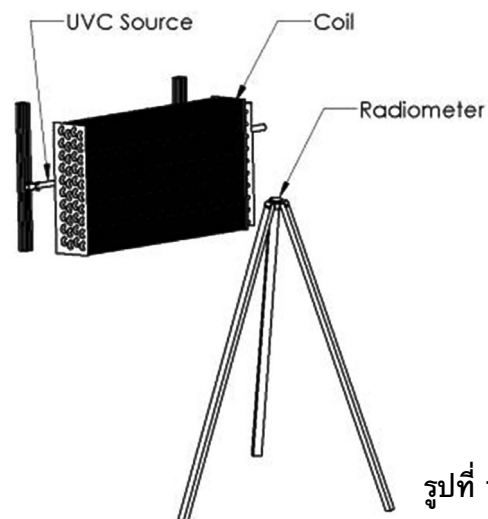
## **การสร้างแบบจำลองห้องปฏิบัติการและการลดจุลินทรีย์ทางทฤษฎี**

### **วิธีการและวัสดุอุปกรณ์**

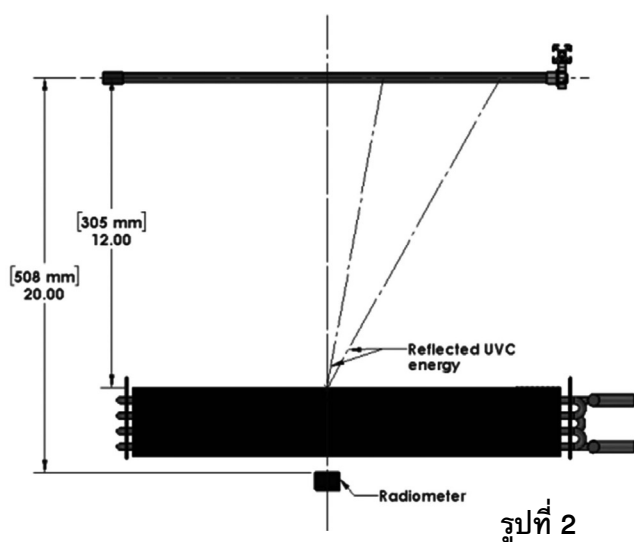
แบบจำลองสองชั้นตอนอย่างง่ายได้สร้างขึ้นและนำมาใช้เพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของ UVGI ต่อการเจริญเติบโตของฟิล์มชีวภาพภายในช่องว่างของคอยล์ตามแนวลึก ชั้นตอนแรกเป็นการจำลองและวัดความเข้มรังสี UVC ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) ที่ฉายผ่านเข้าไปในคอยล์เย็นของระบบปรับอากาศทั่วไป เมื่อเกิดการ

ฉายผ่านเข้าไปของรังสี UVC ขึ้นแล้วจึงสร้างทฤษฎีการลดฟิล์มชีวภาพที่คาดหวังได้

การสร้างแบบจำลอง UVC ใช้คอยล์ [Rahn Industries Whittier, CA] ที่มีขนาดความกว้าง 30 นิ้วและความสูง 40 นิ้วเท่ากัน แต่มีความลึกต่างกันสองแบบ คือ ลึก 2 นิ้ว และ 4 นิ้ว ตามลำดับ โดยเป็นคอยล์ใหม่ยังไม่ได้ใช้และสร้างจากครีบอลูมิเนียมและท่อทองแดง คอยล์ทั้งสองมีครีบบ 10 ครีบบต่อ 1 นิ้ว การทดสอบทำที่อุณหภูมิห้องโดยใช้คอยล์ที่ไม่ได้ใส่สารทำความเย็น และใช้แหล่งพลังงาน UVC สองแหล่ง [Steril-Aire, Inc. Burbank, CA] ได้แก่ หลอด UVC ขนาด 24 นิ้วหนึ่งหลอด และหลอด UVC ขนาด 36 นิ้วหนึ่งหลอดตามลำดับ แหล่งกำเนิดรังสี UVC ตั้งอยู่ห่างจากตัวตรวจวัดรังสี UVC [Gigahertz-Optik, GmbH Puchheim, Germany] 20 นิ้ว และห่างจากหน้าคอยล์ 12 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีตัวตรวจวัดรังสี UVC ติดตั้งบนขาตั้งกลิ้งในรูปแบบที่อยู่ตรงกลางคอยล์ดังแสดงในรูปที่ 1 ในการเริ่มต้นทดสอบแต่ละครั้งหลอด UVC ถูกเปิดและทำงานเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อการรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิ มีการบันทึกผลการวัดสามครั้งสำหรับแหล่งพลังงาน UVC แต่ละหลอด การวัดครั้งแรกได้รับการบันทึกโดยไม่มีคอยล์ และแต่ละครั้งที่มีคอยล์ลึก 2 นิ้ว และ 4 นิ้วอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวตรวจวัดรังสีดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1



## ผลลัพธ์และการอภิปราย

**การสร้างแบบจำลอง UVC และการลดจุลินทรีย์ในทางทฤษฎี** การวัดค่าความเข้มรังสี UVC แสดงให้เห็นว่ามีเพียงบางส่วนของพลังงานจากการฉายรังสีบนหน้าคอยล์ที่ผ่านลึกเข้าไปในช่องว่างของคอยล์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากหลายปัจจัย เช่น การสูญเสียพลังงานตามกฎกำลังสองผกผัน (inverse square law) ของนิวตัน ช่องทางที่ลดลงเนื่องจากการครีบบที่แคบและโค้ง และการดูดซับพลังงานของอลูมิเนียมที่มีค่าประมาณ 26% ทุกครั้งที่เกิดการสะท้อน [Kowalski 2011] การทดสอบแบบเรียบง่ายนี้ (ซึ่งไม่คำนึงถึงสภาวะการทำงาน เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และการปนเปื้อน) แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียพลังงาน UVC เท่ากับ 1-Log (10-1) สำหรับการฉายผ่านคอยล์ลึกเข้าไปทุกๆ 1 นิ้ว ดังแสดงในตารางที่ 1 ตามแบบจำลองนี้ความเข้มของ UVC ที่ผิวหน้าคอยล์ 50-100  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  [ASHRAE 2015] จะให้ค่าคงเหลือเท่ากับ 0.5 - 1  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ที่ความลึก 2 นิ้วจากผิวหน้าคอยล์ ขั้นตอนที่สองของการวิเคราะห์ได้พิจารณาประสิทธิภาพเชิงทฤษฎีของรังสี UVC ที่มีความเข้มหน้าคอยล์เท่ากับ 100  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  [ASHRAE 2015] บนฟิล์มชีวภาพชั้นเดียวที่ความลึก 2 นิ้วภายในคอยล์ ฟิล์มชีวภาพชั้นเดียวโดยทั่วไปจะมี 105 - 106 หน่วยการก่อรูปเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ต่อตารางเซนติเมตร (colony

forming units/cm<sup>2</sup>, CFUs/cm<sup>2</sup>) [Leach and Scheir 2014; Ryan et al., 2011; Moreau-Marquis et al., 2010] การทดสอบนี้เลือก *Pseudomonas* sp. ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่แยกได้จากระบบปรับอากาศทั่วไป [Leach and Scheir 2014; Ryan et al., 2011] เพื่อใช้ในการแสดงผล โดยแบคทีเรียนี้จะเพิ่มสองเท่าโดยประมาณในทุกๆ 20 นาที ปริมาณรังสี UVC (dose) ที่จำเป็นสำหรับการลด *Pseudomonas* sp. ลง 1-Log หรือ 90% คือ 5,495  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  [Zelle 1955] ปริมาณรังสี UVC สะสมในช่วงเวลา 20 นาทีที่คาดหวังสำหรับ *Pseudomonas* sp. บนผิวคอยล์ที่ความลึกของคอยล์ 2 นิ้ว ควรมีค่าเท่ากับ 1  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  คูณ 1,200 วินาที หรือ 1,200  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  ค่าความเข้มนี้เท่ากับการลด *Pseudomonas* sp. ลงประมาณ 22% ในทุกๆ 20 นาที ผลลัพธ์คือ 105 หรือ 100,000 CFUs ของ *Pseudomonas* sp. คูณ 22% ที่ลดลงเท่ากับการอยู่รอดของ 78,000 CFUs ซึ่งแบคทีเรียที่อยู่รอด 78,000 CFUs นี้จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในระยะเวลา 20 นาที เท่ากับการเพิ่มความเข้มข้นของ CFU ภายในฟิล์มชีวภาพ  $\geq 50\%$  หรือเพิ่มเป็น 156,000 CFUs โดยประมาณ

การเพิ่มขึ้น 1-log หรือ 10 เท่าของค่าความเข้ม UVC ที่หน้าคอยล์จะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น ความเข้ม 1,000  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ที่หน้าคอยล์จะให้ผลของความเข้ม 10  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ที่ความลึกของคอยล์ 2 นิ้ว ในช่วง 20 นาที ปริมาณรังสี UVC สะสมที่คาดหวังสำหรับ *Pseudomonas* sp. บนผิวคอยล์ที่ความลึกของคอยล์ 2 นิ้ว จะมีค่าเท่ากับ 10  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  คูณ 1,200 วินาที หรือ 12,000  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  ค่าความเข้มนี้เท่ากับการลด *Pseudomonas* sp. ลงประมาณ 99% ในทุกๆ 20 นาที ผลลัพธ์คือ 105 หรือ 100,000 CFUs ของ *Pseudomonas* sp. คูณ 99% ที่ลดลงเท่ากับการอยู่รอดของ 1,000 CFUs

ตารางที่ 1 พลังงานรังสี UVC ผ่านคอยล์เย็นที่วัดได้

| ขนาดของหลอด UVC | พลังงานรังสี UVC ที่ตำแหน่งต่าง ๆ |                                |                               |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                 | ผิวหน้าคอยล์                      | ความลึก 2 นิ้ว<br>ภายในคอยล์   | ความลึก 4 นิ้ว<br>ภายในคอยล์  |
| 24 นิ้ว         | 312 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$     | 1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$    | 0.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ |
| 36 นิ้ว         | 900 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$     | 2.75 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ | 0.8 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ |

ซึ่งแบคทีเรียที่อยู่รอด 1,000 CFUs จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในระยะเวลา 20 นาที เทียบกับการลดความเข้มข้นของ CFU ภายในฟิล์มชีวภาพลงเหลือเพียง 2,000 CFUs เท่านั้น ในระยะเวลา 20 นาทีถัดไปจะส่งผลให้มีการลดลงอีก 99% ของจำนวนที่เหลืออยู่ 2,000 CFUs ไปเป็น 40 CFUs โดยประมาณ

การจำลองนี้แสดงให้เห็นว่ารังสี UVC ความเข้ม 50 - 100  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ที่หน้าคอยล์ไม่มีประสิทธิภาพในการขจัดฟิล์มชีวภาพที่อยู่ลึกภายในคอยล์ ตรงกันข้ามการเพิ่มขึ้นของความเข้ม UVC ที่ 100  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็น 1,000  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ที่ผิวหน้าคอยล์จะก่อให้เกิดผลลัพธ์ตามที่ตั้งใจไว้ในการทำความสะอาดช่องว่างระหว่างครีบบนคอยล์

### การใช้ UVGI ในงานจริงและการวิเคราะห์วิธีการและวัสดุอุปกรณ์

โรงพยาบาลสองแห่งได้รับเลือกให้ติดตั้ง UVGI โรงพยาบาล A เป็นโรงพยาบาลเอกชนที่ตั้งอยู่ในรัฐแคลิฟอร์เนียตอนกลาง และโรงพยาบาล B เป็นโรงพยาบาลสำหรับการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัยที่ตั้งอยู่ในรัฐเทนเนสซีตอนกลาง โรงพยาบาล A และโรงพยาบาล B กำลังประสบปัญหาค่าความดันตกเพิ่มขึ้น การไหลของอากาศลดลง และการไหลของอากาศที่ไม่สม่ำเสมอผ่านคอยล์เย็นของระบบปรับอากาศ โรงพยาบาล A มีคอยล์ลึก 8 แถว และโรงพยาบาล B มีคอยล์ลึก 10 แถว ระยะห่างของครีบบนคอยล์ที่โรงพยาบาลทั้งสองเท่ากับ 10 ครีบบน

กระบวนการบรรเทาปัญหาเบื้องต้นของโรงพยาบาล A และ B คือการล้างอัดฉีด (power wash) ทั้งด้านหน้าและด้านหลังคอยล์ด้วยสารลดแรงตึงผิวเกรดอุตสาหกรรมที่ใช้ขจัดคราบบนคอยล์ โรงพยาบาล A ทำความสะอาดคอยล์สี่ครั้งในช่วง 30 วัน โดยบุคลากรด้านวิศวกรรมของโรงพยาบาล โรงพยาบาล B ทำความสะอาดคอยล์สองครั้งในช่วง 14 วัน โดยใช้ผู้รับเหมาทำความสะอาดคอยล์จากภายนอก

โรงพยาบาลทั้งสองแห่งตระหนักว่าไม่สามารถปรับปรุงการไหลอากาศได้โดยการทำมาสะอาดด้วยสารเคมีดังแสดงในตารางที่ 4 จากผลการทดสอบดังกล่าวโรงพยาบาล A และ B ได้เลือกใช้กระบวนการบรรเทาผลกระทบอื่นๆ กระบวนการทางเลือกที่ใช้โดยโรงพยาบาลทั้งสองคือการติดตั้งระบบ UVGI [Steril-Aire, Inc.] ที่ทางออกของคอยล์เย็น โดย ASHRAE ได้ระบุว่า UVGI เป็นเทคโนโลยีที่สามารถยับยั้งการเติบโตของฟิล์มชีวภาพบนคอยล์เย็นในระบบปรับอากาศ [ASHRAE 2015] ระบบ UVGI ซึ่งติดตั้งโดยโรงพยาบาล A และ B ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ความเข้มของรังสี UVC อย่างน้อยที่สุด  $\geq 1,000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตลอดทั้งหน้าทางออกของคอยล์เย็น ความเข้มของรังสี UVC ถูกเลือกเพื่อฉายผ่านเข้าไปในครีบบนคอยล์เย็นได้หลายนิ้ว โดยตั้งใจที่จะทำลายและขจัดฟิล์มชีวภาพที่เชื่อว่าเป็นสาเหตุการไหลอากาศสมรรถนะต่ำ

โรงพยาบาล A และ B ได้กำหนดที่จะใช้การวิเคราะห์แบบสองขั้นตอนเพื่อหาปริมาณการปรับปรุง

สมรรถนะของคอยล์ ชั้นตอนแรกคือการแยกและระบุสิ่งปนเปื้อนของคอยล์ การวิเคราะห์การปนเปื้อนนี้ทำได้โดยการเพาะเลี้ยงตัวอย่างจุลินทรีย์จากพื้นผิวคอยล์ด้วยที่ป้ายซึ่งปราศจากเชื้อ (sterile swabs) [Healthlink, Inc.] และการเก็บวัสดุแข็งสีดำที่ได้มาจากภายในช่องว่างระหว่างครีของคอยล์เย็น ซึ่งกระทำทั้งก่อนและหลังการติดตั้งระบบ UVGI ครบ 60 วัน ส่วนชั้นตอนที่สองเกี่ยวข้องกับการวัดค่าความดันตก ( $\Delta P$ ) ผ่านคอยล์เย็นที่เปลี่ยนแปลง (ลดลงได้)

**การวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพของคอยล์** ตัวอย่างจากคอยล์ของระบบปรับอากาศถูกเก็บรวบรวมโดยใช้วิธีการมาตรฐานสำหรับพื้นผิวที่ไม่มีชีวิต [AIHA: AIHA Field Guide, 1996] และได้รับการวิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการอิสระ [Pure Earth Environmental Laboratory, Inc., Pennsauken, NJ] แต่ละตัวอย่างที่เก็บรวบรวมได้คือหนึ่งตารางนิ้วจากด้านอากาศออกของคอยล์เย็นของระบบปรับอากาศ ตัวอย่างที่ป้ายเชื้อจากพื้นผิวได้จากการใช้อุปกรณ์เก็บเชื้อ (BBL culturette) [Becton Dickinson, Franklin Lakes, NJ] ซึ่งเป็นที่ป้ายเชื้อทำด้วยไหมสังเคราะห์ซึ่งปราศจากเชื้อ (sterile rayon-tipped swab) ชุบด้วย modified Stuart's transport medium ก่อนที่จะทำการสุ่มตัวอย่างจากพื้นที่ผิวหนึ่งตารางนิ้ว ตัวอย่างที่ป้ายเชื้อเรียบร้อยแล้วถูกนำกลับเข้าไปไว้ในภาชนะเดิม ปิดผนึกและส่งทางอากาศไปยังห้องปฏิบัติการทันทีในวันรุ่งขึ้นเพื่อระบุและหาปริมาณเชื้อราและแบคทีเรียในระดับสายพันธุ์

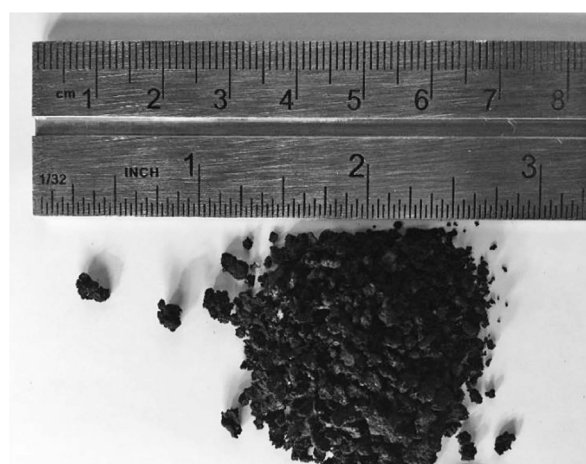
**การวิเคราะห์การปนเปื้อนขนาดใหญ่บนคอยล์ (Coil Bulk Contamination Analysis)** การวิเคราะห์การปนเปื้อนได้ดำเนินการกับการปนเปื้อนขนาดใหญ่ในของแข็งสีดำที่ได้จากคอยล์ดังที่เห็นได้จากรูปที่ 3 และ 4 หลังจากเก็บตัวอย่างแล้วนำไปส่งที่ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัย (State University of New York at Buffalo Instrument Center) เพื่อการวิเคราะห์จากการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

### การวิเคราะห์ เชิงกลของระบบปรับอากาศ

การอ่านค่าความดันตกผ่านคอยล์เย็นของโรงพยาบาล A และโรงพยาบาล B ได้รับการบันทึกไว้หลังจากการทำความสะอาดด้วยสารเคมีและหลังการติดตั้งระบบ UVGI การวัดถูกบันทึกด้วยไมโครมานอมิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic micro manometer) [Shortridge Instruments, Inc. Airdata Multimeter ADM-870C] โรงพยาบาลของ A ใช้บุคลากรในโรงพยาบาลในการบันทึกค่าความดันตกผ่านคอยล์ที่อ่านได้ ขณะที่โรงพยาบาล B ใช้ผู้รับเหมางานทดสอบและปรับสมดุลอากาศจากภายนอก



รูปที่ 3 สิ่งปนเปื้อนจากคอยล์



รูปที่ 4 สิ่งปนเปื้อนที่เก็บจากคอยล์

## ผลลัพธ์และการอภิปราย

ความเข้มของรังสี UVC ถูกเลือกเพื่อฉายผ่านเข้าไปในครีบบนของคอยล์เย็นได้หลายนิ้ว โดยตั้งใจที่จะทำลายและขจัดฟิล์มชีวภาพที่เชื่อว่าเป็นสาเหตุการไหลอากาศสมรรถนะต่ำ โรงพยาบาลทั้งสองแห่งตระหนักว่าไม่สามารถปรับปรุงการไหลอากาศได้โดยการทำความสะอาดด้วยสารเคมี โรงพยาบาลทั้งสองแห่งจึงติดตั้งระบบ UVGI [Steril-Aire, Inc.] ที่ด้านอากาศไหลออกจากคอยล์เย็นซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดผลกระทบ ระบบ UVGI ซึ่งติดตั้งโดยโรงพยาบาล A และ B ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ความเข้มของรังสี UVC  $\geq 1,000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตลอดทั้งหน้าทางออกของคอยล์เย็น

โรงพยาบาล A และ B ใช้การวิเคราะห์แบบสองขั้นตอนเพื่อให้บรรลุเป้าหมาย (ก) ลดปริมาณการปนเปื้อน และ (ข) ตรวจสอบการปรับปรุงสมรรถนะการไหลของอากาศ ขั้นตอนแรกคือการแยกและระบุสิ่งปนเปื้อนของคอยล์ การเพาะเลี้ยงตัวอย่างจุลินทรีย์จากคอยล์ถูกเก็บรวบรวมพร้อมกับตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนขนาดใหญ่ สมรรถนะการไหลของอากาศถูกวัดโดยการตรวจสอบความความดันตกผ่านคอยล์

**การเพาะเลี้ยงตัวอย่างจุลินทรีย์จากคอยล์** การเก็บตัวอย่างกระทำหลังจากการทำความสะอาดด้วยสารเคมีก่อนการติดตั้งระบบ UVGI และหลังการติดตั้งระบบ UVGI ทั้งที่โรงพยาบาล A และโรงพยาบาล B โดยเก็บตัวอย่างที่โรงพยาบาล A หลังการทำความสะอาดคอยล์ด้วยสารเคมี 30 วัน และก่อนการติดตั้ง UVGI ส่วนที่โรงพยาบาล B เก็บตัวอย่างหลังการทำความสะอาดคอยล์ด้วยสารเคมี 60 วัน และก่อนการติดตั้ง UVGI จากตัวอย่างที่เก็บได้พบว่าโรงพยาบาล A มีแบคทีเรียและเชื้อรา 9 ชนิดและโรงพยาบาล B มี 8 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยโรงพยาบาลทั้งสองแห่งพบเชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์เดียวกัน 6 ชนิด แสดงว่าฟิล์มชีวภาพมีลักษณะคล้ายกันโดยธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตเพราะโรงพยาบาลสองแห่งนี้อยู่ในสถานที่ที่แตกต่างกันมากภายในทวีปสหรัฐอเมริกา โรงพยาบาล A อยู่ตอนกลางของรัฐแคลิฟอร์เนีย และโรงพยาบาล B อยู่ตอนกลางของรัฐเทนเนสซี [Acerbi 2016] จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่าความเข้มข้นของจุลินทรีย์จากการเก็บตัวอย่างหลังการทำความสะอาดคอยล์ด้วยสารเคมีนั้นมีค่าสูงจนน่าแปลกใจ

**ตารางที่ 2** ผลการเก็บเชื้อที่ด้านส่งของคอยล์เย็นก่อนการติดตั้งระบบ UVGI ที่โรงพยาบาล A และโรงพยาบาล B

| ชนิดของจุลินทรีย์ | สายพันธุ์ของจุลินทรีย์ | โรงพยาบาล A | โรงพยาบาล B |
|-------------------|------------------------|-------------|-------------|
| แบคทีเรียแกรมบวก  | Bacillus sp.           | X           | X           |
| แบคทีเรียแกรมบวก  | Staphylococcus sp.     | X           |             |
| แบคทีเรียแกรมบวก  | Pseudomonas sp.        | X           | X           |
| แบคทีเรียแกรมบวก  | Acinetobacter sp.      |             | X           |
| เชื้อรา           | Auerobasidium sp.      | X           |             |
| เชื้อรา           | Non-sporulating fungi  | X           |             |
| เชื้อรา           | Verticillium sp.       | X           | X           |
| เชื้อรา           | Penicillium sp.        |             | X           |
| เชื้อรา           | Rhodotorula sp.        | X           | X           |
| เชื้อรา           | Trichoderma sp.        | X           | X           |
| เชื้อรา           | Yeast sp.              | X           | X           |

**ตารางที่ 3** จำนวนหน่วยการก่อรูปเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์เฉลี่ยต่อตารางเซนติเมตร (CFU/cm<sup>2</sup>) ของแบคทีเรียและเชื้อราบนผิวคอยล์ของโรงพยาบาล A และ B

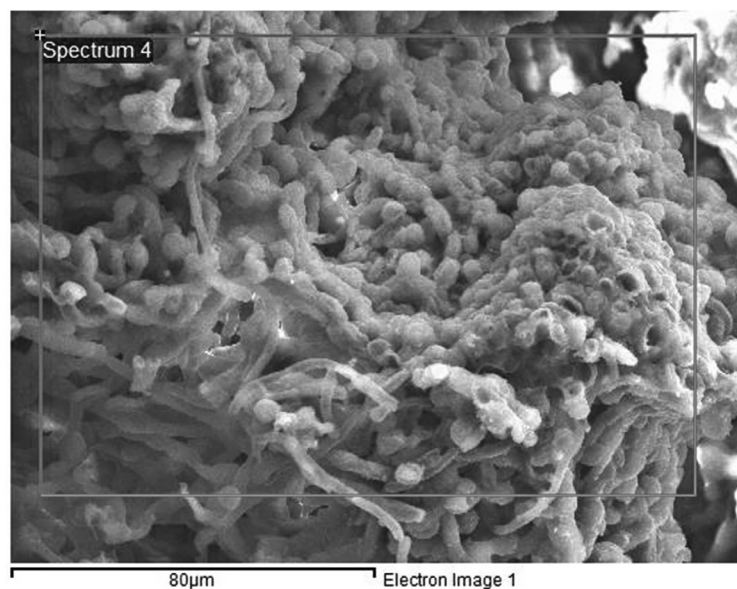
| โรงพยาบาล | จำนวน CFU/cm <sup>2</sup> ก่อนการติดตั้งระบบ UVGI | จำนวน CFU/cm <sup>2</sup> หลังการติดตั้งระบบ UVGI 60 วัน |
|-----------|---|--|
| A         | 79,775  | 0  |
| B         | 327,285   | 2  |

ผลจากตัวอย่างที่เก็บหลังจากการติดตั้งระบบ UVGI เป็นเวลา 60 วัน พบว่าเชื้อจุลินทรีย์บนพื้นผิวด้านส่งของคอยล์ของระบบปรับอากาศลดลง 5-Log ทั้งโรงพยาบาล A และ B จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่โรงพยาบาล A ลดลงจาก 79,775 เป็น 0 และที่โรงพยาบาล B จาก 327,285 เหลือ 2 CFUs ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 จากผลการลดลงของจุลินทรีย์บนพื้นผิวคอยล์นี้สามารถระบุได้ว่าระบบ UVGI ทำงานได้ตามที่ตั้งใจไว้

**การวิเคราะห์การปนเปื้อนขนาดใหญ่** การปนเปื้อนที่เก็บได้จากครีบบของคอยล์ของโรงพยาบาล A และ B และถาดน้ำทิ้งดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 วัตถุประสงค์ตัวอย่าง

ถูกเก็บรวบรวมและส่งไปยังห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยแห่งรัฐนิวยอร์กที่บัฟฟาโล (State University of New York at Buffalo Instrument Center) เพื่อการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM EDX โดยสมบัติทางกายภาพของวัสดุคือมีสีดำ แข็ง และมีรูพรุนเหมือนถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ดังแสดงในรูปที่ 4

ผลการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยระบุว่าสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 4 เป็นฟิล์มชีวภาพ ฟิล์มชีวภาพนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสปอร์และเส้นใยของเชื้อราตามที่ได้เห็นได้จากรูปที่ 5



**รูปที่ 5** ภาพขยายโดย SEM ของสิ่งปนเปื้อนเป็นสีดำ — สปอร์และเส้นใยของเชื้อรา



**ตารางที่ 4** ค่าความดันตกผ่านคอยล์,  $\Delta P$

| โรงพยาบาล | $\Delta P$ หลังจากรั้งอัดฉีด | $\Delta P$ หลังจกติดตั้งระบบ UVGI |
|-----------|------------------------------|-----------------------------------|
| A         | 3.65 นิ้วน้ำ                 | 1.46 นิ้วน้ำ (52 วัน)             |
| B         | 4.57 นิ้วน้ำ                 | 1.97 นิ้วน้ำ (74 วัน)             |

**การวิเคราะห์เชิงกลของระบบปรับอากาศ**  
 การวัดการไหลของอากาศถูกบันทึกด้วยไมโครมานอมิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic micro manometer) [Shortridge Instruments, Inc. Airdata Multimeter ADM-870C] ค่าความดันตกผ่านคอยล์ของโรงพยาบาล A ลดลง 2.19 นิ้วน้ำหลังการติดตั้ง UVGI เป็นระยะเวลา 52 วัน และค่าความดันตกผ่านคอยล์ของโรงพยาบาล B ลดลง 2.6 นิ้วน้ำหลังการติดตั้ง UVGI เป็นระยะเวลา 74 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4 ความต่างของจำนวนวันในการปรับปรุงค่าความดันตกผ่านคอยล์อาจเป็นผลมาจากความลึกของคอยล์โรงพยาบาล A ที่เห็นผลลัพท์ใน 52 วันมีคอยล์ลึก 8 แถว และโรงพยาบาล B ใช้เวลา 74 วัน เพื่อเห็นผลลัพท์มีคอยล์ลึก 10 แถว

เจตนาของการติดตั้งระบบ UVGI คือการคืนสภาพคอยล์ให้ใกล้เคียงกับสภาวะการออกแบบมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สภาวะการออกแบบของโรงพยาบาล A และ B มีค่าความดันตกเท่ากับ 1.25 นิ้วน้ำ ข้อมูลจากผลการตรวจสอบบ่งชี้ถึงความสำเร็จในการปรับปรุงสมรรถนะการไหลของอากาศและกระบวนการขจัดคราบบนคอยล์

## unสรุป

วิธีการวิเคราะห์สองวิธีในการตรวจสอบประสิทธิภาพของการทำความสะอาดคอยล์ด้วยระบบ UVGI วิธีการแรกคือการเก็บตัวอย่างก่อนและหลังทำความสะอาดมาเพาะเลี้ยงเพื่อดูการมีอยู่ของแบคทีเรียและเชื้อรา การวิเคราะห์นี้กำหนดประสิทธิภาพของการกำจัดเชื้อ วิธีที่สองตรวจสอบการปรับปรุงสมรรถนะการไหลของอากาศเพื่อตรวจสอบว่าลักษณะการใช้งานของคอยล์กลับสู่สภาวะการออกแบบหรือไม่ [Kowalski 2011] ข้อมูลที่นำเสนอในบทความนี้แสดงให้เห็นว่าพลังงานของรังสี UVC ที่หน้าคอยล์เย็นอย่างน้อยที่สุด  $\geq 1,000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ส่งผลให้เกิดการกำจัดเชื้อบนคอยล์ (มีการขจัดคราบ) และสมรรถนะการไหลของอากาศดีขึ้น บทความนี้ยังนำมาสู่คำถามของประสิทธิภาพของการกำจัดเชื้อตามข้อแนะนำที่ระบุในคู่มือ ASHRAE 2015 (Handbook for HVAC application) ที่  $50 - 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ว่าเพียงพอหรือไม่ ด้วยวิธีการที่ใช้ในการศึกษาซึ่งได้อธิบายไว้ในบทความนี้ ยังคงมีข้อจำกัดบางอย่าง จำเป็นต้องมีการศึกษาแบบกว้างขวางและครอบคลุมหลายด้านมากขึ้นเพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบของฟิล์มชีวภาพที่มีต่อสมรรถนะของคอยล์เย็นดีขึ้น เพื่อให้ระบบ UVGI ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานของระบบปรับอากาศ จะต้องมีการทำความเข้าใจเกี่ยวกับระดับพลังงานของรังสี UVC เพื่อเพิ่มสมรรถนะการใช้คอยล์เย็นอย่างเหมาะสม การทำความเข้าใจโดยละเอียดนี้ควรใช้ในการกำหนดประสิทธิภาพตามขนาดของคอยล์ ระยะห่างของครีป วัสดุที่ใช้ใน

การสร้าง และองค์ประกอบอื่นๆ สุดท้าย ASHRAE ควรกำหนดระดับสมรรถนะในทอมของ "ประสิทธิภาพ" เช่นเดียวกันกับที่กำหนดไว้สำหรับอุตสาหกรรม การกรองอากาศ โดยมาตรฐาน "ประสิทธิภาพ" เหล่านี้ ควรเป็นไปตามสมรรถนะตามการออกแบบเฉพาะ ใช้งานซึ่งสามารถทั้งวัดและทดสอบการใช้งานได้

## กิตติกรรมประกาศ

ทีมนักวิจัยขอขอบคุณ Vanderbilt University Medical Center และ Kaiser Permanente Healthcare สำหรับความร่วมมือในการศึกษาภาคสนาม

## บทส่งท้าย (ผู้แปลและเรียบเรียง)

บทความวิชาการนี้ได้แปลและเรียบเรียงขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตฆ่าเชื้อโรค (UVGI) อย่างถูกต้อง และจากการศึกษาครั้งนี้ได้พิสูจน์แล้วว่าค่ารังสี UVC ที่ความเข้ม 50 - 100  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตลอดทั้งหน้าทางออกของคอยล์ตามที่คู่มือ ASHRAE สำหรับงานด้านการปรับอากาศ การระบายอากาศ และการทำความร้อน (ASHRAE Handbook for HVAC Applications 2015) แนะนำไว้นั้นไม่เพียงพอต่อการฆ่าเชื้อโรคที่อยู่ลึกเข้าไปในคอยล์ โดยค่าความเข้มของรังสี UVC ที่ผู้วิจัยแนะนำสำหรับการฆ่าเชื้อโรคอย่างได้ผลคืออย่างน้อยที่สุด 1,000  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตลอดทั้งหน้าทางออกของคอยล์เย็น การใช้เทคโนโลยี UVGI นี้ นอกจากจะส่งผลให้คุณภาพอากาศภายในอาคารยอมรับได้แล้วยังทำให้สมรรถนะของระบบปรับอากาศเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้อีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- Leach, T., Taylor, G. Restoring Acceptable HVAC Performance with Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) Coil Treatment. *ASHRAE Transactions*, vol. 123, no. 1, 2017
- Acerbi, E., Chenard, D., Miller, D., Gaultier, N.E., Heinle, C.E., Chang, V.W-C., Uchida, A., Drautz-Moses, D.I., Schuster, S.C., Lauro, F.M. 2016. Ecological succession of the microbial communities of an air-conditioning cooling coil in the tropics. *Indoor Air* doi: 10.1111/ina.12306
- Apter, A., Bracker, A., Hodgson, M., Sidman, J., Leung, W-Y. Epidemiology of the sick building syndrome. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 1994 Vol 94, Issue2, Part 2, Pg. 277-288
- American Industrial Hygiene Association (AIHA): *Field Guide for the Determination of Biological Contaminants in Environmental Samples*. Fairfax, VA: AIHA, 1996
- ASHRAE. 2013. *ASHRAE Handbook - HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics*, Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE. 2015. *ASHRAE Handbook - HVAC Applications*, Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE. 2016. *ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment*, Atlanta: ASHRAE.
- ANSI/ASHRAE-SPC-185.2-2014. *Method of Testing Ultraviolet Lamps for use in HVAC%R or Air Ducts to Inactivate Microorganisms on Irradiated Surfaces*.
- Hugenholtz, P., Fuerst, J. Heterotrophic Bacteria in an Air-Handling System. *Applied and Environmental Microbiology*, Dec. 1992, P. 3914-3920
- Kowalski, W. *UVGI for Cooling Coil Disinfection, Air Treatment and Hospital Infection Control*. American Air & Water, January 24, 2011
- Leach, T., Scheir, R. *Ultra Violet Germicidal Irradiation (UVGI) in Hospital HVAC Decreases Ventilator Associated Pneumonia*. ASHRAE, NY-14-C023
- Levetin, E., Shaughnessy, R., Rogers, C.A., Scheir, R. Effectiveness of Germicidal UVRadiation for Reducing Fungal Contamination within Air-Handling Units. *Applied and Environmental Microbiology*, Aug. 2001, p. 3712-3715
- Moreau-Marquis, S., Redelman, C.V., Stanton, B.A., Anderson, G.G. Co-cultures of Pseudomonas aeruginosa biofilms grown on line human airway cells, *Journal of Visualized Experiments*. DOI:10.3791/2186
- Ryan, R.M., Wilding, G.E., Wynn, R.J., Holm, B.A., Leach, C.L. Effect of enhanced ultraviolet germicidal irradiation the heating ventilation and air conditioning system on ventilator-associated pneumonia in a neonatal intensive care unit. *Journal of Perinatology*. (2011), 1-8
- Siegel, J.A., Nazaroff, W.W. (2003). Predicting particle deposition on HVAC heat exchangers. *Atmospheric Environment* 37(39),5587-5596. doi:10.1016/j.atmosenv. 2003.09.033
- Walter, C.W., (1969). Ventilation and air conditioning as bacteriologic engineering. *Anesthesiology*. 31, 186-192
- Zelle, M.R., Hollaender, A. (1955). *Radiation Biology Volume II*. McGraw-Hill, New York