

สถานะที่เหมาะสมของระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต  
ในห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อวัณโรค



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2557

**OPTIMUM CONDITION OF ULTRAVIOLET  
GERMICIDAL IRRADIATION SYSTEM IN  
TUBERCULOSIS ISOLATION ROOM**



**Wisaed Warissarangkul**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Environment Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2014**

สภาวะที่เหมาะสมของระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต  
ในห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อวัณโรค

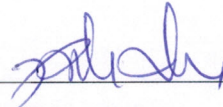
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



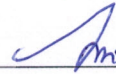
(ผศ. ดร.จรียา ยิ้มรัตน์บวร)

ประธานกรรมการ



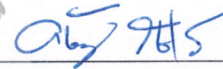
(ผศ. ดร.สุจิต ทรัพย์จิต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



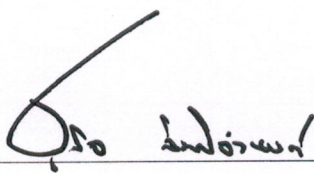
(ผศ. ดร.กิริติ สุกักษณ์)

กรรมการ



(อ. ดร.อภิชน วัชรนทรวงศ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิเศษ วัชรรางกูล : สภาวะที่เหมาะสมของระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อวัณโรค (OPTIMUM CONDITION OF ULTRAVIOLET GERMICIDAL IRRADIATION SYSTEM IN TUBERCULOSIS ISOLATION ROOM)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิต คุรุจิต, 178 หน้า.

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและสภาวะที่เหมาะสมของหลอด UVC ของระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตหรือ UVGI ในห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อวัณโรคของโรงพยาบาลชุมชน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและเป็นไปตามมาตรฐานด้านความปลอดภัย โดยทำการศึกษาทดลองในห้องจำลอง และการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตำแหน่งช่องระบายอากาศที่ศึกษา ติดตั้งระดับสูง (H) หรือระดับต่ำ (L) มีตำแหน่งช่องจ่ายอากาศเข้า/ช่องดูดอากาศออก L/H, H/L และ H/H และอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6, 9 และ 12 ACH ค่าที่ตรวจวัดในห้องจำลอง ได้แก่ ตรวจวัดความเร็วอากาศ และความเข้มรังสี UVC โดยได้วิเคราะห์ลักษณะการกระจายของรังสี UVC จากการแปรผันปัจจัยเกี่ยวข้อง ได้แก่ กำลังไฟ ตำแหน่งการติดตั้ง และจำนวนหลอด ในส่วนของแบบจำลองใช้เทคนิคพลศาสตร์ของการไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14 จำลองการไหลของอากาศและอนุภาคเชื้อวัณโรคเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ ผลการศึกษา พบตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H และอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ทำให้อนุภาคเชื้อวัณโรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone นานที่สุดเฉลี่ย 105.74 วินาที สภาวะของหลอด UVC ที่เหมาะสมที่มีการกระจายความเข้มรังสี UVC ของระบบฯ สูงสุดในห้องจำลองและเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด ได้แก่ ระบบที่ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟขนาด 8 W ระดับความสูงจากพื้น 3.0 และ 3.3 m มีอัตราการฆ่าเชื้อโรค เฉลี่ยร้อยละ 53.60-91.28 และติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 16 W เฉพาะระดับความสูงจากพื้น 3.3 m มีอัตราการฆ่าเชื้อโรคเฉลี่ยร้อยละ 63.45-98.19

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

WISAED WARISSARANGKUL : OPTIMUM CONDITION OF  
ULTRAVIOLET GERMICIDAL IRRADIATION SYSTEM IN  
TUBERCULOSIS ISOLATION ROOM. THESIS ADVISOR :  
ASST. PROF. SUDJIT KARUCHIT, Ph.D., 178 PP.

ULTRAVIOLET / GERMICIDAL / ISOLATION ROOM / VENTILATION / AIR  
CHANGE RATE / HOSPITAL / ENGINEERING CONTROL

This research aims to study the optimum air exchange rate and conditions of UVC lamps of the Ultraviolet Germicidal Irradiation System or UVGI in the tuberculosis isolation room of a typical local hospital. The goal is to obtain maximum effectiveness and still in accordance with the safety standards. The study was undertaken in an actual-sized simulation room with the use of mathematical models. The position of the studied ventilation system was at a high (H) or low (L) level with air intakes/outlets labeled L/H, H/L and H/H. The air change rates were 6, 9 and 12 ACH. The parameters measured in the simulation room were air velocity and UVC intensity. The UVC distribution was analyzed from varied determined factors which were electric power, installed positions, and the number of the lamps. In the simulation, computational fluid dynamics program, ANSYS FLUENT 14, was used. It simulated the air flow and the tuberculosis germination particles to evaluate the effectiveness of the system. It was found that the L/H ventilation position and air change rate at 6 ACH caused the longest time of tuberculosis germination particles in the upper zone at 105.74 seconds. The optimum conditions in which the highest UVC radiation intensity distribution were obtained within the safety standards were the

system with UVC lamps 8 W at the height 3.0 and 3.3 m. from the floor with the average germicidal rates of 53.60-91.28, and the system with 16 W lamps at the height 3.3 m. with the germicidal rate of 63.45-98.19.



School of Environment Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิต คุรุจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาส เวลาและความเสียสละทุ่มเทอย่างมากในการให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ แก้ไขปัญหาตั้งแต่เริ่มต้นจนวิทยานิพนธ์สำเร็จ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยัมรัตนบวร หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สั่งสอน ให้คำแนะนำ และข้อคิดเตือนสติที่เป็นประโยชน์ในการปฏิบัติตัวตลอดระยะเวลาการศึกษาและวิจัย อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างละเอียด ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งและถือเป็นพระคุณอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณทั้งสามท่านเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ทั้งกรอบความคิดและรายละเอียดต่าง ๆ ในการจำลองโปรแกรม CFD ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชโลธร ธรรมแท้ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอากาศยานที่ได้ให้แนวคิดในการจำลองด้วยโปรแกรม CFD ในส่วนการเคลื่อนที่อนุภาค

ขอขอบคุณนักศึกษามหาบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คุณชัยพลกษัย เชื้อประสาท นักศึกษาปริญญาเอก ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านโปรแกรม CFD ตั้งแต่การติดตั้ง การใช้งานและหลักการจำลองต่าง ๆ คุณเจตศักดิ์ วงศ์ชนะ นักศึกษาปริญญาโท ที่ได้ให้ความช่วยเหลือการสร้างแบบจำลองและหลักการสร้างเมช

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ โดยเฉพาะคุณ โสริษา กิจอาสา เพื่อนร่วมชั้นปีที่ เป็นทั้งเพื่อนเรียน เพื่อนทำวิทยานิพนธ์ ควบคู่กันมาและคอยให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

คุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพ ยิ่ง และคณาจารย์ผู้ประสาทวิชาความรู้ ครอบครัวยุติธรรม และครอบครัวบุญญาภินิหารย์ ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่ให้กำลังใจช่วยเหลือจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

วิเศษ วัชรนทร์วงศ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (อังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
<b>2 ทัศนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 วัน โรค.....	4
2.1.1 คุณลักษณะทั่วไปของเชื้อวัน โรค.....	4
2.1.2 กลไกการติดเชื่อและการก่อโรค.....	4
2.1.3 การแพร่กระจายเชื้อวันโรคในอากาศ.....	5
2.1.4 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่มีเพิ่มความเสี่ยงการแพร่กระจายเชื้อวันโรค.....	5
2.2 การควบคุมป้องกันวัน โรคด้วยวิธีทางวิศวกรรม.....	6
2.3 ห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื่อทางอากาศ .....	7
2.4 การฆ่าเชื่อด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต.....	8
2.4.1 หลอด UVGI.....	8
2.4.2 กลไกการก่อความเสียหายของรังสี UVC.....	9
2.4.3 ความเข้มของหลอด UVGI .....	9



## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

2.4.4	หลักการทางจลน์ศาสตร์ของการอินแอคทีเวชันจุลชีพด้วยรังสี UVC.....	10
2.4.5	ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของจุลชีพ.....	11
2.4.6	รูปแบบของระบบ UVGI.....	12
2.5	การฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตในพื้นที่ส่วนบนของห้อง .....	13
2.5.1	ปัจจัยที่มีผลต่อระบบ UR UVGI.....	15
2.5.2	การเปรียบเทียบระบบ UR UVGI กับ In-duct UVGI.....	16
2.5.3	ประสิทธิภาพของระบบ UR UVGI.....	17
2.6	ค่าความปลอดภัยในการสัมผัสรังสี UVC.....	19
2.7	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	20
2.7.1	ความหมายและหลักการ.....	20
2.7.2	กระบวนการ CFD.....	20
2.7.3	แบบจำลองแบบปั่นป่วน.....	22
2.8	การใช้ CFD ในงานฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสี UV.....	22
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.9.1	การศึกษาปริมาณความเข้มข้นและการกระจายเชื้อวันโรคในอากาศ.....	24
2.9.2	ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ UR UVGI.....	25
2.9.3	การศึกษาการใช้ CFD ในงานฆ่าเชื้อในระบบ UR UVGI.....	30
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1	สถานที่การศึกษาวิจัย.....	35
3.2	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	35
3.2.1	การสร้างห้องผู้ป่วยจำลอง.....	37
3.2.2	การตรวจวัดความเร็วอากาศ.....	40
3.2.3	การตรวจวัดความเข้มรังสี UVC .....	44
3.2.4	การจำลองโปรแกรม ANSYS FLUENT.....	51
3.2.5	การวิเคราะห์ข้อมูลและแปรผล.....	57
3.2.6	สรุปรูปแบบการระบายอากาศและสภาวะปลอด UVC ที่เหมาะสม.....	60

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

3.2.7 การปรับปรุงรูปแบบห้องโดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT.....	60
3.3 เครื่องมือตรวจวัดและวัสดุอุปกรณ์.....	61
3.3.1 เครื่องมือตรวจวัด.....	61
3.3.2 โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD Program).....	61
3.3.3 วัสดุอุปกรณ์.....	61
<b>4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....</b>	<b>62</b>
4.1 ความเร็วของอากาศในห้องผู้ป่วยจำลองและในแบบจำลอง.....	62
4.2 ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อวันโรคในห้องผู้ป่วยจำลอง.....	64
4.3 การศึกษาความเข้มรังสี UVC ที่สภาวะต่าง ๆ.....	67
4.3.1 การศึกษาลักษณะการกระจายความเข้มรังสี UVC จากการคำนวณ ทางทฤษฎีและเปรียบเทียบกับจากชุดติดตั้งระบบ UVGI.....	68
4.3.2 การกระจายรังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลอง.....	70
4.3.3 การกระจายความเข้มรังสีในห้องผู้ป่วยจำลองที่ติดตั้งระบบ UVGI ตั้งแต่ 1 – 4 คิวบิกเมตร.....	78
4.4 ปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone .....	83
4.4.1 ปริมาณรังสี UVC กับสภาวะด้านรูปแบบการระบายอากาศ.....	84
4.4.2 ปริมาณรังสี UVC กับสภาวะของหลอด UVC .....	84
4.4.3 การสรุปปริมาณรังสี UVC สูงสุดที่ได้จากการศึกษา.....	87
4.5 การประเมินอัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC.....	88
4.5.1 อัตราการฆ่าเชื้อโรคกับสภาวะด้านระบบระบายอากาศ.....	88
4.5.2 อัตราการฆ่าเชื้อโรคกับสภาวะของหลอด UVC.....	91
4.5.3 อัตราการเชื้อโรคสูงสุดที่ได้จากการศึกษา.....	92
4.6 สภาวะที่เหมาะสมของหลอด UVC ฆ่าเชื้อโรคและประเมินประสิทธิภาพ.....	93
4.6.1 อัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่เหมาะสม.....	95
4.6.2 สภาวะของหลอด UVC ที่เหมาะสม.....	96

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 การปรับรูปแบบห้องโดยใช้การจำลองด้วย ANSYS FLUENT.....	97
<b>5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>99</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	99
5.2 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์.....	102
5.3 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	102
รายการอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลด้านช่องระบายอากาศและอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ.....	112
ภาคผนวก ข ข้อมูลด้านสถานะหลอด UVC.....	116
ภาคผนวก ค ข้อมูลการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT .....	145
ภาคผนวก ง ข้อมูลสถิติ.....	166
ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ใน ระหว่างศึกษา.....	168
ประวัติผู้เขียน.....	178

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของเชื้อจุลชีพชนิดต่างๆ จากผลการศึกษา ที่ผ่านมา.....12
2.2	เปรียบเทียบผลการศึกษาการใช้ระบบ UR UVGI ในการฆ่าเชื้อวัณโรค โดยใช้เชื้อกลุ่ม Mycobacterium เป็นตัวแทน.....18
2.3	ค่า Permissible Exposure Times ของรังสี UVC .....19
2.4	การใช้ CFD ในการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของจุลชีพในระบบ UVGI.....24
3.1	อัตราแลกเปลี่ยนอากาศและอัตราการไหลอากาศในการทดลอง.....40
3.2	การกำหนดเงื่อนไขการติดตั้ง Air supply/Air exhaust ในการทดลอง.....42
3.3	การกำหนดเงื่อนไขการติดตั้งหลอด UVC .....45
3.4	แผนการตรวจวัดความเข้มรังสี UVC ต่อขนาดกำลังไฟ.....47
3.5	การกำหนดเงื่อนไขขอบของพื้นผิวผนัง.....54
3.6	การกระจายจำนวนและขนาดของ droplet nuclei ที่ถูกไอออกมา ต่อครั้ง (0.4 L/s).....54
3.7	การกระจายจำนวนตามขนาด droplet nuclei ที่ถูกไอออกมาต่อวินาที ที่ใช้ในการจำลองในการศึกษา.....55
4.1	ผลการวิเคราะห์ความเร็วอากาศจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลอง กับการจำลองในแบบจำลองแยกตามตำแหน่งช่องระบายอากาศและ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ.....63
4.2	ระยะเวลาอนุภาคเชื้อวัณโรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone ตามรูปแบบ ระบบระบายอากาศ และขนาดอนุภาค.....66
4.3	ค่าความเข้มรังสี UVC จากการคำนวณ ตามกำลังไฟหลอดและระยะ ห่างจากจุดกึ่งกลางหลอด UVC.....68

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 ค่าความเข้มรังสี UVC จากการตรวจวัด ตามกำลังไฟหลอดและระยะห่างจากจุดกึ่งกลางหลอด .....	69
4.5 ความเฉลี่ยเข้มรังสี UVC ที่ระดับความสูงจากพื้น ของหลอด UVC ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นต่าง ๆ.....	75
4.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper Zone ของหลอด UVC ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 8W 16W และ 30 W.....	79
4.7 ปริมาณรังสี UVC สูงสุด จากระบบ UVGI ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ระดับติดตั้งหลอด UVC 3.0 m ตามกำลังไฟหลอด UVC และจำนวนด้านติดตั้ง.....	87
4.8 อัตราการฆ่าเชื้อโรค สูงสุด จากระบบ UVGI ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ระดับติดตั้งหลอด UVC 3.0 m ตามกำลังไฟหลอด UVC และจำนวนด้านติดตั้ง.....	93
4.9 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ระดับความสูงจากพื้น 1.7 m ของระบบ UVGI ติดตั้งบนผนัง 1 ด้านด้วยหลอดกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นต่าง ๆ .....	95
4.10 สภาวะที่เหมาะสมของหลอด UVC และประสิทธิภาพที่ได้จากการศึกษา.....	96
4.11 สภาวะที่เหมาะสมของหลอด UVC และประสิทธิภาพตามมาตรฐานห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ แบบ วศ.1/2549.....	96
ก1 ระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone จำแนกตามตำแหน่งช่องระบายอากาศ อัตราและเปลี่ยนอากาศ และขนาดอนุภาค.....	113
ก2 ระยะเวลาอนุภาคเชื้อวันโรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone ตามรูปแบบการระบายอากาศ และขนาดอนุภาค.....	114
ข1.1 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 1 ด้าน (หน้าหรือหลัง) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง.....	117

## สารบัญตาราง (ต่อ)

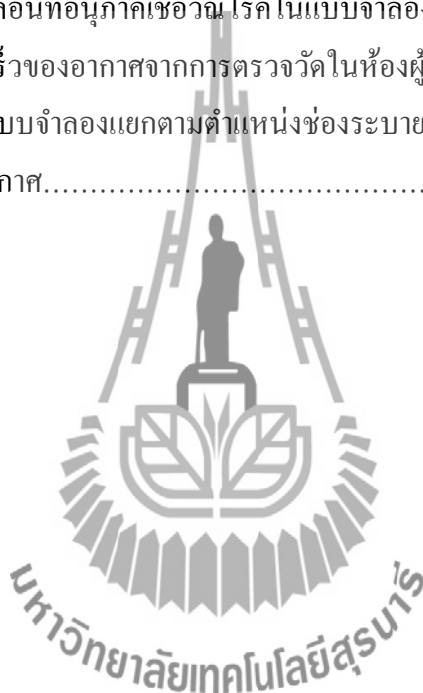
ตารางที่	หน้า
ข1.2 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 1 ด้าน (ซ้ายหรือขวา) แบ่งตามกำลังไฟและ ระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง.....	119
ข1.3 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 2 ด้าน (หน้าและหลัง) แบ่งตามกำลังไฟและ ระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง.....	121
ข1.4 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 2 ด้าน (ซ้ายและขวา) แบ่งตามกำลังไฟและ ระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง.....	123
ข1.5 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 3 ด้าน (หน้า หลังและซ้ายหรือขวา) แบ่งตาม กำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง.....	125
ข1.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ส่วนบน (Upper zone) ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 4 ด้าน แบ่งตามกำลังไฟและ ระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง.....	127
ข2.1 ค่าความเข้มรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบที่ติดตั้ง ด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W จำแนกตามระดับตามระดับการ ติดตั้งระบบ และจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ.....	129
ข2.2 ค่าความเข้มรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบที่ติดตั้ง ด้วยหลอดกำลังไฟ 16 W จำแนกตามระดับตามระดับการ ติดตั้งระบบ และจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ.....	130
ข2.3 ค่าความเข้มรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบที่ติดตั้ง ด้วยหลอดกำลังไฟ 30 W จำแนกตามระดับตามระดับการ ติดตั้งระบบ และจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ.....	131

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข3.1 ปริมาณรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อ ที่มีตำแหน่ง ช่องระบายอากาศแบบ L/H ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ และระดับ ต่าง ๆ จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและจำนวนด้านที่ติด ตั้งระบบ.....	132
ข3.2 ปริมาณรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อ ที่มีตำแหน่ง ช่องระบายอากาศแบบ H/L ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ และระดับ ต่าง ๆ จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและจำนวนด้านที่ติด ตั้งระบบ.....	133
ข3.3 ปริมาณรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อ ที่มีตำแหน่งช่อง ระบายอากาศแบบ H/H ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ และระดับต่าง ๆ จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ.....	134
ข4.1 อัตราการฆ่าเชื้อโรค ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อที่มีตำแหน่ง ช่องระบายอากาศแบบ L/H ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟและระดับต่าง ๆ จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ.....	135
ข4.2 อัตราการฆ่าเชื้อโรค ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อที่มีตำแหน่ง ช่องระบายอากาศแบบ H/L ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟและระดับต่าง ๆ จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ.....	136
ข4.3 อัตราการฆ่าเชื้อโรค ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อที่มีตำแหน่ง ช่องระบายอากาศแบบ H/H ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟและระดับต่าง ๆ จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ.....	137
ข5 ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ระหว่างการตรวจวัดค่าความเข้ม รังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลอง วันที่ 7 กุมภาพันธ์-พฤษภาคม 2556.....	142
ค1.1 การกระจายจำนวนตามขนาดของอนุภาคและ droplet nuclei ที่ถูกไอออกมาต่อวินาที จากการศึกษาของ M.P.Wan et al.....	147
ค1.2 การกระจายจำนวนตามขนาดของอนุภาคและ droplet nuclei ที่ ถูกไอออกมาต่อวินาที ประมาณค่าจากผลการศึกษาของ M.P.Wan et al.....	149

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค1.3 การกระจายจำนวนตามกลุ่มขนาดของอนุภาคและ droplet nuclei ที่ใช้ในการจำลองในการศึกษา.....	150
ค1.4 โดเมน เงื่อนไขขอบพื้นที่ผิวผนัง ค่าเริ่มต้นและรายละเอียดต่าง ๆ ในการจำลองการเคลื่อนที่อนุภาคเชื้อไวรัสโคโรนาแบบจำลอง.....	151
ง1 การวิเคราะห์ความเร็วของอากาศจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลอง กับการจำลองใน แบบจำลองแยกตามตำแหน่งช่องระบายอากาศและ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ.....	167





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เชื้อวัณโรค ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป กำลังขยาย 15549 เท่า.....4
2.2	ห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ.1/2549.....7
2.3	หลอด UVC.....8
2.4	กลไกการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของ UVC.....9
2.5	การตรวจคำนวณความเข้มรังสีของหลอด UVC .....10
2.6	ตัวอย่างการติดตั้งชุด UVGI และทิศทางของรังสี .....13
2.7	แสดงระดับรังสีของระบบ UR UVGI .....14
2.8	แสดงการกระจายรังสี UV ภายในห้อง .....15
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....36
3.2	ห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ. 1/2549.....37
3.3	แบบโครงสร้างห้อง.....38
3.4	แสดงตำแหน่งช่องระบายอากาศทั้ง 3 กรณี.....41
3.5	แผนผังการตรวจความเร็วลมหน้าห้องเดิมอากาศ.....42
3.6	ตำแหน่งตรวจวัดความเร็วอากาศในห้องผู้ป่วยจำลอง.....43
3.7	การคำนวณความเข้มรังสีของหลอด UVC.....44
3.8	ผังแสดงตำแหน่งติดตั้งหลอด UVC.....46
3.9	จุดตรวจวัดความเข้มรังสี UVC ในแต่ละระนาบ.....48
3.10	ตำแหน่งประมาณค่าความเข้มรังสี UVC.....49
3.11	ห้องผู้ป่วยจำลอง พร้อมอุปกรณ์.....50
3.12	เส้นระดับความเข้มรังสี หลอด 8 W แนวแกน XZ ในแนวราบ ระดับความสูงจากพื้น 2.7 m.....51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 เส้นระดับความเข้มรังสี หลอด 8 W แนวแกน XY ในแนวตั้ง ระยะห่างจากผนังด้านหน้า 1.0 m.....	51
3.14 โดเมนห้องผู้ป่วยจำลอง ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศ 3 รูปแบบ.....	53
3.15 เมฆห้องผู้ป่วยจำลอง ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศ 3 รูปแบบ.....	53
3.16 ภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาค ในโดเมนห้องจำลองผู้ป่วย.....	58
4.1 ค่าเฉลี่ยความเร็วของอากาศจากการตรวจวัดและจากการจำลอง.....	62
4.2 ระยะเวลาที่อนุภาคเชื้อวันโรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone .....	66
4.3 ห้องผู้ป่วยจำลองและการติดตั้งระบบ UVGI.....	67
4.4 ความเข้มรังสี UVC จากคำนวณและจากการตรวจวัดตามระยะห่าง จากจุดกึ่งกลางหลอด.....	70
4.5 หลอด UVC ในชุดติดตั้ง.....	71
4.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ของหลอด UVC ระดับต่าง ๆ ติดตั้งด้วย หลอดกำลังไฟ 8 W .....	72
4.7 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ของหลอด UVC ระดับต่าง ๆ ติดตั้งด้วย หลอดกำลังไฟ 16 W .....	73
4.8 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ของหลอด UVC ระดับต่าง ๆ ติดตั้งด้วย หลอดกำลังไฟ 30 W .....	74
4.9 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงสุด ที่ระดับติดตั้งหลอด UVC และ กำลังไฟแต่ละขนาด.....	76
4.10 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ระดับสูงและต่ำกว่าระดับติดตั้งหลอด UVC 0.3 m.....	77
4.11 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้ง ระดับต่าง ๆ .....	78
4.12 การกระจายความเข้มรังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลอง.....	79
4.13 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ของหลอด UVC .....	81

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นรังสี UVC ในพื้นที่ Upper Zone ที่ติดตั้งด้วยหลอด กำลังไฟ 8 W.....	82
4.15 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นรังสี UVC ในพื้นที่ Upper Zone ที่ติดตั้งด้วยหลอด กำลังไฟ 16 W.....	82
4.16 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นรังสี UVC ในพื้นที่ Upper Zone ที่ติดตั้งด้วยหลอด กำลังไฟ 30 W.....	83
4.17 ปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ของหลอด UVC ที่สภาวะ ด้านรูปแบบการระบายอากาศและสภาวะด้านหลอด UVC ต่าง ๆ.....	85
4.18 อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC ที่สภาวะด้านรูปแบบการระบาย อากาศและสภาวะด้านหลอด UVC ต่าง ๆ.....	90
4.19 อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC ที่เหมาะสม ที่สภาวะด้าน รูปแบบการระบายอากาศและสภาวะด้านหลอด UVC ต่าง ๆ.....	98
ก1 ระยะเวลาที่อนุภาคเชื้อไวรัสโรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone ตามรูปแบบ การระบายอากาศและขนาดอนุภาค.....	115
ข1 ปริมาณรังสี UVC ของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่างๆ โดยมีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H.....	138
ข2 ปริมาณรังสี UVC ของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่างๆ โดยมีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L.....	138
ข3 ปริมาณรังสี UVC ของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่างๆ โดยมีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H.....	139
ข4 อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่างๆ โดยมีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H.....	140
ข5 อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่างๆ โดยมีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L.....	140
ข6 อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่างๆ โดยมีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H.....	141

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค2.11 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ แนวแกน XY ระยะ ช่องจ่ายอากาศเข้า.....	156
ค2.12 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ แนวแกน XZ ระดับ ช่องจ่ายอากาศเข้า.....	157
ค2.13 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ แนวแกน XY ระยะ ช่องดูดอากาศออก.....	158
ค2.14 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ แนวแกน XZ ระดับ ช่องดูดอากาศออก.....	159
ค2.15 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ ตำแหน่งช่องระบาย อากาศแบบ L/H 6 ACH.....	161
ค2.16 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ ตำแหน่งช่องระบาย อากาศแบบ H/L 6 ACH.....	162
ค2.17 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ ตำแหน่งช่องระบาย อากาศแบบ H/H 6 ACH.....	163
ค2.2 รูปแบบทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อไวรัสโคโรนาแบบจำลอง แบบ L/H 6 ACH.....	165

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ACH	=	Air Change per Hour
ASHRAE	=	American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers
BTU	=	British thermal unit
°C	=	องศาเซลเซียส
CDC	=	Centers for Disease Control and Prevention
CFD	=	Computational Fluid Dynamic
HEPA Filter	=	High Efficiency Particulate Air Filter
HIV	=	Human Immunodeficiency Virus
J	=	จูล
L	=	ลิตร
L/s	=	ลิตรต่อวินาที
NIOSH	=	National Institute for Occupational Safety and Health
TB	=	Tuberculosis
TLV	=	Threshold Limit Value
UVGI	=	Ultraviolet Germicidal Irradiation
UR UVGI	=	Upper Room Ultraviolet Germicidal Irradiation
UVC	=	Ultraviolet C
W	=	วัตต์
WHO	=	World Health Organization
Z	=	Susceptibility Constant
cm <sup>2</sup>	=	ตารางเซนติเมตร
ft	=	ฟุต
g	=	กรัม
in	=	นิ้ว
k	=	Susceptibility Constant
kg	=	กิโลกรัม
kg/m <sup>3</sup>	=	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

kg/m-s	=	กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที
kg/s	=	กิโลกรัมต่อวินาที
m	=	เมตร
m <sup>2</sup>	=	ตารางเมตร
m <sup>3</sup>	=	ลูกบาศก์เมตร
m/s	=	เมตรต่อวินาที
nm	=	นาโนเมตร
s	=	วินาที
sec	=	วินาที
μm	=	ไมโครเมตร
μW	=	ไมโครวัตต์



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การติดเชื้อในโรงพยาบาล (Nosocomial infection) กำลังเป็นปัญหาที่มีความสำคัญและเกิดขึ้นทั่วโลก มีการประมาณการว่าผู้ป่วย 1 ใน 10 คน จะเกิดการติดเชื้อในขณะที่อยู่ในโรงพยาบาล (Mertens, 1996) ในกรณีของการแพร่ระบาดของวัณโรคในโรงพยาบาลต่าง ๆ ทั่วโลกนั้น ในปี พ.ศ. 2547 มีรายงานพบบุคลากรทางการแพทย์ติดเชื้อวัณโรคจากการปฏิบัติงานในรัฐไอดาโฮ ประเทศสหรัฐอเมริกา และในระดับจังหวัดของประเทศโคลัมเบีย มีอัตราอุบัติการณ์ 0.8 และ 14.6 ราย/แสนประชากรตามลำดับ (NIOSH, 2009) ส่วนประเทศไทยในปี พ.ศ. 2552 พบ 71 ราย หรือ 0.12 ราย/แสนประชากร (กรมควบคุมโรค, 2552) ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องควบคุมป้องกันการแพร่ระบาดของวัณโรคภายในโรงพยาบาล ซึ่ง CDC (2005) ได้ให้คำแนะนำการป้องกันควบคุมวัณโรคด้านสิ่งแวดล้อม 2 ชั้น ชั้นแรก เป็นการควบคุมที่แหล่งโรคโดยใช้การระบายอากาศออกเฉพาะที่และการกำจัดอากาศที่ปนเปื้อนโดยใช้การระบายอากาศทั่วไป ส่วนชั้นที่ 2 เป็นการควบคุมการไหลอากาศเพื่อควบคุมการปนเปื้อนของอากาศที่อยู่ใกล้กับแหล่งแพร่เชื้อโรค และทำความสะอาดอากาศโดยใช้ระบบกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) หรือการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตฆ่าเชื้อ (ultraviolet germicidal irradiation: UVGI)

ปัจจุบันโรงพยาบาลชุมชนทุกระดับทั่วประเทศมีห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศเฉลี่ย 1 ห้อง/โรง ตามนโยบายกระทรวงสาธารณสุข ที่กำหนดให้เป็นห้องที่ต้องมีระบบการควบคุมการแพร่กระจายเชื้อโรคในอากาศด้วยการควบคุมความดันอากาศให้เป็นลบและติดตั้ง HEPA filter ร่วมกับ UVGI ในชุดระบายอากาศ (กองวิศวกรรมการแพทย์, 2549) แต่มีประเด็นปัญหาที่สำคัญ คือ การปรับปรุงห้องพิเศษเป็นห้องแยกโรคผู้ป่วยฯ แต่ละห้องที่ดำเนินการอยู่ใช้งบประมาณสูง ประมาณ 200,000-400,000 บาท สูงสุด 1 ล้าน 2 แสนบาท ค่าเปลี่ยนไส้กรองเฉลี่ย 6,000-12,000 บาทต่อปี (ศูนย์วิศวกรรมการแพทย์ที่ 4, 2554) ทำให้โรงพยาบาลบางแห่งไม่สามารถจัดหางบประมาณมาสนับสนุนได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าโรงพยาบาล ร้อยละ 56.1 อาจมีผู้ป่วยวัณโรคเข้ารับการรักษา โดยเฉลี่ย 1-6 คนต่อวัน (เจริญ ชูโชติถาวร, 2552) จึงเกิดปัญหาการมีผู้ป่วยเข้ารับการรักษามากกว่า 1 คนในช่วงเวลาเดียวกันซึ่งต้องใช้ห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อมากกว่า 1 ห้อง หรือห้องแยกโรคผู้ป่วยฯ ที่มีอยู่ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ทำให้ต้องนำผู้ป่วยเข้าพักรักษาตัวอยู่ใน

ห้องที่ไม่มีระบบฆ่าเชื้อใด ๆ จึงมีโอกาสแพร่กระจายเชื้อไปยังพื้นที่อื่น ๆ และทำให้เกิดการติดเชื้อวันโรคในโรงพยาบาลขึ้นได้ ดังนั้น ปัญหาดังกล่าวนี้จึงมีความจำเป็นต้องได้รับการพิจารณาทางเลือกในการแก้ไขภายใต้ข้อจำกัดด้านงบประมาณและโครงสร้างของอาคารโรงพยาบาลที่มีอยู่

จากปัญหาการแพร่ระบาดของวันโรคที่ยังสูงอยู่ในขณะที่ปริมาณห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศที่ได้มาตรฐานในโรงพยาบาลชุมชนกลับมีแนวโน้มไม่เพียงพอกับปริมาณผู้ป่วย ประกอบกับเกิดสถานการณ์การติดเชื้อวันโรคในบุคลากรในโรงพยาบาล แต่การเพิ่มจำนวนห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศค่อนข้างทำได้ยากถึงแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อโรสูงถึงร้อยละ 99.97 แต่ก็มีข้อจำกัดด้านการจัดหาห้องที่จะปรับปรุง เนื่องจากห้องพิเศษมีจำนวนจำกัดและต้องหมุนเวียนใช้เป็นห้องผู้ป่วยทั่วไปด้วย ดังนั้น เมื่อปรับปรุงเป็นห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศแล้ว จะไม่สามารถหมุนเวียนได้ นอกจากนี้ งบประมาณที่ใช้ปรับปรุงห้องและการดูแลรักษาค่อนข้างสูง การใช้งานและบำรุงรักษาต้องดำเนินการโดยผู้ได้รับการฝึกอบรมเป็นอย่างดี จึงนำมาสู่ความจำเป็นในการศึกษาทางเลือกในการแก้ปัญหาโดยการปรับปรุงห้องพิเศษของโรงพยาบาลที่มีอยู่เดิมให้เป็นห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อวันโรคเพิ่มเติม โดยติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในพื้นที่ส่วนบนของห้อง (Upper room Ultraviolet Germicidal Irradiation; UR UVGI) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อวันโรค ร้อยละ 62-84 (Sung & Kato, 2010) ห้องที่ติดตั้งระบบแล้วสามารถหมุนเวียนใช้เป็นห้องผู้ป่วยทั่วไปได้ สามารถดำเนินการได้ในระยะเวลาสั้นและใช้งบประมาณไม่สูง แต่ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด อีกทั้งมีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากความเข้มของรังสีสูงเกินไป

ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงสถานะที่เหมาะสมของระบบการฆ่าเชื้อโรคที่จะนำมาใช้งาน การศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาถึงการจัดอัตราแลกเปลี่ยนอากาศของระบบระบายอากาศ ตำแหน่งช่องระบายอากาศ และสถานะที่เหมาะสมในการติดตั้งหลอด UVC ของระบบ UR UVGI ในห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อวันโรค ที่ปรับปรุงจากห้องพิเศษของอาคารผู้ป่วยในของโรงพยาบาลชุมชน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบฆ่าเชื้อวันโรคสูงที่สุดและมีความปลอดภัยต่อคนที่อยู่ใต้ระบบ โดยการศึกษาประกอบด้วยขั้นตอนการสร้างห้องจำลอง การศึกษาอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ การศึกษาสถานะที่เหมาะสมของระบบ และการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT ซึ่งเป็นโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของการไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics: CFD) มาจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค เพื่อการประเมินประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งผลการศึกษาจะทำให้ได้ข้อมูลในการปรับปรุงห้องพิเศษด้วยการติดตั้งระบบ UR UVGI เพื่อใช้เป็นห้องสำหรับรักษาผู้ป่วยเพิ่มเติมโดยใช้ต้นทุนไม่สูงเมื่อเทียบกับระบบที่มีใช้อยู่



## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาทดลองหาอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศและตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับระบบฆ่าเชื้อวัณโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตในพื้นที่ส่วนบนของห้อง (UR UVGI) ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพของระบบฆ่าเชื้อโรคสูงที่สุด

1.2.2 เพื่อศึกษาทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของหลอด UVC ในระบบ UR UVGI ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพของระบบฆ่าเชื้อโรคสูงที่สุด

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาในห้องจำลองที่สร้างขึ้นให้มีขนาดและโครงสร้างคล้ายห้องพิเศษอาคารผู้ป่วยในของโรงพยาบาลชุมชน ขนาด 60 ตารางเมตร ที่ปรับปรุงเป็นห้องแยกโรคผู้ป่วย ตามแบบห้องผู้แยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ วศ.1/2549 โดยที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ HEPA filter ไม่เป็น Negative pressure room และไม่รวมห้องน้ำผู้ป่วยหลังห้อง

1.3.2 กำหนดสภาวะคงที่ ได้แก่ อุณหภูมิ ช่วง 24 - 26 °C และความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 40-60

1.3.3 กำหนดปริมาณรังสี UVC ที่มีค่าความปลอดภัยต่อคนในห้องมีค่าความเข้มรังสี UVC ที่ lower zone (ต่ำกว่า 1.7 m) ไม่เกินค่ามาตรฐานความปลอดภัย คือ  $0.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

1.3.4 ใช้รังสี UVC ความยาวคลื่น 254 nm ในระบบ UR UVGI

1.3.5 การศึกษาอัตราแลกเปลี่ยนอากาศของระบบระบายอากาศ 3 ค่า (6,9 และ 12 ACH)

1.3.6 กำหนดตำแหน่งช่องระบายอากาศ 3 แบบ ได้แก่ ช่องจ่ายอากาศเข้า (Air supply; In) และช่องดูดอากาศออก (Air Exhaust; Out) เป็นแบบ In-low/Out-high (L/H), In-high/Out-low (H/L) และ In-high/Out-high (H/H) เนื่องจากต้องการให้เชื้อวัณโรคถูกฆ่าด้วย UR UVGI ให้มากที่สุด และลดการกำจัดเชื้อวัณโรคออกจากพื้นที่แหล่งโรคด้วยระบบระบายอากาศให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการหมุนเวียนเชื้อวัณโรคกลับเข้ามาภายในอาคาร

1.3.7 ศึกษาสภาวะของหลอด UVC ด้านกำลังไฟของหลอด UVC ขนาด 8 W, 16 W และ 30 W ติดตั้งที่ผนังห้องระดับความสูงจากพื้น 2.7, 3.0 และ 3.3 m

1.3.8 การจำลองการเคลื่อนที่และการกระจายของเชื้อวัณโรค โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT บนพื้นฐานการเคลื่อนที่แบบ Turbulent Flow

1.3.9 การประเมินอัตราการตายของเชื้อวัณโรค โดยใช้ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC (UVC susceptibility constant: Z) เท่ากับ  $0.4721 \text{ m}^2/\text{J}$

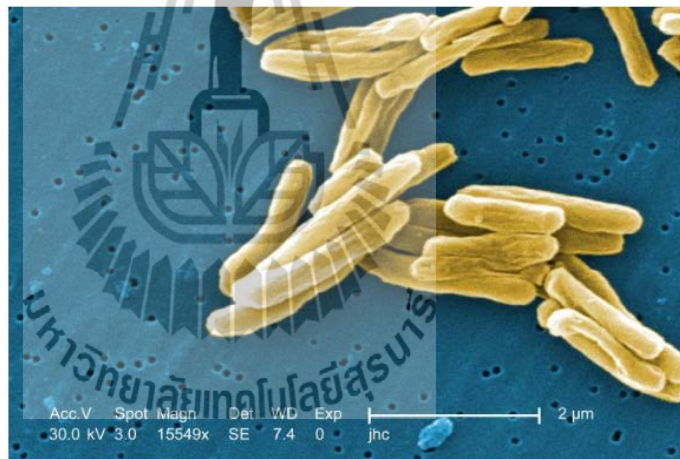
## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัณโรค

##### 2.1.1 คุณลักษณะทั่วไปของเชื้อวัณโรค

วัณโรค (Tuberculosis, TB) เป็นโรคแพร่เชื้อทางอากาศ (airborne disease) ที่สามารถติดต่อได้ทางการหายใจ เกิดจากเชื้อ *Mycobacterium tuberculosis* ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียขนาดใหญ่ ชนิด non motile rod-shaped bacterium มีความยาว 2 - 4  $\mu\text{m}$  และเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 - 0.5  $\mu\text{m}$  (CDC, 2005) ดังรูปที่ 2.1



*Mycobacterium tuberculosis* scanning electron micrograph. Mag 15549X. CDC.

รูปที่ 2.1 เชื้อวัณโรค ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป กำลังขยาย 15,549 เท่า (CDC, 2005)

##### 2.1.2 กลไกการติดเชื้อและการก่อโรค

เชื้อวัณโรค ถูกจัดว่าเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่ในอากาศ (airborne particles) ในรูปอนุภาคเชื้อวัณโรค (droplet nuclei) ซึ่งถูกปล่อยออกมาจากการไอ จาม ตะโกนหรือร้องเพลงของผู้ป่วยวัณโรคปอดหรือวัณโรคที่กล่องเสียง (American Thoracic Society, CDC, and Infectious Disease Society of America, 2000, 2003) วัณโรคเป็นโรคที่สามารถติดต่อโรคผ่านทางอากาศเท่านั้น หลังจากหายใจเอาอนุภาคเชื้อวัณโรคที่มีเชื้อวัณโรคเข้าสู่ร่างกายทางปากหรือจมูกและเข้าสู่ถุงลมฝอย (alveoli) อาจทำให้เกิดการติดเชื้อเฉพาะที่ขึ้น จากการกระจายไปตามต่อมน้ำเหลืองและ

กระแสดูดไปทั่วร่างกาย (Canetti G. 1955) การติดเชื้อนี้จะพบในคนที่มีความไวต่อโรค คนที่เป็นวัณโรคในน้ำช่องเยื่อหุ้มปอดอาจไม่ถูกสงสัยว่าเป็นวัณโรคปอดหรือวัณโรคที่ท่อน้ำเหลือง หลังจากติดเชื้อประมาณ 2-12 สัปดาห์ ระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายจะจำกัดการเพิ่มจำนวนของเชื้อวัณโรค การทดสอบภูมิคุ้มกันต่อเชื้อวัณโรคจะให้ผลบวก อย่างไรก็ตาม เชื้อวัณโรคจะยังคงหลงเหลืออยู่ในร่างกายเป็นระยะเวลาหลายปี ทำให้เป็นการติดเชื้อวัณโรคชนิดแฝง (Latent tuberculosis infection : LTBI) คนที่เป็น LTBI จะไม่มีอาการของวัณโรคและไม่มีการติดเชื้อ (CDC. 2005)

### 2.1.3 การแพร่กระจายเชื้อวัณโรคในอากาศ

การไอ จาม จะมีการผลิตละอองน้ำลายที่เป็นละอองของเหลว (droplet) มีขนาดตั้งแต่เล็กกว่าไมโครเมตร จนถึง 1,000  $\mu\text{m}$  โดยประมาณ ร้อยละ 40 ของ droplets ที่ลอยอยู่ในสิ่งแวดล้อมมีขนาดเล็กกว่า 10  $\mu\text{m}$  (Nicas, M., Nazaroff, W.W., Hubbard, A., 2005) ในคนสุขภาพปกติทั่วไปเมื่อไอหรือจามจะมีการปล่อยอนุภาคเชื้อวัณโรคออกมาจำนวนประมาณ 3,000 droplets/ครั้ง มีความเร็วต้นเฉลี่ย 6-22 m/s (Zhu, S., Kato, S., Yang, J-H., 2006) และอาจสูงได้ถึง 100 m/s (Wells, 1955 และ Kenneth Todar, 2012) และถ้าเป็นผู้ป่วยวัณโรคจะไอเอา droplet ที่มีเชื้อวัณโรคติดอยู่ออกมาจำนวนประมาณ 1,000 droplet/ครั้ง (Fletcher, L.A. et. al., 2003) ส่วนการจามเป็นเวลา 1 นาทีหรือการพูดเป็นเวลา 5 นาที ก็จะปล่อยออกมาประมาณ 3,000 droplets เช่นกัน โดยส่วนใหญ่อนุภาคเชื้อวัณโรคที่สามารถทำให้ติดเชื้อได้จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5  $\mu\text{m}$  ที่ถูกหายใจเข้าไปในร่างกาย จะมีตัวเชื้อวัณโรคไม่เกิน 3 bacilli/droplet โดยปริมาณเชื้อวัณโรคที่ทำให้เกิดการติดเชื้อได้ ต่ำมากประมาณ 1-5 bacilli เท่านั้น (Balasubramanian, V., Wiegeshaus, E. H., Taylor, B. T. and Smith, D. W., 1994) เมื่อเชื้อวัณโรคถูกไอจามออกมาจะแพร่เข้าสู่บรรยากาศทั่วไปได้ไกลถึง 10 ft เนื่องจาก อนุภาคเชื้อวัณโรค มีขนาดเล็กมากจึงสามารถลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลานาน (Kenneth Todar. 2012) และมีการแพร่กระจายผ่านไปยังพื้นที่ต่าง ๆ ภายในห้องหรืออาคาร โดย droplet ขนาด 2  $\mu\text{m}$  สามารถลอยอยู่ในห้องที่ลมสงบได้นาน 4.2 ชั่วโมง แล้วตกลงจากระดับความสูง 2 m ดังนั้น อนุภาคจึงสามารถแพร่กระจายไปได้ทั่วไปในอาคาร ระบบระบายอากาศเป็นวิธีการที่มีความสำคัญในการควบคุมการแพร่กระจายเชื้อวัณโรค (Fletcher, L.A. et. al. 2003, Wells WF., 1955)

### 2.1.4 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ที่มีเพิ่มความเสี่ยงการแพร่กระจายเชื้อวัณโรค

การแพร่กระจายของเชื้อวัณโรคมีโอกาสเพิ่มการแพร่กระจายของเชื้อวัณโรคเนื่องจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การสัมผัสกับเชื้อวัณโรคในพื้นที่แคบและปิดมิดชิด การระบายอากาศทั่วไปและเฉพาะที่ไม่เพียงพอเป็นผลให้การเงิองหรือการกำจัด อนุภาคเชื้อวัณโรค

ไม่เพียงพอ เกิดการหมุนเวียนอากาศที่ปนเชื้อ อนุภาคเชื้อวัณโรค การทำความสะอาดและการทำลายเชื้ออุปกรณ์ทางการแพทย์ไม่เพียงพอ การขนส่งตัวอย่างไม่เหมาะสม (CDC, 2005) ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้วิธีการควบคุมด้านสิ่งแวดล้อมในการจัดการ

## 2.2 การควบคุมป้องกันวัณโรคด้วยวิธีทางวิศวกรรม

CDC (1994, 2005) ได้กล่าวถึงวิธีทางวิศวกรรมในการควบคุมป้องกัน (Engineering controls) ว่าเป็นการควบคุมด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Controls) ซึ่งเป็นแนวทางดำเนินการที่ 2 ตามมาตรการป้องกันของโปรแกรมการควบคุมการติดเชื้อวัณโรค (TB infection-control program) ที่ใช้ดำเนินการต่อจากการใช้การควบคุมด้วยการบริหารจัดการ (Administrative controls) ซึ่งจะใช้เทคโนโลยีที่เป็นวิธีทางวิศวกรรมในการกำจัดและอินแอคทิเวตเชื้อวัณโรคในอากาศ วิธีการเหล่านี้ช่วยในการป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อและลดความเข้มข้นของอนุภาคเชื้อวัณโรค ในอากาศที่คิดเชื้อลง อันได้แก่

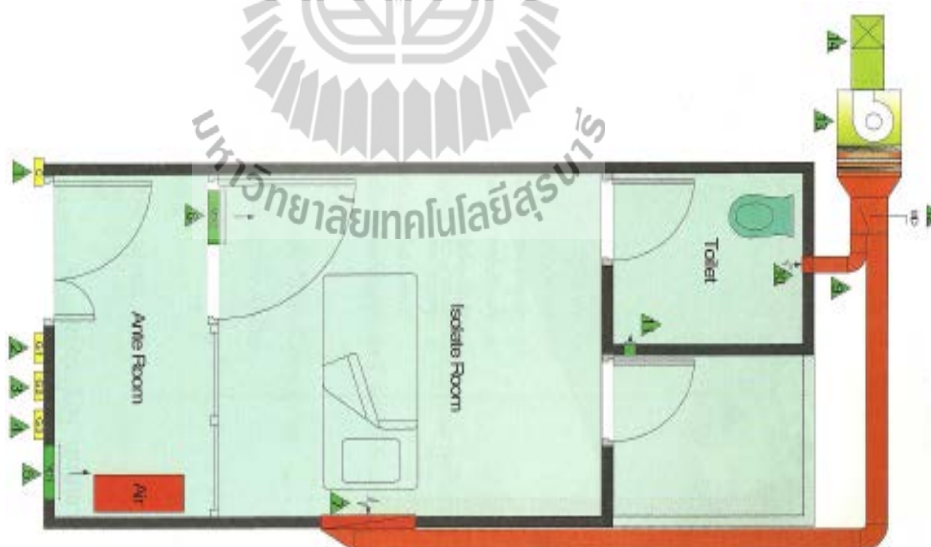
1) การระบายอากาศแบบเฉพาะที่ (local exhaust ventilation) เป็นการนำสิ่งปนเปื้อนที่กำลังเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดไปกำจัดก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอก จึงเป็นเทคนิคในการควบคุมที่แหล่งกำเนิด โดยระบบระบายอากาศจะถูกออกแบบมาเพื่อรวบรวมสิ่งปนเปื้อนที่แหล่งหรือใกล้เคียงแหล่งการปนเปื้อนนั้น ก่อนที่จะฟุ้งกระจายขึ้นสู่อากาศในระดับหายใจของผู้ที่อยู่ในพื้นที่นั้น ดังนั้น การระบายอากาศแบบเฉพาะที่จึงเป็นมาตรการควบคุมสิ่งปนเปื้อนที่แหล่งที่มีประสิทธิภาพสูง และประหยัดพลังงาน วิธีการระบายอากาศแบบเฉพาะที่มีการใช้อยู่ ได้แก่ external hoods, enclosing booths, และเต็นท์ ชุด enclosed หรือ ventilated booth ใช้สำหรับระบายอากาศในบริเวณที่มีกิจกรรมการ ไอ หรือทำให้มีละอองของเหลว (aerosol)

2) การระบายอากาศแบบทั่วไป (general ventilation) มีวัตถุประสงค์เพื่อเจือจางสิ่งปนเปื้อนในอากาศให้อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ นั่นคือ ระดับที่เชื่อว่าไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของคนทำงานส่วนใหญ่ และไม่ทำให้เกิดสภาพที่อาจเกิดไฟไหม้หรือระเบิดได้ รวมทั้งทำให้เกิดความสบายต่อผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้น การระบายอากาศแบบทั่วไปมีวิธีการดำเนินการได้หลายวิธี ได้แก่ การทำให้เจือจางและการกำจัดการปนเปื้อน การจัดการรูปแบบการไหลอากาศภายในห้อง การควบคุมการไหลอากาศภายในอาคาร ห้องความดันลบ (negative pressure in rooms) และห้องผู้ป่วยแยกโรคติดเชื้อวัณโรค (TB isolation rooms)

3) การทำความสะอาดอากาศหรือการฆ่าเชื้อโรคในอากาศ ประกอบด้วย การกรองอากาศ (filtration of air) โดยใช้ HEPA filters และการฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือ UVGI

### 2.3 ห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ (Airborne infection isolation room)

ประเทศไทยมีโรงพยาบาลภาครัฐทุกระดับรวม 736 แห่ง แบ่งเป็น โรงพยาบาลชุมชน 642 แห่ง โรงพยาบาลทั่วไป 69 แห่ง และโรงพยาบาลศูนย์ 25 แห่ง (สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์, 2552) ผลการสำรวจสถานการณ์การติดเชื้อวัณโรคของบุคลากรในโรงพยาบาลทั่วประเทศ จำนวน 576 (78.3%) ในปี 2550 พบว่า มีโรงพยาบาลประมาณร้อยละ 56.1 ที่มีผู้ป่วยเข้ารับการรักษาดำรงอยู่ในโรงพยาบาลอย่างน้อย 1 - 6 ราย/วัน และพบบุคลากรป่วยเป็นวัณโรค จำนวน 324, 234, 235 ราย ในปี 2547, 2548 และ 2549 ตามลำดับ โดยปฏิบัติงานอยู่ในอาคารหอผู้ป่วยอายุรกรรม ร้อยละ 45.1 หอผู้ป่วยศัลยกรรม ร้อยละ 12.4 ห้องอุบัติเหตุ-ฉุกเฉิน ร้อยละ 6.8 ห้อง ICU ร้อยละ 6.4 ห้องศัลยกรรม ร้อยละ 4.1 ห้องปฏิบัติการ ร้อยละ 3.7 และคลินิกทันตกรรมร้อยละ 1.9 (เจริญ ชูโชติถาวร, 2551) นอกจากนี้ มีการคาดการณ์ว่ามีประชาชนและผู้ป่วยจำนวนไม่น้อยที่ติดเชื้อวัณโรค ในขณะที่เข้าไปใช้บริการในพื้นที่โรงพยาบาล จากสถานการณ์การระบาดของโรคแพร่เชื้อทางอากาศในปัจจุบัน เช่น SARS ไข้หวัดนก (H5N1) รวมถึงวัณโรคดังกล่าว กระทรวงสาธารณสุขจึงได้มีนโยบายให้โรงพยาบาลของรัฐทุกแห่งจัดทำห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศเพื่อป้องกันควบคุมการแพร่ระบาดของโรคไปยังบุคลากรทางการแพทย์ รวมถึงผู้ป่วยและประชาชนทั่วไปที่เข้าไปใช้บริการด้านสุขภาพในโรงพยาบาล โดยการปรับปรุงห้องผู้ป่วยพิเศษ อาคารผู้ป่วยในของโรง



รูปที่ 2.2 ห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศตามแบบ วศ. 1/2549  
(กองวิศวกรรมการแพทย์, 2549)

พยาบาลตามแบบ วศ.1/2549 (รูปที่ 2.2) หรือ วศ.2/2549 ทำให้ในปัจจุบันโรงพยาบาลชุมชนทุกระดับทั่วประเทศไทยมีห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ เฉลี่ย 1 ห้อง/โรง ที่มีระบบการควบคุม

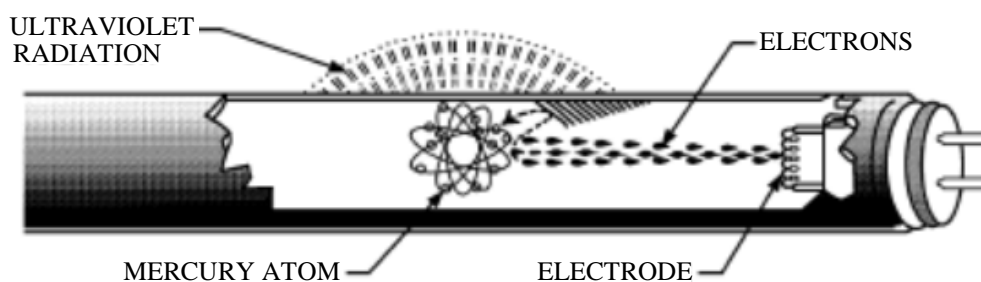
คุมการแพร่กระจายเชื้อโรคในอากาศด้วยการควบคุมความดันอากาศให้เป็นลบ และติดตั้งระบบกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter) ร่วมกับการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสี UVC ในชุดระบายอากาศ (กองวิศวกรรมการแพทย์, 2549)

ห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ.1/2549 ดังรูปที่ 2.2 โครงสร้างของห้องประกอบด้วย 1) ห้องก่อนห้องผู้ป่วย (Ante room) เป็นห้องเก็บวัสดุอุปกรณ์และเตรียมตัวของผู้เจ้าหน้าที่ก่อนเข้าไปปฏิบัติงานในห้องแยกผู้ป่วย 2) ห้องแยกผู้ป่วย (Isolation room) เป็นห้องพักรักษาตัวผู้ป่วย 3) ห้องน้ำสำหรับผู้ป่วย 4) ชุดระบายอากาศ Filter Housing Unit (FHU) ประกอบด้วย Medium filter, หลอด UV และ HEPA filter 5) ท่อระบายลม 6) ช่องเติมอากาศ และ 7) ช่องระบายอากาศที่หัวเตียงและห้องน้ำ โดยหลักการทั่วไป กำหนดให้เป็นห้องที่มีความดันของอากาศภายในห้องต่ำกว่าความดันของห้องโดยรอบตามมาตรฐานกำหนดให้ขั้นต่ำไม่น้อยกว่า 2.5 Pascal วิธีการโดยดึงอากาศซึ่งปนเปื้อนภายในห้องไปผ่านกระบวนการกรองดักกำจัดเชื้อโรคก่อนปล่อยทิ้ง

## 2.4 การฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet germicidal irradiation: UVGI)

### 2.4.1 หลอด UVGI (Ultraviolet germicidal irradiation lamp)

หลอด UVGI เป็นหลอดชนิด low-pressure mercury discharge ภายในบรรจุด้วยปรอทที่ถูกทำให้กลายเป็นไอเมื่อหลอดถูกทำให้สว่างขึ้น อะตอมของปรอทเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากการชนกันของก๊าซเฉื่อย และเข้าสู่สถานะ excited stage อะตอมปรอทในสถานะ excited stage จะปลดปล่อยพลังงานออกมา โดยเกือบ 85% ของพลังงานทั้งหมดมีความยาวคลื่น 253.7 nm ส่วนพลังงานที่เหลือจะถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ในช่วง UV (ความยาวคลื่น 185 nm ส่วนมาก) มีเพียงเล็กน้อยที่ถูกปลดปล่อยในช่วงที่มองเห็นได้ หลอด UV ที่ถูกผลิตออกมามีรูปร่างแตกต่างกันออกไป แต่เกือบทั้งหมดจะผลิตให้มีรูปร่างเป็นแบบหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไป ดังรูปที่ 2.3

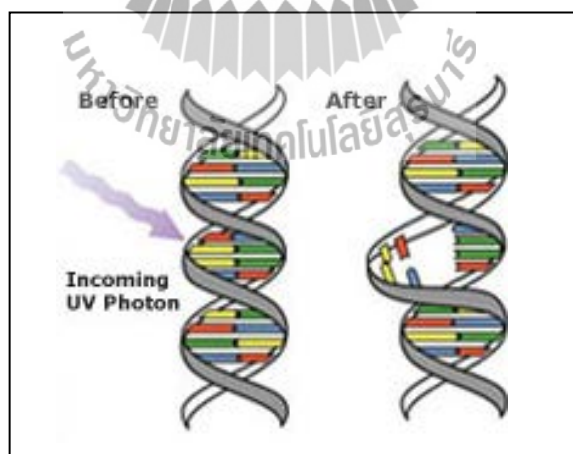


รูปที่ 2.3 หลอด UVGI

**หลอดชนิด Cylindrical** ตัวหลอดอาจมีเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวหลายขนาด เหมือนกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เกือบทั้งหมดจะมีขั้วต่อเข้ากับไฟฟ้าที่ปลาย 2 ข้าง แต่ก็ยังมีแบบที่ต่อกับปลายเพียงข้างเดียว โดยทั่วไปหลอดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง รุ่น T12 เท่ากับ 1.5 in, รุ่น T8 เท่ากับ 1.1 in, รุ่น T6 เท่ากับ 0.79 in และ รุ่น T5 เท่ากับ 0.63 in หลอดชนิด Biaxial เป็นหลอดที่มีลักษณะเป็นหลอดรูปทรงกระบอกคู่ที่มีการเชื่อมต่อกันที่ปลายด้านนอก แต่มีขั้วต่อเข้าไฟฟ้าเพียงด้านเดียว ส่วนหลอดชนิด U-tube มีลักษณะคล้ายกับหลอดชนิด biaxial lamps ที่มีขั้วต่อเข้ากับไฟฟ้าเพียงด้านเดียว มีส่วนที่โค้งที่ปลายด้านนอก

#### 2.4.2 กลไกการก่อความเสียหายของ UVC

การแผ่รังสีของหลอดชนิด Low pressure mercury arc lamp จะให้แสงที่มีลักษณะสีเดียว ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 253.7 nm ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนได้มากที่สุด โดยสารพันธุกรรม ( nucleic acids ; DNA, RNA) ของจุลชีพ กลไกสำคัญเกิดจากรังสี UVC ผ่านทะลุเข้าไปในผนังเซลล์ของจุลชีพและทำลาย DNA และ RNA โดยการดูดกลืนพลังงานโฟตอนของ UVC เป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายจากโฟโตเคมีคอลของจุลชีพ โดยเฉพาะการเกิด dimerization ใกล้เคียง pyrimidine nucleotides ผลเสียหายที่เกิดขึ้นอาจจะครอบคลุมถึงความสามารถในการซ่อมแซมเซลล์ เกิดการกลายพันธุ์ ชัดขวางการแบ่งเซลล์และในที่สุดจะฆ่าจุลชีพ ทำให้เชื้อจุลชีพไม่สามารถสร้างเซลล์ใหม่และไม่เกิดการแพร่เชื้อได้ (Friedberg et al., 1995) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการฆ่าเชื้อจุลชีพของ UVC

#### 2.4.3 ความเข้มของหลอด UVGI (UVGI lamp irradiance)

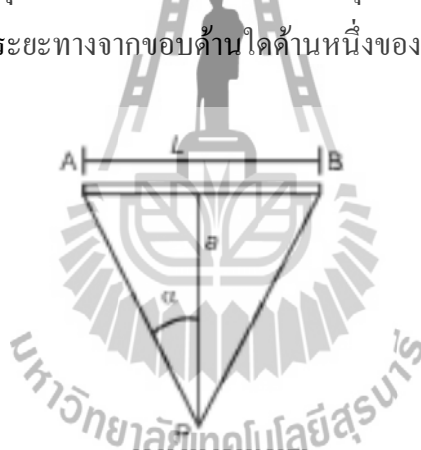
ความเข้มของหลอด UVGI ถูกวัดในหน่วย  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ผู้ผลิตมักได้ค่าความเข้มของหลอดมาจากการตรวจวัด ความเข้มของรังสี UV ที่อ่านค่า ณ จุดที่ห่างจากจุดกึ่งกลางของหลอดเป็น

ระยะทาง 3.3 ft ในบรรยากาศห้อง อุณหภูมิประมาณ 75 °F และความเร็วอากาศเป็นศูนย์ โปรโตคอลมาตรฐานสำหรับทดสอบการวัดความสามารถของหลอด UVC ในการอินแอคทีเวชันเชื้อจุลชีพในอากาศหรือบนพื้นผิวถูกพัฒนาขึ้นโดย ASHRAE Standard Project Committee SPC185 (ASHRAE, 2008) ค่า irradiance ( $E$ )  $AB = L$  จึงสามารถคำนวณหาค่า  $E$  จากสมการ (2-1)

$$E = \frac{\phi}{2\pi^2 La} (2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (2-1)$$

โดยที่

- $E$  = ค่าความเข้มรังสีของหลอด ( $W/m^2$ )
- $\phi$  = ค่ากำลังหลอด UVC (W)
- $L$  = ความยาวหลอด UVC (m)
- $a$  = ระยะทางจากจุดกึ่งกลางหลอดถึงจุดตรวจวัด (m)
- $\alpha$  = มุมระหว่างเส้นระยะทางจากจุดกึ่งกลางหลอดถึงจุดตรวจวัดกับเส้นระยะทางจากขอบด้านใดด้านหนึ่งของหลอดถึงจุดตรวจวัด (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 การคำนวณความเข้มของหลอด UVGI

เมื่อระยะทางสั้น ๆ ( $a < 0.5L$ ) ค่า irradiance จะเป็นส่วนกลับกับระยะทางจากหลอดถึงจุดตรวจวัด สามารถจัดรูปสมการ (2-1) ให้อยู่ในรูปใหม่ได้ดังสมการ (2-2)

$$E = \frac{\phi}{2\pi La} \quad (2-2)$$

#### 2.4.4 หลักการทางจลน์ศาสตร์ของการอินแอคทีเวชันจุลชีพด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

##### (Kinetics of UV inactivation in microorganisms)

การฆ่าเชื้อโรคด้วยการฉายรังสี UV จะไปอินแอคทีเวชัน (inactivation) จุลชีพ ทำให้ไม่สามารถเพิ่มจำนวนเซลล์หรือโคโลนีได้ ซึ่งเป็นไปตามสมการ standard decay;  $S$  (2-3) ซึ่ง



Kowalski et al. (2000) เป็นผู้ที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูป UV decay curves โดยใช้ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของจุลชีพ (UVC susceptibility constant; Z) และ lethal ultraviolet dosages หรือ  $UV_{Dose}$  ได้จากการศึกษาทดลองจำนวนมากในแบคทีเรีย ฟังไจ ไวรัส และ โปโตซัว ค่าปริมาณ UVC (UVC doses) ที่จำเป็นต้องใช้ในการอินแอคทีเวตจะถูกเลือกใช้ตามชนิดของจุลชีพซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนตามการออกแบบการทดลองชีวภัณฑ์และการตรวจวัด UVC เช่น การทดสอบด้วย biosimetry test strains ทำสามารถใช้ในการหาปริมาณการใช้ UVC และการทำนายถึงผลเกิดขึ้นกับจุลชีพได้ (Lytle and Sagripanti, 2005)

$$\text{Standard decay } S = \exp(-Z \times I \times t) \quad (2-3)$$

โดยที่  $S$  = สัดส่วนของประชากรจุลชีพที่รอดชีวิตจากการสัมผัสกับรังสี UV ที่เวลา  $t$  ใดๆ  $= C_t/C_0$   
 $Z$  = ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของจุลชีพ ( $m^2/J$ )  
 $I$  = ความเข้มรังสี UV (UV irradiance) ( $W/m^2$ )  
 $t$  = เวลาจุลชีพสัมผัสกับรังสี UV (s)

และเมื่อ  $UV_{Dose} =$  ปริมาณรังสี UV  $= I \times t$  ( $Ws/m^2$ )

$$\text{ดังนั้น Standard decay } S = \exp(-Z \times UV_{Dose}) \quad (2-4)$$

การอินแอคทีเวตเชื้อวันโรคด้วยรังสี UVC (254 nm) ที่อุณหภูมิห้องให้ได้ ร้อยละ 90, 99.9, 99.99 และ 99.999 ต้องใช้ปริมาณรังสี UVC เท่ากับ 0.5-23, 1.0-6.0, 1.5-10, 2.0-13 และ 2.4-17 ตามลำดับ (AWWOA, 1999, David H. L. 1973; Kallenbach N. R. et al., 1989; Kano et al. (Millipore), 2003; Kowalski W. J. et al., 2000)

#### 2.4.5 ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของจุลชีพ

ความไวต่อความเสียหายจากรังสี UV ของเชื้อจุลชีพในอากาศ หรือเรียกว่า ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของจุลชีพ (UVC susceptibility constant) ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อและสภาพภูมิอากาศ ถ้าประชากรของเชื้อสัมผัสกับรังสี UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm จะทำให้เกิดการทำลาย DNA ของเชื้อ และเมื่อสัมผัสรังสี UV ในปริมาณที่มากขึ้นก็จะทำให้เกิดความเสียหายมากขึ้นและทำให้เชื้อจุลชีพตายในที่สุด ผลการศึกษาที่ผ่านมาดังตารางที่ 2.1 รังสี UV ที่ 254 nm ทำให้เกิดความเสียหายต่อเชื้อจุลชีพส่วนใหญ่และความเสียหายก็มีความแตกต่างกันในจุลชีพแต่ละชนิด ความไวต่อรังสี UV ของจุลชีพหาได้จากค่าคงที่ของความไวต่อรังสี UV (UV susceptibility constant, Z ( $m^2/J$ ) และจากการคำนวณ การตรวจวัดและการทดลอง โดยใช้สมการ (2-5)

$$Z = \frac{-\ln(C_t/C_0)}{UV_{Dose}} \quad (2-5)$$

โดยที่  $Z$  = ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของจุลชีพ ( $m^2/J$ )  
 $C_t$  = ความเข้มข้นของละอองชีวภาพที่เวลา  $t$  ( $cfu/m^3$ )  
 $C_0$  = ความเข้มข้นของละอองชีวภาพที่เวลาเริ่มต้น ( $cfu/m^3$ )  
 $UV_{Dose}$  = ปริมาณรังสี UV ที่เชื้อจุลชีพได้รับ (effective UV dose) ( $J/m^2$ )

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของเชื้อจุลชีพชนิดต่างๆจากผลการศึกษาที่ผ่านมา (ดัดแปลงจาก Beggs, C. B., Noakes, C. J., Sleigh, P. A., Fletcher, L. A., & Kerr, K. G. (2006))

ชนิดเชื้อจุลชีพ	ค่า $Z$ ( $m^2/J$ )	RH	ที่มา
<i>Bacillus subtilis</i> (mixed spores)	0.0190	-	Rentschler (1941)
<i>Bacillus subtilis</i> (vegetative cells)	0.063-0.066	20%-40%	Peccia et al. (2001)
<i>Bacillus anthracis</i>	0.0510	-	Sharp (1938)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0.5721	-	Sharp (1940)
<i>Serratia marescens</i>	$0.5721 \pm 0.42^a - 0.58 \pm 0.21^b$	$^a 49-62\%$ , $^b 22-33\%$	Ko et al. (2000)
<i>Serratia marescens</i>	$0.095^c - 0.94^d$	$^c 78\%$ , $^d 48\%$	Fletcher et al. (2003)
<i>Serratia marescens</i>	0.35-0.45	40%-50%	Peccia et al. (2001)
<i>Serratia marescens</i>	1.83-2.45	50%	Riley et al. (1976)
<i>Serratia marescens</i>	0.4449	-	Sharp (1940)
<i>Mycobacterium bovis</i> BCG	0.37-0.39, 0.23-0.28*	50%	Riley et al. (1976)
<i>Mycobacterium bovis</i> BCG	0.17-0.13a, 0.27±0.20 <sup>b</sup>	$^a 49-62\%$ , $^b 22-33\%$	Ko et al. (2000)
<i>Mycobacterium parafortuitum</i>	0.12-15 <sup>c</sup> , 0.2-0.22 <sup>d</sup>	$^c 50-90\%$ , $^d 20-40\%$	Peccia et al. (2001)
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	0.23-0.42, 0.44-0.55*	50%	Riley et al. (1976)
<i>Staphylococcus aureus</i>	0.3476	-	Sharp (1940)
<i>Staphylococcus aureus</i>	0.9602	-	Luckiesh (1946)
<i>Escherichia coli</i>	0.3759	-	Sharp (1940)
Adenovirus	0.0546	-	Jensen (1964)
Influenza A virus	0.1187	-	Jensen (1964)
<i>Penicillium chrysogenum</i>	0.00434	-	Luckiesh (1946)

\* เพาะเลี้ยงเชื้อแตกต่างกัน 2 วิธี

จากสมการ (2-3), (2-4) และ (2-5) จึงสามารถหาค่าอัตราการอินแอคทีเวต (Inactivation rate) หรืออัตราการฆ่าเชื้อจุลชีพ (Killing rate: KR) ได้ดังสมการ (6) ซึ่งจะใช้เป็นสมการหลักในการประเมินประสิทธิภาพของระบบ UR UVGI ในการศึกษานี้

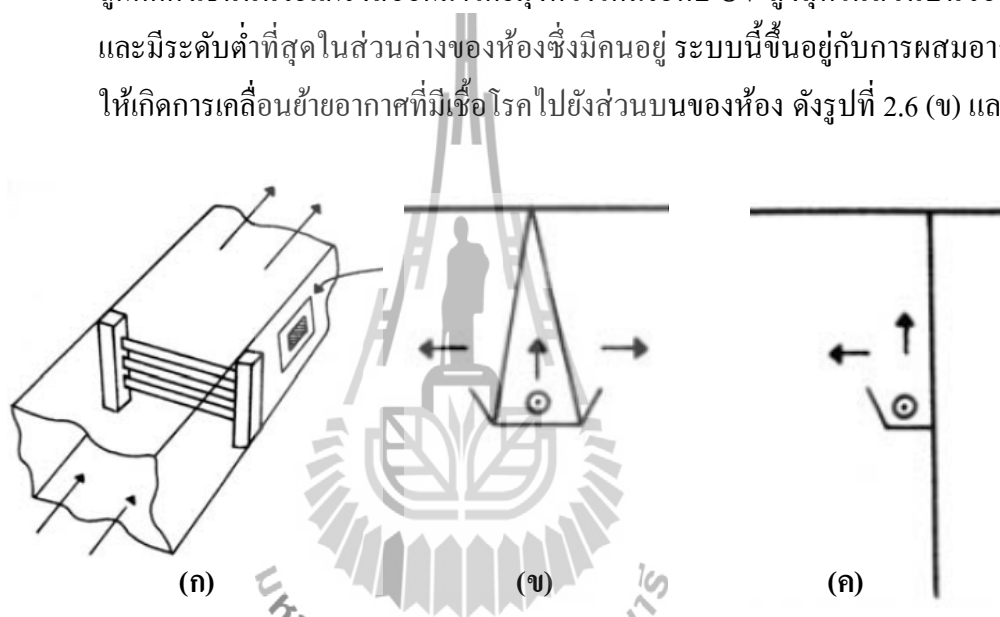
$$KR = 1 - S$$

$$KR = 1 - \exp(-Z \times UV_{Dose}) \quad (2-6)$$

#### 2.4.6 รูปแบบของระบบ UVGI

CDC (2005a) สรุปลงในสถานบริการสุขภาพมีการใช้ระบบ UVGI ในการฆ่าหรือการอินแอคทีเวชันเชื้อโรคที่ติดต่อได้ทางอากาศ เช่น เชื้อวัณโรค 3 รูปแบบ ได้แก่

- 1) การฉายรังสีที่ระบายอากาศ (duct irradiation) เป็นการติดตั้งหลอด UVGI 1 หลอด หรือหลายหลอดระหว่างท่อเพื่อฉายรังสีตั้งแต่อากาศดูดออกจากห้องผ่านเข้าไปในท่อ ระบบระบายอากาศ หรือติดตั้งตลอดท่อระบายอากาศ ดังรูปที่ 2.6 (ก)
- 2) การใช้หลอด UVGI ร่วมกับระบบหมุนเวียนอากาศภายในห้อง เป็นการใช้พัดลมดึงอากาศเข้าสู่ชุดไถ่บริเวณหลอด UVGI เพื่อทำลายเชื้อในอากาศก่อนที่จะหมุนเวียนกลับเข้ามาในห้อง ชุดดังกล่าวอาจจะเป็นแบบตั้งโต๊ะเคลื่อนย้ายได้หรือติดผนัง
- 3) UR irradiation เป็นระบบที่หลอด UV จะถูกติดตั้งบนเพดานหรือผนัง ซึ่งหลอด UV ที่ถูกติดตั้งเช่นนั้นจะแผ่รังสีออกมาโดยมุงห้วงให้มีระดับ UV สูงสุดในส่วนบนของห้อง และมีระดับต่ำที่สุดในส่วนล่างของห้องซึ่งมีคนอยู่ ระบบนี้ขึ้นอยู่กับการผสมอากาศดีให้เกิดการเคลื่อนย้ายอากาศที่มีเชื้อโรคไปยังส่วนบนของห้อง ดังรูปที่ 2.6 (ข) และ (ค)



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการติดตั้งชุด UVGI (ลูกศรชี้ทิศทางของรังสี)

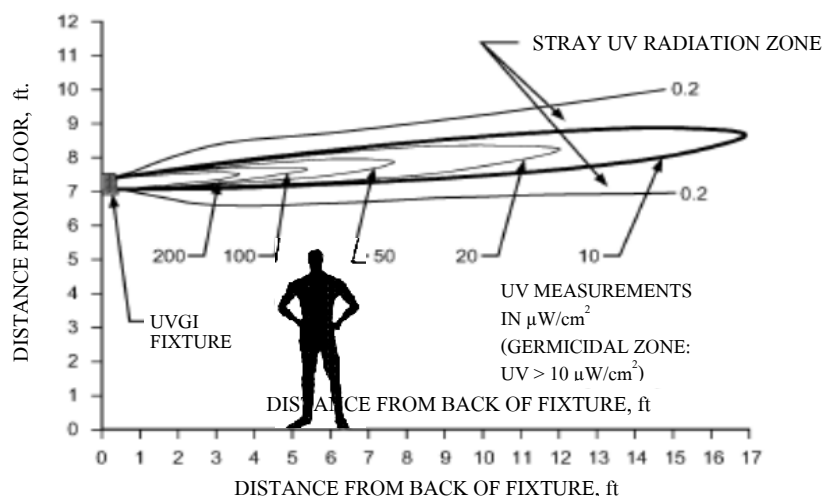
- (ก) การติดตั้งในท่อระบบระบายอากาศ (ข) การติดตั้งบนเพดาน  
(ค) การติดตั้งบนผนังห้อง

## 2.5 การฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในพื้นที่ส่วนบนของห้อง

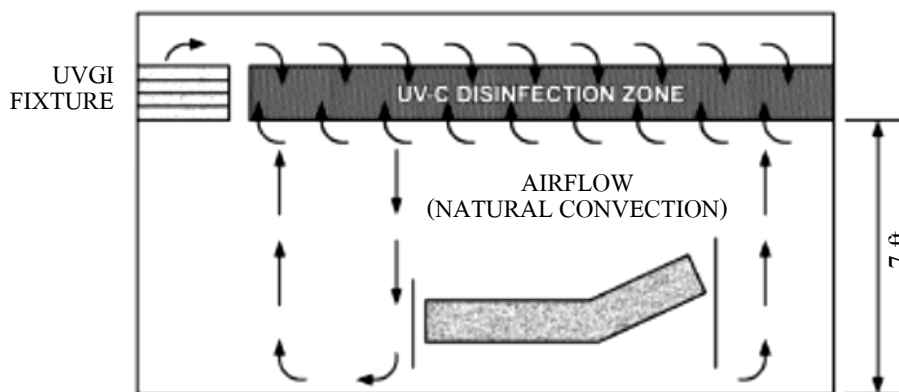
การแบ่งพื้นที่ภายในห้องผู้ป่วย ของระบบ UR UVGI มีการแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) พื้นที่ส่วนล่างของห้อง (Lower zone) เป็นพื้นที่ที่ใช้ในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ภายในห้อง มีความสูงจากพื้นไม่เกิน 2.1 m ซึ่งกำหนดให้มีความเข้มรังสี UVC ที่ระดับความสูงจากพื้นไม่เกิน 1.7 m ต้องไม่เกิน  $0.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
- 2) พื้นที่ส่วนบนของห้อง (Upper zone) เป็นพื้นที่ที่อยู่สูงขึ้นไปถัดมาจากพื้นที่ส่วนล่างของห้อง ระดับความสูงจากพื้นตั้งแต่ 2.1 m ขึ้นไป

ระบบการฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในพื้นที่ส่วนบนของห้อง (Upper room irradiation germicidal: UR UVGI) เป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อฉายรังสีฆ่าเชื้อจุลชีพในพื้นที่ส่วนบนของห้องเท่านั้น โดยให้มีแถบรังสีที่แคบและโฟกัสในทิศทางขนานแนวนอนกับเพดานห้อง และไม่ให้เกิดการเบี่ยงเบนรังสีลงไปยังพื้นที่ส่วนล่างของห้องเพื่อป้องกันการมีผลกระทบต่อคน ระบบ UR UVGI นี้ ขึ้นอยู่กับการถ่ายเทอากาศและการผสมอากาศให้มีการเคลื่อนที่จากส่วนล่างขึ้นไปยังส่วนบนของห้อง เพื่อที่จะให้สามารถฉายรังสีให้เกิดการอินแอคทีเวชันกับจุลชีพในอากาศได้ (Kethley and Branch, 1972) มีการจัดทำสวิตช์นิรภัยเพื่อควบคุมการเปิดใช้งาน และจะต้องมีแผ่นกั้น (baffles) หรือบานบังแสง (louvers) ที่มีการติดตั้งเพื่อบังกับแสงให้ขึ้นด้านบนของห้อง โดยจะต้องไม่มีการโค้งงอหรือผิดรูป ชุดติดตั้ง UR UVGI จะใช้หลอดชนิด low-pressure UVC ที่มีรูปร่างกะทัดรัดและมีกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน การเลือกขนาดของหลอด รูปทรง และบาลาสต์ ในการออกแบบการติดตั้งระบบให้มีการกระจายรังสีเปิดกว้างหรือจำกัดพื้นที่นั้น ขึ้นอยู่กับสภาพทางกายภาพของสถานที่ กรณีเพดานห้องสูงเกินกว่า 10 ft ก็ใช้การติดตั้งแบบเปิดที่ให้มีการกระจายเป็นวงกว้างซึ่งจะได้ระบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่า แต่ถ้าเพดานต่ำกว่า 10 ft ก็ให้ติดตั้งระบบที่มีบานบังแสง (ชนิดติดผนัง แขนวนหรือติดมุมห้อง) สามารถใช้การติดตั้งแบบผสมที่ความสูงจากพื้นอย่างน้อย 7 ft ในรูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างของการติดตั้งระบบ UR UVGI ที่ระดับความสูง 7 ft รังสีมีความเข้มสูงในระยะ 3 ft แรกและลดลงครึ่งหนึ่งทุกระยะ 3 ft โดยรังสีถูกบังคับให้กระจายเอียงขึ้นด้านบนของห้อง และรูปที่ 2.8 แสดงการกระจายของรังสี UV ภายในห้องผู้ป่วยที่ติดตั้งระบบ UR UVGI ที่ระดับความสูง 7 ft เช่นกัน โดยมีการจัดระบบระบายอากาศที่ทำให้เกิดการหมุนเวียนอากาศจากพื้นที่ส่วนล่างขึ้นไปมาเชื้อในพื้นที่ส่วนบนของห้อง



รูปที่ 2.7 ระดับรังสีกับระดับความสูง (ASHRAE, 2008)



รูปที่ 2.8 การกระจายรังสี UV ภายในห้อง (ASHRAE, 2008)

## 2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบ UR UVGI

### 2.5.1.1 ความเข้มและปริมาณ UVGI

ความเข้มและปริมาณ UVGI (UVGI Irradiance and Dose) เป็นปัจจัยที่สำคัญในการประเมินความสามารถในการฆ่าหรือการอินแอคทีเวชัน (inactivation) ของเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถติดต่อได้ทางอากาศเป็นสื่อ ประกอบด้วยความไวต่อ UVGI ของจุลินทรีย์ และปริมาณ UVGI (UVGI dose) ที่จุลินทรีย์หรือประชากรของจุลินทรีย์ได้รับปริมาณ UVGI เป็นค่าที่ได้จากค่าความเข้มรังสี UV คูณกับเวลาต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น  $\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  การออกแบบระบบ UR UVGI จะมีประสิทธิภาพในการฆ่าหรืออินแอคทีเวชันอนุภาคเชื้อวัณโรคในอากาศที่มีเชื้อโรคลกลุ่ม mycobacteria เกือบทั้งหมด ต้องมีค่าประมาณ  $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ถึง  $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  (Miller et al., 2002) ซึ่งปริมาณ UVGI ช่วงนี้ มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อวัณโรคได้ โดยจะลดลงเมื่อมีการติดตั้ง UVC lamp เพียงด้านใดด้านหนึ่งของห้อง ดังนั้น จึงต้องมีการกระจายของ UVGI ในพื้นที่ส่วนบนของห้องให้คล้ายคลึงกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

### 2.5.1.2 ระบบระบายอากาศเชิงกล (Mechanical Ventilation)

ภายใต้สภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการ มีอัตราการหมุนเวียนอากาศ 6 ACH ซึ่งเป็นอัตราการหมุนเวียนอากาศที่เชื้อจุลินทรีย์ถูกฆ่าหรืออินแอคทีเวตด้วยระบบ UVGI ซึ่งจะต้องมีการติดตั้งระบบระบายอากาศเชิงกลที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ภายในห้อง

### 2.5.1.3 ความชื้น (Humidity)

สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity: RH) ที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพที่เหมาะสมในห้องที่มีการติดตั้งระบบ UR UVGI จะต้องควบคุมให้ได้ไม่เกินร้อยละ 60 ซึ่ง American Institute of Architects (AIA) and the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) ได้แนะนำไว้ว่า RH ของพื้นที่ต้องดูแลผู้ป่วยและผู้ป่วย

น้อยจะอยู่ในช่วงร้อยละ 30 - 60 และประสิทธิภาพของ UR UVGI จะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ สูงกว่าร้อยละ 40 ถ้าโดยทั่วไปมีความชื้นสัมพัทธ์สูงอาจจะต้องติดตั้งระบบที่มีความเข้มรังสี UV ที่ สูงกว่าทุกๆ ไป (Riley and Permutt, 1971)

#### 2.5.1.4 อุณหภูมิ (Temperature)

ข้อเสนอแนะที่พัฒนาโดย ASHRAE (2008) และ AIA (2006) ได้กำหนดการ ออกแบบอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับผู้ป่วยที่นอนพักในโรงพยาบาลและผู้ป่วยนอก ควรอยู่ในช่วง 68 °F - 75 °F (20 °C - 24 °C) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้หลอด low pressure mercury ที่ ใช้ในระบบ UR UVGI

#### 2.5.2 การเปรียบเทียบระบบ UR UVGI กับ In-duct UVGI

Edward A. Nardell (1991) ได้เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของระบบ UR UVGI และ In-duct UVGI และสรุปเหตุผลในการเลือก UR UVGI ในการฆ่าเชื้อในอากาศด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในพื้นที่เหนือศีรษะหรือส่วนบนของห้องแทนการเลือกการฆ่าเชื้อในท่อระบายอากาศไว้ดังนี้

1) การติดต่อจากคนสู่คนของเชื้อโรคที่ลอยอยู่ในอากาศ (airborne infections) มัก พบในคนที่อยู่ในห้องเดียวกัน ไม่ใช่เกิดจากอากาศที่ถูกหมุนเวียนเข้ามาภายในอาคารจากระบบ ระบายอากาศ ในการลดความเสี่ยงต่อการติดเชื้อระหว่างห้องต้องการการแจ้งจากระบบ ระบายอากาศ ซึ่งการป้องกันด้วยการระบายอากาศก็มีข้อจำกัดในทางทฤษฎี หากต้องการให้เกิดการ ป้องกันด้วยการระบายอากาศมากๆ ก็ต้องใช้การแลกเปลี่ยนอากาศจำนวนมาก แต่ UVGI มีข้อ ได้เปรียบที่สำคัญ คือ ความสามารถในการฆ่าเชื้อในอากาศปริมาณมากเพียงครั้งเดียว UVGI สามารถป้องกันการหมุนเวียนเชื้อกลับเข้ามาภายในอาคารได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในห้องที่มีระบบ ระบายอากาศและใช้การฆ่าเชื้อด้วย UV-ควบคู่กันไปด้วย

2) ประสิทธิภาพของ UR UVGI ขึ้นอยู่การผสมอากาศที่ติภายในห้อง แต่ไม่ขึ้นกับ จำนวนการแลกเปลี่ยนอากาศภายในห้อง ซึ่งตรงข้ามกับการใช้ UV ฆ่าเชื้อในท่อระบายอากาศ ที่ ถึงแม้ว่าจะสามารถฆ่าเชื้อได้ทั้งหมด ก็มีข้อจำกัดการแจ้งเชื้อในอากาศจากความต้องการการ แลกเปลี่ยนอากาศที่เหมาะสมของคนที่อยู่ในห้อง หรือกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อด้วย UV ในท่อระบายอากาศถูกจำกัดด้วยอัตราการระบายอากาศ ในขณะที่ UR UVGI ไม่ถูกจำกัด

3) ในอาคารต่าง ๆ ในหลายสถานที่ในโลก ที่เกิดปัญหาการแพร่กระจายของโรคติดต่อ เชื้อทางอากาศ อาจจะไม่มียุทธศาสตร์ระบายอากาศส่วนกลาง เช่น อาคาร ในประเทศกำลังพัฒนาโดย เฉพาะในประเทศแถบอบอุ่น ที่พักคนเร่ร่อน

ทั้งนี้ การเลือกระบบ UR UVGI ของ Edward A. Nardell ในข้างต้นอยู่บนพื้นฐาน การเปรียบเทียบกับข้อได้เปรียบของการฆ่าเชื้อด้วย UV ในท่อระบายอากาศ ดังนี้

1) การติดตั้งทำได้ง่ายกว่า ต้องการการฉายรังสีด้วยการผ่านอากาศเข้าในท่อแห้ง เดียวหรือการหมุนอากาศผ่านในท่อหลาย ๆ ครั้ง ในขณะที่ระบบ UR UVGI ต้องมีการติดตั้งระบบ ในหลายห้อง

2) UV ในท่อระบายอากาศจะถูกติดตั้งในตำแหน่งที่มองไม่เห็นและไม่ทำให้เกิดการ สัมผัสภายในห้องที่สูงเกินไป ถึงแม้ว่าผู้ที่ทำหน้าที่ในการบำรุงรักษาอาจมีการสัมผัสในขณะที่เข้าไป ปฏิบัติงาน

3) การแปรปรวนของ UV ในท่อระบายอากาศ เกิดจากการฉายรังสีภายในหลอด การทำงานของพัดลมภายในห้อง อุปกรณ์ฆ่าเชื้อต่าง ๆ เหล่านี้มีแนวโน้มที่จะช่วยเสริมในการฆ่า เชื้อด้วยการระบายอากาศเชิงกลหรือระบบระบายอากาศตามธรรมชาติ การเพิ่มจำนวนการ แลกเปลี่ยนอากาศในห้องจะเป็นตัวจำกัดในข้อได้เปรียบนี้ ในห้องขนาดใหญ่จะลดข้อจำกัดนี้จาก การผสมอากาศและเพิ่มการแลกเปลี่ยนอากาศเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจมีการผสมอากาศไม่ดี

4) ในการลดการแพร่เชื้อโรคจากคนสู่คน UV ในระบบระบายอากาศช่วยลดการ ร้องเรียน การอุทธรณ์เนื่องจากอาคาร จากการเจริญเติบโตของโมลและสิ่งอื่น ๆ ของระบบหล่อเย็น (Menzies, D., Popa, J., Hanley, J.A., Rand, T. and Milton, D.K., 2003) ซึ่ง UR UVGI ไม่มีผลต่อ การร้องเรียนเหล่านี้

### 2.5.3 ประสิทธิภาพของระบบ UR UVGI

จากการผลศึกษาการใช้ระบบ UR UVGI ในการฆ่าหรือการอินแอคทิเวชันเชื้อ วัณโรคโดยใช้เชื้อในกลุ่ม Mycobacterium จำนวน 2 ชนิด คือ เชื้อ BCG และ *M. parafortuitum* เป็น ตัวแทน (surrogate) แทนการศึกษาในเชื้อวัณโรคชนิดก่อโรค เพื่อป้องกันผลกระทบต่อผู้ที่อยู่ใน พื้นที่ส่วนล่างของห้อง ส่วนใหญ่ศึกษาในห้องขนาด 87 m<sup>3</sup> รองลงมาขนาด 63 m<sup>3</sup> และ 46 m<sup>3</sup> ติดตั้งระบบ UR UVGI ชนิดมีบานบังแสง และใช้หลอด UV กำลังไฟ 216 W และ 108 W ในห้อง ขนาด 87 m<sup>3</sup> ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 50 พบว่าในค่าความเข้มรังสี UV ในพื้นที่ส่วนบน 42± 19 μW/cm<sup>2</sup> ในการศึกษาด้วยวิธี constant-generation (CG) model พบว่าในการศึกษาที่มีการใช้พัดลม ผสมอากาศภายในห้องทดลอง อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 0 และ 6 ACH ระบบมีประสิทธิภาพ ร้อยละ 93-98 และ ร้อยละ 83-95 ตามลำดับ (Xu P., 2001) ส่วนการศึกษาในห้องขนาด 46 m<sup>3</sup> ที่ไม่ใช้พัด ลมในการผสมอากาศภายในห้องทดลอง และใช้หลอด UV กำลังไฟ 59 W และ 36 W ความชื้น สัมพัทธ์ ร้อยละ 41-69 อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 และ 6-8 ACH ระบบมีประสิทธิภาพ ร้อยละ 64 ± 10 และ ร้อยละ 52 ± 95 ตามลำดับ (Ko et al, 2000) ซึ่งจะพบว่าประสิทธิภาพของระบบจะสูงเมื่อ กำลังไฟของหลอดสูง อัตราแลกเปลี่ยนอากาศต่ำ ๆ ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบผลการศึกษา การใช้ระบบ UR UVGI ในการฆ่าเชื้อวัณโรคโดยใช้เชื้อกลุ่ม Mycobacterium เป็นตัวแทน (Surrogate) (CDC (2005a))

Study	Mycobacterium Surrogate Of virulent <i>M. tuberculosis</i>	Fan	Method <sup>†</sup>	Upper-zone irradiance ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	UV lamps (W)	Room size ( $\text{m}^3$ )	RH (%)	Mechanical ventilation ACH	UVGI Effect	
									eACH	Effectiveness
Riley et al. [2000]	BCG	Yes <sup>‡</sup>	Decay	30 <sup>‡</sup>	46	63	20-41	0	18-33	-
Riley et al. [2000]	BCG	Yes <sup>‡</sup>	Decay	-	17	63	25	0	10	-
Ko et al. [2000]	BCG	Yes	CG	42±19 <sup>¶</sup>	216 <sup>**</sup>	87	50	0	-	90-93
Xu et al. [2000]	BCG	Yes	CG	-	59 <sup>**</sup>	46	41-69	6	11.7±7.1	64±10
Ko et al. [2000]	BCG	Yes	CG	-	36 <sup>**</sup>	46	41-69	6-8	9.8±6.4	52±19
Xu [2001]	<i>M. parafortuitum</i>	Yes	CG	42±19 <sup>¶</sup>	216 <sup>**</sup>	87	50	0	-	93-98
Xu [2001]	<i>M. parafortuitum</i>	Yes	Decay	20±8.1 <sup>¶</sup>	216 <sup>**</sup>	87	50	0	-	83-95
Xu et al. [2003]	<i>M. parafortuitum</i>	Yes	Decay	42±19 <sup>¶</sup>	216 <sup>**</sup>	87	50	0	17.5±1.8	-
Xu et al. [2003]	<i>M. parafortuitum</i>	Yes	Decay	20±8.1 <sup>¶</sup>	108 <sup>**</sup>	87	50	0	6.7±0.66	-
Xu et al. [2003]	<i>M. parafortuitum</i>	Yes	Decay	42±19 <sup>¶</sup>	216 <sup>**</sup>	87	50	0	23.1±0.78	-
Xu et al. [2003]	<i>M. parafortuitum</i>	Yes	Decay	42±8.1 <sup>¶</sup>	108 <sup>**</sup>	87	50	0	14.8±1.1	-

\* Abbreviations: ACH = air change per hour, BCG = bacillus Calmette-Guérin [*M. bovis* BCG], eACH = equivalent air change per hour (for subject microbial species), RH = relative humidity, UV = ultraviolet, UVGI = ultraviolet germicidal irradiation.

<sup>†</sup> Decay method or constant-generation (CG) method (see glossary).

<sup>‡</sup> During aerosolization only.

No upper-air UVGI measurements were taken during experiments. The figure provided is an estimate made by Nicas and Miller [1999].

<sup>¶</sup> Spherical irradiance.

<sup>\*\*</sup> UVGI fixtures with louvers.



## 2.6 ค่าความปลอดภัยในการสัมผัสรังสี UVC (Exposure Limits)

ในปี 1972 Centers for Disease Control and Prevention (CDC) และ National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) ได้จัดทำและเผยแพร่ ค่า **Recommended exposure limit (REL)** สำหรับคนที่ต้องทำงานสัมผัสกับรังสี UV ค่า REL ที่กำหนดมาขึ้นนี้เพื่อป้องกันคนทำงานเกิดอาการป่วยเฉียบพลันจากการสัมผัสกับรังสี UV แต่ข้อแนะนำนี้ไม่ครอบคลุมรวมถึงการป้องกันคนที่มีความไวต่อรังสี UV และคนที่ถูกกระตุ้นทางเคมีจากแสง ตารางที่ 2.3 แสดงค่าระยะเวลาที่ยอมให้สัมผัสรังสี UV ในระดับต่าง ๆ การสัมผัสที่สูงเกินกว่าค่า CDC/NIOSH REL นั้น จำเป็นต้องสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPE) ซึ่งประกอบด้วย แว่นตา ชุดแต่งกายที่ป้องกันรังสี UV ผ่านทะลุได้ เพื่อป้องกันตาและผิวหนังจากการสัมผัสรังสี UVC ผู้ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบรังสี UV ซ่อมบำรุง ต้องไม่ทำงานอยู่ในที่ใดที่หนึ่งตลอดการทำงานและยอมให้มีการสัมผัสกับรังสี UVC ไม่เกินค่า Threshold Limit Value® (TLV®) (8 ชั่วโมงทำงาน) ในการใช้ค่า TLV นั้น ควรอ้างอิงกับระยะเวลาที่อยู่ในบริเวณที่ได้รับ UVGI (ACGIH, 2007) ค่า CDC/NIOSH REL กำหนดเป็นค่าสำหรับการทำงานสัมผัสกับรังสี UVC (253.7 nm) เป็นเวลา 8 ชั่วโมงทุกวัน ไม่เกิน  $6 \text{ mJ/cm}^2$  ( $6,000 \text{ }\mu\text{J/cm}^2$ ) ค่า ACGIH's TLV (2007) ในช่วงรังสี UVC นี้ จะเป็นค่าเดียวกับกับค่า REL และ สามารถคำนวณค่า Permissible exposure times (PET) ที่มีระดับความรังสีแตกต่างกันดังสมการ (2-7)

$$\text{PET, s} = \frac{\text{REL of } 6000 \text{ }\mu\text{J/cm}^2 \text{ at } 254 \text{ nm}}{\text{Measured irradiance level at } 254 \text{ nm in } \mu\text{W/cm}^2} \quad (2-7)$$

ตารางที่ 2.3 ค่า Permissible Exposure Times และระดับ Irradiance ของ UVC (253.7 nm) (ACGIH, 2007)

Permissible Exposure Time*	Effective Irradiance ( $\mu\text{W/cm}^2$ )
24 h	0.07
18 h	0.09
12 h	0.14
10 h	0.17
8 h	0.2
4 h	0.4
2 h	0.8
1 h	1.7
30 min	3.3
15 min	6.7
10 min	10
5 min	100
1 min	200
30 s	200
15 s	400
5 s	1,200
1 s	6,000

ในการศึกษานี้ การเลือกใช้ค่า TLV ที่เหมาะสม พิจารณาจากผู้ที่อยู่ใต้ระบบ UR UVGI ภายในห้องแยกโรคผู้ป่วย มีอยู่กลุ่ม 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ 1) ผู้ป่วย อยู่ในห้อง 24 ชั่วโมง/วัน เป็นเวลาเฉลี่ย 2 สัปดาห์ มีค่า TLV  $0.07 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  2) ผู้เกี่ยวข้องกับการให้บริการตรวจรักษาโรค เช่น แพทย์ พยาบาล ผู้ช่วยเหลือคนไข พนักงานทำความสะอาด อยู่ในห้องสูงที่สุด 8 ชั่วโมง/วัน ทุกวัน มีค่า TLV  $0.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  3) ญาติผู้ป่วยอยู่ในห้อง 30 นาที/วัน เป็นเวลาเฉลี่ย 2 สัปดาห์ มีค่า TLV  $3.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ ค่า TLV เท่ากับ  $0.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็นค่าความปลอดภัยสำหรับกลุ่มบุคคลที่ต้องมีการสัมผัสกับรังสี UVC อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

## 2.7 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

รายละเอียดด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา สรุปได้ดังนี้ (กิริติ สุกฤษณ์, 2553)

### 2.7.1 ความหมายและหลักการ

**พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD)** คือการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลต่าง ๆ การถ่ายเทความร้อน การแพร่กระจายของอนุภาค รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยหาผลเฉลยและจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นหรืออาจกล่าวโดยสั้น ๆ ได้ว่า CFD คือวิธีการเชิงตัวเลขสำหรับการไหล พื้นฐานของ CFD คือ สมการนาเวียร์-สโตกส์ ซึ่งกล่าวถึงการไหลของของไหลหนึ่งเฟส สมการควบคุมการไหลล้วนถูกสร้างบนกฎมูลฐานของ (1) ความอนุรักษ์มวล (2) ความอนุรักษ์พลังงาน (3) ความโมเมนตัม

### 2.7.2 กระบวนการ CFD

โดยทั่วไปการสร้างสมการเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ของการไหลทำได้ไม่ยากนัก สิ่งที่ยากคือการแก้สมการหาผลเฉลย การควบคุมการไหลหรือสมการนาเวียร์-สโตกส์นั้น มีความซับซ้อนมากจนไม่สามารถแก้ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพในการคำนวณได้อย่างถูกต้องจึงนำมาช่วยแก้ไขสมการการไหล แต่ไม่สามารถนำสมการอนุพันธ์ป้อนเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อแก้ไขได้โดยตรง จึงต้องนำเทคนิคพิเศษเข้าช่วยเพื่อแปลงสิ่งที่มนุษย์เข้าใจ (อนุพันธ์คณิต) ให้เป็นสิ่งที่คอมพิวเตอร์เข้าใจ (พีชคณิต) กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า ดิสครีไทเซชัน (Discretization)

#### 2.7.2.1 ขั้นตอนของ CFD ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1) การประมวลผลก่อน (Pre-processor) ประกอบด้วยการกำหนดข้อมูลให้กับโปรแกรม ได้แก่ สร้างรูปทรงของโดเมนที่จะวิเคราะห์ สร้างกริดหรือปริมาตรควบคุมหรือเอ

ลิเมนต์ การกำหนดค่าคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความหนืด การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบ เป็นต้น

2) การประมวลผล (Processor) เป็นขั้นตอนการเลือกใช้รูปแบบดิสกรีไทเซชันเพื่อสร้างสมการดิสกรีไทส์ โดยปกติซอฟต์แวร์ CFD แต่ละแบบจะถูกพัฒนากระบวนการดิสกรีไทเซชันเพียงอันใดอันหนึ่ง ไม่ได้มีให้เลือก เช่น ซอฟต์แวร์ FLUENT, CFX, STAR-CCM+ พัฒนารูปแบบวิธีไฟไนต์โวลุ่ม ส่วน ANSYS, EasyFEM และ EOSMOS พัฒนารูปแบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขั้นตอนการประมวลผลนี้ ผู้พัฒนาหรือผู้ใช้ซอฟต์แวร์จะต้องเลือกแบบแผนการประมาณค่าเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ที่เหมาะสมให้กับการวิเคราะห์เพื่อให้การคำนวณได้ความแม่นยำและมีเสถียรภาพเหมาะสมตามที่ต้องการ

3) การประมวลผลหลัง (Post-processor) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการ CFD ที่รับค่าผลเฉลยจากขั้นตอนคำนวณมาแสดงผลในรูปแบบของกราฟิกต่าง ๆ เช่น รูปร่างของปัญหาและกริด กราฟเวกเตอร์ กราฟคอนทัวร์ กราฟพื้นผิว การเปลี่ยนตำแหน่ง เช่น การเคลื่อนตัว การหมุน เป็นต้น

#### 2.7.2.2 เมช

เมช (Mesh) คือ กริดหรือปริมาตรควบคุมหรือเอลิเมนต์ ที่สร้างขึ้นมี 2 รูปแบบ คือ แบบมีโครงสร้างแน่นอน และแบบไม่มีโครงสร้าง เมชเกิดจากจุดต่อกันเป็นโครงสร้างตาข่าย ความแม่นยำของผลเฉลยที่แก้ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง หนึ่งในปัจจัยหลักคือจำนวนจุดต่อที่ใช้ ปัญหาเดียวกันหากใช้จำนวนจุดต่อต่างกันย่อมได้ความถูกต้องของผลเฉลยที่ต่างกัน โดยทั่วไปการใช้จำนวนจุดต่อมากย่อมได้ความถูกต้องมากกว่าการใช้จำนวนจุดต่อน้อย แต่จำนวนจุดต่อที่มากย่อมใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

#### 2.7.2.3 เงื่อนไขขอบ (Boundary conditions)

การกำหนดเงื่อนไขขอบของปัญหาการไหลเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการจำลองปัญหาการไหลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป นอกจากต้องให้ความสนใจในลักษณะทางกายภาพของพฤติกรรมของการไหลนั้นแล้ว ต้องเข้าใจและทราบถึงข้อจำกัดของโปรแกรม มีชนิดของเงื่อนไขขอบทั้งสิ้น 6 ประเภท ซึ่งต้องเลือกใช้ตามความเหมาะสม ดังนี้

- 1) Inlet เป็นการกำหนดทิศทางการไหลเป็นการไหลเข้าเท่านั้น
- 2) Outlet เป็นการกำหนดทิศทางการไหลเป็นการไหลออกเท่านั้น
- 3) Opening เป็นการกำหนดให้มีการไหลผ่านพื้นผิวได้ทั้งเข้าและออก

เงื่อนไขขอบชนิดนี้ไม่เหมาะสมกับปัญหาการไหลที่มีของไหลมากกว่าหนึ่งประเภท

4) Wall เป็นการกำหนดให้ด้านนั้น ๆ เป็นผนังซึ่งหมายความว่าไม่มีของไหลไหลผ่านเข้าหรือออกผ่านพื้นผิวนี้ได้

5) Symmetry Plane ของไหลไม่สามารถไหลเข้าหรือออกผ่านทะลุพื้นผิวนี้ได้ พื้นผิวสมมาตรจะทำหน้าที่เสมือนกระจกสะท้อนค่าที่ได้จากการคำนวณ ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ หรือพฤติกรรมของการไหลภายในโดเมนที่อยู่เป็นระยะห่างเท่ากันเมื่อวัดจากพื้นผิวสมมาตรออกไปจะมีค่าเท่ากันเสมอ เงื่อนไขของประเภทนี้ใช้กับปัญหาการไหลที่มีลักษณะสมมาตร

6) Periodic Pair เป็นการถ่ายโอนข้อมูลที่คำนวณได้จากพื้นผิวหนึ่งไปสู่อีกพื้นผิวหนึ่ง เงื่อนไขขอบเขตลักษณะนี้ไม่เหมาะสมกับการจำลองปัญหาการไหลแบบหลายสถานะ

### 2.7.3 แบบจำลองแบบปั่นป่วน (Turbulence Modeling)

การไหลในทางวิศวกรรมส่วนใหญ่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ความปั่นป่วนมีผลต่อการถ่ายเทโมเมนตัม ความร้อนและมวล ในปัญหาที่มีค่า Reynolds numbers สูงๆ จำเป็นต้องใช้โมเดลความปั่นป่วนดำเนินการ และต้องเลือกโมเดลความปั่นป่วนที่เหมาะสมในการจำลองผลของความปั่นป่วนที่มีต่อการไหล (mean flow) มีการศึกษาการไหลแบบปั่นป่วน 2 วิธี คือ Average Navier-Stokes simulations (RANS) และ Large Eddy Simulation (LES) มีพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการอธิบายความปั่นป่วน คือ turbulence Reynolds number ( $Re_t$ ) และ length scale ( $L$ ) ดังสมการ (2-8) และ (2-9)

$$Re_t = \frac{\sqrt{k} L}{\nu} = \frac{u}{\nu \varepsilon} \quad (2-8)$$

$$L_t = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (2-9)$$

โดยที่

- $k$  = turbulent kinetic energy
- $\nu$  = kinetic viscosity of the fluid
- $\varepsilon$  = dissipation rate

## 2.8 การใช้ CFD ในงานฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสี UV

การจำลอง CFD ถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลของการออกแบบวิธีควบคุมการแพร่เชื้อโรค โดยเฉพาะเชื้อที่ติดต่อทางการหายใจ เมื่อเชื้อถูกหายใจออกมาและกระจายทั่วไปในอากาศ เชื้อจะมี

ความเข้มข้นและตำแหน่งจะแปรเปลี่ยนไปตามเวลา โดยส่วนใหญ่ใช้ทฤษฎีอ้างอิงในการจำลอง 2 ทฤษฎี คือ

### 2.8.1 The Eulerian Reference Theory

หลักการทฤษฎีนี้จะกระทำกับอนุภาคอย่างต่อเนื่อง โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ (conservation equations) มีความสนใจต่อตำแหน่งของอนุภาคในพื้นที่ว่างในอากาศที่มีของไหลบรรจุอยู่ภายใน ผลอันเนื่องมาจากความดันของของไหล ความเร็ว ความปั่นป่วนและตัวแปรอื่น ๆ ที่เป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งในกรณีที่ไม่อยู่ในสภาวะไม่คงที่ (unsteady state) และเวลา ด้วยสมมติฐานนี้จะไม่พิจารณาความเร็วจากความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียและอากาศเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กมาก อนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศ ทฤษฎี Eulerian มักจะพิจารณาเป็นความเข้มข้นร่วมกับการไหลอากาศ (airflow) (Alani et al., 2001; Memarzadeh and Jiang, 2000) มีการใช้วิธีตามทฤษฎี Eulerian อย่างกว้างขวางในการศึกษาการทำนายความเข้มข้นและการกระจาย (distribution) ของอนุภาคภายในห้อง (Murakami et al., 1992; Shimada et al., 1996; Holmberg and Chen, 2003; Zhao et al., 2004a) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้วิธีการจำลองควบคู่กับการทำการทดลองซึ่งบางครั้งพบ่าไม่มีความสอดคล้องกัน

### 2.8.2 The Lagrangian Reference Theory

ให้ความสำคัญกับพฤติกรรมของอนุภาคเป็นรายอนุภาค และพิจารณาวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคอยู่บนพื้นฐานของสมการการเคลื่อนที่ หรือ motion equations (Lu et al., 1996; Zhang and Chen 2004; Zhao et al., 2004b) มองอนุภาคของไหลรายอนุภาค เส้นทางการเคลื่อนที่ ความเร็วและคุณลักษณะของของไหลแต่ละอนุภาคจะถูกติดตามด้วยฟังก์ชันของเวลา ในชุดโปรแกรม CFD ส่วนใหญ่จะนำ การไหล อุณหภูมิ และ scalar fields อื่น ๆ เข้ามาคำนวณในระบบ อย่างไรก็ตามในการคำนวณปริมาณรังสี UV ต้องใช้เวลาที่อนุภาคอยู่ใน UV zone ซึ่งไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงจากระบบ Eulerian แต่ในกรณีเช่นนี้ Lagrangian สามารถคำนวณหาเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ใน UV zone ได้อย่างละเอียด เพราะฉะนั้น ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเกี่ยวกับการไหลจะดำเนินการโดยใช้ทฤษฎี Eulerian และทำการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี Lagrangian (Alani et al., 2001; Memarzadeh and Jiang, 2000) วิธีตามทฤษฎี Lagrangian นี้จะใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่และการกระจาย (dispersion) เมื่อต้องการติดตามและวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่จำนวนมาก มีประโยชน์มากในการทำนายด้านพลศาสตร์ของอนุภาคและการพัฒนาการแพร่กระจายของอนุภาค ซึ่งในบางการศึกษาที่สรุปว่าวิธีการของทฤษฎี Lagrangian จะมีความความแม่นยำในการทำนายการ dispersion และ distribution ของมลพิษมากกว่าวิธีการของทฤษฎี Eulerian (Loomans and Lemaire, 2002; Riddle et al., 2004) ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การใช้ CFD ในการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของจุลชีพใน UR-UVGI

ทฤษฎี	โปรแกรม	วิธีศึกษา	ขนาดห้อง	ACH	ผู้ศึกษา (ปี)	ปี
Lagrangian	Flovent	CFD	4.5m x 3.5m x 2.7m (42.5 m <sup>3</sup> )	11.4,14.2, 17,18.4	Noakes et al.	2001
Eulerian	CFX	Analytical+ CFD	4.26m x 3.35m x 2.26m (32 m <sup>3</sup> )	6	Noakes et al.	2004
Lagrangian	Flovent	CFD	4.6m x 2.97m x 3.05m (41.7 m <sup>3</sup> )	2-6	Memarzadeh et al.	2004
Eulerian	CFD	CFD	4.26m x 3.35m x 2.26m (32 m <sup>3</sup> )	2-6	Noakes et al.	2006
Eulerian	Star CD	CFD+ Experimental	5.4m x 6.0m x 2.7m (87.5 m <sup>3</sup> )	11	Sung et al.	2008
Eulerian	Star CD	CFD+ Experimental	5.4m x 6.0m x 2.7m (87.5 m <sup>3</sup> )	11	Sung et al.	2008
Eulerian	PHOENIC S	CFD	4.6m x 2.97m x 3.05m (41.7 m <sup>3</sup> )	2-6	Heidarinejad and Srebric	2009
Eulerian	Fluent	CFD	4.26m x 3.35m x 2.26m (32 m <sup>3</sup> )	6	Li et al.	2009

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.9.1 การศึกษาปริมาณความเข้มข้นและการกระจายเชื้อวัณโรคในอากาศ

Pei-Shih Chen & Chih-Shan Li (2005) ศึกษาวิธีวัดปริมาณเชื้อวัณโรคในอากาศภายในห้องพักผู้ป่วยด้วยวิธี Real-Time qPCR ร่วมกับ Air-Sampling Filter Method ในผู้ป่วย 6 ราย ที่มีผลการตรวจพบเชื้อ +1 ถึง +3 โดยวัดในห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อมีภาวะมาตรฐานตามข้อแนะนำ อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ ACH > 8–12 ACH ที่ pressure difference > 8 pa เก็บตัวอย่างด้วยกระดาษกรองชนิด track-etched polycarbonate ขนาด 37 mm ขนาดรูพรุน (pores size 0.4 μm) อัตราการไหลอากาศ 22 L/min ที่ระดับความสูงจากพื้น 1.2–1.5 m ระยะการหายใจของผู้ป่วย (Breathing Zone) จำนวน 22 ตัวอย่าง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง วิเคราะห์ด้วย DNA Extraction Method ผลการศึกษา พบปริมาณเชื้อวัณโรค  $1.43 \times 10^3$  copies/m<sup>3</sup> ถึง  $2.06 \times 10^5$  copies/m<sup>3</sup> หรือเท่ากับ  $1.26 \times 10^3$  tubercle bacilli/m<sup>3</sup> ถึง  $8.14 \times 10^3$  cfu/m<sup>3</sup> และในการศึกษานี้พบความสัมพันธ์ปานกลางระหว่างปริมาณเชื้อในเสมหะผู้ป่วยและปริมาณเชื้อในอากาศ ( $r = 0.57$ )

Fenelly et al. (2004) ได้ศึกษาขนาดอนุภาคเชื้อวัณโรค โดยเก็บตัวอย่างอากาศจากการไอโดยใช้ two Andersen six-stage impactors for 5 minutes ในช่วงก่อนอาหารเช้า ในผู้ป่วยวัณโรค จำนวน 33 คน จาก 45 คน พบว่า ในสเปกที่ 5 (309 cfu หรือ 49%) ขนาดอนุภาค 1.1 μm ใน

สเตจที่ 4 และ 6 (572 cfu หรือ 90%) มีขนาด 0.65 - 3.3  $\mu\text{m}$  จำนวนเชื้อ TB มี ค่า A time-weighted average ที่ผู้ป่วยไอ 18 ถึง 3,798 อนุภาค /ชั่วโมง และมีอัตราการไอในระยะเวลา 5 นาที มีค่ามัธยฐาน 54 ครั้ง ค่าเฉลี่ย 76.5 ครั้ง (interquartile range, 32–113) ส่วนการหาปริมาณเชื้อเฉลี่ยในอากาศที่ทำให้คนที่มีความไวต่อโรคไม่สามารถหาได้เนื่องจากไม่สามารถเพาะเลี้ยงเชื้อจากตัวอย่างอากาศในห้องได้

## 2.9.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ UR UVGI

### 2.9.2.1 อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ (Air change rate)

Beggs และ Sleigh (2002) การศึกษานี้ได้เสนอรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า parametric study ที่ใช้ในการศึกษาในเชิงทฤษฎี สามารถใช้ในการออกแบบคุณลักษณะ และการประเมินประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรค ของระบบ UR UVGI ได้ การศึกษาทางทฤษฎีได้ชี้ให้เห็นว่าระบบ UR UVGI สามารถทำงานได้ดีที่อัตราการระบายอากาศต่ำ และประสิทธิภาพลดลงเมื่อมีการติดตั้งระบบระบายอากาศไว้ระดับสูง ในการศึกษาได้ทดสอบหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่าง inter-zonal air velocity และอัตราการระบายอากาศภายในห้อง ซึ่งชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ภายใต้สภาวะคงที่ จำนวนจุลชีพที่ผ่านเข้าไปในพื้นที่ในระบบ UR UVGI ในรูปอนุภาคของละอองลอยชีวภาพไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราการระบายอากาศ ประสิทธิภาพของระบบ UR UVGI อยู่ระหว่าง ร้อยละ 9.5 ถึง 92.2 ขึ้นอยู่กับกำลังวัตต์ของหลอด UV และอัตราการระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเกิดขึ้นภายใต้สภาวะอัตราการระบายอากาศต่ำ เช่น หลอด UV ขนาด 30 W มีประสิทธิภาพ ร้อยละ 30 ที่อัตราการระบายอากาศ 2 ACH และลดลงเหลือ ร้อยละ 23.3 เมื่ออัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 16 ACH และการเพิ่มกำลังวัตต์ของหลอดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขึ้นเพียงเล็กน้อย เช่น หลอด UV ขนาด 30 W ที่อัตราการระบายอากาศ 2 ACH ประสิทธิภาพเท่ากับ ร้อยละ 79.9 และเมื่อเพิ่มกำลังหลอด UV เป็น 115 W (เพิ่มขึ้น 3.2 เท่า) กลับพบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียง ร้อยละ 12.3 เท่านั้น

Noakes et al. (2004) ศึกษาผลของการผสมอากาศที่มีต่อระบบ UR UVGI โดยใช้ two-zone ventilation model กำหนดพื้นที่ส่วนบนของห้องเป็นตัวแทน UVGI field และพื้นที่ส่วนล่างใช้เป็นตัวแทนเขตพื้นที่ที่มีคนอยู่ โดยในการทดสอบได้จำลองการระบายอากาศ 4 ลักษณะ มีการติดตั้งท่อจ่ายอากาศและท่อดูดอากาศไว้บนผนังที่อยู่ฝั่งตรงกันข้ามกันในระดับใกล้กับเพดานหรือใกล้กับพื้น พบว่า ในการจำลองนี้เมื่อท่อจ่ายอากาศและท่อระบายอากาศถูกติดตั้งอยู่ในพื้นที่ส่วนบนของห้องจะทำให้เกิดการผสมอากาศที่ไม่ดีมากที่สุด แต่เมื่อติดตั้งท่อระบายอากาศและท่อดูดอากาศไว้ใกล้กับพื้นกลับพบว่าเกิดการผสมอากาศที่ดีที่สุด ส่วนการจำลองอีก 2 ลักษณะ

(การจ่ายอากาศในพื้นที่ส่วนบนและการดูดอากาศในพื้นที่ส่วนล่าง และการจ่ายอากาศในพื้นที่ส่วนล่างและการดูดอากาศในพื้นที่ส่วนบน) และให้มีการผสมอากาศอย่างดีคล้ายในการจำลองติดตั้งท่อดูดอากาศและท่อระบายอากาศในพื้นที่ส่วนล่าง ในการศึกษาไม่ได้พิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่จ่ายเข้ามาและอากาศที่มีอยู่เดิมภายในห้อง

Xu and Miller (1999) ได้ศึกษาการผสมอากาศโดยใช้ SF<sub>6</sub> ใน He เป็นก๊าซติดตาม (tracer gas) ปล่อยเข้าสู่พื้นที่ส่วนล่างของห้องที่จำลองเป็นห้องรักษาพยาบาลผู้ป่วย ผลการทดลอง พบว่าการระบายอากาศเชิงกล ที่ 0, 3 หรือ 6 ACH ในสถานะที่เปิดหรือปิดพัดลมผสมอากาศและมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของอากาศที่จ่ายเข้าสู่ห้อง (ติดตั้งท่อจ่ายอากาศ 2 ชุด ที่เพดานด้านหนึ่งและท่อดูดอากาศ 2 ชุด ที่เพดานด้านตรงกันข้าม) มีผลการผสมอากาศระหว่างพื้นที่ส่วนบนและส่วนล่างของห้องเกิดขึ้นเป็นอย่างดีในทุกสภาวะยกเว้นในการทดลองสภาวะฤดูหนาวที่มีการจ่ายอากาศที่อุ่นกว่า (32 °C) อากาศภายในห้อง (21 °C) และไม่มีการเปิดพัดลมผสมอากาศภายใต้สภาวะเช่นนี้ พบความเข้มข้นของก๊าซติดตามในพื้นที่ส่วนล่างสูงกว่าพื้นที่ส่วนบนประมาณ 20 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการผสมอากาศที่ไม่ดี การศึกษาได้แนะนำว่าถ้ามีการติดตั้งทั้งท่อจ่ายอากาศและท่อดูดอากาศที่เพดานห้อง อาจเกิดสภาวะการผสมที่ไม่สมบูรณ์หรือไม่ดีขึ้นได้ในสภาวะอากาศเช่นเดียวกับในฤดูหนาว การลอยตัวของอากาศที่อุ่นกว่าอากาศที่จ่ายเข้าไปภายในห้อง เป็นสาเหตุทำให้เกิด short circuit ระหว่างอากาศจากท่อจ่ายอากาศและท่อดูดอากาศ (Miller et al. 2002) จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักถึงระบบการกระจายอากาศที่แตกต่างกันภายในห้อง โดยทั่วไปความเร็วของอากาศที่ถูกจ่ายออกจากท่อจ่ายอากาศจะสูงกว่าในพื้นที่ที่คนอยู่ เมื่อมีการเลือกชนิดตัวจ่ายอากาศในระบบ ผู้ใช้งานจะต้องพิจารณาถึงการลดระยะทางในแนวตั้งและในแนวนอนของกระแสการไหลอากาศของตัวจ่ายอากาศ และจะมีผลต่อการผสมอากาศภายในห้องในแนวตั้งอย่างไร นอกจากนี้ ในผลการศึกษาอีกจำนวนหนึ่งที่ศึกษาถึงตำแหน่งการตั้งเครื่องดูดอากาศ ก็พบว่า ตำแหน่งติดตั้งใกล้พื้นมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของอนุภาคได้มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบระบายอากาศรูปแบบอื่น เช่น ติดที่เพดาน ผนังห้อง (Zhang Z, Chen Q., 2006; Khan JA et al., 2006)

### 2.9.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

มีการศึกษาจำนวนมากที่ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ และ ผลของ UVGI ต่อเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศ ในจำนวนนี้เพียงมี 2 การศึกษา (Rentschler and Nagy, 1942; Rentschler et al. 1941) ที่สรุปว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลแต่อย่างใดต่อความสามารถของระบบ UVGI ในการฆ่าหรือทำให้เชื้อ *Esherichia coli* ไม่ก่อโรค แต่ในการศึกษาส่วนใหญ่ (Gates, 1929a; Ko et al., 2000; Luckiesh and Holladay, 1942; Miller et al. 2002; Peccia, 2000; Riley and



Kaufman, 1972; Wells 1942, 1955; Wells and Wells 1936) ได้ชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของ UVGI จะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ในการศึกษาของ Peccia and Hernandez (2001) และ Xu (2001) ได้พบว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ความสามารถของแบคทีเรียในการซ่อมแซมความเสียหายของ DNA ด้วยกระบวนการ Photochemical reaction (PR) ก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งเกิดขึ้นตรงกันข้ามกันผลการศึกษาในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ๆ ที่แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของ UVGI ลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในระดับต่ำ ๆ เช่น ร้อยละ 25 เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของ UVGI ที่ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 50 โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าปริมาณ UVGI ต่ำมาก ๆ เช่น  $1 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$

Miller et al. (2002) ได้ศึกษาโดยการจำลองห้องรักษาพยาบาลในสภาวะที่มีการผสมอากาศอย่างดี ที่อัตราการระบายอากาศ 6 ACH มีการปรับเปลี่ยนความชื้นสัมพัทธ์จากร้อยละ 25 ถึง 100 และทดสอบประสิทธิภาพของระบบ UVGI (216 W) ในการฆ่าหรือยับยั้งการก่อโรคของ *M. parafortuitum*. โดยเปรียบเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 75 และร้อยละ 100 ประสิทธิภาพของระบบลดลงประมาณร้อยละ 40 เท่ากัน และที่ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 25 ลดลงประมาณร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ ร้อยละ 50 ส่วน Wells and Wells (1936) ได้รายงานผลการศึกษาที่สอดคล้องกัน โดยปฏิเสธความสามารถในการฆ่าหรือทำให้ไม่ก่อโรคของเชื้อ *E. coli* ในอากาศที่อยู่ในห้องเล็ก ๆ เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จากร้อยละ 55 ถึง ร้อยละ 65

Riley and Kaufman (1972) ศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณการฉายรังสีต่อ *S. marcescens* ในอากาศ โดยใช้ bench-scale apparatus ด้วยการทดลองให้เชื้อจุลินทรีย์สัมผัสกับ UVGI จากหลอด UVGI ในปริมาณต่าง ๆ ตั้งแต่  $0.75 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  ถึง  $96 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันตั้งแต่ ร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 90 โดยให้เชื้อจุลินทรีย์ผ่านเข้าไปในหลอดแก้วเปล่าที่วางคู่ขนานกัน ผลการศึกษานี้ได้ปฏิเสธความสามารถในการยับยั้งการก่อโรคของ *S. marcescens* ที่ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 60 ถึงร้อยละ 70 และที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า ร้อยละ 80 จะทำให้เชื้อแบคทีเรียสามารถกลับมาก่อให้เกิดโรคได้

Ko et al. (2000) ได้ใช้ห้องในการทดลองประเมินผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อ UVGI โดยทดลองกับเชื้อ *M. bovis* (BCG) และ *S. marcescens* ที่อยู่ในละอองลอย ในการศึกษา นี้เชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดจะได้รับ UVGI ในปริมาณตั้งแต่  $57 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  ถึง  $829 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 3 ระดับ คือ ร้อยละ 30, 60 และ 90 ผลการศึกษพบว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นจะมีผลไปลดความไวของเชื้อจุลินทรีย์ต่อการถูกฆ่าหรืออินแอคทิเวชันด้วย UVGI และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า ร้อยละ 85 จะพบความทนทานต่อการถูกอินแอคทิเวชันด้วย UVGI ของทั้ง

เชื้อ *S. marcescens* และ *M. bovis* BCG ค่า Z-values ลดลงประมาณ ร้อยละ 50 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ ประมาณ 85% เมื่อเปรียบเทียบกับที่ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 60

Peccia et al. (2001) ได้ศึกษาผลของของเหลวโดยใช้ bench-scale reactor (0.8 m<sup>3</sup>) ในการทดสอบความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ต่อ *M. parafortuitum*, *S. marcescens*, และ *B. subtilis* ในรูป endospores และ vegetative cells ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 20 กับ ร้อยละ 95 พบว่า ค่า Z-values ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการฆ่าหรือการ อินแอคทีเวชันของเชื้อแบคทีเรียของระบบ UVGI ลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ค่า Z-value สูงที่สุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ใกล้เคียง ร้อยละ 50 และมีค่าต่ำที่สุดเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 95 ซึ่ง พบในการทดลองกับเชื้อทั้ง 3 ชนิดดังกล่าว และเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงเกินกว่าช่วงนี้ ค่า Z-value ของ *S. marcescens*, *B. subtilis* และ *M. parafortuitum* มีค่าลดลง โดยมีค่าแฟกเตอร์เท่ากับ 6.5, 1.5 และ 3.2 ตามลำดับ

### 2.9.2.3 อุณหภูมิ (Temperature)

ระดับอุณหภูมิสูงหรือต่ำภายในห้องที่ติดตั้งระบบ UR UVGI จะมีผลต่อ ประสิทธิภาพของระบบประการแรก อุณหภูมิสูงหรือต่ำอาจไปลด UVGI ที่ออกมาจากหลอด UV ชนิด low-pressure mercury lamps หรือเพิ่มความไวต่อ UVGI ของเชื้อจุลินทรีย์ ประการที่สอง ความ เก้าของกลไกหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของบาลลาสต์ (แต่ยังคงใช้งานได้ตามปกติ) อาจได้รับผล จากอุณหภูมิสูงหรือต่ำ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำงานของหลอดและ UVGI ที่ออกมา จากหลอด low-pressure mercury lamps ประสิทธิภาพของ UV ของหลอดมีความสัมพันธ์โดยตรง กับความดันปรอทอิ่มตัว (saturated mercury pressure) ที่ขึ้นกับจุดต่ำสุดของอุณหภูมิของหลอด (Philips, 2006) จุดติดตั้งที่จะทำให้หลอด UVGI จะทำงานได้ดีที่สุดนั้นขึ้นกับอุณหภูมิและการไหล ของอากาศ (Rea MS, ed., 2000) รังสี UV จากหลอดที่อยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่า อุณหภูมิการใช้งานมาตรฐานของหลอดอาจมีผลไปลดประสิทธิภาพของหลอดลงได้ (Van Osdell and Foarde, 2002) หลอดจะผลิตรังสี UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm ในอากาศที่มีอุณหภูมิกว่า 20 °C (68 °F) ที่อุณหภูมิ 10 °C (50 °F) จะให้รังสีที่ความยาวคลื่นลดลง 88% ของค่าสูงสุด (Philips, 1992) นอกจากนี้ ASHRAE (2007) และ AIA (2006) ได้ออกข้อแนะนำในการออกแบบ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับผู้ป่วยที่นอนพักในโรงพยาบาลและผู้ป่วยนอก ควรอยู่ในช่วง 68 °F - 75 °F (20 °C to 24 °C) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้หลอด low-pressure mercury ที่ใช้ใน ระบบ UR UVGI

Westinghouse (1982) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการปลดปล่อยรังสีของ หลอด UV โดยพบว่า รังสีจากหลอด UV ลดลงเมื่ออุณหภูมิห้องสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิที่ได้

ออกแบบเอาไว้ในการทดลอง จากผลการศึกษา ได้กำหนดอุณหภูมิห้องสำหรับหลอด UV ที่ออกแบบในการทดลอง คือ 27 °C (80 °F) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีก 5 °C (40 °F) จะมีผลไปลดรังสี UV ลง 1 ใน 3 การลดของรังสี UV นี้ จะเกิดขึ้นมากกว่าถ้ามีอากาศไหลผ่านหลอด UV เกิดขึ้น เนื่องจากไอปรอทในหลอด UV มีการสูญเสียความร้อนอย่างรวดเร็ว (First et al., 1999a) นอกจากนี้ Sylvania (1981) และ Philips (2006) ก็ได้ตั้งข้อสังเกตว่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจะลดอายุการใช้งานของหลอด UV ส่วน Gates (1929b) และ Rentschler et al. (1941) ได้สรุปผลการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อจุลชีพบนอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยทั้ง 2 การศึกษาชี้ว่าเชื้อแบคทีเรียที่สัมผัสกับอุณหภูมิ ระหว่าง 5 °C ถึง 37 °C ไม่ได้รับผลจาก UVGI ส่วน Ko et al. (2002) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิจาก 4 °C ถึง 25 °C กับ *S. marcescens* และ *M. bovis* BCG ในละอองของเหลวภายในห้องและพบประสิทธิภาพของระบบ UVGI ลดลง 2 ถึง 3 ส่วนเมื่ออุณหภูมิลดลง ซึ่งในห้องทดลองประกอบด้วยหลอด UV ที่ได้รับอุณหภูมิจากนอกห้องเมื่อมีการทดลองแต่ละครั้ง พบว่า อุณหภูมิต่ำ ๆ เช่น ที่ 4 °C อาจเป็นสาเหตุการลดของ UVGI ที่ออกมาจากหลอด UV (Philips, 2006) ประสิทธิภาพของระบบ UR UVGI ที่ลดลงอาจจะเนื่องมาจากเชื้อจุลชีพมีความไวต่อ UV ลดลงที่อุณหภูมิต่ำ ๆ หรือเกิดจากการมีรังสี UV ออกมาต่ำร่วมกับเชื้อจุลชีพมีความไวต่อ UV ลดลง (Ko et al. 2002)

#### 2.9.2.4 ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UV ของจุลชีพ

Beggs, Noakes, Sleigh, Fletcher, & Kerr, (2006) ศึกษาเพื่อหาค่าคงที่ความไวต่อรังสี UV (UV susceptibility constant;  $Z_{eff}$ ) ต่อเชื้อ *Serratia marcescens* ของระบบ UR UVGI โดยศึกษาในสถานะที่มีการผสมอากาศแบบสมบูรณ์โดยใช้ complete mixing model และในสถานะการผสมอากาศแบบไม่สมบูรณ์ โดยใช้ two zone steady-state continuous contamination models ทำการทดลองในห้องทดสอบที่มีปริมาตร 32.25 m<sup>3</sup> เพดานห้องสูง 2.27 m ติดตั้งช่องระบายอากาศเข้าที่ระดับต่ำ และพัดลมดูดอากาศที่ระดับสูง ศึกษาที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 และ 9 ACH ติดตั้งระบบ UVGI ที่ผนังห้องมี UV zone สูง 0.5 m และคำนวณสัดส่วนการรอดชีวิตของเชื้อจุลชีพ โดยคิดจากพื้นที่ทั้งห้อง ส่วน two-zone model ใช้สัดส่วน  $C_{UV}/C_1$  ซึ่งเก็บตัวอย่างใกล้กับช่องดูดอากาศออกในพื้นที่ส่วนบนของห้อง และคำนวณหาค่า  $Z_{eff}$  ซึ่งไม่ได้นำค่า  $\beta$  (mixing factor) มาคิดผลการทดลองพบว่า ค่า  $Z_{eff}$  ที่ได้จากทั้ง 2 โมเดลมีค่าเท่ากับ 0.0469 (0.018–0.106) m<sup>2</sup>/J ที่ 6 ACH และ 0.0433 (0.032–0.057) m<sup>2</sup>/J ที่ 9 ACH ตามลำดับ ในการคำนวณคือ  $Z_{eff}$  ใช้  $\beta$  เท่ากับ 3.6 มีสัดส่วนการรอดชีวิตใน lower zone ( $C_{2UV}/C_2$ ) ประมาณ 0.665 ที่ 6 ACH และ 0.754 ที่ 9ACH ซึ่งจะพบว่ามีค่าขึ้นกับ mixing factor โดยในการศึกษาที่ผ่านมาของ Noakes, Beggs, & Sleigh (2004b) ค่า  $\beta$  อยู่ในช่วง  $3 < \beta < 10$  จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ช่วยอธิบายการคำนวณได้ค่าที่ต่ำกว่าค่าคาดการณ์

ใน fully mixed model จากการศึกษาที่สรุปได้ว่า ที่สภาวะเดียวกันแต่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศต่างกัน ค่า  $Z_{eff}$  ที่จะมีค่าเท่า ๆ กัน โดยค่าจาก single pass จะมีค่าสูงกว่า

### 2.9.3 การศึกษาการใช้ CFD ในงานฆ่าเชื้อในระบบ UR UVGI

M.P.Wan et al. (2007) ได้ใช้ The Eulerian-Lagrangian multiphased model ศึกษาการแพร่กระจายของอนุภาคเชื้อโรคในอากาศ ด้วยการจำลองด้วย CFD เปรียบเทียบกับการทดลองในห้องผู้ป่วยที่มีการติดตั้งระบบระบายอากาศเชิงกลผสมอากาศที่เพดานห้อง โดยในการศึกษานี้ได้ใช้สมการในการอธิบายเฟสของละอองชีวภาพ (bioaerosole) ที่มี 2 เฟส คือ Carrier phase (air) และ Discrete phase (droplets and droplet nuclei) ใน Carrier phase (air) จำลองเพื่อหา Eulerian mass, momentum และ energy conservation equation ใช้  $k-\epsilon$  turbulence model โดยสมมติให้ turbulence model นี้เป็นเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (Fully turbulence) และมีลักษณะ Isotropic ทั้งห้อง ส่วนการเคลื่อนที่ในเฟสของไอน้ำ ใช้สมการ the species convection-diffusion equation และใช้ The Lagrangian force balance equation ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของ droplet จากการศึกษาส่วนการทดลองในห้องผู้ป่วยได้ฉีดตัวอย่างน้ำที่มีส่วนที่ไม่ระเหยอยู่ภายในให้เป็น droplet ซึ่งทั้งในการทดลองและการจำลอง ด้วย CFD จะทำการฉีด droplet ที่มีขนาด (ค่า peak  $12 \mu\text{m}$ ) ที่ใกล้เคียงกับการไอของคน ด้วยอัตรา  $0.4 \text{ L/s}$  เท่ากัน ตรวจวัดการกระจายของ droplet ด้วยวิธี interferometric Mie imaging ร่วมกับการตรวจวัด aerosol spectrometer

Sung และ Kate (2010) ได้ศึกษาวิธีการคำนวณปริมาณรังสี UVC ของระบบ UR UVGI ที่ช่วงความยาวคลื่น  $254 \text{ nm}$  โดยอาศัยหลักการด้านประสิทธิภาพของการระบายอากาศ ทำการจำลองเพื่อประมาณผลการฆ่าเชื้อของระบบด้วยโปรแกรม CFD และใช้สมการในการคำนวณ killing rate (KR) ดังนี้

$$KR = (1 - e^{-kt}) \times 100$$

โดยที่  $k = \text{UV rate constant (m}^2/\text{J)}$

$I = \text{UV irradiance (W/m}^2\text{)}, t = \text{exposure time (s)}$

จากการรู้ค่า UV rate constant ( $k$ ) จึงสามารถประมาณค่า killing rate (KR) จากค่า UV dose ซึ่งเป็นผลคูณของ UV irradiance ( $I$ ) ที่ได้จากการตรวจวัดในการทดลองจริงกับ exposure time ( $t$ ) ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD ซึ่งทั้งสองค่าเป็นค่าที่สำคัญของการประเมินผลการฆ่าเชื้อโรคของระบบ UVGI ที่มีปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพล ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ในการศึกษาได้เปรียบเทียบปริมาณรังสี UV ที่คำนวณจากหลักการ local purging flow rate (L-PFR) ซึ่งพิจารณาเฉพาะความเข้มข้นของรังสี UV เสมือนเป็นมวลของอากาศ (air mass) ที่

มีระยะเวลาการเคลื่อนที่เท่ากัน กับปริมาณรังสี UV ที่คำนวณจากหลักการกระจายของรังสี UV ซึ่งพิจารณาระยะทางและทิศทางที่ทำกับระบบ UVGI รวมด้วย ดังนั้น ในการจำลอง CFD จึงมองความเข้มรังสี UV เป็น passive scalar flux ของจุดชีพที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับการไหลของอากาศ ทำการทดลองในห้องพักผู้ป่วยใน ขนาดห้อง  $4 \times 5 \times 2.7 \text{ m}^3$  จำนวน 2 ห้องที่มีลักษณะสมมาตรกันติดตั้งท่อจ่ายอากาศและดูดอากาศในตำแหน่งที่กำหนดแตกต่างกัน มีอัตราการระบายอากาศ 11 ACH ใช้ชุดหลอด UVC ชนิด low-pressure mercury lamps มีบานบังแสงในแนวนอน ติดตั้งกับผนัง จำนวน 2 ชุด โดยตรวจวัดค่าความเข้มรังสี UV ในพื้นที่ของ UR UVGI จำนวน 300 จุด ตามระยะห่างและมุมในแนวตั้งภายในห้องด้วยวิธี actinometry ในสภาพ black light มีอุณหภูมิภายในห้อง  $24^\circ\text{C} - 26^\circ\text{C}$  และในพื้นที่ UR UVGI มีอุณหภูมิประมาณ  $40^\circ\text{C}$  ผลการศึกษาปริมาณรังสี UV ที่คำนวณจากหลักการการกระจายรังสี UV ถึง ร้อยละ 8 – 109 ในขณะที่ปริมาณรังสี UV จากหลักการการกระจายรังสี UV มีค่าแตกต่างกันในช่วง  $2.04 - 3.90 \text{ J/m}^2$  จากปริมาณรังสี UV ดังกล่าว สามารถคำนวณค่าอัตราการฆ่าเชื้อวัณโรควัณโรค ( $k = 0.4721 \text{ m}^2/\text{J}$ ) มีค่าอยู่ในช่วง ร้อยละ 62 – 85 นอกจากนี้ การติดตั้งระบบ UR UVGI ที่เหมาะสมควรห่างจากช่องดูดอากาศออกและการเพิ่มจำนวนช่องดูดอากาศมากขึ้น โดยมีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเท่าเดิมจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

Lai, Wang and Chen (2008) ได้ศึกษาการกระจายของอนุภาคและการได้รับสัมผัสอนุภาคของคนระหว่ง 2 พื้นที่ในเชิงเรขาคณิต โดยใช้แบบจำลองสมดุลมวลที่มีการผสมอย่างดี (well-mixed mass balance model) และใช้ Eulerian-type drift-flux model เพื่ออธิบายผลของแรงโน้มถ่วงและการกระจายของอนุภาคที่มีต่อความเร็ว ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการทดลองในห้องขนาดเล็กที่สร้างขึ้น ตรวจวัดคุณลักษณะการไหลอากาศ และความเข้มข้นของอนุภาค โดยใช้ phase Doppler Anemometer ใช้ Numerical drift-flux model โดยใช้ CFD code FLUENT จำลองการไหลของอากาศในพื้นที่ปิดและใช้ PISO algorithm ในการสร้างความดันและความเร็วในห้อง ภายในอาคารมีสัดส่วนของอนุภาคต่ำจึงไม่มีการเคลื่อนที่แบบ Turbulence จึงใช้ RNG k- $\epsilon$  model ในการจำลองการไหลอากาศแบบ Turbulence ใน 3 มิติ แล้วและดัดแปลงเป็น drift-flux model การวิเคราะห์แบบจำลองการกระจายของอนุภาคใน 2 โชนจากแบบจำลอง multi-zone mass transport models เช่น CONTAM (Dols and Walton, 2000) ซึ่งใช้ทำนายอัตราการไหลอากาศและความเข้มข้นภายในพื้นที่ คิดบนพื้นฐานว่ามวลไม่เปลี่ยนแปลงในแต่ละพื้นที่และสารมลพิษในแต่ละพื้นที่ที่มีการผสมอย่างดี การศึกษานี้ไม่ได้ดัดแปลงแบบจำลอง ได้ใช้วิธีการคำนวณความเข้มข้นโดยใช้สมการ material-balance โดยอนุภาค

ถูกผสมอย่างดีในพื้นที่แรกและเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดเข้ามาในพื้นที่ที่ 2 ที่อยู่ติดกัน ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้วิธี the computational two-zone geometry ของ IAQ ซึ่งมีการพิสูจน์โดย Chang et al. (2006) และ Zhao et al. (2004) สร้างห้องทดลองขนาด  $0.4 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$  มีแผงกันที่มีช่องเปิดขนาด  $0.08 \text{ m} \times 0.24 \text{ m}$  อยู่ตรงกลางห้องมี inlet และ outlet ขนาด  $0.04 \times 0.04 \text{ m}$  อยู่ต่ำกว่าเพดานห้องในพื้นที่ 1 และอยู่เหนือพื้นในพื้นที่ 2 ระยะ  $2 \text{ cm}$  เท่ากัน ใช้ความเร็วขาเข้า  $0.225$  และ  $0.45 \text{ m/s}$  ที่ความเร็ว  $0.225 \text{ m/s}$  ใช้อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเท่ากับ  $10 \text{ ACH}$  ซึ่ง Reynolds number (Re) มีค่า  $600$  ตรวจวัดคุณลักษณะการไหลอากาศและความเข้มข้นของอนุภาคด้วย phase Doppler Anemometer (Dantec, Denmark) ใช้ ultrasonic nebulizer (EU-12, Omron, Japan) สร้างหยดน้ำมันมะกอกเพื่อตรวจวัดความเร็วของอนุภาค โดยเปิดพัดลมและเครื่องทำให้เกิดการกระจายเป็นเวลา  $15$  นาทีให้เกิดการผสมอย่างเต็มที่และที่สภาวะคงที่ การวัดความเข้มข้นของอนุภาคจะใช้อนุภาคของแข็งทำจากแก้วใสเคลือบด้วยเงินขนาด  $10 \mu\text{m}$  นิดด้วยเครื่องฉีดและใช้ PDA ตรวจวัดขนาดและความเร็วอนุภาคจากการกระจายแสง ความเข้มข้น PDA ไม่สามารถวัดได้โดยตรงจึงประเมินด้วยวิธี the transit-time-based algorithm ตามวิธีซึ่งอธิบายโดย Hardalupas and Taylor (1989) จุดตรวจวัด (เทียบกับระดับหายใจ  $1.625 \text{ m}$ ) คือ  $x = 0.2, y = 0.2, z = 0.26$  และ  $x = 0.6, y = 0.2, z = 0.26$  ในพื้นที่ 1 และพื้นที่ 2 ตามลำดับ

ผลการศึกษา พบว่า ความเข้มข้นในพื้นที่ 1 ลดลงแบบ exponential โดยแบบจำลองแบบผสมอากาศอย่างดี ได้ทำนายผลการลดลงของอนุภาคที่ช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบ drift-flux model ด้วยกระบวนการนำ การลดลงของอนุภาคเกิดจากอัตราการผสมในแนวตั้งที่ต่ำ ในพื้นที่ 2 ความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นถึงระดับสูงสุดและเริ่มลดลง ระยะเวลาที่ความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นถึงระดับสูงสุด มีค่า  $60-180$  วินาที และ  $180-240$  วินาที ในแบบจำลองแบบผสมอย่างดี และแบบจำลองแบบ drift-flux model ตามลำดับ และระดับความเข้มข้นที่ทำนายโดยแบบจำลองแบบ drift-flux model จะมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองแบบผสมอย่างดี ที่  $60$  วินาที ในพื้นที่ 2 ความเข้มข้นของอนุภาคระดับต่ำมากกว่าระดับสูงเนื่องจากมีความเร็วในแนวตั้งต่ำ ดังนั้น ที่เวลานี้ในระดับสูงของพื้นที่ 2 จึงมีความเข้มข้นเกือบเป็น 0 และที่เวลา  $300$  วินาทีอนุภาคขนาด  $0.1 \mu\text{m}$  จะพบว่า ความเข้มข้นสม่ำเสมอทั้งในระดับสูงระดับต่ำ และความเข้มข้นของอนุภาคขนาดใหญ่จะต่ำกว่าความเข้มข้นของอนุภาคขนาดเล็กเนื่องจากการตกด้วยแรงโน้มถ่วง โดยอนุภาคขนาด  $10 \mu\text{m}$  จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป และที่ เวลา  $180$  วินาที มีความเข้มข้นเข้าใกล้ 0 โดยสรุปแบบจำลองแบบผสมอย่างดีจะให้ผลการคาดการณ์ค่าความเข้มข้นในระดับหายใจต่ำเกินไปในพื้นที่ 1 และสูงเกินไป ในพื้นที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีเวลาต่างกัน  $0-120$  วินาที Klepeis (1999) ได้แนะนำให้ใช้ความเข้มข้นค่าเดียวเป็นตัวแทนของพื้นที่ทั้งหมด และแบบจำลองแบบผสมอากาศ

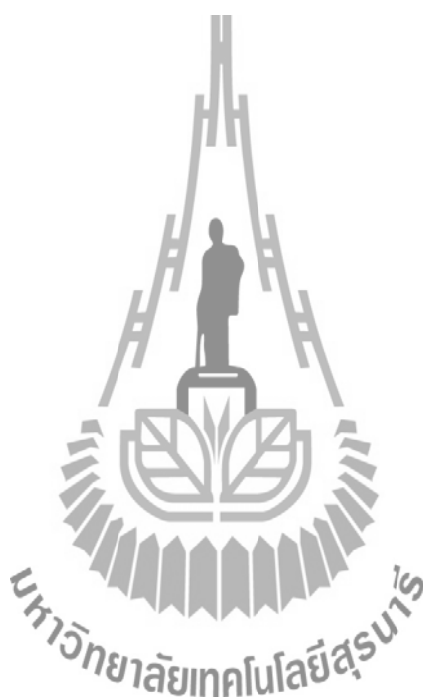
อย่างดีควรมีการผสมตลอดเวลา ให้มีระยะเวลาในการสัมผัสที่นานกว่าเวลาในการปล่อยอนุภาค การคำนวณทางคณิตศาสตร์และการทดลองที่ใช้ในการสาธิตแบบจำลองแบบ drift-flux model สามารถใช้อธิบายการตกจากแรงโน้มถ่วงและการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เป็นละอองลอยในหลายพื้นที่ของห้องที่มีการระบายอากาศ ในสถานะที่การระบายอากาศเดียวกันการกระจายของอนุภาคใน 2 พื้นที่ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แรงโน้มถ่วงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการตกของอนุภาค โดยอนุภาคขนาดใหญ่กว่าตกเร็วกว่าอนุภาคขนาดเล็กกว่าอย่างมีนัยสำคัญ แบบจำลองแบบ drift-flux model ได้ทำนายว่าอนุภาคมีการกระจายตัวเป็นรูปแบบเดียวกันในแต่ละพื้นที่ ข้อสันนิษฐานของแบบจำลองแบบผสมอย่างดีใช้ไม่ได้กับอนุภาคขนาดต่ำกว่า  $\mu\text{m}$  แบบจำลองแบบ drift-flux model สามารถใช้อธิบายร่วมกับแรงจากภายนอกได้ เช่น thermal gradient, surface roughness

Hathway, Noakes, Sleigh, and Fletcher (2010) ศึกษาโดยใช้ CFD ในการออกแบบเพื่อประเมินความเสี่ยงจากละอองทางชีวภาพ ในการทดลองได้ใช้วิธีการเปรียบเทียบกันโดยตรงระหว่างการจำลอง CFD ด้วย Lagrangian Method และการศึกษาการกระจายละอองทางชีวภาพ ได้แสดงให้เห็นถึง passive scalar และวิธีการติดตามอนุภาคที่มีความเหมาะสมกับอนุภาคที่เป็นละอองทางชีวภาพขนาดเล็ก ในการศึกษาได้ใช้แหล่งเป็นแบบเขตพื้นที่ เพื่อใช้เป็นตัวแทนของค่าเฉลี่ยการปล่อยเชื้อแบคทีเรียจากแหล่งในพื้นที่ที่มีกิจกรรมเกิดขึ้นทั่วทั้งพื้นที่ เปรียบเทียบกับค่าการกระจายเฉลี่ยตามเวลาจากแหล่งชั่วคราว พบว่า ความสามารถของแหล่งที่อยู่กับที่เป็นตัวแทนของการกระจายโดยขึ้นอยู่กับ airflow regime วิธีการของแบบจำลองได้สาธิตการจำลองการปล่อยเชื้อแบคทีเรียจากกิจกรรมการปูเตียงในห้องแยกโรคผู้ป่วย การศึกษานี้ได้พัฒนาการตรวจสอบและนำแบบจำลองของ CFD ที่เหมาะสมไปใช้ในการประเมินการกระจายของเชื้อก่อโรคที่ลอยอยู่ในอากาศจากการทำกิจกรรมภายในโรงพยาบาล โดย

1) การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองในการทดลองการถ่ายทอดละอองชีวภาพ โดยการทดลองในห้องควบคุมสภาพแวดล้อมเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือของการจำลองการถ่ายทอดละอองภายใน CFD ซึ่งจะใช้ทั้ง passive scalar และ Lagrangian particle tracking เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกันในภายหลัง

2) การตรวจสอบความถูกต้องการคำนวณแหล่งกำเนิดแบบเขตพื้นที่ ใช้เป็นตัวแทนของแหล่งที่มีการปล่อยละอองชีวภาพที่มีความซับซ้อนซึ่งแปรเปลี่ยนตลอดเวลาภายในสิ่งแวดล้อมของโรงพยาบาลจริงๆ แหล่งนี้เป็นตัวแทนค่าเฉลี่ยตามเวลาที่ดีเนื่องจากมีการเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งพื้นที่แบบสุ่ม ด้านความน่าเชื่อถือในการคำนวณ โดยเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายจากการปล่อยละอองชีวภาพในสถานะคงที่ จากแหล่งที่มีการเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งพื้นที่ตลอดเวลาเช่นกัน

3) การตรวจสอบความถูกต้องค่าความไวของการวิเคราะห์ในการใช้งานจริง  
วิธีการคำนวณทางเรขาคณิตของแหล่งแบบเขตพื้นที่ที่ถูกออกแบบให้มีลักษณะล้อมรอบแหล่งกำเนิด  
ที่ปล่อยละอองชีวภาพ การกำหนดขนาดขอบเขตพื้นที่ของกิจกรรมทำได้ยาก ดังนั้น ความไวของ  
เขตพื้นที่ของแหล่งกำเนิดจึงใช้ขนาดและรูปร่างที่จำลองจากห้องแยกโรคผู้ป่วย และใช้เป็นตัวแทน  
ของทั้ง 2 แหล่งในแบบจำลองการปล่อยเชื้อก่อโรค





## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาหาอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ (Air change rate) และตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสมของระบบระบายอากาศ และสภาวะที่เหมาะสมของหลอด UVC ของระบบ UVGI ด้านกำลังไฟฟ้า จำนวนและตำแหน่งการติดตั้งหลอด UVC ให้ได้ปริมาณรังสี UVC ในการฆ่าเชื้อวัณโรคสูงสุดในขณะเดียวกันก็มีความปลอดภัยต่อผู้ที่อยู่ในห้อง โดยมีขั้นตอนในการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 3.1 สถานที่การศึกษาวิจัย

ทำการศึกษาและวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในห้องผู้ป่วยจำลองที่สร้างขึ้นให้มีขนาดและโครงสร้างเช่นเดียวกับห้องพิเศษอาคารผู้ป่วยในของโรงพยาบาลชุมชนขนาด 60 เตียง ที่ปรับปรุงเป็นห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อวัณโรค ตามแบบห้องผู้ป่วยแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ วศ. 1/2549 (กองวิศวกรรมการแพทย์, 2549) ตั้งอยู่ในบริเวณสำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 5 นครราชสีมา ถนนราชสีมา-โชคชัย ตำบลหนองบัวศาลา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

#### 3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

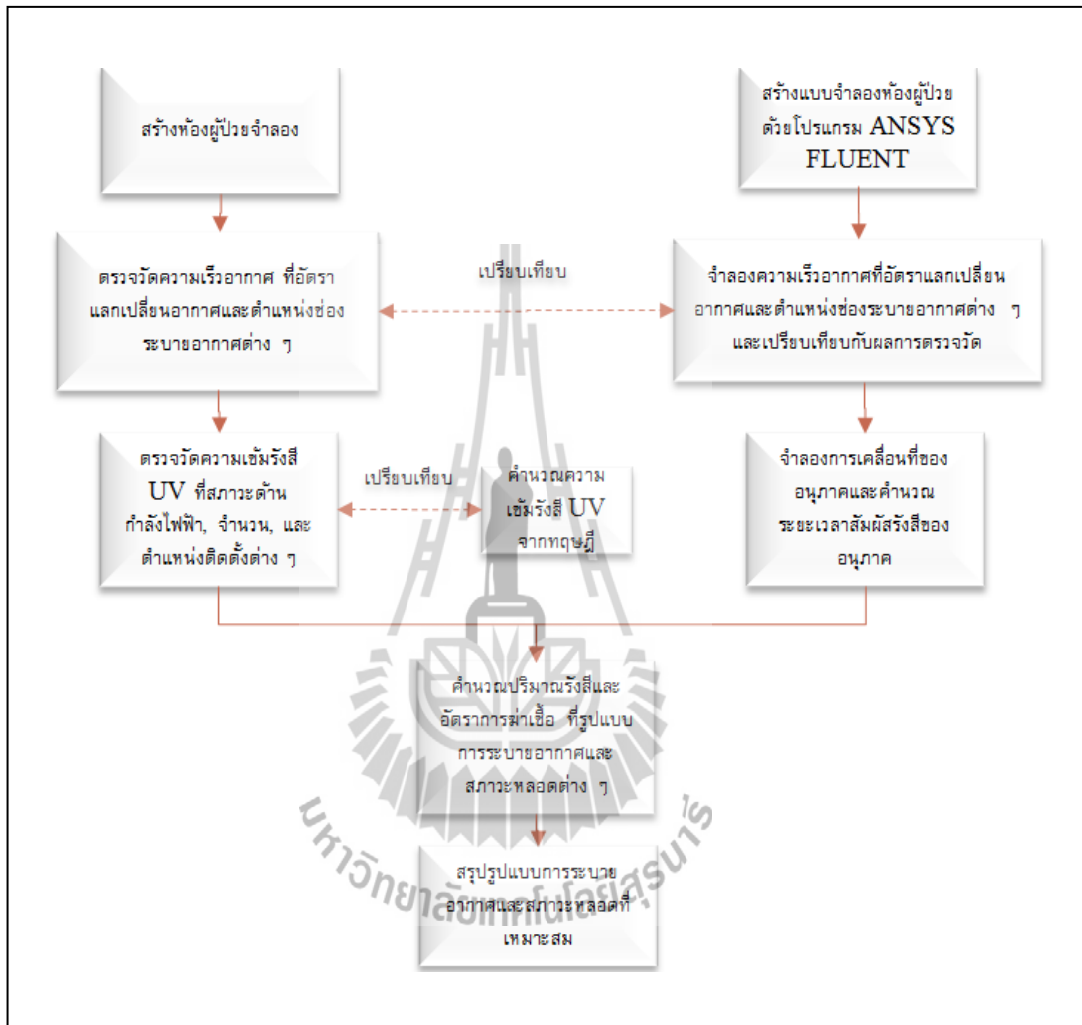
ขั้นตอนการศึกษาวิจัยแสดงดังในรูปที่ 3.1 โดยสรุปรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน ดังนี้

3.2.1 การสร้างห้องผู้ป่วยจำลอง ตามแบบห้องพิเศษ อาคารผู้ป่วยใน โรงพยาบาลชุมชน

3.2.2 การตรวจวัดความเร็วอากาศ เป็นการศึกษาอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ จำนวน 3 ค่า (6, 9 และ 12 ACH) ติดตั้งช่องระบายอากาศประกอบด้วย ช่องจ่ายอากาศ (Air supply: In) และช่องดูดอากาศ (Air exhaust: Out) มีตำแหน่งติดตั้ง 3 รูปแบบ คือ In-low/Out-high (L/H), In-high/Out-low (H/L) และ In-high/Out-high (H/H) โดยศึกษาในห้องผู้ป่วยจำลองแล้วตรวจวัดความเร็วของอากาศ

3.2.3 การตรวจวัดความเข้มรังสี UVC เป็นการศึกษาสภาวะของหลอด UVC ที่มีกำลังไฟ 3 ขนาด ได้แก่ 8 W, 16 W, และ 30 W มีตำแหน่งติดตั้งที่ระดับความสูงจากพื้น 3 ระดับ คือ 2.7 m, 3.0 m, 3.3 m โดยศึกษาในห้องผู้ป่วยจำลองแล้วตรวจวัดความเข้มรังสี UVC

3.2.4 การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT เป็นการสร้างแบบจำลองห้องผู้ป่วย จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อวัณโรคแล้วคำนวณระยะเวลาสัมผัสรังสี UVC ของอนุภาคฯ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวិจัย

### 3.2.5 วิเคราะห์ข้อมูลและแปรผล

1) การวิเคราะห์ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อวันโรค ใน Upper zone และเปรียบเทียบข้อมูลจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลองและจากการจำลอง

2) การคำนวณปริมาณรังสี UVC โดยนำความเข้มรังสี UVC จากการศึกษาในข้อ 3.2.3 และระยะเวลาสัมผัสรังสี UVC จากการศึกษาในข้อ 1) มาคำนวณหาปริมาณรังสี UVC และสรุปปริมาณรังสี UVC สูงที่สุดที่ได้จากการศึกษา

3) การคำนวณอัตราการฆ่าเชื้อวันโรคของระบบ

### 3.2.6 สรุปรูปแบบการระบายอากาศและสถานะหลอด UVC ที่เหมาะสม

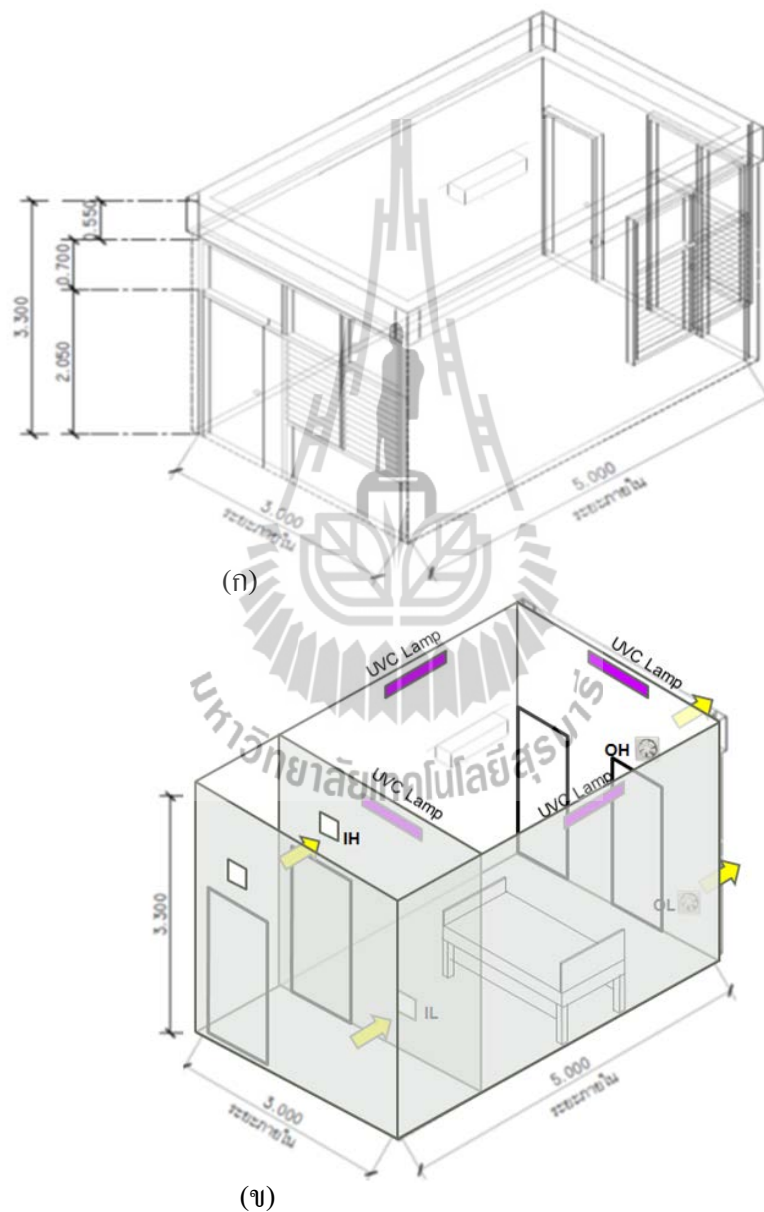
#### 3.2.1 การสร้างห้องผู้ป่วยจำลอง

การศึกษานี้มุ่งศึกษาการฆ่าเชื้อด้วย UVGI ที่ติดตั้งในห้องที่มีโครงสร้างคล้ายห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ.1/2549 ดังรูปที่ 3.2 โดยการปรับปรุงห้องพิเศษอาคารผู้ป่วยในโรงพยาบาลชุมชนเพื่อใช้เป็นห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อวันโรค ดังรูปที่ 3.3 (ก) โดยจะทำการทดลองในห้องผู้ป่วยจำลองที่สร้างขึ้นให้มีขนาดโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพเช่นเดียวกับห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อจริง ขนาด (ก x ย x ส) 3 m x 5 m x 3.3 m ผนังห้องบุด้วยสมาร์ทบอร์ดหนา 4 ทั้ง 5 ด้าน และจัดทำผนังกั้นแบ่งห้องเป็นสองส่วน ส่วนหน้าเป็นห้องก่อน



รูปที่ 3.2 ห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ.1/2549  
(กองวิศวกรรมการแพทย์, 2549)

ห้องแยกผู้ป่วย (Ante room) ขนาดห้อง (ก x ย x ส) 3 m x 1.5 m x 3.3 m และส่วนหลังเป็นห้องแยกผู้ป่วย (Isolation room) ขนาดห้อง (ก x ย x ส) 3 m x 3.5 m x 3.3 m ภายในห้องแยกผู้ป่วยจัดทำช่องจ่ายอากาศเข้า ขนาด 18 cm x 24 cm จำนวน 3 ชุด โดยเป็นตำแหน่งตามแบบ วศ.1/2549 จำนวน 2 ชุด คือที่ผนังเหนือประตูเข้าห้องแยกผู้ป่วย 1 ชุด และที่ผนังเหนือประตูเข้าห้องก่อนห้องแยกผู้ป่วย 1 ชุด และที่จุดกึ่งกลางใต้ขอบหน้าต่างจุดกึ่งกลางผนังติดประตูเข้าห้องแยกผู้ป่วย 1 ชุด ส่วนช่องดูด



รูปที่ 3.3 แบบโครงสร้างห้อง (ก) ห้องพิเศษ อาคารผู้ป่วยในโรงพยาบาลชุมชน  
(ข) ห้องผู้ป่วยจำลอง

อากาศออก ได้ย้ายช่องระบายอากาศออกจากตำแหน่งใต้หัวเตียงผู้ป่วยที่ติดอยู่ผนังด้านขวาไปติดที่ผนังหลังห้องแยกผู้ป่วย ซึ่งอยู่ตรงกันข้ามกับช่องจ่ายอากาศเข้าที่ติดผนังด้านประตูเข้าห้องแยกผู้ป่วย การติดตั้งดังกล่าวนี้จะทำให้การผสมอากาศเกิดขึ้นได้ดีกว่า (Noakes et al., 2004; Xu and Miller, 1999) โดยทำการติดตั้งพัดลมดูดเพื่อระบายอากาศออก ขนาดใบพัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 cm จำนวน 2 ชุด ที่ผนังหลังห้องแยกผู้ป่วยตำแหน่งเหนือประตูทางออก 1 ชุด และได้ขอบหน้าต่าง 1 ชุด พื้นผิวภายในห้องทาสีครีมอ่อน มีเตียงผู้ป่วย ขนาด 0.9 m x 2.0 m x 0.65 m จำนวน 1 เตียง ตั้งอยู่กลางห้องในลักษณะหัวเตียงชิดผนังด้านขวามือ ส่วนในห้องก่อนห้องแยกผู้ป่วย ได้ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ขนาด 18,000 BTU ที่กลางผนังห้องด้านหน้าระดับห่างจากเพดาน 0.30 m และตั้งเครื่องทำไอหมอกไว้เพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องแยกผู้ป่วย และเนื่องจากไม่ได้ศึกษาถึงผลของการระบายอากาศโดยธรรมชาติ (ผลจากช่องเปิดของประตู หน้าต่าง) จึงไม่มีการติดตั้งประตูและหน้าต่างบานเกล็ดบังแสง เช่นเดียวกับห้องจริง มีเพียงประตูสำหรับเป็นทางเข้าออกห้องทดลองขนาด 0.9 m x 2.0 m เท่านั้น นอกจากนี้ ห้องผู้ป่วยจำลองไม่ได้จัดทำห้องน้ำผู้ป่วยที่อยู่ต่อจากห้องแยกผู้ป่วยไปด้านหลัง ดังรูปที่ 3.3 (ข)

### 3.2.1.1 รูปแบบการระบายอากาศ

รูปแบบการระบายอากาศ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ตำแหน่งช่องระบายอากาศ และอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ ในส่วนช่องระบายอากาศ มี 3 แบบ คือ L/H, H/L และ H/H ตามตำแหน่งของช่องจ่ายอากาศเข้าและช่องดูดอากาศออก การเตรียมช่องจ่ายอากาศโดยทำการติดตั้งช่องจ่ายอากาศ ขนาด 0.18 m x 0.24 m จำนวน 2 ชุด ที่ผนังหน้าห้องแยกผู้ป่วยตำแหน่งเหนือประตูทางเข้า 1 ชุด 1 ชุด (H) และจุดกึ่งกลางใต้ขอบหน้าต่างผนังด้านหน้าห้องแยกผู้ป่วย 1 ชุด (L) 1 ชุด ส่วนช่องดูดอากาศออก ทำการติดตั้งพัดลมดูดเพื่อระบายอากาศออก ขนาดใบพัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 cm จำนวน 2 ชุด ที่ผนังด้านหลังห้องแยกผู้ป่วยตำแหน่งเหนือประตูทางออก (H) 1 ชุด ได้ขอบหน้าต่าง (L) 1 ชุด ส่วนอัตราแลกเปลี่ยนอากาศใช้การควบคุมอัตราการดูดอากาศออกของพัดลมดูดอากาศ ให้มีอัตราการดูดอากาศออก 3 อัตรา คือ 6 ACH, 9 ACH และ 12 ACH

### 3.2.1.2 ระบบฆ่าเชื้อด้วยรังสี UVC ในพื้นที่ส่วนบนของห้อง

ติดตั้งชุด UVGI แบบติดผนัง ที่ระดับความสูง ตั้งแต่ 2.7 m-3.3 m โดย

- 1) หลอด UVC ใช้หลอด UVC ผลิตภัณฑ์ Philips ความยาวคลื่น 254 nm ชนิด low-pressure mercury vapour กำลังไฟฟ้า 8 W, 16 W และ 30 W
- 2) ชุดติดตั้ง ใช้ชุดติดตั้งหลอด UVC ขนาด ก x ย x ล = 0.13 x 0.95 x 0.16.5 m<sup>3</sup> ชนิดมีบานเกล็ดบังแสง และไม่มีระบบสะท้อนแสง (reflex) โดยชุดติดตั้งสามารถปรับเปลี่ยนขึ้นลงในแนวดิ่งได้

### 3.2.1.3 การควบคุมสถานะสิ่งแวดล้อมภายในห้องผู้ป่วยจำลอง

การควบคุมสถานะสิ่งแวดล้อมของห้องผู้ป่วยจำลองได้แก่อุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการฆ่าเชื้อวัณโรค โดยควบคุมอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 24-26 °C และความชื้นสัมพัทธ์ อยู่ระหว่างร้อยละ 40-60 ด้วยการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ขนาด 18,000 BTU และเครื่องทำไอหมอก ขนาด 1-5  $\mu\text{m}$  ไว้ภายในห้องก่อนห้องแยกโรคฯ

## 3.2.2 การตรวจวัดความเร็วอากาศ

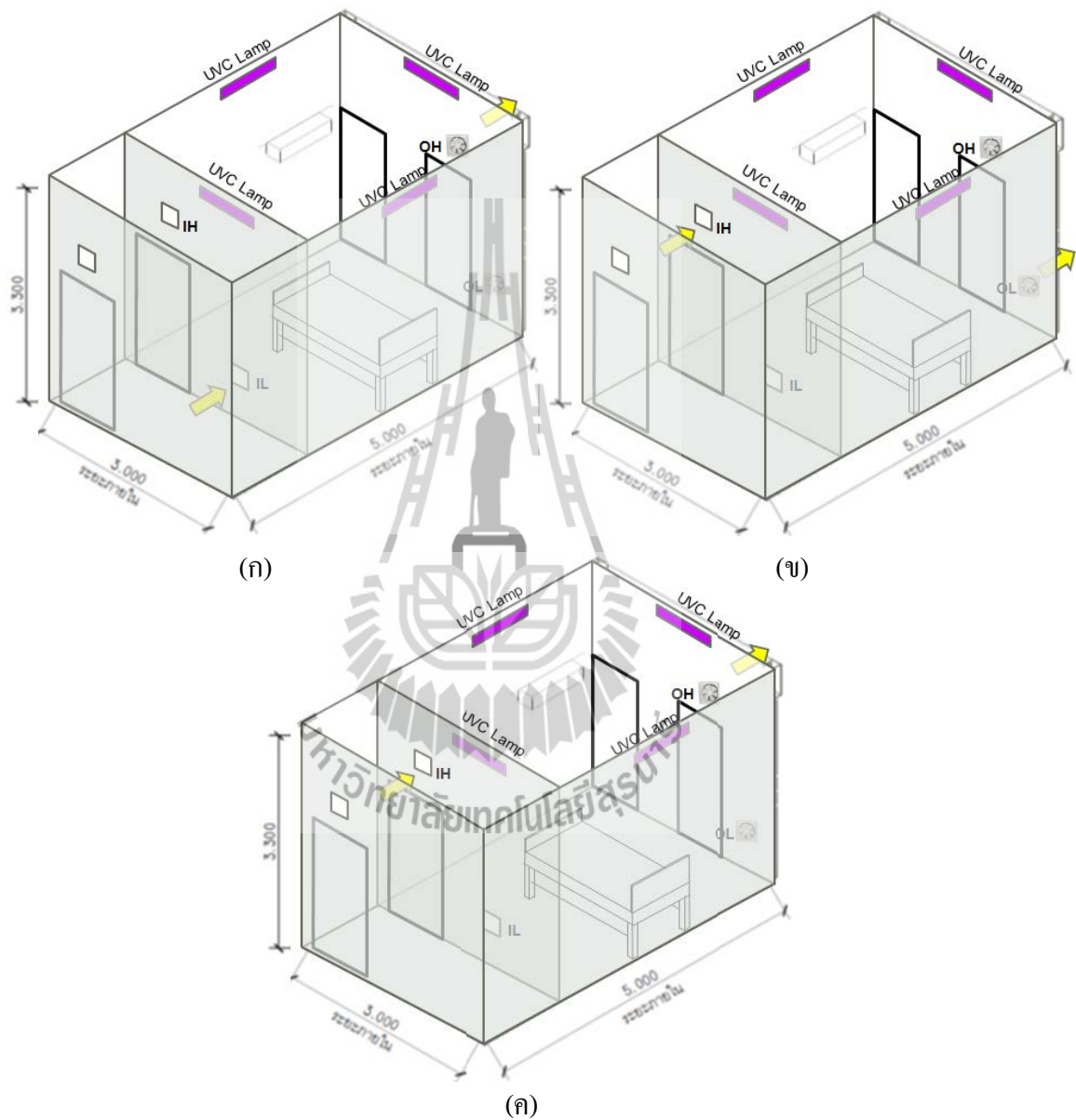
### 3.2.2.1 การออกแบบการทดลอง

การตรวจวัดความเร็วอากาศ เป็นการศึกษารูปแบบการระบายอากาศที่มีการแปรผันตำแหน่งช่องระบายอากาศและอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ ที่มีผลต่อระยะเวลาการเคลื่อนที่และกระจายตัวของอนุภาคเชื้อวัณโรค ใน Upper zone ในห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อวัณโรคที่มีการปนเปื้อนแบบต่อเนื่องเกิดขึ้นภายในห้อง ในการศึกษาี้จัดการรูปแบบการระบายอากาศให้มีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 3 ค่า คือ 6, 9 และ 12 ACH เนื่องจาก CDC (2009) และ AIA (2006) ได้กำหนดอัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่เหมาะสมสำหรับห้องแยกโรคติดเชื้อไว้ที่ 12 ACH และยอมให้มีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศขั้นต่ำไม่น้อยกว่า 6 ACH ดังนั้น ในการศึกษาี้ จึงกำหนดอัตราแลกเปลี่ยนอากาศตามข้อแนะนำ 2 ค่า คือ 6 ACH 12 ACH และเนื่องจากประสิทธิภาพของระบบจะสูงเมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศต่ำ ๆ (Ko et al, 2000) จึงเพิ่มการศึกษาอัตรา 9 ACH อีก 1 ค่า ซึ่งเป็นค่ากลางเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบเมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศต่ำกว่าอัตราที่กำหนดร้อยละ 50 โดย

ตารางที่ 3.1 อัตราแลกเปลี่ยนอากาศและอัตราการไหลอากาศในการทดลอง

การทดลองที่	ตำแหน่งช่องระบายอากาศ	อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH)	อัตราการไหลของอากาศ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
1	L/H	6	0.0578
2	L/H	9	0.0866
3	L/H	12	0.1155
4	H/L	6	0.0578
5	H/L	9	0.0866
6	H/L	12	0.1155
7	H/H	6	0.0578
8	H/H	9	0.0866
9	H/H	12	0.1155

การศึกษาและติดตั้งช่องระบายอากาศที่มีตำแหน่งช่องจ่ายอากาศเข้า/ช่องดูดอากาศ ออก ที่มีการติดตั้งแตกต่างกัน 3 ลักษณะ คือ L/H, H/L และ H/H รวมทั้งสิ้น 9 การทดลอง ดังสรุปในตารางที่ 3.1 และแสดงเงื่อนไขการเปิด-ปิด ระบบการระบายอากาศ ดังรูปที่ 3.4 และตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งช่องระบายอากาศทั้ง 3 กรณี

(ก) L/H (ข) H/L (ค) H/H

ตารางที่ 3.2 การกำหนดเงื่อนไขระบบการติดตั้ง Air supply/Air exhaust ในการทดลอง

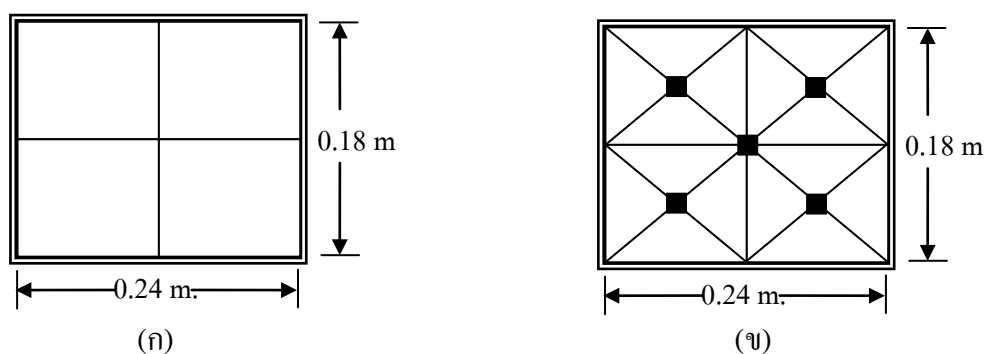
ตำแหน่ง ช่องระบายอากาศ	การเปิด-ปิดระบบ			
	Air Supply (In)		Air Exhaust (Out)	
	Low level	High level	Low level	High level
L/H	On	Off	Off	On
H/L	Off	On	On	Off
H/H	On	On	On	On

### 3.2.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

เพื่อให้เข้าใจขั้นตอนการทดลอง จึงขอยกตัวอย่างการทดลองตามการทดลองที่ 1 ที่ติดตั้งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH อัตราไหลอากาศ  $0.0578 \text{ m}^3/\text{s}$

1) การปรับอัตราการไหลอากาศให้ได้ตามกำหนด โดยที่ช่องจ่ายอากาศเข้าหน้าห้องให้เปิดตำแหน่ง L และปิดตำแหน่ง H และเปิดพัดลมดูดอากาศที่ผนังหลังห้องตำแหน่ง H แล้วปรับความเร็วของพัดลมดูดอากาศออกให้มีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศเท่ากับ 6 ACH ด้วยการหมุนปุ่มควบคุมความเร็วพัดลมดูดอากาศให้มีอัตราไหลอากาศเข้าและออกจากห้องด้วยอัตรา  $0.0578 \text{ m}^3/\text{s}$  ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่ม-ลดอัตราการหมุนพัดลมดูดอากาศออกหลังห้อง และตรวจวัดอัตราการไหลเข้าของอากาศที่หน้าแปลนช่องจ่ายอากาศด้านหน้า ตามวิธีมาตรฐาน ANSI/ASHRAE 41.2-1987 (RA 92) (ASHREA, 1992) ดังนี้

1.1) แบ่งพื้นที่หน้าช่องจ่ายอากาศ ขนาด  $0.18 \text{ m} \times 0.24 \text{ m}$  ออกเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมจำนวน 4 ช่อง ดังรูปที่ 3.5 (ก)



รูปที่ 3.5 แผนผังการตรวจวัดความเร็วอากาศหน้าช่องจ่ายอากาศ

(ก) การแบ่งพื้นที่หน้าช่องจ่ายอากาศ (ข) จุดตรวจวัดความเร็วอากาศ



1.2) กำหนดจุดตรวจวัด 5 จุด เป็นจุดกลางพื้นที่สี่เหลี่ยมย่อย 4 จุด และจุดกลางหน้าแปลนช่องจ่ายอากาศ 1 จุด ดังรูปที่ 3.5 (ข)

1.3) ทำการตรวจวัดอัตราการไหลเข้าของอากาศที่หน้าแปลนช่องจ่ายอากาศ โดยเปิดเครื่องตรวจวัดความเร็วลมแล้วเลือกหน่วยการวัด กำหนดและประมาณทิศทางของลม แล้วนำหัววัดเครื่องตรวจวัดความเร็วลมไปไว้หน้าช่องจ่ายอากาศให้ปลายหัววัดอยู่ห่างจากช่องจ่ายอากาศประมาณ 0.3 m ตรงจุดกึ่งกลางพื้นที่ที่จะตรวจวัดจุดที่ 1 จัดให้หัววัดตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ รอประมาณ 4 วินาที ให้ค่าที่วัดได้คงที่ จึงอ่านและบันทึกค่าที่ 1 โดยทำซ้ำกัน 3 ครั้ง แล้วเลื่อนไปยังจุดที่ 2 ทำการตรวจวัดตามขั้นตอนจนครบทั้ง 5 จุด

1.4) หาค่าเฉลี่ยความเร็วลมหน้าช่องจ่ายอากาศ

1.5) คำนวณหาอัตราการไหลอากาศออกจากห้องผู้ป่วยจำลอง ตามสมการ (3-1)

$$Q = v \times A \quad (3-1)$$

โดยที่

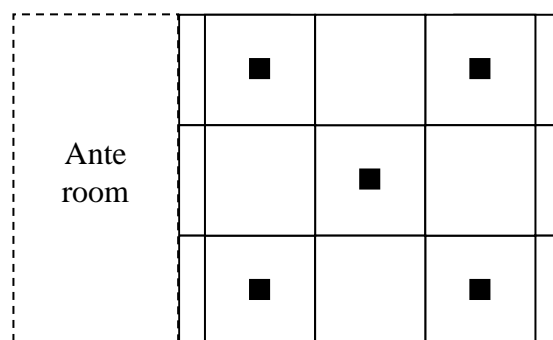
$Q$  = อัตราการไหลอากาศ ( $m^3/s$ )

$v$  = ความเร็วลม ( $m/s$ )

$A$  = พื้นที่หน้าตัดช่องจ่ายอากาศ ( $m^2$ )

1.6) ปรับความเร็วพัดลมจนได้อัตราการไหลอากาศเท่ากับ  $0.0578 m^3/s$  โดยผลที่ได้จากการปรับอัตราการไหลอากาศนี้ จะทำให้มีการแลกเปลี่ยนอากาศภายในห้องเท่ากับ 6 ACH

2) การตรวจวัดความเร็วอากาศในห้องผู้ป่วยจำลอง ตามวิธีมาตรฐาน ANSI/ASHRAE 41.2-1987 (RA 92) (ASHREA, 1992) โดยตรวจวัดที่ระดับความสูง 1.7 m ตามจุดที่กำหนดรวม 5 จุด ดังรูปที่ 3.6 และบันทึกค่าผลการตรวจวัดโดยละเอียด



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งตรวจวัดความเร็วอากาศในห้องผู้ป่วยจำลอง

3) ทำการทดลองจนครบตามการทดลองที่ได้ออกแบบในตารางที่ 3.1

ผลที่ได้จากการทดลองนี้ คือ ความเร็วอากาศ ซึ่งได้พิจารณาว่า อนุภาคเชื้อไวรัสโรคเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอากาศ ดังนั้น อนุภาคเชื้อไวรัสโรค จึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วอากาศที่เคลื่อนที่ในห้อง และจะนำค่าความเร็วอากาศนี้ไปใช้ประโยชน์ในเปรียบเทียบกับความเร็วอากาศที่ได้จากการจำลองด้วย ANSYS FLUENT ที่พิกัดเดียวกัน โดยจะทำการเปรียบเทียบ จำนวน 1 ระบาย/การทดลอง

### 3.2.3 การตรวจวัดความเข้มรังสี UVC

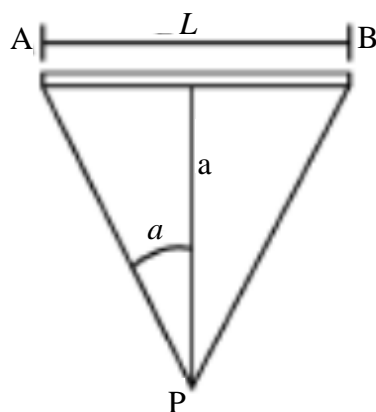
#### 3.2.3.1 การคำนวณความเข้มรังสี UVC จากทฤษฎี

เป็นการตรวจสอบการผลิตและการกระจายรังสีของหลอด UVC ในทางทฤษฎี ที่จะใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี UVC ในการทดลองนี้ โดยดำเนินการตามวิธีของ ASHRAE (2008) ดังสมการ (3-2)

$$E = \frac{\phi}{2\pi^2 La} (2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (3-2)$$

โดยที่

- $E$  = ค่าความเข้มรังสีของหลอด ( $\text{W/m}^2$ )
- $\phi$  = ค่ากำลังไฟหลอด UVC (W)
- $L$  = ความยาวหลอด UVC (m)
- $a$  = ระยะทางจากจุดกึ่งกลางหลอดถึงจุดตรวจวัด (m)
- $\alpha$  = มุมระหว่างเส้นระยะทางจากจุดกึ่งกลางหลอดถึงจุดตรวจวัดกับเส้นระยะทางจากขอบด้านใดด้านหนึ่งของหลอดถึงจุดตรวจวัด



รูปที่ 3.7 การคำนวณความเข้มรังสีของหลอด UVC

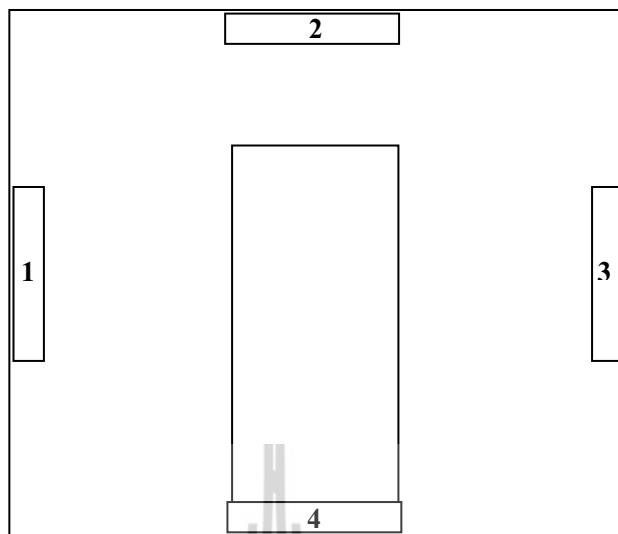
### 3.2.3.2 การตรวจวัดความเข้มรังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลอง

#### การออกแบบการทดลอง

การตรวจวัดความเข้มรังสี UVC เป็นการศึกษาผลที่เกิดขึ้นต่อความเข้มรังสี UVC เมื่อมีการแปรผันสภาวะหลอด UVC ด้านกำลังไฟฟ้า ขนาด 8 W, 16 W และ 30 W มีตำแหน่งติดตั้งในแนวตั้งระดับสูงจากพื้น 2.7 m, 3.0 m และ 3.3 m และระยะกึ่งกลางผนังแนวระนาบ เมื่อติดตั้งด้วยชุดที่มีบานเกล็ดบังแสง ภายใต้สภาวะด้านภูมิอากาศคงที่ คือ อุณหภูมิ 24-26 °C ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 40-60 ที่เป็นสภาวะที่ทำให้ระบบ UVGI มีความเข้มรังสี UVC (Irradiance) สูงสุดแต่ยังคงมีความปลอดภัย โดยที่มีการกระจายความเข้มรังสีสม่ำเสมอ และมีพื้นที่รังสี ช่วง 30-50  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ใน Upper zone มีพื้นที่มากที่สุด ทั้งนี้ ในพื้นที่ส่วนล่างของห้อง (Lower zone) หรือตั้งแต่ระดับความสูงจากพื้นตั้งแต่ 1.7 m ลงมาจะต้องมีความเข้มรังสี UVC ไม่เกิน 0.2  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.8 ในการทดลองนี้จะไม่พิจารณาผลกระทบของอัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่มีต่อความเข้มของรังสี UVC จึงไม่มีการดูดอากาศออกเพื่อปรับเปลี่ยนอัตราแลกเปลี่ยนอากาศในขณะตรวจวัด เนื่องจากความเข้มรังสี UVC แปรผันโดยตรงกับความเข้มของหลอด UVC และแปรผกผันกับระยะห่างจากหลอด UVC ดังสมการ (3-2) ในข้างต้น

ตารางที่ 3.3 การกำหนดเงื่อนไขการติดตั้งหลอด UVC

การทดลองที่	จำนวนติดตั้งหลอด UVC	ตำแหน่งติดตั้งหลอด UVC (ด้านที่)
1	1 ด้าน (1ด้าน <sup>1</sup> )	1 (หน้า)
2	1 ด้าน (1ด้าน <sup>2</sup> )	2 (ซ้าย)
3	1 ด้าน (1ด้าน <sup>1</sup> )	3 (หลัง)
4	1 ด้าน (1ด้าน <sup>1</sup> )	4 (ขวา)
5	2 ด้าน (2ด้าน <sup>1</sup> )	1-3 (หน้าและหลัง)
6	2 ด้าน (2ด้าน <sup>2</sup> )	2-4 (ซ้ายและขวา)
7	3 ด้าน (3ด้าน <sup>1</sup> )	1-3-2 (หน้า หลังและซ้าย)
8	3 ด้าน (3ด้าน <sup>1</sup> )	1-3-4 (หน้า หลังและขวา)
9	4 ด้าน	1-3-2-4 (หน้า หลัง ซ้ายและขวา)



รูปที่ 3.8 ผังตำแหน่งติดตั้งหลอด UVC

#### ขั้นตอนการทดลอง

1) ติดตั้งชุดหลอด UVC พร้อมบานเกล็ดบังแสง ที่ผนังด้านที่ 1 ระดับความสูง 2.7 m ตามเงื่อนไขการทดลองที่ 1 ตารางที่ 3.3 โดยใช้หลอด UVC กำลังไฟ 8 W

2) ตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องจำลอง โดยดำเนินการดังนี้

2.1) กรณีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อยู่ในช่วงที่กำหนด คือ อุณหภูมิ 24-26 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40-60 ดำเนินการทดลองต่อไป ตามข้อ 3)

2.2) กรณีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อยู่นอกช่วงที่กำหนด ในช่วงเวลาใด ๆ ให้ดำเนินการดังนี้

2.2.1) อุณหภูมิอยู่นอกช่วง ให้ปรับเพิ่มหรือลดอุณหภูมิที่อุปกรณ์ควบคุมให้สูงขึ้นหรือลดลงแล้วแต่กรณี และตรวจวัดอุณหภูมิซ้ำ ทำเช่นนี้จนอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่กำหนด

2.2.2) ความชื้นสัมพัทธ์อยู่นอกช่วง

- ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า ร้อยละ 40 ให้ปรับลดอุณหภูมิที่อุปกรณ์ควบคุมให้ต่ำลง ทั้งนี้ไม่ต่ำกว่า 24 °C และเปิดพัดลมไอหมอก ตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์ซ้ำ ทำเช่นนี้จนความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงที่กำหนด

- ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า ร้อยละ 60 ให้ปรับเพิ่มอุณหภูมิที่อุปกรณ์ควบคุมให้สูงขึ้น ทั้งนี้ไม่สูงเกินกว่า 26 °C ตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์ซ้ำ ทำเช่นนี้จนความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงที่กำหนด

3) ทำการตรวจวัดความเข้มรังสี UVC ตามขั้นตอนการตรวจ วัดตามวิธีของ Miller (2002) และบันทึกข้อมูล ดังนี้

3.1) กำหนดระยะการตรวจวัดในแนวระนาบ ห่างจากระดับที่ติดตั้งหลอด UVC เท่ากับ 0 cm และขึ้นและลงในแนวตั้งคราวละ 0.3 m โดยระดับต่ำสุดไม่ต่ำกว่า 2.4 m และระดับสูงสุดไม่เกิน 3.3 m

3.2) กำหนดกริดในการตรวจวัดในแนวระนาบ เป็นจุดกึ่งกลางสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1.0 m x 1.0 m ในพื้นที่ขนาด (กxข) 3.0 m x 3.5 m ได้จุดตรวจวัด จำนวน 4 ระนาบ โดยระนาบระดับติดตั้ง 1 ระนาบ จำนวน 5 จุด และระนาบที่ไม่ตรงระดับติดตั้ง จำนวน 9 จุด รวม 32 จุด/ระดับติดตั้ง ติดตั้ง 3 ระดับ รวม 96 จุด/ขนาดกำลังไฟ ดังตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.9 โดยศึกษา กำลังไฟหลอด UVC 3 ขนาด รวมตรวจวัดทั้งสิ้น 288 จุด ๆ ละ 4 ด้าน และตรวจซ้ำ 3 ครั้ง/ตัวอย่าง รวม 3,456 ตัวอย่าง

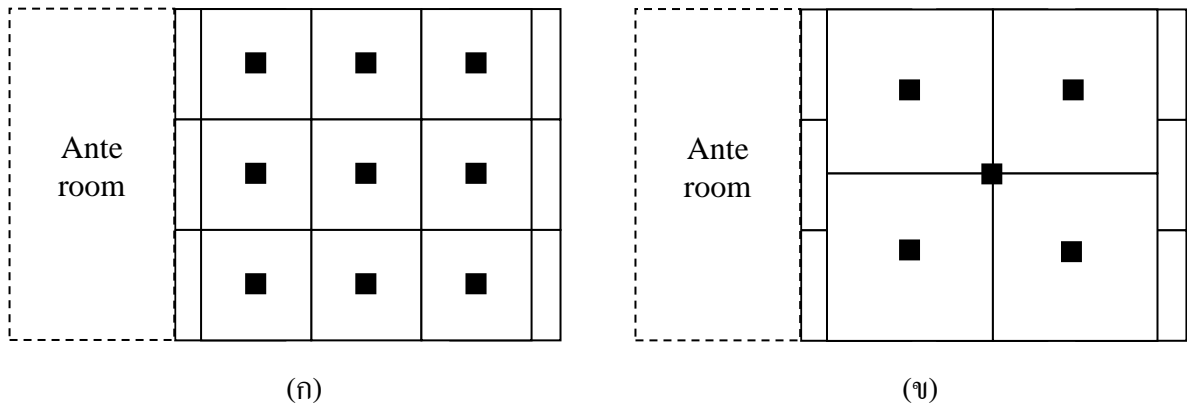
ตารางที่ 3.4 แผนการตรวจวัดความเข้มรังสี UVC ต่อขนาดกำลังไฟหลอด UVC

ระดับติดตั้ง ระบบ UVGI (m)	จำนวนจุดตรวจวัดความเข้มรังสี UVC ที่ระดับความสูงต่าง ๆ				
	2.4 m	2.7 m	3.0 m	3.3 m	รวม
2.7	9	5	9	9	32
3.0	9	9	5	9	32
3.3	9	9	9	5	32
รวม	27	23	23	23	96

3.3) การอุ่น (warm up) หลอด UVC (Philips, 2006)

- หลอด UVC ที่ใช้ครั้งแรกต้องได้รับการอุ่น เป็นเวลา 100 ชั่วโมงติดต่อกัน เพื่อให้การปล่อยรังสี UVC ออกมาคงที่และสม่ำเสมอ

- เปิดหลอด UVC ให้ทำงานติดต่อกันเป็นเวลา 30 นาที ก่อนเริ่มการตรวจวัดความเข้มรังสี UVC



**รูปที่ 3.9** จุดตรวจวัดความเข้มรังสี UVC ในแต่ละระนาบ

(ก) ระดับที่ไม่ตรงกับหลอด UVC (ข) ระดับที่ตรงกับหลอด UVC

3.4) ทำการตรวจวัดความเข้มรังสี UVC แต่ละจุด ในระนาบ 2.4 m โดยตั้งขาตั้งตรงตำแหน่งตรวจวัดที่ 1 ปรับเลื่อนหัวตรวจวัดไปที่ระดับความสูง 2.4 m แล้วเปิดป็นยิงแสงเลเซอร์ หมุนปรับอุปกรณ์ให้เซลรับแสงของหัวตรวจวัดหันออกไปยังหลอด UVC โดยให้จุดลำแสงเลเซอร์อยู่จุดกึ่งกลางหลอด UVC ตั้งทิ้งไว้ 1 นาที แล้วอ่านค่าและบันทึกผลการตรวจ โดยทำซ้ำกัน 3 ครั้ง แล้วเลื่อนหัวตรวจวัดไปที่ระดับ 2.7 m และทำการตรวจวัดตามขั้นตอนจนครบทุกระดับ จากนั้นเลื่อนขาตั้งพร้อมชุดตรวจวัดไปยังตำแหน่งตรวจวัดต่อไป และทำการตรวจจนครบ 9 จุด หรือ 5 จุด สำหรับระดับที่ไม่ตรงและตรงระดับติดตั้งหลอด UVC

4) ทำการทดลองตามข้อ 1)-2) โดยเปลี่ยนระดับความสูงติดตั้งชุดหลอด UVC เป็น 3.0 m และ 3.3 m ตามลำดับ

5) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1)-3) แต่เปลี่ยนกำลังไฟหลอด UVC เป็น 16 W และ 30 W ตามลำดับ ทั้งนี้ทำการทดลอง ตั้งแต่วันที่ 7 กุมภาพันธ์ – 8 พฤษภาคม 2557 รวม 72 วัน

ผลที่ได้จากการทดลองนี้ คือ ค่าความเข้มของรังสี UVC และจะนำค่าความเข้มรังสี UVC นี้ ไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาปริมาณรังสี UVC โดยคำนวณร่วมกับระยะเวลาสัมผัสรังสีที่ได้จากการจำลองด้วย ANSYS FLUENT ที่พิกัดเดียวกัน

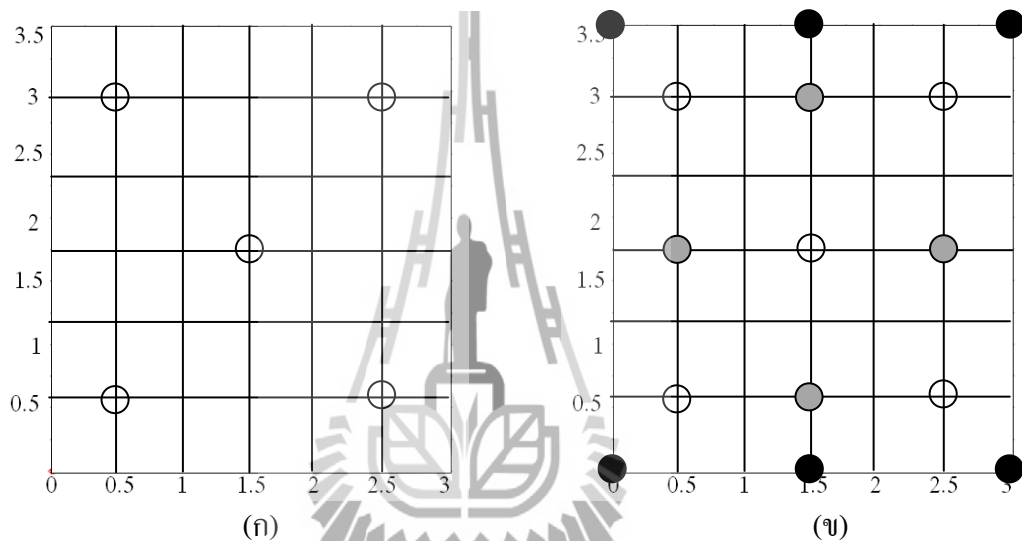
### 3.2.3.3 การวิเคราะห์ความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone

- 1) รวบรวมข้อมูลจากการทดลองและตรวจวัดความเข้มรังสีตามแผนการทดลอง
- 2) ทำการสร้างชุดข้อมูลเพิ่มเพื่อให้ได้ข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ในห้องจำลอง โดยใช้การวิเคราะห์เส้นระดับชั้นความเข้มรังสี (Contour line) ด้วยโปรแกรม Winsurf 11 (Trial)

ในการประมาณค่าการกระจายความเข้มรังสีในพื้นที่แนวราบและแนวดิ่งในห้องผู้ป่วยจำลองด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) และการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) ดังรูปที่ 3.10 กล่าวคือ

2.1) การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) เป็นการประมาณค่าความเข้มรังสีที่จุดไม่รู้ค่าหรือจุดสี ● ที่อยู่ระหว่างจุดที่รู้ค่าจากการตรวจวัด 2 จุด หรือจุดสี ○

2.2) การประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) เป็นการประมาณค่าความเข้มรังสีที่ไม่รู้ค่าหรือ จุดสี ● ที่อยู่ถัดจากจุดที่รู้ค่าจากการตรวจวัด 2 จุด หรือจุดสี ○



(ก)

(ข)

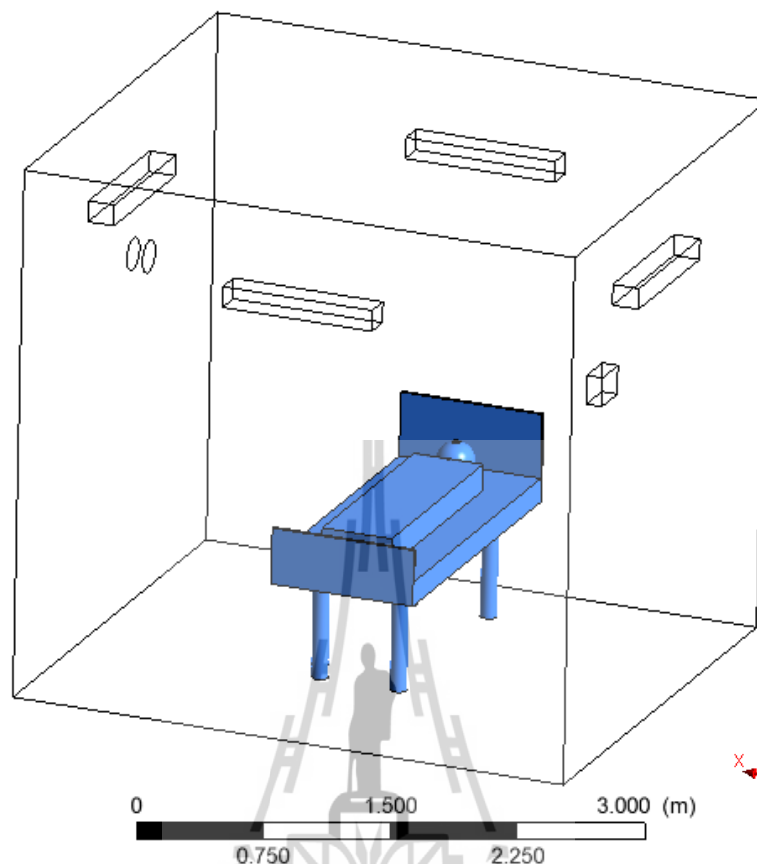
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งประมาณค่าความเข้มรังสี UVC

(ก) จุดที่รู้ค่าความเข้มรังสีจากการตรวจวัด

(ข) จุดที่ได้ค่าความเข้มรังสีจากการประมาณค่า

2.3) เมื่อพิจารณารูปห้องผู้ป่วยจำลอง ดังรูปที่ 3.11 โดยแกน X เป็นความกว้าง แกน Y เป็นสูง และแกน Z เป็นความยาวของห้อง ผลจากการดำเนินการตามข้อ 2.1)-2.2) ทำให้ได้ตำแหน่งและค่าประมาณความเข้มรังสี ดังนี้

- แนวราบ แนวแกน XZ จาก 4 ระดับ (2.4 2.7 3.0 3.3 m) เพิ่มเป็น 12 ระดับ (0.0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7, 3.0, และ 3.3 m) ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.12
- แนวดิ่ง แนวแกน XY ตามความกว้างของห้องจาก 3 ชั้น (0.75, 1.75 และ 2.25 m) เพิ่มเป็น 14 ชั้น (0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.75, 3.0, 3.25 และ 3.5 m) ดังตัวอย่างรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.11 ห้องผู้ป่วยจำลอง พร้อมอุปกรณ์

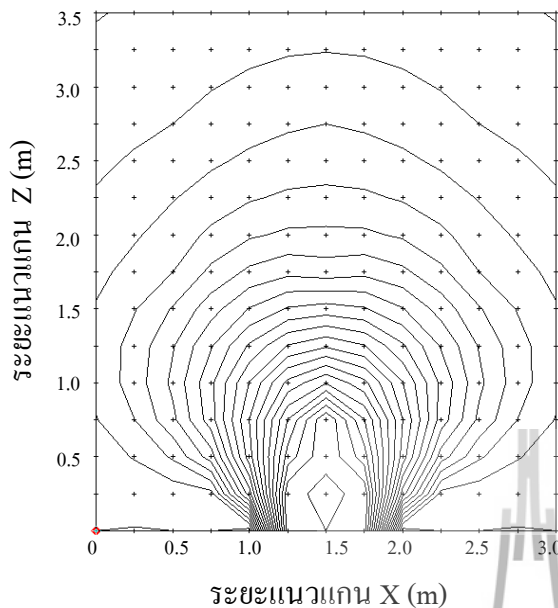
แนวตั้ง แนวแกน ZY ตามความยาวของห้อง จาก 3 ชั้น ( 0.5, 1.5, 2.75 m) เพิ่มเป็น 12 ชั้น (0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.75, และ 3.0 m)

ผลการวิเคราะห์เส้นระดับความเข้มรังสีนี้ ทำให้ได้ค่าความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ที่ไม่ได้ตรวจวัด พื้นที่ตั้งแต่ระดับต่ำกว่า 2.4 m ลงมา หรือบริเวณที่มีความเข้มรังสีมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดล่างที่เครื่องมือสามารถตรวจวัดได้ เช่น บริเวณมุมหรือผนังห้อง โดยเฉพาะระดับ 1.7 m ที่เป็นระดับความปลอดภัย และระดับ 2.1 m ขึ้นไปที่เป็นพื้นที่ฆ่าเชื้อโรค

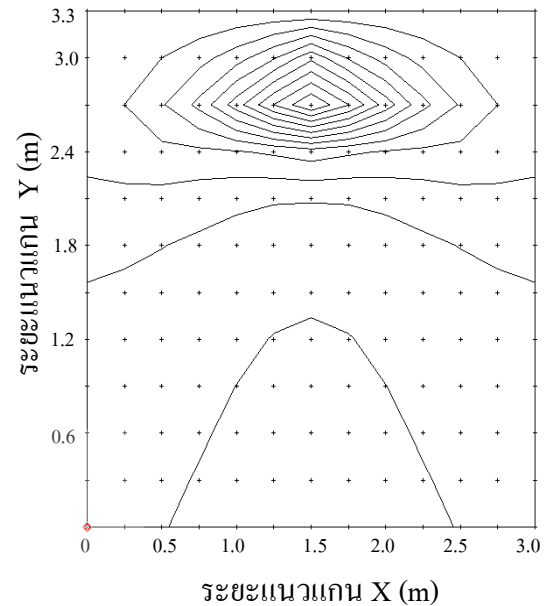
3) แบ่งพื้นที่ Upper zone ในแบบจำลองห้อง เป็น 2 ชั้น ๆ ละ 9 ห้อง รวม 18 ห้อง โดย

3.1) การแบ่งชั้น Upper zone เป็น 2 ชั้น ที่ระดับความสูงจากพื้น 2.1 m และ 2.7 m





รูปที่ 3.12 เส้นระดับความเข้มรังสี หลอด 8 W  
แนวแกน XZ ในแนวราบ ระดับ  
ความสูงจากพื้น 2.7 m



รูปที่ 3.13 เส้นระดับความเข้มรังสี หลอด 8 W  
แนวแกน XY ในแนวตั้งระยะห่าง  
จากผนังด้านหน้า 1.0 m

3.2) การแบ่งห้อง ในแต่ละชั้น เป็น 9 ห้อง โดยแบ่งจากแนวแกน X และ Z ออกจากแนวกึ่งกลางห้องด้านซ้ายและขวาด้านละ 0.5 m รวม 1 m

4) คำนวณค่าความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ในแต่ละห้อง ค่าเฉลี่ยรวมชั้นล่าง ค่าเฉลี่ยรวมชั้นบน และค่าเฉลี่ยรวม Upper zone

ความเข้มรังสี UVC ที่ได้จากการตรวจวัดและประมาณค่าดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณรังสีและอัตราการฆ่าเชื้อ ในหัวข้อที่ 3.2.5.3 และ 3.2.5.4 ต่อไป

### 3.2.4 การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

เป็นการศึกษาระยะเวลาการเคลื่อนที่และกระจายตัวของอนุภาคเชื้อวันโรคในระบบ UVGI ในห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อมด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ(Computational Fluid Dynamic; CFD) โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อวันโรคของระบบ UVGI และใช้แบบจำลองการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ (Turbulent modeling) มีขั้นตอนการศึกษาประกอบด้วย การทดสอบโปรแกรม ขั้นตอนการประมวลผลก่อน (การสร้างขอบเขตของปัญหา การสร้างเมช (Mesh) การกำหนดเงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น) ขั้นตอนการประมวลผล และขั้นตอนการประมวลผลหลัง ดังนี้

### 3.2.4.1 การทดลองโปรแกรม (Code Validation)

ความเชื่อถือได้และเสถียรภาพของโปรแกรมที่นำมาใช้จำลองผลระบบพลวัตเป็นปัจจัยที่สำคัญและต้องทำการทดลองความถูกต้อง ความละเอียดและความแม่นยำของผลจำลองที่ได้อย่างละเอียดก่อนที่จะนำมาใช้งาน การจำลองการเคลื่อนที่ของ อนุภาคเชื้อวัณโรค ในห้องแยกโรคผู้ป่วยติดเชื้อวัณโรค โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT ในงานวิจัยนี้ก็ได้รับการทดสอบเช่นเดียวกัน ซึ่งการทดสอบโปรแกรมดำเนินการโดยการทดสอบกับปัญหาที่คล้ายกับการศึกษานี้และเป็นปัญหาที่ได้มีการจำลองการไหลมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ จำนวน 2 ชุด ดังนี้

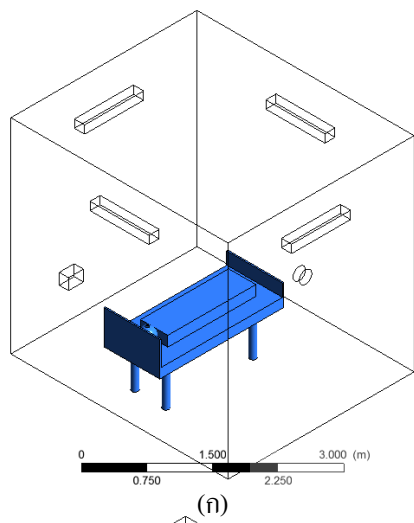
- 1) ปัญหาการไหล Backward step flow
- 2) ปัญหาการไหล 3 มิติ

โดยทำการทดสอบกับปัญหาดังกล่าวที่ละปัญหาตามขั้นตอนการจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT ที่จะใช้ในการจำลองในการศึกษานี้ แล้วเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากการทดสอบไปเทียบกับผลเฉลยอ้างอิงของปัญหานั้น ๆ ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า มีผลเฉลยที่สอดคล้องกัน ทั้งนี้ ไม่ได้แสดงผลการทดสอบไว้ในรายงานการศึกษานี้ แสดงว่าโปรแกรมมีความแม่นยำน่าเชื่อถือได้ สามารถใช้ในการจำลองการศึกษานี้ได้

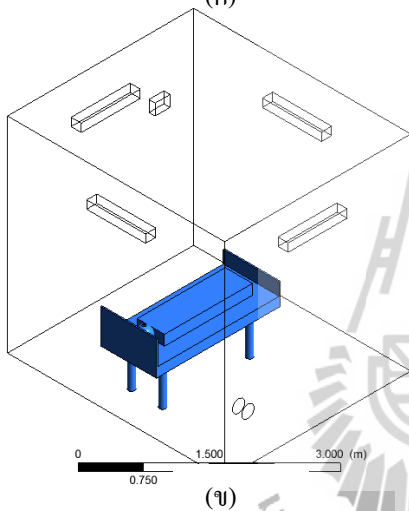
### 3.2.4.2 ขั้นตอนการประมวลผลก่อน

- 1) การสร้างขอบเขตของปัญหา (โดเมน) ทำการสร้างรูปทรงภายนอกของห้องแยกโรคผู้ป่วย ขนาดภายใน (กxขxต) 3.0 m x 3.5 m x 3.3 m เป็นห้องที่เกิดจากการแบ่งพื้นที่ของห้องพิเศษ ขนาด 3.0 m x 3.5 m x 3.3 m ออกเป็นห้องก่อนห้องแยกโรคผู้ป่วย ขนาดภายใน 1.5 m x 3.0 m x 3.3 m และพื้นที่ส่วนหลังเป็นห้องแยกโรคผู้ป่วย โดเมนในการศึกษานี้ มี 3 แบบ ตามตำแหน่งช่องระบายอากาศ ได้แก่ L/H, H/L และ H/H ดังรูปที่ 3.14

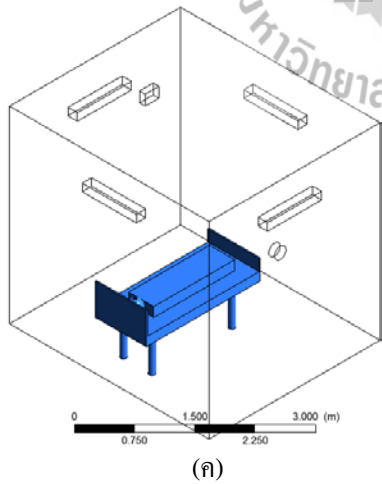
- 2) การสร้างเมช โดยเมชที่จะใช้ในการคำนวณสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อวัณโรคในการศึกษานี้เป็นเมชแบบไร้โครงสร้าง (Unstructured mesh) แบบ Tetrahedral เนื่องจากในการจำลองการศึกษามีรูปแบบการระบายอากาศ ที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะ คือ L/H, H/L และ H/H ดังนั้น ในการสร้างเมชจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การสร้างเมชเบื้องต้น (เมชแบบหยาบ) ก่อน แล้วจึงปรับเมชให้ได้เมชที่มีความละเอียดในบริเวณที่เป็นช่องจ่ายอากาศและช่องดูดอากาศออกให้มีเมชขนาดเล็กเพื่อให้มีความเหมาะสมในการคำนวณและได้ผลการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นต่อไป ผลการสร้างเมชแบบ Tetrahedral ของโดเมนแบบ L/H จำนวน 580,391 เซลล์ แบบ H/L จำนวน 578,469 เซลล์ และแบบ H/H จำนวน 579,763 เซลล์ ดังรูปที่ 3.15



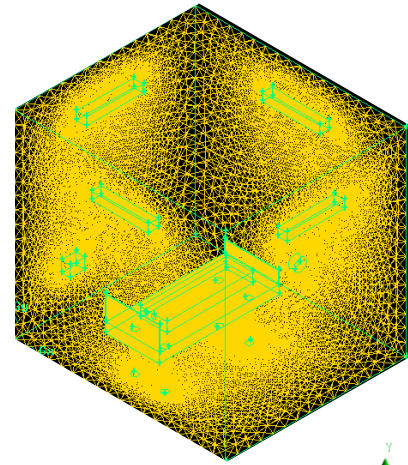
(ก)



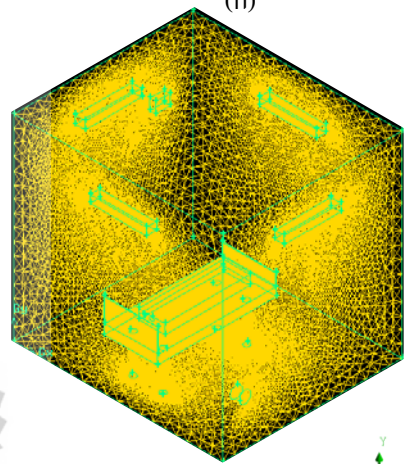
(ข)



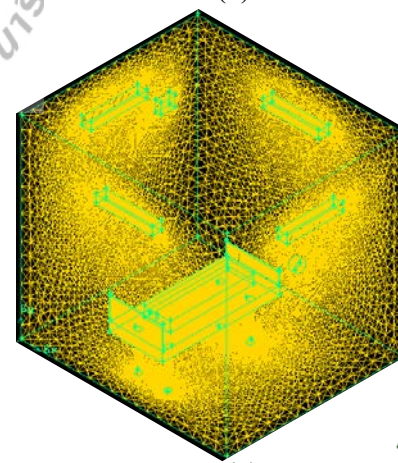
(ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.14 โดเมนห้องผู้ป่วยจำลองที่มีตำแหน่งช่อง  
ระบายอากาศ 3 รูปแบบ  
ก) แบบ L/H ข) แบบ H/L ค) แบบ H/H

รูปที่ 3.15 เมชห้องผู้ป่วยจำลองที่มีตำแหน่งช่อง  
ระบายอากาศ 3 รูปแบบ  
ก) แบบ L/H ข) แบบ H/L ค) แบบ H/H

3) การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการจำลองปัญหาการไหลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ได้ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบการจำลองดังกล่าวที่ ค.1.4 ส่วนโดเมนห้องแยกโรคผู้ป่วยมีการติดตั้งช่องจ่ายอากาศเข้าที่ผนังหน้าห้องและช่องดูดอากาศออกที่ผนังหลังห้อง กำหนดเงื่อนไขขอบของพื้นผิวผนัง ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบของพื้นผิวผนัง

ตำแหน่ง ช่องระบายอากาศ	เงื่อนไขขอบของพื้นผิวผนัง					
	ด้านหน้า	ด้านซ้าย	ด้านขวา	ด้านหลัง	ด้านบน	ด้านล่าง
ช่องจ่ายอากาศ-ด้านหน้า	Inlet	Wall- no slip	Wall- no slip	Outlet	Wall- no slip	Wall- no slip
ช่องดูดอากาศ-ด้านหลัง						

ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่สำคัญคือ น้ำหนักเชื้อวัณโรค  $10^{-12}$  g (Davis, Dulbecco, Eisen, Ginsberg, 1973) จำนวน droplet และอนุภาคเชื้อวัณโรคที่ถูกไอออกมาด้วยความเร็วต้น 6-22 m/s ในอัตราต่อครั้ง (0.4 L/s) ดังตารางที่ 3.6 และมีค่าเฉลี่ยการไอ 77 ครั้ง/ 5 min (Fenelly et al., 2004) โดยมีแหล่งกำเนิดอยู่ที่กลางห้องสูงจากพื้น 0.8 m ซึ่งเป็นตำแหน่งการนอนไอของผู้ป่วย กำหนดสภาวะคงที่ อุณหภูมิห้อง 24-26 °C ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 40 - 60

ตารางที่ 3.6 การกระจายจำนวนตามขนาดของอนุภาคเชื้อวัณโรคที่ถูกไอออกมาต่อครั้ง

(0.4 L/s) (M.P.Wan et al., 2007)

ขนาดอนุภาคเริ่มต้น ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน (อนุภาค)	จำนวนต่อปริมาตร ( $\text{cm}^{-3}$ )	ขนาด droplet nuclei ( $\mu\text{m}$ )
1.5	500	1.3	0.6
3	2,900	7.3	1.5
6	9,700	24.3	2.4
12	16,000	40	4.7
20	8,700	21.8	7.8
28	4,200	10.5	11
36	2,400	6	14.1
45	1,100	2.8	17.6
62.5	1,400	3.5	24.5
87.5	850	2.1	34.3
112.5	480	1.2	44.2
137.5	380	1	54
175	350	0.9	68.5
225	290	0.7	88.1
375	340	0.9	146.8
750	120	0.3	293.6
1500	20	0.1	587.2

ในการศึกษานี้ ได้จัดกลุ่มขนาดอนุภาคตามขนาด อนุภาคเชื้อวัณโรค หรือ Estimated nucleus จากตารางที่ 3.6 ซึ่งเป็นขนาดที่ลดลงภายหลังจากน้ำลายที่ห่อหุ้มอนุภาคไว้ได้ระเหยออกไปแล้ว โดยจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ อนุภาคขนาดเล็ก (0.6 – 20.0  $\mu\text{m}$ ) และอนุภาคขนาดใหญ่ (>20.0  $\mu\text{m}$ ) ดังตารางที่ 3.7 ทั้งนี้ ได้คัดเลือกเฉพาะอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้นที่ใช้ในการจำลองในการศึกษา (ดังแสดงขั้นตอนการคัดเลือกไว้ในภาคผนวก ค หัวข้อ ค.1.1) เนื่องจากเป็นขนาดอนุภาคที่แสดงพฤติกรรมของอนุภาคแขวนลอยในอากาศ (airborne particle) ที่สามารถเข้าสู่ร่างกายทางลมหายใจ เข้าถึงทางเดินหายใจส่วนปลายและก่อให้เกิดพยาธิสภาพต่อร่างกายได้ ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่จะตกลงสู่พื้นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก

**ตารางที่ 3.7** การกระจายจำนวนตามขนาด อนุภาคเชื้อวัณโรค ที่ถูกไอลออกมาต่อวินาทีที่ใช้ในการจำลองในการศึกษา (ดัดแปลงจาก M.P.Wan et al., 2007)

กลุ่มขนาดอนุภาคเชื้อวัณโรค	ขนาดอนุภาคเชื้อวัณโรค ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน (อนุภาค)	ความเข้มข้น ( $\text{cm}^{-3}$ )	อัตรา (L/s)	การคัดเลือก
ขนาดเล็ก	< 5	29,100	29.56	0.0948	ขนาดศึกษา
	6-20	16,400	16.07	0.0516	ขนาดศึกษา
ขนาดใหญ่	> 20	4,230	4.19	0.0135	-
รวม		49,730	49.82	0.1599	-

### 3.2.4.3 ขั้นตอนการประมวลผล

ในการศึกษานี้ประมวลผลโดยใช้วิธีไฟไนต์โวลุ่ม (Finite volume) โดยการแปลงสมการควบคุมการไหลให้เป็นสมการแบบพีชคณิตเพื่อให้สามารถนำไปคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ได้ โดยใช้สมการหลักของ Turbulent modeling และสมการที่สำคัญ ดังนี้

1) ใช้สมการ the species convection-diffusion equation และใช้ The Lagrangian force balance equation ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของ droplet จากการหายใจ ดังสมการ (3-3) ดังนี้

$$\frac{du_{p,i}}{dt} = \frac{18\mu f_D}{\rho_p D_p^2 C_c} (u_i - u_{p,i}) + g \quad (3-3)$$

2) การเคลื่อนที่ของ droplet เคลื่อนที่ด้วย eddy โดยใช้เวลาเคลื่อนที่อย่างน้อยด้วย The eddy life time ( $T_e$ ) หรือ The eddy crossing time

- The eddy life time ( $T_e$ ) ใน homogeneous and isotropic turbulences หาได้จากสมการ (3-4) (Graham and James, 1996)

$$T_e = 2T^L \quad (3-4)$$

โดย Lagrangian integral time scale ( $T^L$ ) หาได้จาก สมการ (3-5)

$$T^L = C_L \frac{k}{\varepsilon} \quad (3-5)$$

$C_L$  คือ the empirical integral time-scale constant

- The eddy crossing time ( $t_p$ ) ของ droplet หาได้จาก สมการ (3-6)

$$\tau_{\text{cross}} = -\tau_p \ln \left[ 1 - \left( \frac{L_e}{\tau_p |u - u_p|} \right) \right] \quad (3-6)$$

เมื่อ  $L_e$  (the eddy length scale) ใน homogeneous and isotropic turbulences หาได้จากสมการ (3-7) (Graham and James, 1996)

$$L_e = 2L^E \quad (3-7)$$

โดย The Eulerian integral length scale ( $L^E$ ) หาได้จากสมการ (3-8) (Lu, 1995)

$$L^E = T^L \sqrt{u'^2} / 0.36 \quad (3-8)$$

สรุประยะเวลาที่ได้จากการคำนวณ มีดังนี้ 1) ค่า The eddy life time เป็นเวลาที่อนุภาคเชื้อเพลิง ไรบเคลื่อนที่สัมผัสกับรังสี UVC นำไปใช้คำนวณหาค่าปริมาณรังสี UVC ในขั้นตอนต่อไป 2) ค่า The eddy crossing time เป็นเวลาการเคลื่อนที่ของฟลักซ์ อนุภาคเชื้อเพลิง ไรบ ทั้งก่อนที่เคลื่อนผ่าน UVGI จะนำไปใช้คำนวณหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของฟลักซ์ อนุภาคเชื้อเพลิง ไรบ แล้วใช้ในการเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากการจำลองด้วย ANSYS FLUENT กับจากการตรวจวัดในห้องผู้วิจัยจำลองต่อไป

#### 3.2.4.4 ขั้นตอนการประมวลผลหลัง

เป็นขั้นตอนการแสดงผลการคำนวณจากชุดข้อมูลดิบที่ได้มาจากการแก้

สมการไฟไนต์โวลุ่ม ซึ่งจะสามารถแสดงในรูปของเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของอนุภาคแสดงได้ตามอายุของอนุภาคในห้องผู้ป่วยจำลอง ดังรูปที่ 3.16

### 3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลและแปลผล

#### 3.2.5.1 การวิเคราะห์ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อไวรัสโรคใน Upper zone

- 1) จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อไวรัสโรคตามแผนการทดลอง
- 2) สุ่มเลือกอนุภาคฯ อย่างง่ายเพื่อติดตามการเคลื่อนที่ จำนวน 13 อนุภาค ให้มีระยะเวลา ในช่วงเวลาเฉลี่ย ดังนี้

2.1) Incomplete (ยังคงเคลื่อนที่อยู่ในห้อง) = 10 อนุภาค

2.2) Escape (หลุดออกจากห้องด้วยระบบระบายอากาศ) = 3 อนุภาค

3) แบ่งพื้นที่ Upper zone โมเดลห้องจำลอง เป็น 2 ชั้น รวม 18 ห้อง ดังนี้

3.1) การแบ่ง Upper zone เป็น 2 ชั้น ความสูงจากพื้น 2.1 m และ 2.7 m

3.2) การแบ่งห้อง ในแต่ละชั้น เป็น 9 ห้อง โดย แบ่งจากแนวแกน X

และ Z ออกจากแนวกึ่งกลางห้องด้านซ้ายและขวาด้านละ 0.5 m รวม 1 m

4) จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคฯ บันทึกภาพเป็นไฟล์ข้อมูล 2 ชนิด ต่อ 1 ขนาดอนุภาค ดังรูปที่ 3.16

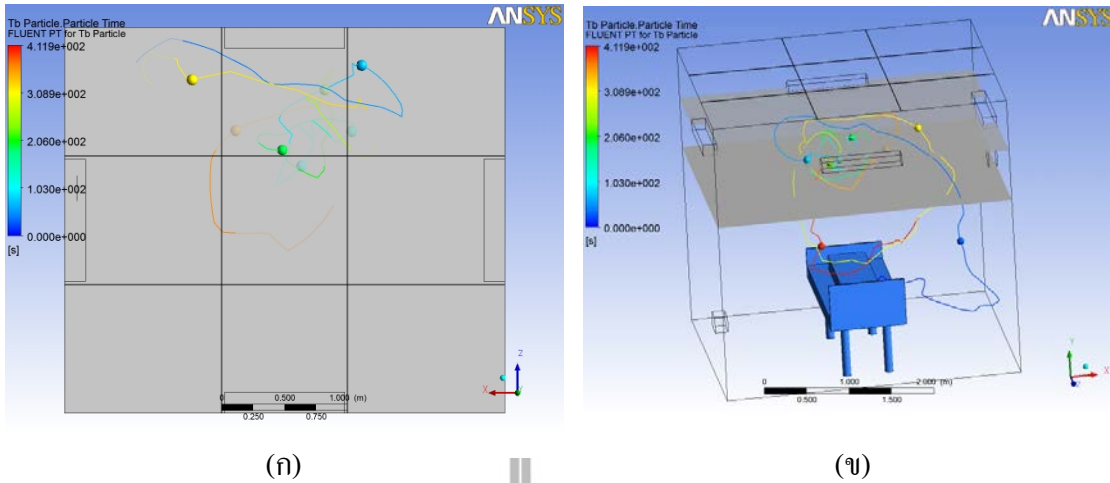
4.1) ไฟล์วิดีโอ 2 ไฟล์ แบ่งเป็น

- ภาพแนวแกน XZ ใช้ประกอบการหาตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน Upper zone แต่ละห้อง
- ภาพ Isometric ใช้ตรวจสอบจำนวนภาพทั้งหมดที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone

4.2) ไฟล์ภาพนิ่ง จำนวน Frame (ภาพ) 24 ภาพ/sec รวม 1,000 ภาพ สร้างขึ้นพร้อมกับไฟล์วิดีโอ ใช้ประกอบการคำนวณเวลาที่อนุภาคฯ เคลื่อนที่ผ่าน Upper zone แต่ละห้อง

5) คำนวณระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน Upper zone ในแต่ละช่อง จากจำนวนภาพเปรียบเทียบกับจำนวนภาพทั้งหมด หาค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาค

6) ตรวจสอบค่า Covariance หรือผลหารของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(SD) ด้วยค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) ของเวลาของอนุภาคภาพรวม หากเวลาของอนุภาคใดที่มีผลทำให้ค่า Covariance ภาพรวมมากกว่า 1 จะสุ่มเลือกอนุภาคใหม่แทน



รูปที่ 3.16 ภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาค ในโดเมนห้องจำลองผู้ป่วย

(ก) ภาพแนวแกน XZ (ข) ภาพ Isometric

7) บันทึกข้อมูลลงในตารางบันทึกข้อมูล เพื่อนำไปประกอบการคำนวณปริมาณรังสี UVC ในหัวข้อ 3.2.5.3 ต่อไป

### 3.2.5.2 การเปรียบเทียบข้อมูล

การศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบข้อมูลค่าความเร็วของอากาศจากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT กับค่าความเร็วอากาศจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลอง โดยใช้หลักการทางสถิติในการทดลองสมมติฐานความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้ง 2 ชุดแบบจับคู่ ด้วยสถิติ Paired t-Test ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยกำหนดค่าระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือระดับความเชื่อมั่น 95% โดยในการเปรียบเทียบข้อมูลค่าความเร็วนี้เพื่อใช้ในการสรุปเวลาที่อนุภาคเชื้อวัณโรคสัมผัสรังสี UVC ในขณะที่เคลื่อนที่อยู่ในพื้นที่รังสีในส่วนบนของห้องซึ่งได้จากการจำลองด้วย ANSYS FLUENT กับเวลาที่ได้จากการตรวจวัดจริงในห้องผู้ป่วยจำลอง แต่เนื่องจากไม่สามารถตรวจวัดระยะเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่ได้โดยตรง จึงใช้วิธีการพิจารณาว่า อนุภาคเชื้อวัณโรคมีการเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการไหลของอากาศภายในห้อง ดังนั้น อนุภาคเชื้อวัณโรคจึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วในการไหลของอากาศ ซึ่งจะทำให้สามารถสรุปได้ว่า เวลาที่อนุภาคเชื้อวัณโรคเคลื่อนที่จึงเท่ากับเวลาการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลค่าความเร็วแทนค่าเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อวัณโรคที่ระดับความสูงจากพื้น 1.7 m เพียงระนาบเดียว จำนวน 5 จุด/การทดลอง ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ในการทดลองสมมติฐานนี้มีสมมติฐานหลัก คือ  $H_0$ : ค่าเฉลี่ยประชากรของความเร็วการไหลของอากาศจากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS



FLUENT กับค่าความเร็วการไหลของอากาศจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลอง มีค่าไม่แตกต่างกัน หรือ  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$  และมีสมมติฐานแย้ง คือ  $H_A: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$  โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 และมีเขตปฏิเสธ  $H_0$  ถ้า P-Value < 0.05

**การพิจารณาผลการเปรียบเทียบข้อมูลดังกล่าวข้างต้นแบ่งเป็นสองกรณี ดังนี้**

1) กรณีผลการเปรียบเทียบข้อมูลพบว่าค่าความเร็วการไหลของอากาศจากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT กับค่าความเร็วการไหลของอากาศจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลองไม่มีความแตกต่างกัน ย่อมสรุปได้ว่าข้อมูลจากการทดลองมีความน่าเชื่อถือ และมีความมั่นใจในการนำไปใช้ประโยชน์หรือใช้งานได้จริง

2) กรณีผลการเปรียบเทียบข้อมูลพบว่าค่าความเร็วการไหลของอากาศจากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT กับค่าความเร็วการไหลของอากาศจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลองมีความแตกต่างกัน ต้องมีการตรวจสอบย้อนกลับ หาสาเหตุที่ทำให้ได้ข้อมูลแตกต่างกัน ตั้งแต่การกำหนดพารามิเตอร์ วัสดุอุปกรณ์ วิธีการจำลอง วิธีการตรวจวัด แล้วเปรียบเทียบข้อมูลใหม่อีกครั้ง หากผลการเปรียบเทียบข้อมูลยังคงมีความแตกต่างกันเช่นเดิม ในขั้นของการสรุปผลการศึกษา ต้องอธิบายถึงเหตุผลของความแตกต่างและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงและการนำไปใช้ประโยชน์

### 3.2.5.3 การคำนวณปริมาณรังสี UVC และสรุปปริมาณรังสีสูงสุด

ปริมาณรังสี UVC เป็นผลคูณของความเข้มรังสี UVC (I) ที่ได้จากการตรวจวัดในการทดลองจริงตามข้อ 3.2.3 กับเวลาสัมผัสกับรังสี UVC (t) ของอนุภาคเชื้อวัน โรคที่ได้จากการจำลอง ตามข้อ 3.2.4 ดังสมการ (3-9) (Lytle & Sagripanti, 2005)

$$UV_{Dose} = It \quad (3-9)$$

โดยที่  $UV_{Dose}$  = ปริมาณรังสี UVC ( $W.s/m^2$ )

I = ความเข้มรังสี UVC ( $W/m^2$ ) จากการตรวจวัดจริง

t = ระยะเวลาสัมผัสรังสี UVC (s) จากการจำลองด้วย FLUENT

ปริมาณรังสี UVC สูงที่สุดที่ต้องการในการศึกษานี้ คือ ค่าปริมาณรังสี UVC ที่มีค่าสูงที่สุดที่ได้จากการคำนวณ ในข้อ 3.2.5.3

### 3.2.5.4 การคำนวณอัตราการฆ่าเชื้อของระบบ UVGI

การประเมินอัตราการฆ่าเชื้อวันโรค (Killing Rate) ของระบบ UVGI ในการศึกษานี้ใช้วิธีประมาณจากปริมาณรังสี UVC แทนการประเมินจากอัตราการตายหรืออัตราการรอดของเชื้อวันโรคโดยตรง โดยใช้ปริมาณรังสี UVC ที่ได้จากข้อ 3.2.5.3 คำนวณร่วมกับค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของเชื้อวันโรค (Z) ที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งในสภาวะเดียวกันหรือใกล้เคียงกันแต่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศต่างกัน แต่ค่า k จะมีค่าเท่า ๆ กัน (Noakes, Beggs, & Sleight, 2004b) ดังนั้น ในการประเมินอัตราการฆ่าเชื้อวันโรค killing rate (KR) ของระบบจึงคำนวณได้ตามสมการ (3-10)

$$KR = (1 - e^{-Z \cdot UV_{Dose}}) \times 100 \quad (3-10)$$

โดยที่  $Z$  = ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของเชื้อ ( $m^2/J$ )  
 $UV_{Dose}$  = ปริมาณรังสี UVC ( $W.s/m^2$ )

### 3.2.6 สรุปรูปแบบการระบายอากาศและสภาวะหลอด UVC ที่เหมาะสม

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามวัตถุประสงค์ทั้ง 2 ข้อ จะนำมาสรุปรูปแบบการระบายอากาศและสภาวะของหลอด UVC ที่ให้ปริมาณรังสี UVC สูงที่สุด ซึ่งเป็นปริมาณรังสี UVC ที่ได้จากข้อ 3.2.5.3 โดยจะนำมาพิจารณา

- 1) รูปแบบการระบายอากาศที่เหมาะสม ได้แก่ ตำแหน่งช่องระบายอากาศและอัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่ทำให้ได้ระยะเวลาสัมผัสรังสี UVC ใน Upper zone นานที่สุดและมีความปลอดภัย
- 2) สภาวะของหลอด UVC ที่เหมาะสม เป็นสภาวะของหลอด UVC ด้านกำลังไฟจำนวนและตำแหน่งการติดตั้งหลอด ที่ทำให้ได้ความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone สูงที่สุดและมีความปลอดภัย

### 3.2.7 การปรับรูปแบบห้องโดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

เป็นการทดลองขยายผลจากการศึกษาโดยเพิ่มการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT ในห้องที่มีรูปแบบแตกต่างออกไปจากการออกแบบในการทดลอง คือ เพิ่มการศึกษาในห้องที่มีระบบระบายอากาศเป็นแบบห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ คือ แบบ HL แต่ตำแหน่งพัดลมดูดอากาศจะเปลี่ยนตำแหน่งไปอยู่บริเวณหัวเตียงผู้ป่วย จุดกึ่งกลางผนังด้านขวาพื้นที่ได้ขอบหน้าต่างด้านขวา เพื่อดูความสามารถในการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้งาน

### 3.3 เครื่องมือตรวจวัดและวัสดุอุปกรณ์

#### 3.3.1 เครื่องมือตรวจวัด

1) การตรวจวัดความเร็วลม (Air velocity meter) Model VelociCalc<sup>®</sup> Model-9565P ผลิตภัณฑ์ของ TSI-USA ช่วงการวัด Hot wire 0-50 m/s (accuracy±3%) Pitot Tube 1.27-78.7 m/s (accuracy±3%) การสอบเทียบครั้งสุดท้าย ต.ค. 2555

2) การตรวจวัดความเข้มรังสี UVC (UVC light meter) Model UVC-254SD ผลิตภัณฑ์ของ LT-Taiwan ช่วงการวัดที่ 1 : 2 mW/cm<sup>2</sup> 1.999-0.001 mW/cm<sup>2</sup> ช่วงการวัดที่ 2 : 20 mW/cm<sup>2</sup> 2-20 mW/cm<sup>2</sup> (accuracy+4% Full Scale+2 digits) การสอบเทียบครั้งสุดท้าย ต.ค. 2555

3) การตรวจวัดสภาวะแวดล้อม

- เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิห้อง (Thermometer) Model QUESTemp<sup>°</sup> 32 ผลิตภัณฑ์ของ 3M-USA ช่วงการวัด 0-90% (accuracy ± 5 °C ระหว่าง 0 °C -120 °C) การสอบเทียบครั้งสุดท้าย พ.ย. 2555

- เครื่องตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์ Model VelociCalc<sup>®</sup> Model-9565P ผลิตภัณฑ์ของ TSI - USA ช่วงการวัด 0-90 % (accuracy ± 3 %RH) การสอบเทียบครั้งสุดท้าย ต.ค. 2555

#### 3.3.2 โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD Program)

โปรแกรม ANSYS FLUENT 14

#### 3.3.3 วัสดุอุปกรณ์

1) ระบบแสงสว่าง โคมไฟชนิดโคมปิดในห้อง Isolation room จำนวน 1 ชุด (หลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 36 W จำนวน 2 หลอด) และโคมไฟหัวเตียงผู้ป่วย จำนวน 1 ชุด (หลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 18 W จำนวน 1 หลอด)

2) เตียงผู้ป่วย ขนาด (ก x ย x ส) 90 cm x 200 cm x 65 cm จำนวน 1 เตียง

3) อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล เป็นอุปกรณ์ป้องกันการสัมผัสกับรังสี UVC ได้แก่ แวนตานิรภัยป้องกัน UVC ชุดและถุงมือป้องกันรังสี UVC

4) เครื่องทำไอหมอก ขนาด 1-5 μm ใช้ในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องผู้ป่วยจำลองให้อยู่ในช่วงร้อยละ 40-60

5) เครื่องปรับอากาศขนาด 18,000 BTU ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องให้อยู่ระหว่าง 24-26 °C

6) ปืนยิงลำแสงเลเซอร์

7) กล้อง Web-cam

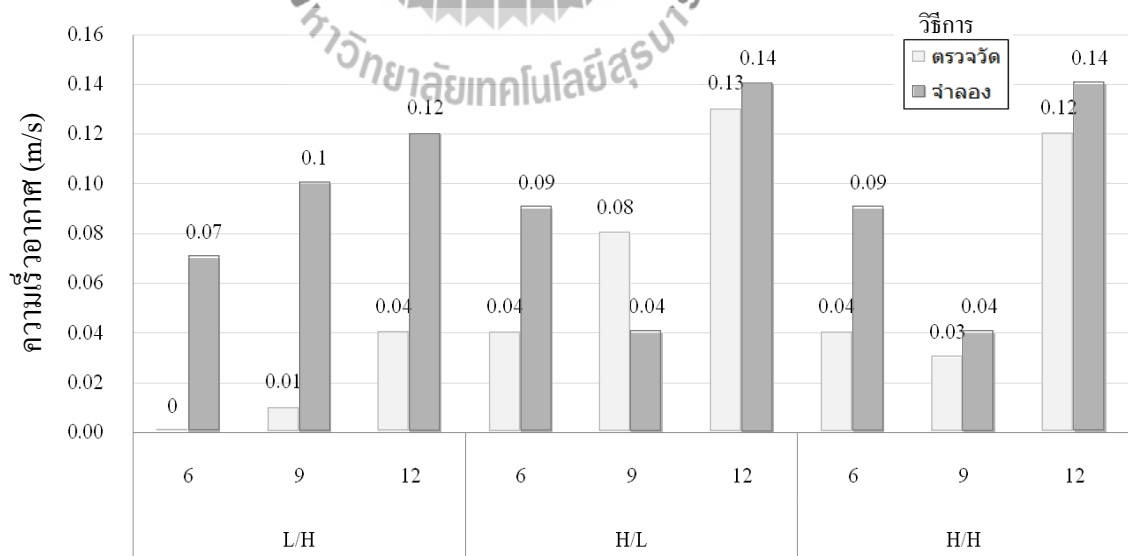
8) คอมพิวเตอร์แบบพกพา

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 ความเร็วของอากาศในห้องผู้ป่วยจำลองและในแบบจำลอง

ระบบการระบายอากาศของห้องผู้ป่วยจำลองที่สร้างขึ้น และของแบบจำลองห้องผู้ป่วยที่ใช้ในการจำลองด้วย ANSY FLUENT ในการศึกษาครั้งนี้ มีการแปรผันตำแหน่งช่องระบายอากาศ จำนวน 3 รูปแบบ คือ L/H, H/L และ H/H และอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 3 ค่า คือ 6, 9, 12 ACH ดำเนินการตรวจวัดความเร็วของอากาศ ที่ระดับความสูง 1.7 m จำนวน 5 จุด/การทดลอง (ตำแหน่งการตรวจวัดแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 บทที่ 3) มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วของอากาศจากการตรวจวัด และการจำลอง มีการเพิ่มและลดลงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยความเร็วของอากาศจากการตรวจวัดเกือบทุกรูปแบบตำแหน่งช่องระบายอากาศมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าจากการจำลอง ยกเว้นตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 9 ACH เท่านั้น ที่พบว่าความเร็วของอากาศ จากการตรวจวัด สูงกว่าจากการจำลอง โดยมียค่าเฉลี่ย 0.08 m/s และ 0.04 m/s ตามลำดับ ส่วนที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 12 ACH นั้น พบว่ามีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน คือ 0.13 m/s และ 0.14 ตามลำดับ โดยแยกประเด็นพิจารณาได้ดังนี้



อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) และตำแหน่งช่องระบายอากาศ

รูปที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความเร็วของอากาศจากการตรวจวัดกับการจำลอง

#### 4.1.1 ความเร็วของอากาศจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลอง

ความเร็วของอากาศจากการตรวจวัดฯ ในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H และ H/L มีทิศทางเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศสูงขึ้น แต่ในแบบ H/H จะมีทิศทางลดลงเมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศเพิ่มขึ้นจาก 6 ACH เป็น 9 ACH และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศเป็น 12 ACH ความเร็วของอากาศมีค่าต่ำที่สุด พบในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 0.00 m/s ส่วนความเร็วของอากาศสูงสุด พบในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 12 ACH มีค่าเฉลี่ย 0.13 m/s

#### 4.1.2 ความเร็วของอากาศจากการจำลองด้วย ANSYS FLUENT

ความเร็วของอากาศจากการจำลองฯ ในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H มีทิศทางเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศสูงขึ้น แต่ในแบบ H/L และ H/H จะมีทิศทางลดลงเมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศเพิ่มขึ้นจาก 6 ACH เป็น 9 ACH และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศเป็น 12 ACH ความเร็วของอากาศมีค่าต่ำที่สุด พบในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L และ H/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 9 ACH มีค่าเฉลี่ย 0.04 m/s ส่วนความเร็วของอากาศสูงสุด พบในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 12 ACH มีค่าเฉลี่ย 0.14 m/s

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความเร็วของอากาศจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลองกับการจำลอง ในแบบจำลองแยกตามตำแหน่งช่องระบายอากาศและอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ

ตำแหน่ง ช่องระบาย อากาศ	อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH)	ค่าเฉลี่ยความเร็วของอากาศ (m/s)		P- Value	ข้อสรุป
		จากการ ตรวจวัดฯ	จากการ จำลองฯ		
L/H	6	0.00	0.07	0.010*	แตกต่างกัน
	9	0.01	0.10	0.009*	แตกต่างกัน
	12	0.04	0.12	0.004*	แตกต่างกัน
H/L	6	0.04	0.09	0.134	ไม่แตกต่างกัน
	9	0.08	0.04	0.570	ไม่แตกต่างกัน
	12	0.13	0.14	0.944	ไม่แตกต่างกัน
H/H	6	0.04	0.09	0.113	ไม่แตกต่างกัน
	9	0.03	0.04	0.030*	แตกต่างกัน
	12	0.12	0.14	0.775	ไม่แตกต่างกัน

\* ระดับนัยสำคัญ 0.5

#### 4.1.3 การทดสอบความแตกต่างของความเร็วของอากาศจากการตรวจวัดฯ กับจากการจำลองในแบบจำลอง

ทำการทดสอบแบบ Paired t-Test ซึ่งมีการทดสอบสมมติฐาน คือ ความแตกต่างของอัตราการไหลอากาศจากการตรวจวัดฯ และการจำลองฯ ณ ตำแหน่งเดียวกันจำนวน 5 จุด ที่ทำการวิเคราะห์หาค่าเท่ากับศูนย์ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 สรุปผลการศึกษา ดังตารางที่ 4.1 โดยพบว่า ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H ทุกอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ มีความแตกต่างกันของความเร็วของอากาศอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value ของอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH, 9 ACH และ 12 ACH เท่ากับ 0.01, 0.009 และ 0.004 ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H พบว่า มีเฉพาะของอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 9 ACH เท่านั้นที่มีความแตกต่างกันของความเร็วของอากาศอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.030 โดยความเร็วของอากาศจากการจำลองฯ สูงกว่าจากการตรวจวัดฯ เพียงเล็กน้อย แต่สำหรับตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L ทุกอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ ไม่พบความแตกต่างกันของความเร็วของอากาศอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างความเร็วจาก 2 วิธีดังกล่าว พบว่า หากช่องระบายอากาศทางเข้าเป็นด้านบน คือ H/L และ H/H ผลการทดสอบ 5 ใน 6 กรณี สรุปว่าความเร็วอากาศไม่แตกต่างกัน และในกรณีที่เหลือ 1 กรณี ก็มีค่า P-value ค่อนข้างสูง คือ 0.030 ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าค่าความเร็วอากาศจากแบบจำลองสามารถใช้แทนค่าจากการตรวจวัดได้โดยไม่มีข้อผิดพลาดมากนัก เมื่อพิจารณาช่องระบายอากาศทางเข้าเป็นด้านล่าง คือ L/H ผลการทดสอบสรุปว่า ความเร็วอากาศมีความแตกต่างกัน อาจเป็นเพราะอากาศที่เข้าด้านล่างมีการไหลผ่านสิ่งกีดขวางมากกว่า ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างผลการทำนายและการตรวจวัดมากกว่า อย่างไรก็ตาม ค่าจากการทำนายและค่าจากการตรวจวัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าจากการทำนายมีค่าสูงกว่า

จากผลการทดสอบดังกล่าว สรุปได้ว่า การใช้ค่าความเร็วอากาศจากแบบจำลองในการคำนวณขั้นตอนต่อไปของการศึกษา อาจมีความคลาดเคลื่อนเฉพาะในกรณีช่องระบายอากาศแบบ L/H โดยเป็นความคลาดเคลื่อนในทางที่มีค่ามาก และอาจมีผลให้เวลาและประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคคลาดเคลื่อนในทางที่มีค่าน้อยลงซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนในทางที่ปลอดภัย (conservative) โดยจะทำการอภิปรายถึงข้อจำกัดนี้ในผลการศึกษาอื่น ๆ และในบทสรุปต่อไป

#### 4.2 ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อไวรัสโรคในห้องผู้ป่วยจำลอง

ในการศึกษานี้ สนใจศึกษาระยะเวลาเฉพาะช่วงที่อนุภาคฯ เป็น nuclei ขนาดไม่เกิน 20  $\mu\text{m}$  เนื่องจากเป็นขนาดของอนุภาคขนาดเล็กที่มีพฤติกรรมเป็น airborne particle ในขณะที่เคลื่อนที่ผ่าน

พื้นที่สนามรังสี UVC ใน Upper zone ระดับความสูงจากพื้นตั้งแต่ 2.1 m ขึ้นไป ที่เป็นผลจากการแปรผันตำแหน่งช่องระบายอากาศ และอัตราการแลกเปลี่ยน โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ANSYS FLUENT ด้วย Turbulent flow model มีผลการศึกษาดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 ดังนี้

#### 4.2.1 ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อไวรัสโรคกับขนาดอนุภาค

พบว่า ระยะเวลาที่อนุภาคฯ เคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone ในทุกตำแหน่งช่องระบายอากาศ จะแปรผันตามขนาดอนุภาคฯ ที่ใหญ่ขึ้น ดังนี้ เมื่อปรับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศเป็น 6, 9 และ 12 ACH ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่อยู่ใน Upper zone ในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H ของอนุภาคฯ ขนาดไม่เกิน 5  $\mu\text{m}$  มีค่าเท่ากับ 97.12 s, 67.56 s และ 60.10 s ตามลำดับ และเมื่อขนาดอนุภาคฯ ใหญ่ขึ้นเป็น 6-20  $\mu\text{m}$  ระยะเวลาฯ จะนานขึ้นมีค่าเท่ากับ 122.86 s, 70.44 s และ 64.31 s ตามลำดับ ส่วนในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่อยู่ใน Upper zone ของอนุภาคฯ ขนาดไม่เกิน 5  $\mu\text{m}$  มีค่าเท่ากับ 61.40 s, 56.60 s และ 46.03 s ตามลำดับ ส่วนขนาดอนุภาค 6-20  $\mu\text{m}$  ระยะเวลาฯ จะนานขึ้นมีค่าเท่ากับ 72.47 s, 59.79 s และ 51.05 s ตามลำดับ สำหรับตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H นั้น ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่อยู่ใน Upper zone ของอนุภาคฯ ขนาดไม่เกิน 5  $\mu\text{m}$  เท่ากับ 56.80 s, 48.73 s และ 41.24 s ตามลำดับ ส่วนขนาดอนุภาค 6-20  $\mu\text{m}$  ระยะเวลาฯ จะนานขึ้นมีค่าเท่ากับ 65.72 s, 51.88 s และ 45.09 s ตามลำดับ เช่นเดียวกัน

#### 4.2.2 ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อไวรัสโรคกับตำแหน่งช่องระบายอากาศ

ในทุกอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและขนาดอนุภาคฯ ตำแหน่งช่องระบายอากาศที่ทำให้อนุภาคฯ เคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone เป็นเวลานานมากที่สุด คือ แบบ L/H รองลงมาได้แก่ แบบ H/L ส่วนแบบ H/H เป็นที่ทำให้อนุภาคฯ เคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone เป็นเวลาดสั้นที่สุด ดังนี้ ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H H/L และ H/H ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่อยู่ใน Upper zone เมื่อปรับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศเป็น 6 ACH มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 105.74 s, 66.94 s และ 61.28 s ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศเป็น 9 ACH มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 69.00 s, 58.19 s และ 50.31 s ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศเป็น 12 ACH มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 62.21 s, 48.54 s และ 43.17 s ตามลำดับ

#### 4.2.3 ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อไวรัสโรคกับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ

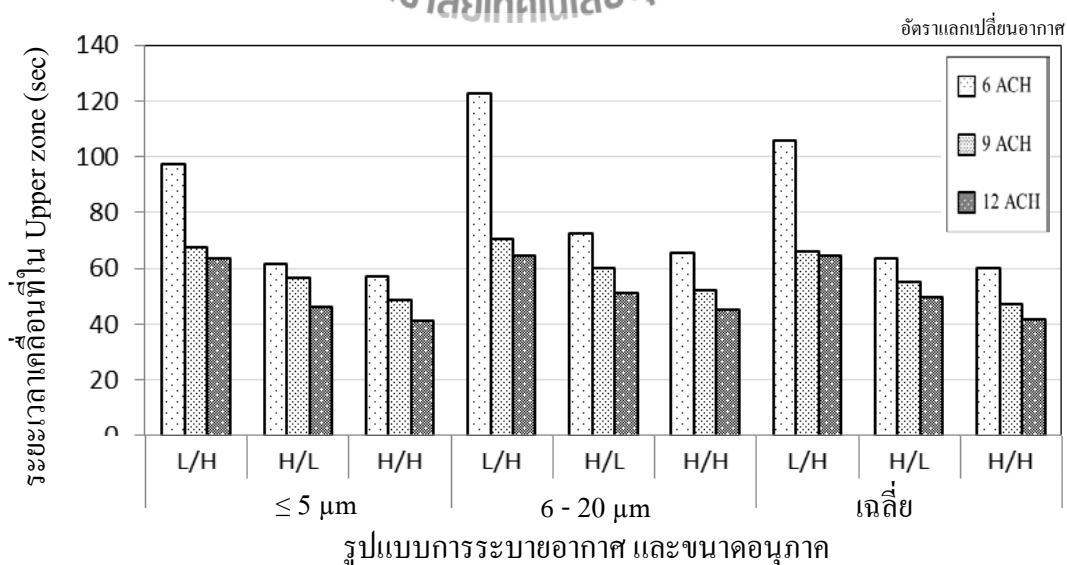
ระยะเวลาที่อนุภาคฯ เคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone แปรผกผันกับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศในทุกตำแหน่งช่องระบายอากาศ กล่าวคือ เมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศสูงขึ้น ระยะเวลาอนุภาคฯ เคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone จะมีค่าลดลง ดังนี้ เมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศสูงขึ้น จาก 6 เป็น 9 และ 12 ACH ตามลำดับ ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่อยู่ใน Upper zone ตำแหน่งช่องระบายอากาศ

แบบ L/H มีค่าเฉลี่ยลดลงจาก 105.74 s เป็น 69.00 s และ 62.21 s ตามลำดับ ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L มีค่าเฉลี่ยลดลงจาก 66.94 s เป็น 58.19 s และ 48.54 s ตามลำดับ และตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H มีค่าเฉลี่ยลดลงจาก 61.28 s เป็น 50.31 s และ 43.17 s ตามลำดับ

นอกจากนี้ ยังพบว่าในทุกรูปแบบตำแหน่งช่องระบายอากาศที่มีอัตราแลกเปลี่ยนเท่ากัน อนุภาคขนาด 6-20  $\mu\text{m}$  จะมีระยะเวลาเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone นานกว่าอนุภาคขนาดเล็กกว่า 5  $\mu\text{m}$  ทั้งนี้ สันนิษฐานว่า เนื่องจากอนุภาคทั้ง 2 ขนาด ต่างมีพฤติกรรมเป็นอนุภาคแขวนลอยอากาศที่สามารถลอยอยู่ในอากาศได้นาน แต่เนื่องจากอนุภาค 5  $\mu\text{m}$  มีขนาดเล็กกว่าจึงมีพฤติกรรมการเคลื่อนที่แบบสุ่มควบคู่ไปกับการเคลื่อนที่ตามกระแสอากาศ และอาจทำให้มีโอกาสหลุดออกจากห้องได้เร็วกว่า

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาอนุภาคเชื้อวัน โรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone ตามรูปแบบการระบายอากาศ และขนาดอนุภาค

รูปแบบการระบายอากาศ	ระยะเวลาอนุภาคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone (sec)								
	6 ACH			9 ACH			12 ACH		
	$\leq 5 \mu\text{m}$	6-20 $\mu\text{m}$	เฉลี่ย	$\leq 5 \mu\text{m}$	6-20 $\mu\text{m}$	เฉลี่ย	$\leq 5 \mu\text{m}$	6-20 $\mu\text{m}$	เฉลี่ย
L/H	97.12	122.86	105.74	67.56	70.44	69.00	60.10	64.31	62.21
H/L	61.40	72.47	66.94	56.60	59.79	58.19	46.03	51.05	48.54
H/H	56.80	65.72	61.28	48.73	51.88	50.31	41.24	45.09	43.17



รูปที่ 4.2 ระยะเวลาที่อนุภาคเชื้อวัน โรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone



### 4.3 การศึกษาความเข้มรังสี UVC ที่สถานะต่าง ๆ

การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาการกระจายรังสีจากหลอด UVC จากการคำนวณทางทฤษฎี เปรียบเทียบกับการกระจายรังสีจากชุดติดตั้งหลอดในห้องจำลอง (รูปที่ 4.3) เพื่อตรวจสอบว่าชุดติดตั้งหลอด ทำให้เกิดการกระจายรังสี UVC เป็นอย่างไร โดยเฉพาะผลของการติดตั้งแผงด้านหน้าชุดติดตั้งในการลดความเข้มรังสีที่ระดับติดตั้งให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ช่วง  $30 - 50 \text{ uW/cm}^2$  (Miller et al., 2002) ในขณะเดียวกันก็สามารถป้องกันรังสีลงสู่พื้นที่ส่วนล่างของห้องที่มีคนอยู่ได้หรือไม่เพียงใด ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาการกระจายความเข้มรังสีในห้องผู้ป่วยจำลอง โดยติดตั้งระบบ UVGI ตามการออกแบบแล้วตรวจวัดค่าความเข้มรังสี UVC มีผลการศึกษาดังนี้



รูปที่ 4.3 ห้องผู้ป่วยจำลองและการติดตั้งระบบ UVGI

- (ก) ห้องจำลองด้านนอก (ง) รังสี UVC จากชุด UVGI ขณะใช้งาน 1 ด้าน  
 (ข) ภายในห้องจำลอง หน้าด้านหน้า (จ) รังสี UVC จากชุด UVGI ขณะใช้งาน 4 ด้าน  
 (ค) ภายในห้องจำลอง หน้าด้านหลัง

#### 4.3.1 การศึกษาลักษณะการกระจายความเข้มรังสี UVC จากการคำนวณทางทฤษฎีและเปรียบเทียบกับจากชุดติดตั้งระบบ UVGI

##### 4.3.1.1 การกระจายความเข้มรังสีของหลอด UVC จากการคำนวณทางทฤษฎี

การกระจายของความเข้มรังสีในห้องผู้ป่วยจำลอง ขึ้นกับค่าความเข้มรังสีจากหลอด UVC ที่ติดตั้งในระบบ ในการศึกษาการกระจายความเข้มรังสีจากการคำนวณ เป็นการตรวจสอบการผลิตและการกระจายความเข้มรังสีของหลอด UVC ที่ได้ในทางทฤษฎีซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดรังสี UVC ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการวิธีของ ASHRAE (2008) ดังสมการ (3-2) ในบทที่ 3 ได้ผลดังตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าความเข้มรังสีจากแกว่งกลางหลอดของหลอด UVC กำลังไฟทั้ง 3 ขนาด มีความเข้มรังสีลดลงอย่างรวดเร็วในระยะ 0.75-3.5 m หลอดกำลังไฟขนาด 8 W, 16 W และ 30 W มีค่าความเข้มรังสีที่ระยะ 0.75 m/3.5 m เท่ากับ 281/13  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 561/26  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ 883/49  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มรังสีมีค่าลดลงใกล้เคียงกัน คือ ประมาณร้อยละ 95 โดยพบว่า ค่าความเข้มรังสีของหลอดกำลังไฟขนาด 16 W มีค่าสูงเป็น 2 เท่าของหลอดกำลังไฟขนาด 8 W และหลอดกำลังไฟ 30 W ซึ่งมีกำลังไฟสูงประมาณ 3 เท่าของหลอดกำลังไฟขนาด 8 W พบว่า มีความเข้มรังสีสูง เป็น 3.1-3.7 เท่า ของหลอดกำลังไฟขนาด 8 ทั้งนี้ หลอดกำลังไฟ 30 W ในการทดลองนี้เป็นหลอดขนาดปกติ (T12) มีความยาวของหลอด 0.9 m ซึ่งยาวเป็น 3 เท่า และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 0.6 เท่าของหลอดกำลังไฟขนาด 8 W จากผลการศึกษาดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อความเข้มรังสีจากการคำนวณ ได้แก่ กำลังไฟของหลอด ระยะห่างจากหลอด โดยพบว่าเมื่อกำลังไฟสูงขึ้นความเข้มรังสีจะสูงขึ้นเท่ากับจำนวนเท่าของกำลังไฟที่เพิ่มขึ้น ส่วนความยาวหลอดมีผลต่อความเข้มรังสีน้อยมาก

ตารางที่ 4.3 ค่าความเข้มรังสี UVC จากการคำนวณ ตามกำลังไฟหลอดและระยะห่างจากจุดกึ่งกลางหลอด UVC

กำลังไฟ (W)	ความยาวหลอด (m)	ความเข้มรังสี UVC ที่ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางหลอดต่าง ๆ ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
		0.75 (m)	1.0 (m)	1.25 (m)	1.5 (m)	1.75 (m)	2.0 (m)	2.25 (m)	2.5 (m)	2.75 (m)	3.0 (m)	3.25 (m)	3.5 (m)
8	0.30	281	160	103	72	53	40	32	26	21	18	15	13
16	0.30	561	319	205	143	105	81	64	52	43	36	31	26
30	0.90	883	538	359	255	190	147	117	95	79	67	57	49

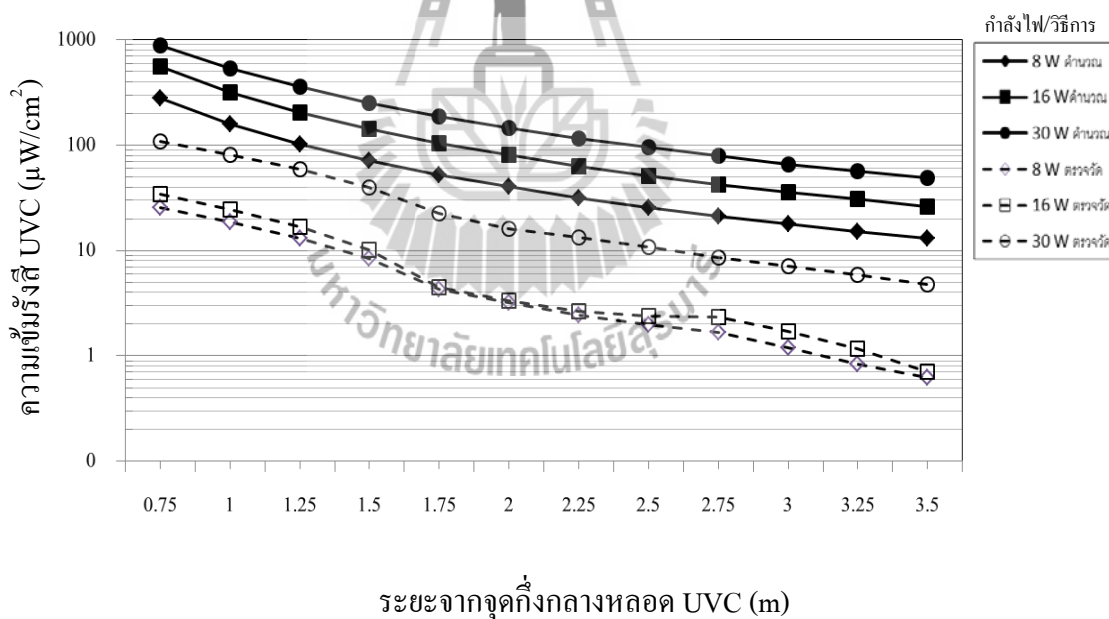
#### 4.3.1.2 การกระจายความเข้มรังสี UVC จากชุดติดตั้งระบบ UVGI

ระบบ UVGI ที่ติดตั้งในห้องผู้ป่วยจำลอง ติดตั้งด้วยหลอด UVC ความยาวคลื่น 254 nm กำลังไฟ 8 W, 16 W และ 30 W การตรวจวัดความเข้มรังสี UVC ไม่ได้ทำการตรวจวัดโดยตรง แต่จะตรวจวัดจากหลอดที่อยู่ในชุดติดตั้งที่ติดบานเกล็ดบริเวณด้านหน้า เอียงทำมุมขึ้นกับแนวระนาบ 5 องศา และเริ่มต้นตรวจวัดที่ระยะห่างจากหลอด 0.75 m เพื่อป้องกันความเสียหายกับหัวตรวจวัดจากรังสี UVC ระยะใกล้หลอดที่มีความเข้มสูง โดยขณะทำการทดลองได้ควบคุมสภาวะแวดล้อมคงที่ อุณหภูมิ 24-26 °C และความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 40-60 ดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข5 ผลการตรวจวัดความเข้มรังสีระดับติดตั้งหลอด UVC ห่างแนวกึ่งกลางหลอดเป็นระยะ 0.75-3.5 m ดังตารางที่ 4.4 พบว่า หลอดกำลังไฟ 8 W, 16 W และ 30 W มีค่าความเข้มรังสีอยู่ในช่วง 0.6-25.7  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 0.7-34.2  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ 4.8-109.2  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ ค่าความเข้มรังสีของหลอดทุกขนาดจะมีค่าลดลงใกล้เคียงกัน ประมาณ ร้อยละ 50, 90 และ 97 ที่ระยะห่างจากหลอด UVC 1.5 m, 2.25 m และ 3.5 m ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ความเข้มรังสีจากการตรวจวัดต่ำกว่าจากการคำนวณ และมีปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มรังสีคล้ายกันยกเว้นความยาวของหลอดที่ผลการตรวจวัดมีค่าความเข้มรังสีเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟ มีเหตุผลสนับสนุน คือ ผลของบานเกล็ดบังแสงมีผลในการลดความเข้มรังสีในแนวราบ ส่วนหลอดกำลังไฟขนาด 30 W ที่ยังคงมีความเข้มรังสีสูงกว่าหลอดขนาด 16 W มาก เนื่องจากถึงแม้หลอดจะมีความยาวมากกว่าแต่ก็มีขนาดของหลอดใหญ่กว่า ดังนั้น ในระดับติดตั้งหลอด 30 W จึงมีพื้นที่กระจายรังสีของหลอดบางส่วนที่สูงกว่าขอบบนของบานเกล็ด ในขณะที่หลอด 16 W ขนาดเล็กกว่า จะถูกบานเกล็ดบังรังสีที่กระจายจากหลอดได้มากกว่า

ตารางที่ 4.4 ค่าความเข้มรังสี UVC จากการตรวจวัด ตามกำลังไฟหลอดและระยะห่างจากจุดกึ่งกลางหลอด

กำลังไฟ (W)	ความยาวหลอด (m)	ความเข้มรังสี UVC ที่ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางหลอดต่าง ๆ ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
		0.75 (m)	1.0 (m)	1.25 (m)	1.5 (m)	1.75 (m)	2.0 (m)	2.25 (m)	2.5 (m)	2.75 (m)	3.0 (m)	3.25 (m)	3.5 (m)
8	0.30	25.7	18.7	13.0	8.3	4.3	3.2	2.5	2.0	1.7	1.2	0.8	0.6
16	0.30	34.2	24.7	16.9	10.3	4.5	3.3	2.7	2.4	2.3	1.7	1.2	0.7
30	0.90	109.2	81.8	59.1	39.6	22.5	16.3	13.5	10.7	8.7	7.2	5.9	4.8

เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มรังสี UVC ของหลอด UVC กำลังไฟ 8 W, 16 W และ 30 W จากค่าการคำนวณกับค่าความเข้มรังสีที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า ค่าความเข้มรังสีที่ได้จากการตรวจวัดต่ำกว่าค่าจากการคำนวณเฉลี่ย 12.8, 20.9 และ 8.4 เท่าตามลำดับ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าบานเกล็ดมีผลในการลดความเข้มรังสีลง ทั้งนี้ เนื่องจากถึงแม้ว่ารังสีจะกระจายออกจากหลอดในทุกทิศทางในลักษณะตั้งฉากจากกับพื้นผิวหลอด แต่พื้นที่หวังผลในการฆ่าเชื้อบริเวณหน้าหลอดและขนานกับพื้น มีการติดตั้งบานเกล็ดไว้ที่ด้านหน้าชุดติดตั้งหลอด เอียงทำมุมขึ้น 5 องศา กับแนวตั้ง จะปิดกั้นทางเดินของรังสีที่กระจายออกทางด้านหน้า จึงมีผลในการลดความเข้มรังสีลง โดยหลอดกำลังไฟ 8 W มีค่าความเข้มรังสีต่ำกว่าช่วงแนะนำทุกระยะ ในขณะที่หลอดกำลังไฟ 16 W มีค่าความเข้มรังสีอยู่ในช่วงแนะนำในระยะไม่เกิน 0.75 m ส่วนหลอดกำลังไฟ 30 W มีค่าความเข้มรังสีสูงกว่าช่วงแนะนำในระยะไม่เกิน 1.25 m แต่มีค่าต่ำกว่าช่วงแนะนำที่ระยะเกินกว่า 1.75 m ขึ้นไป ส่วนที่อยู่ในช่วงแนะนำจะอยู่ระหว่างระยะ 1.25-1.75 m ทั้งนี้ เป็นผลมาจากการติดตั้งบานเกล็ดตั้งแต่จุดกึ่งกลางหลอดขึ้นไป มีมุมเอียงน้อย จึงมีผลทำให้ค่าความเข้มรังสีโดยเฉพาะระดับติดตั้งหลอดขึ้นไปมีค่าลดลงมากกว่าที่คาดการณ์ไว้



รูปที่ 4.4 ความเข้มรังสี UVC จากคำนวณและจากการตรวจวัดตามระยะห่างจากจุดกึ่งกลางหลอด

#### 4.3.2 การกระจายรังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลอง

##### 4.3.2.1 ลักษณะการกระจายรังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลอง

หลอด UVC จะผลิตรังสี UVC ออกมาจากหลอดทุกทิศทาง โดยมีความเข้มของรังสีแปรผกผันกับระยะทางในทิศทางตั้งฉากกับจุดกึ่งกลางหลอด ตามสมการ (3-2) ระบบ

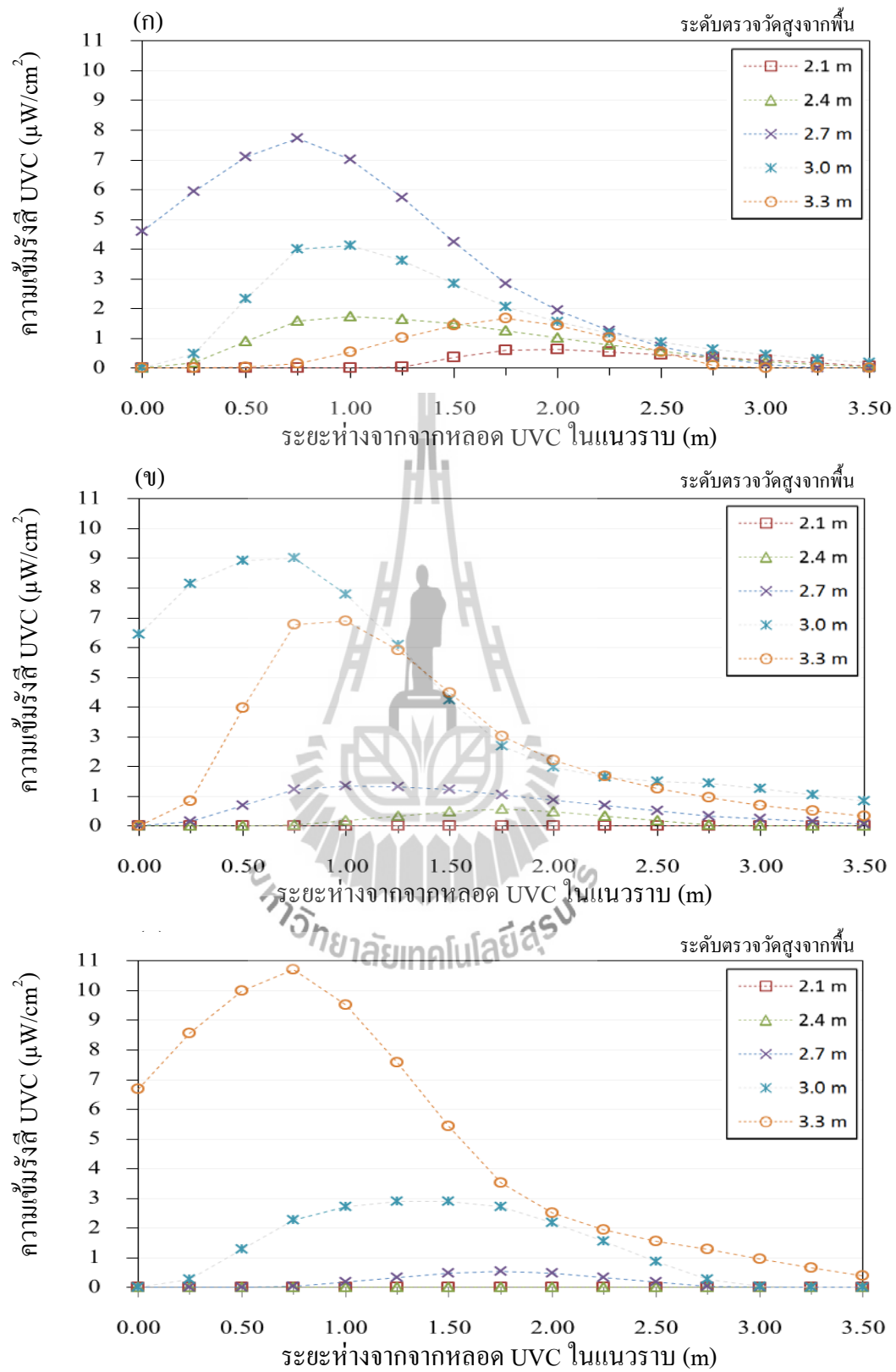
UVGI ในการศึกษานี้ได้นำหลอด UVC ติดตั้งในชุดติดตั้งที่เป็นกล่องสี่เหลี่ยมมีช่องเปิดด้านหน้าเพียงด้านเดียว และมีบานเกล็ดด้านหน้าเอียงทำมุมขึ้น 5 องศา เพื่อป้องกันรังสีลงสู่พื้นทางด้านล่างแต่สะท้อนขึ้นสู่ด้านบนแทน ดังรูปที่ 4.5 ทำการตรวจวัดความเข้มรังสี โดยขณะทำการทดลองได้ควบคุมสภาวะแวดล้อมคงที่ โดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 24-26 °C และความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง ร้อยละ 40-60 จากการทดลองทั้ง 72 วันมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 24.8 °C และ ร้อยละ 49.2 ตามลำดับ ซึ่งค่าโดยเฉลี่ยแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข5 ผลการตรวจวัด พบว่าการกระจายรังสีจากหลอด UVC ถูกบังคับออกมาทางด้านหน้าของชุดติดตั้ง โดยจะมีความเข้มรังสีสูงที่สุดในแนวระนาบระดับเดียวกับจุดกึ่งกลางหลอด และลดลงตามระยะห่างจากจุดกึ่งกลางหลอดในแนวราบและแนวตั้ง ดังที่ได้อธิบายไว้ในข้อ 2.1-2.2 ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์การกระจายรังสี 2 ลักษณะ ได้แก่ การกระจายในแนวราบ และการกระจายในแนวตั้ง และเนื่องจากในการศึกษานี้มีการติดตั้งระบบฯ บนผนังห้องผู้ป่วยจำลองจำนวน 1-4 ด้าน จึงเลือกหลอด UVC ที่ติดตั้งบนผนัง 1 ด้านเป็นตัวแทนในการอธิบายลักษณะการกระจายรังสีดังกล่าว ดังนี้



รูปที่ 4.5 หลอด UVC ในชุดติดตั้ง

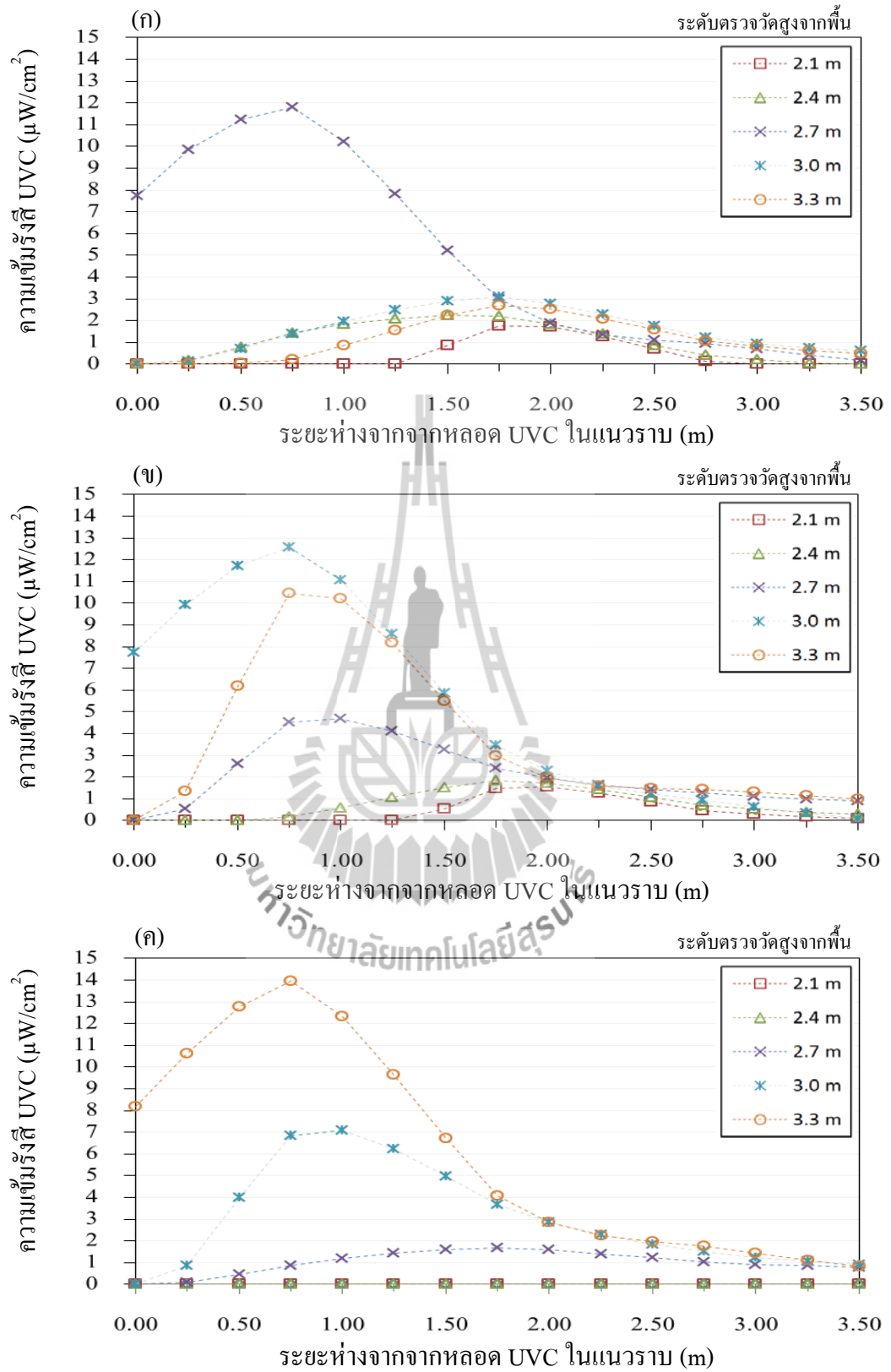
#### 1) การกระจายความเข้มรังสี UVC ในแนวราบ

เป็นการวิเคราะห์การกระจายความเข้มรังสี ณ จุดห่างจากหลอด UVC ที่ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางหลอดออกไปในแนวราบ ตั้งแต่ 0.0 m ถึง 3.50 m และการกระจายในแนวตั้ง ตั้งแต่ 0.0 ถึง 3.3 m เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณปริมาณรังสี UVC ที่อนุภาคเชื้อไวรัสโรคเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่รังสีในแนวระนาบ และจากผลการติดตั้งระบบ UVGI ด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W, 16 W และ 30 W บนผนังด้านหน้า 1 ด้าน มีการกระจายความเข้มรังสี UVC ในแนวราบแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.6-4.8 ดังนี้คือ ที่ระดับติดตั้งหลอด UVC มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีสูง

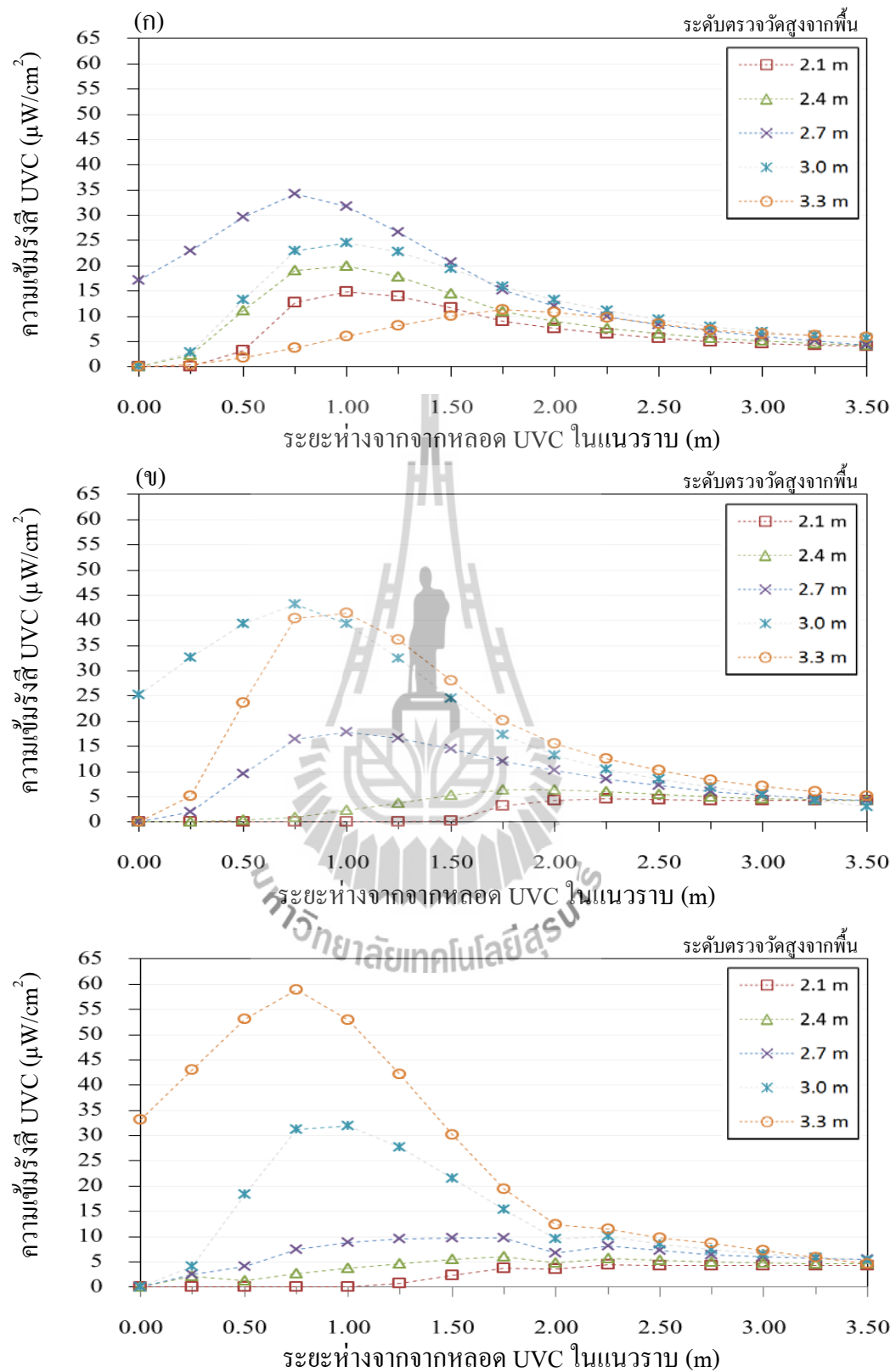


รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ของหลอด UVC ระดับต่าง ๆ ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W

(ก) ระดับติดตั้งสูงจากพื้น 2.7 m (ข) ระดับติดตั้งสูงจากพื้น 3.0 m (ค) ระดับติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 m



รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ของหลอด UVC ระดับต่าง ๆ ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 16 W  
 (ก) ระดับติดตั้งสูงจากพื้น 2.7 m (ข) ระดับติดตั้งสูงจากพื้น 3.0 m (ค) ระดับติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 m



รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ของหลอด UVC ระดับต่าง ๆ ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 30 W

(ก) ระดับติดตั้งสูงจากพื้น 2.7 m (ข) ระดับติดตั้งจากพื้น 3.0 m (ค) ระดับติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 m



ที่สุดที่ระยะห่างจากระบบ 0.75 m และลดต่ำลงร้อยละ 50 ในทุกระยะที่ห่างจากระบบฯ เพิ่มขึ้น 0.75 m นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในแนวราบระดับติดตั้งหลอด UVC ที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W, 16 W และ 30 W แปรผันตามกำลังไฟที่สูงขึ้น มีค่าเท่ากับ  $4.09 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $5.83 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ  $20.19 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ ทั้งนี้ ความเข้มรังสีตั้งแต่ระดับ 2.1 m ลงมามีค่าต่ำมาก จึงไม่ได้นำมาแสดงผล

## 2) การกระจายรังสี UVC ในแนวดิ่ง

เป็นการวิเคราะห์การกระจายความเข้มรังสี ณ จุดห่างจากหลอด UVC ที่ระดับความสูง น้อยกว่า 2.1 m, 2.1 m, 2.4 m, 2.7 m, 3.0 m และ 3.3 m เพื่อใช้เป็นข้อมูลร่วมในการคำนวณค่าปริมาณรังสี UVC ที่อนุภาคเชื้อไวรัสโรคเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่รังสีที่ระดับความสูงต่าง ๆ จากผลการติดตั้งระบบ UVGI ด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W, 16 W และ 30 W บนผนังด้านหน้า 1 ด้าน มีการกระจายความเข้มรังสี UVC ในแนวดิ่ง ดังตารางที่ 4.5

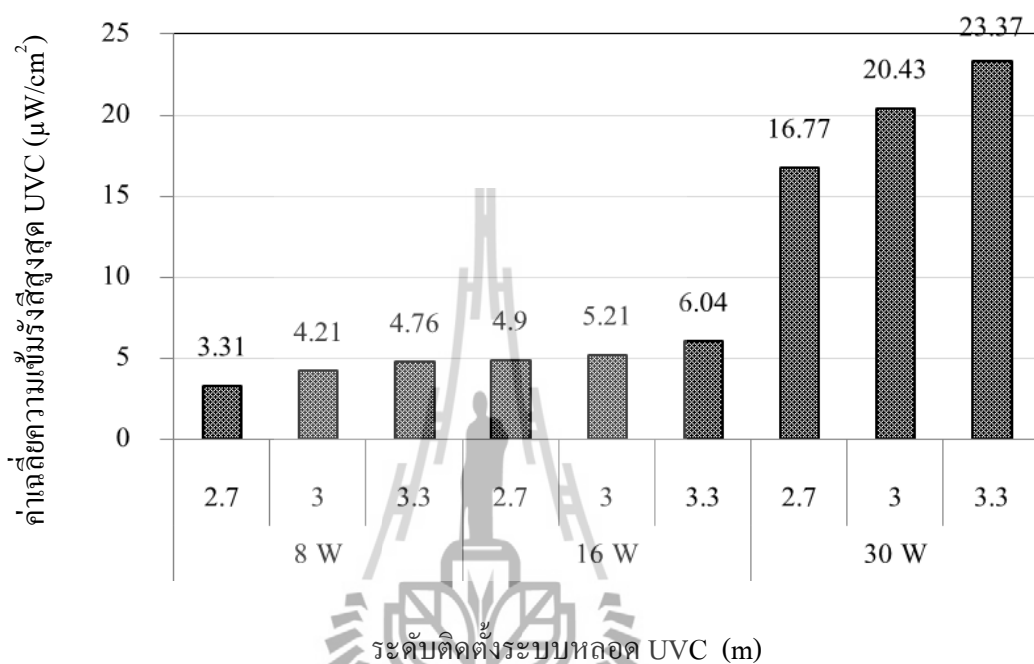
ตารางที่ 4.5 ความเฉลี่ยเข้มรังสี UVC ที่ระดับความสูงจากพื้น ของหลอด UVC ติดตั้งด้วยหลอดขนาดกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นต่าง ๆ

ระดับสูงจากพื้น (m)	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )								
	ระดับติดตั้งหลอด 8 W			ระดับติดตั้งหลอด 16 W			ระดับติดตั้งหลอด 30 W		
	2.7m	3.0m	3.3m	2.7m	3.0m	3.3m	2.7m	3.0m	3.3m
< 2.1	0.09	0.001	0	0.23	0.22	0	4.36	1.37	1.34
2.1	0.24	0.001	0	0.43	0.45	0	6.88	2.27	2.42
2.4	0.80	0.18	0	1.04	0.75	0	9.25	3.69	4.07
2.7	3.31	0.66	0.17	4.90	2.10	1.01	16.77	9.01	8.52
3.0	1.65	4.21	1.34	1.54	5.21	3.03	12.17	20.43	13.56
3.3	0.53	2.64	4.76	1.13	3.66	6.04	6.44	17.32	23.37
Upper zone (2.1-3.3m)	1.31	1.54	1.25	1.81	2.43	2.02	10.30	10.55	10.39

### 2.1) การกระจายรังสี UVC ในแนวดิ่ง ที่ระดับติดตั้งหลอด UVC

ค่าเฉลี่ยรังสี UVC พิจารณาจาก ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในแนวราบ ดังรูปที่ 4.9 พบว่า ที่ระดับเดียวกับระดับติดตั้งหลอด UVC แปรผกผันกับระยะห่างจากเพดาน กล่าวคือ หลอด UVC ที่ติดตั้งห่างเพดานน้อยที่สุด (สูงจากพื้น 3.3 m) มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงที่สุดโดยมีค่า 4.76, 6.04 และ  $23.37 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ ส่วนหลอด UVC ที่ติดตั้งระดับความสูง

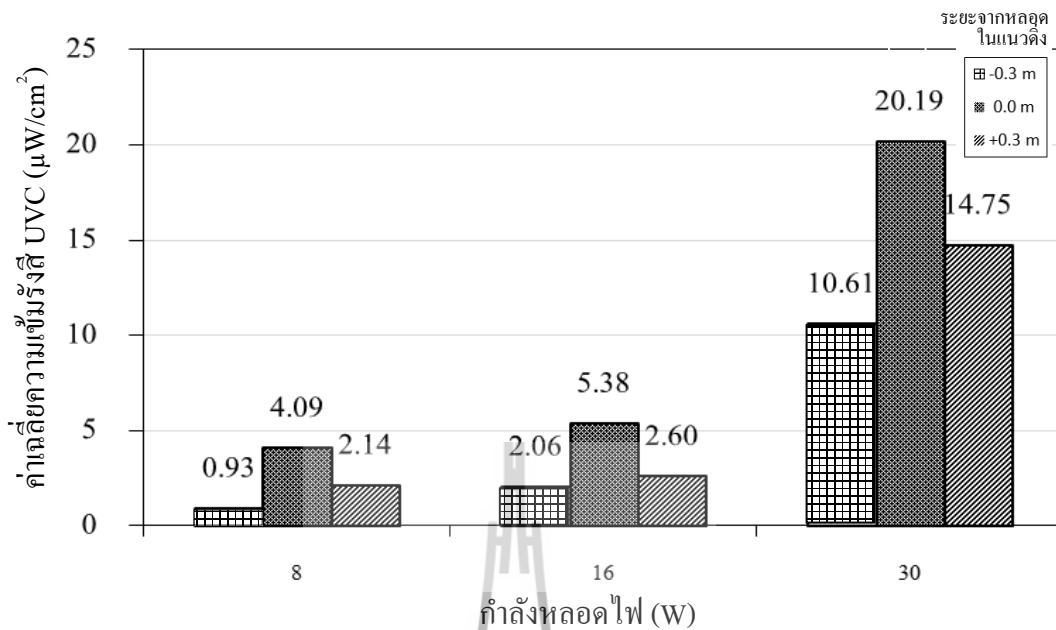
จากพื้น 3.0 และ 2.7 m จะมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ลดต่ำลงตามลำดับ ทั้งนี้ เป็นผลจากเกิดการสะท้อน ของรังสีกับเพดานห้อง โดยหลอด UVC ที่ติดตั้งใกล้เพดานห้องมากกว่าจะเกิดการสะท้อนของรังสีมากกว่า ประกอบกับบานเกล็ดที่ติดตั้งเอียงทำมุมขึ้นในแนวตั้ง 5 องศาบริเวณด้านหน้าของชุดติดตั้งหลอด UVC ที่เพิ่มการสะท้อนของรังสี UVC ขึ้นด้านบน



รูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงสุด ที่ระดับติดตั้งหลอด UVC และกำลังไฟแต่ละขนาด

## 2.2) การกระจายรังสีในแนวตั้งที่ระดับสูงและต่ำกว่าระดับติดตั้งหลอด UVC

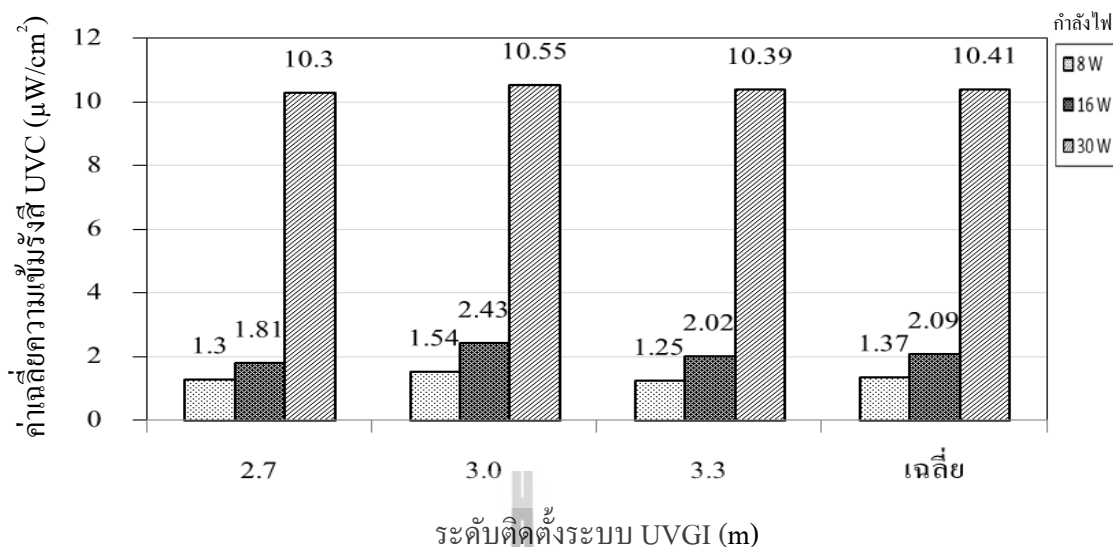
เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ที่ระดับติดตั้งหลอด UVC กับระดับต่ำกว่าและสูงกว่าระดับติดตั้งหลอด UVC 0.30 m ดังรูปที่ 4.10 พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ที่ระดับติดตั้งหลอด UVC ด้วยหลอดกำลังไฟทุกขนาดมีค่าสูงกว่าที่ระดับต่ำกว่าและสูงกว่าระดับติดตั้งหลอด UVC 0.30 m นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ที่ระดับสูงกว่าระดับติดตั้งหลอด UVC ของหลอดกำลังไฟทุกขนาด มีค่าสูงกว่าที่ระดับต่ำกว่าระดับติดตั้งหลอด UVC ซึ่งความแตกต่างของความเข้มรังสีดังกล่าวเป็นผลมาจากบานเกล็ดที่ติดตั้งหน้าหลอด UVC สะท้อนรังสีขึ้นด้านบนของห้องจึงเป็นการเพิ่มปริมาณรังสีในระดับสูงกว่าระดับติดตั้ง



รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ระดับสูงและต่ำกว่าระดับติดตั้งหลอด UVC 0.3 m

### 2.3) การกระจายรังสี UVC ในแนวดิ่ง ในพื้นที่ Upper zone

การกระจายรังสี UVC ในพื้นที่ส่วนบนของห้องกับตำแหน่งติดตั้งหลอด UVC จากการติดตั้งระบบ UVGI ในห้องผู้ป่วยจำลอง ด้วยหลอด UVC 1 หลอด กำลังไฟ 3 ขนาด (8, 16 และ 30 W) บนผนังห้องด้านเดียว มีตำแหน่งติดตั้ง 3 ระดับ (2.7, 3.0 และ 3.3 m) ดังรูปที่ 4.11 พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ส่วนบนของห้อง (Upper Zone) ระดับความสูงตั้งแต่ 2.1 m ขึ้นไป ซึ่งเป็นพื้นที่ในการฆ่าเชื้อโรค มีค่า 1.37, 2.09 และ  $10.41 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่าหลอด UVC กำลังไฟทุกขนาดที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.0 m มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงที่สุด รองลงมาได้แก่ที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 m และ 2.7 m มีค่า  $1.53 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $2.43 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ  $10.55 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องมาจากการประมาณค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC คัดเฉพาะช่วงระดับความสูงจากพื้น 2.1-3.3 m หรือ มีช่วงกว้าง 1.2 m และดังได้กล่าวมาแล้วว่า บานเกล็ดทำให้เกิดการสะท้อนรังสีขึ้นด้านบน และระบบที่ติดตั้งในตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับเพดานมากกว่าจะเกิดการสะท้อนกลับจากเพดานมากกว่า จึงทำให้ค่าเฉลี่ยรังสีของหลอด UVC ที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.0 m สูงกว่าที่ติดตั้งสูงจากพื้น 2.7 m ส่วนระบบที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 m แม้จะอยู่ใกล้เพดานห้องมากกว่า แต่พบว่า มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ต่ำกว่าที่ติดตั้งระดับ 3.0 m เนื่องจากมีพื้นที่ใต้ระดับติดตั้งมากกว่า ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวนี้จะมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ต่ำลงมาก เป็นผลมาจากบานเกล็ดที่ทำหน้าที่สะท้อนรังสีขึ้นด้านบนและจะลดการกระจายรังสีลงสู่ด้านล่างไปพร้อม ๆ กัน



รูปที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งระดับต่างๆ

#### 4.3.3 การกระจายความเข้มรังสีในห้องผู้ป่วยจำลองที่ติดตั้งหลอด UVC ตั้งแต่ 1-4 ด้าน

เป็นการศึกษาการกระจายความเข้มรังสีในห้องผู้ป่วยจำลองที่ติดตั้งหลอด UVC บนผนังด้านต่าง ๆ จำนวนแตกต่างกัน โดยติดตั้งด้วยชุดติดตั้งที่มีหลอด UVC จำนวน 1 หลอด กำลังไฟเท่ากันและระดับความสูงจากพื้นเดียวกัน เพื่อดูการกระจายของรังสีที่เกิดขึ้นภายในห้องผู้ป่วยจำลอง ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.13-4.16 มีผลการศึกษาดังนี้

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper Zone ของระบบ UVGI ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W 16 W และ 30 W

จำนวนด้านที่ติดตั้งหลอด UVC	ความเข้มรังสี UVC จากระบบ UVGI ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )		
	8 W	16 W	30 W
1 ด้าน <sup>1</sup>	1.37	2.09	10.41
1 ด้าน <sup>2</sup>	1.23	1.89	9.59
2 ด้าน <sup>1</sup>	2.73	4.17	20.82
2 ด้าน <sup>2</sup>	2.46	3.76	18.84
3 ด้าน <sup>1</sup>	4.20	6.39	31.61
4 ด้าน	5.44	8.30	41.28

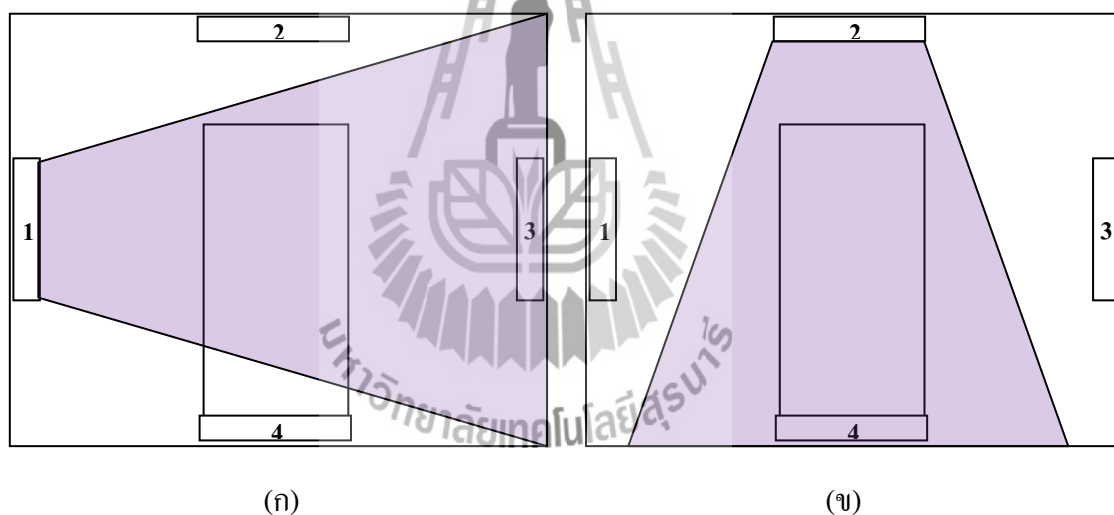
หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

#### 4.3.3.1 การกระจายรังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลองติดตั้งหลอด UVC บนผนัง 1 ด้าน

การกระจายความเข้มรังสีของหลอด UVC ที่ติดตั้งบนผนังเพียงด้านเดียว พบว่า การติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟขนาด 8 W, 16 W และ 30 W บนผนังด้านหน้าหรือด้านหลังเพียงด้านเดียว จะมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีมากกว่าการที่ติดตั้งบนผนังด้านซ้ายหรือขวาเพียงด้านเดียว ร้อยละ 10.9, 10.3 และ 8.5 ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวเป็นไปตามสมการ (3-2) ความเข้มของรังสีแปรผกผันกับระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของหลอด UVC และจากสมการ (3-2) ดังกล่าวก็ยิ่งพบว่า ความเข้มรังสีด้านหน้าหลอดสูงกว่าด้านข้างหลอด ห้องจำลองมีความลึก 3.5 m และความกว้าง 3.0 m จึงมีพื้นที่ผนังด้านข้างของหลอดที่ติดตั้งผนังด้านหน้าหรือด้านหลังน้อยกว่าหลอดที่ติดตั้งผนังด้านซ้ายหรือขวา ดังรูปที่ 14.2 ดังนั้น เมื่อคำนวณค่าความเข้มรังสีเฉลี่ยจึงมีค่าสูงกว่า โดยมีค่าสูงที่สุดเมื่อติดตั้งหลอด UVC สูงจากพื้น 3.0 m รองลงมาได้แก่ ติดตั้งที่ระดับ 3.3 m และ 2.7 m ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 การกระจายความเข้มรังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลอง

(ก) ติดตั้งหน้า 1 ด้าน (ข) ติดตั้งด้านซ้าย 1 ด้าน

#### 4.3.3.2 การกระจายรังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลองที่ติดตั้งหลอด UVC บนผนัง 2 ด้าน

การกระจายความเข้มรังสีของหลอด UVC ที่ติดตั้งบนผนัง 2 ด้าน ด้วยหลอด UVC ที่มีกำลังไฟขนาดเท่ากันเพิ่ม 1 หลอด บนผนังด้านตรงกันข้ามในระดับเดียวกัน พบว่า การติดตั้งลักษณะดังกล่าวมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า โดยหลอด 8 W, 16 W และ 30 W มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC เพิ่มขึ้นจาก  $1.37 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $2.09 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $10.41 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็น  $2.73 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $4.17 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ  $20.82 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ดังตารางที่ 4.6 เนื่องจากเป็น

การเพิ่มแหล่งกำเนิดของรังสี UVC ที่มีความเข้มเท่าเดิมแต่มีทิศทางตรงกันข้าม และพบว่า การติดตั้งหลอด UVC บนผนัง 2 ด้าน ที่ผนังด้านหน้าและด้านหลัง จะมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีมากกว่า การติดตั้งที่ผนังด้านซ้ายและด้านขวาโดยเฉลี่ยมากกว่าประมาณ ร้อยละ 10 เป็นผลจากการมีพื้นที่ด้านข้างของหลอดน้อยกว่าจึงค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีจึงสูงกว่าเช่นเดียวกับการติดตั้งบน 1 ด้าน

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งด้วยหลอด UVC ที่มีกำลังไฟหนึ่ง ๆ จำนวน 2 หลอด บนผนังด้านตรงกันข้ามกันในระดับเดียวกันละ 1 หลอด กับการติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟสูงกว่า 2 เท่า จำนวน 1 หลอด จะพบว่า การติดตั้งกรณีแรกมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีสูงกว่ากรณีที่สอง เช่น ติดตั้งหลอด UVC ที่ผนังด้านหน้าและหลังด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W จำนวน 2 หลอด มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีมากกว่า หลอด UVC ที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 16 W ที่ด้านหน้าหรือหลังเพียงด้านเดียว คือเพิ่มจาก  $2.09 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็น  $2.79 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  หรือเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 30.62 ทั้งนี้ เนื่องจากความเข้มของรังสีแปรผกผันกับระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของหลอด UVC ทำให้ด้านตรงกันข้ามกับด้านติดตั้งหลอดมีความเข้มรังสีลดต่ำลงตามระยะทาง การติดตั้งหลอดบนผนัง 2 ด้านที่อยู่ด้านตรงกันข้ามกันจึงเป็นการเพิ่มและกระจายความเข้มรังสีให้มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ด้าน แต่การติดตั้งเพียงด้านเดียวจะมีความเข้มสูงเฉพาะบริเวณใกล้หลอดและลดต่ำลงที่ระยะห่างจากหลอดเพิ่มขึ้น

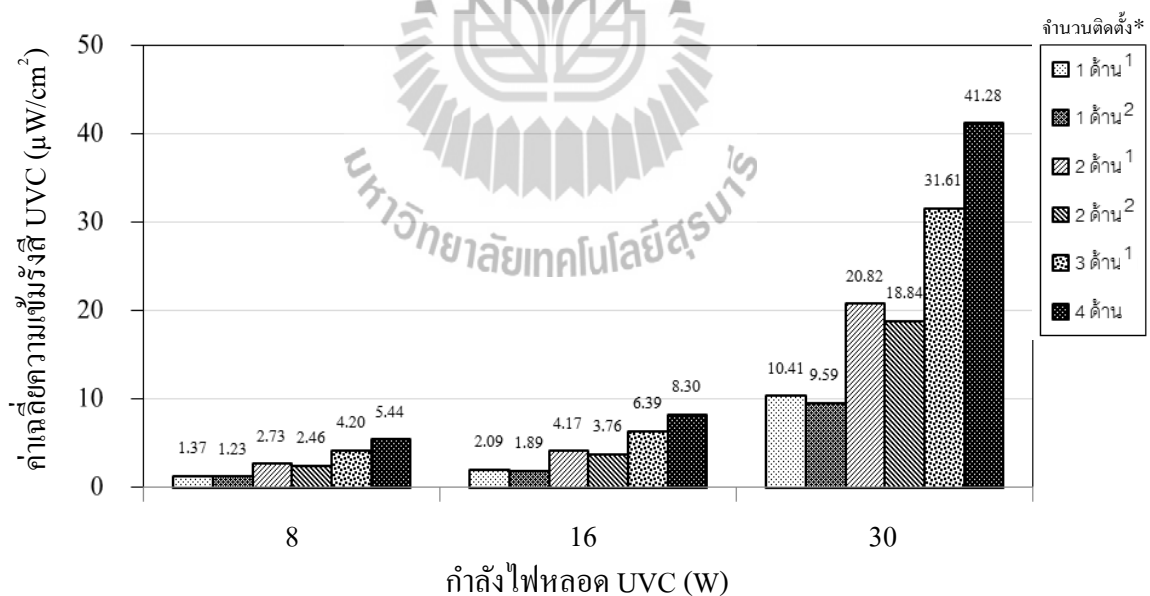
#### 4.3.3.3 การกระจายรังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลองที่ติดตั้งหลอด UVC ผนัง 3 ด้าน

การกระจายความเข้มรังสี UVC ของหลอด UVC ที่ติดตั้งบนผนัง 3 ด้าน ได้แก่ ผนังด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวาอีกหนึ่งด้าน ด้วยหลอด UVC กำลังไฟขนาดเท่ากันและสูงจากพื้นระดับเดียวกัน พบว่า การติดตั้งลักษณะดังกล่าวมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone เพิ่มขึ้นและมากกว่าการติดตั้งที่ผนังด้านหน้าและด้านหลังเพียงอย่างเดียว ถึงร้อยละ 53.9 โดยเพิ่มค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ที่ติดตั้งด้วยหลอด ขนาด 8 W, 16 W และ 30 W จาก  $2.73 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $4.17 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ  $20.82 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็น  $4.20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $6.39 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ  $31.61 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ เนื่องจากการติดตั้งหลอด UVC บนผนัง 2 ด้าน ที่อยู่ด้านตรงกันข้ามกันเป็นเพิ่มและกระจายความเข้มรังสีให้มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ด้าน โดยมีความเข้มรังสีสูงสุดใกล้ผนังด้านที่ติดตั้งหลอดและลดลงต่ำที่สุดในบริเวณกลางห้อง ส่วนการติดตั้งหลอด UVC เพิ่มบนผนังด้านซ้ายหรือขวาอีก 1 ด้านนั้นเป็นการเพิ่มความเข้มรังสีในช่วงกลางห้องให้สูงขึ้น

#### 4.3.3.4 การกระจายรังสี UVC ในห้องผู้ป่วยจำลองที่ติดตั้งหลอด UVC ผนัง 4 ด้าน

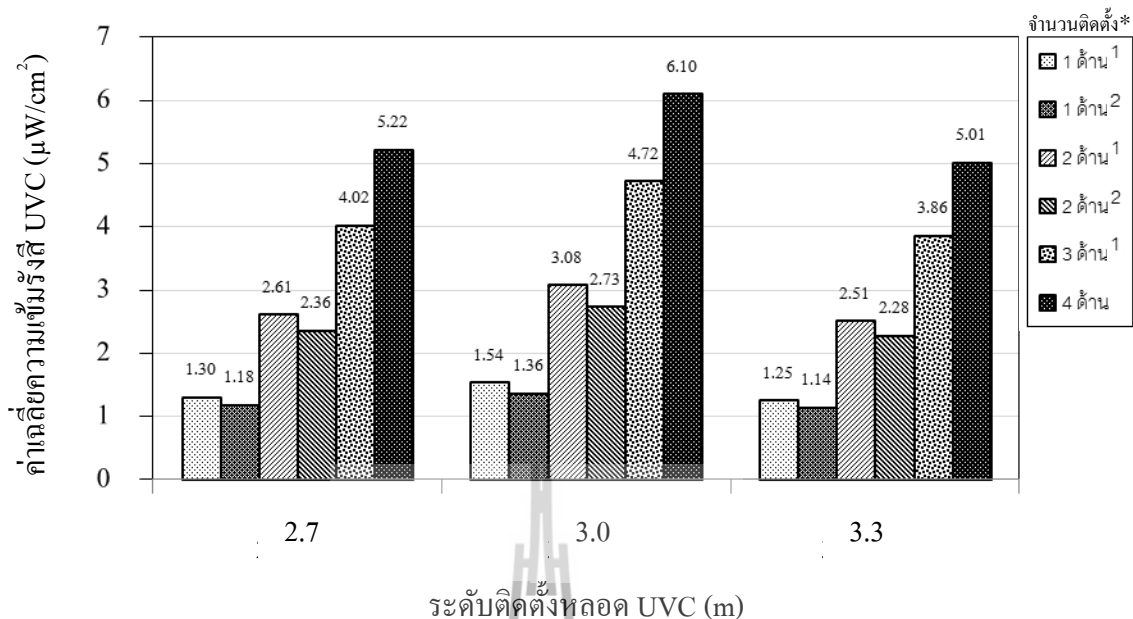
การกระจายความเข้มรังสี UVC ของหลอด UVC ที่ติดตั้งบนผนัง 4 ด้าน ได้แก่ ผนังด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้ายและด้านขวา ด้วยหลอด UVC กำลังไฟขนาดเท่ากันและสูงจากพื้นระดับเดียวกัน พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ที่ติดตั้งด้วยหลอด ขนาด 8 W, 16 W และ

30 W มีค่าสูงกว่าการติดตั้งบนผนัง 2 ด้าน ประมาณ 4.4 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งด้วยหลอด UVC ที่มีกำลังไฟหนึ่ง ๆ จำนวน 4 หลอด บนผนัง 4 ด้าน ๆ ละ ด้านละ 1 หลอด ในระดับเดียว กับการติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟสูงกว่า 2 เท่า จำนวน 2 หลอด ที่ผนังด้านตรงกันข้ามในระดับเดียวกันคล้ายกับการดำเนินการตามข้อ 4.3.3.2 จะพบว่า การติดตั้งกรณีแรกมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีสูงกว่ากรณีที่สอง กล่าวคือ ถ้าติดตั้งหลอด UVC กำลังไฟ 8 W จำนวน 4 หลอด บนผนัง 4 ด้าน มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีมากกว่าการติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 16 W บนผนัง 2 ด้าน ที่ผนังด้านหน้าและด้านหลังด้านละ 1 หลอด คือเพิ่มจาก  $4.17 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็น  $5.44 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  หรือเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 30.46 และมากกว่าการติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 16 W บนผนัง 2 ด้าน ที่ผนังด้านซ้ายและด้านขวาด้านละ 1 หลอด โดยเพิ่มจาก  $3.76 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็น  $5.44 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  หรือเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 44.68 จากผลการศึกษาดังกล่าวนี้ เมื่อพิจารณาความค่าเข้มรังสีจากเนวกึ่งกลางหลอด ที่ติดตั้งเพียงด้านเดียวด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W กับ 16 W หรือกำลังไฟสูงขึ้น 2 เท่า แต่ มีค่าความเข้มรังสีที่ระยะ 0.75 m เพิ่มจาก  $25.7 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็น  $34.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ และที่ระยะ 3.5 m มีค่าเพิ่มจาก  $0.6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็น  $0.7 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เท่านั้น ดังนั้น จึงมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีของการติดตั้งด้วยหลอด 8 W จำนวน 4 ด้าน สูงกว่าการติดตั้งด้วยหลอด 16 W จำนวน 2 ด้าน



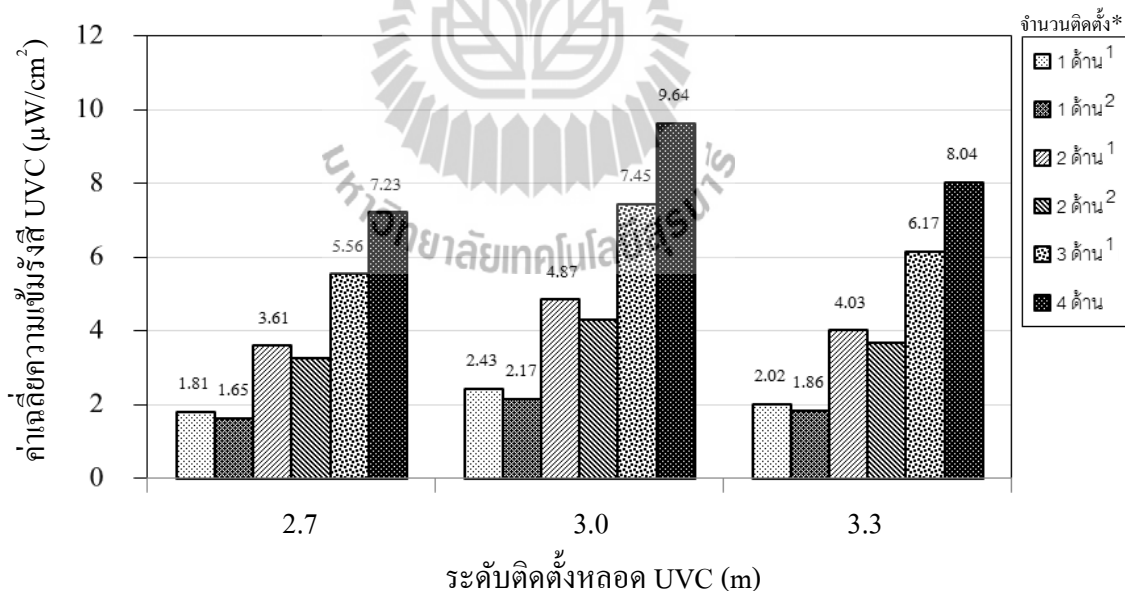
\* จำนวนติดตั้ง 1 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1 ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา  
 2 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2 ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา  
 3 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

รูปที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper Zone ของหลอด UVC



\* จำนวนติดตั้ง 1ด้าน¹ = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1ด้าน² = ด้านซ้ายหรือด้านขวา  
 2ด้าน¹ = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2ด้าน² = ด้านซ้ายและด้านขวา, 3ด้าน¹ = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

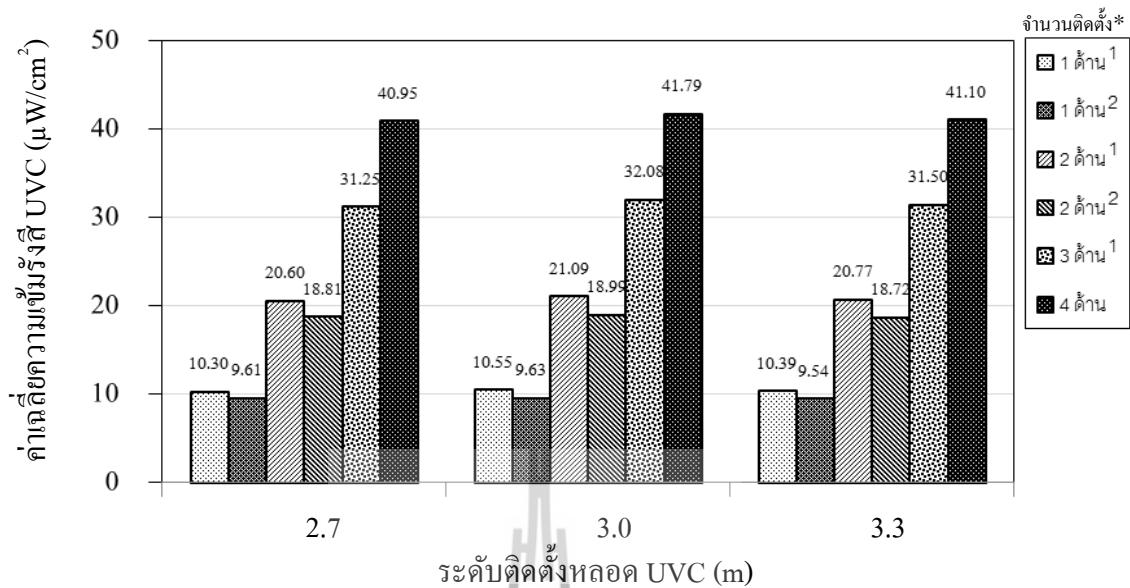
รูปที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper Zone ที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W



\* จำนวนติดตั้ง 1ด้าน¹ = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1ด้าน² = ด้านซ้ายหรือด้านขวา  
 2ด้าน¹ = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2ด้าน² = ด้านซ้ายและด้านขวา  
 3ด้าน¹ = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

รูปที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper Zone ที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 16 W





\* จำนวนติดตั้ง 1 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1 ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา  
 2 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2 ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา  
 3 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper Zone ที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 30 W

#### 4.4 ปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone

ประสิทธิภาพของระบบ UVGI ขึ้นอยู่กับ ปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นใน Upper zone ซึ่งเป็นผล  
 คุณของความเข้มรังสี UVC กับระยะเวลาที่อนุภาคเชื้อไวรัส โรคเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปใน Upper zone  
 ดังสมการ (3-8) เช่น ห้องจำลองที่ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟ 8 W บนผนังห้องด้านหน้า 1 ด้าน  
 ที่ระดับความสูง 2.7 m มีตำแหน่งของระบบอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH มี  
 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC เท่ากับ  $1.365 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และมีระยะเวลาอนุภาคเชื้อไวรัส โรคเคลื่อนที่ผ่าน  
 เข้าไปใน Upper zone เท่ากับ 105.74 วินาที ดังนั้น ในสภาวะดังกล่าวนี้ จะมีปริมาณรังสีใน Upper  
 zone เท่ากับ  $144.33 \mu\text{W}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$  ดังตัวอย่างการคำนวณ ต่อไปนี้

จากสมการ (3-8)

$$UV_{\text{Dose}} = \text{ความเข้มรังสี (I)} \times \text{ระยะเวลาสัมผัสรังสี (t)}$$

โดยที่  $UV_{\text{Dose}} = \text{ปริมาณรังสี UVC (W}\cdot\text{s}/\text{m}^2)$

$I = \text{ความเข้มรังสี UVC (W}/\text{m}^2)$  จากการตรวจวัดจริง

$t = \text{ระยะเวลาสัมผัสรังสี UVC (s)}$  จากการจำลอง ANSYS FLUENT

แทนค่า  $UV_{\text{Dose}} = 1.365 (\mu\text{W}/\text{cm}^2) \times 105.74 (\text{s})$

ดังนั้น  $UV_{\text{Dose}} = 144.33 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$

ในการศึกษานี้มุ่งศึกษาทดลองหาสภาวะที่ทำให้มีปริมาณรังสีสูงที่สุดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงที่สุด จากผลการศึกษาในข้อ 4.2 และข้อ 4.3 สามารถวิเคราะห์หาปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ฆ่าเชื้อโรคใน Upper zone ตามสมการ (3-8) ได้ผลการศึกษาดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข3.1-ข3.3 และรูปที่ 4.17 โดยสามารถพิจารณาค่าปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ตามปัจจัยด้านต่าง ๆ ได้ดังนี้

#### 4.4.1 ปริมาณรังสี UVC กับสภาวะด้านรูปแบบการระบายอากาศ

##### 4.4.1.1 ปริมาณรังสี UVC กับตำแหน่งช่องระบายอากาศ

ปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ของหลอด UVC ที่มีการจัดตำแหน่งช่องระบายอากาศเป็น 3 รูปแบบ คือ L/H, H/L และ H/H มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.17 โดยพบว่า ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H มีปริมาณรังสี UVC สูงที่สุดในทุกอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและกำลังไฟหลอด UVC รองลงมา ได้แก่ ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L ส่วนตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H มีปริมาณรังสี UVC ต่ำที่สุด ทั้งนี้ เนื่องจากผลการศึกษาระยะเวลาที่อนุภาคในพื้นที่ Upper zone พบว่า ตำแหน่งที่มีระยะเวลานานที่สุด คือแบบ L/H และตามด้วย H/L และ H/H ดังนั้น ปริมาณรังสีซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะเวลาจึงเรียงลำดับในลักษณะเดียวกัน

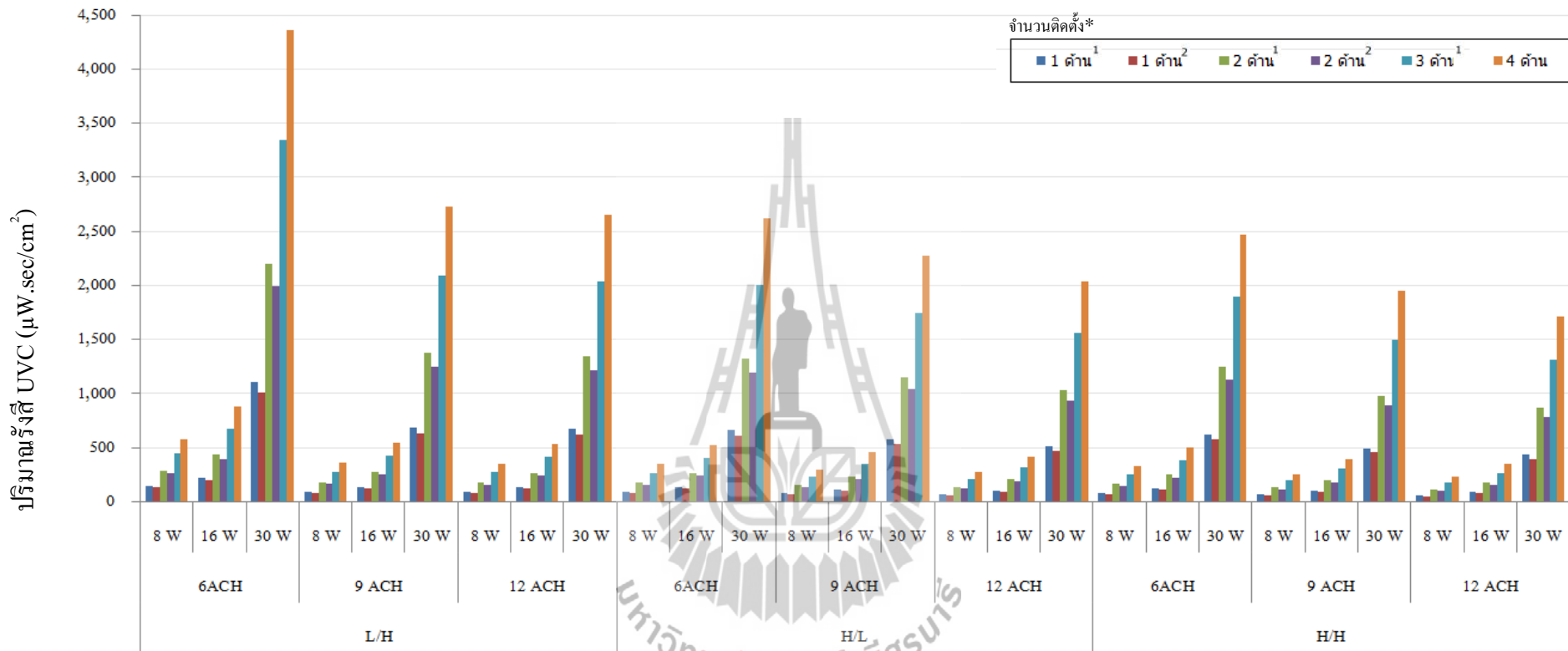
##### 4.4.1.2 ปริมาณรังสี UVC กับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ

ปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ของหลอด UVC ที่มีการจัดตำแหน่งช่องระบายอากาศ 3 รูปแบบ คือ L/H, H/L และ H/H และแต่ละรูปแบบผันแปรอัตราแลกเปลี่ยนอากาศแตกต่างกัน 3 ค่า คือ 6 ACH, 9 ACH และ 12 ACH มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.17 โดยพบว่า ปริมาณรังสีในพื้นที่ Upper zone แปรผกผันกับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ กล่าวคือ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH มีปริมาณรังสี UVC สูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศเป็น 9 ACH พบว่าปริมาณรังสีมีค่าลดลง และลดลงต่ำสุดเมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศเท่ากับ 12 ACH ทั้งนี้ เป็นผลมาจากในห้องจำลองที่มีการระบายอากาศด้วยอัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่ต่ำ จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศภายในห้องจำลองช้ากว่าอัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่สูง ดังนั้น อนุภาคเชื้อโรคจึงมีระยะเวลาเคลื่อนที่ที่อยู่ในห้องจำลองและมีโอกาสสัมผัสกับรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ได้นานกว่าเมื่อเทียบกับเมื่อมีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศสูง ๆ

#### 4.4.2 ปริมาณรังสี UVC กับสภาวะของหลอด UVC

##### 4.4.2.1 ปริมาณรังสี UVC กับกำลังไฟของหลอด UVC

ปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ของระบบ UVGI ที่ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 8 W, 16 W และ 30 W มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.17 โดยพบว่า ปริมาณรังสีในพื้นที่ Upper zone แปรผันตามกำลังไฟของหลอด UVC กล่าวคือ ในระบบที่มี



กำลังไฟหลอด UVC จำนวนด้านติดตั้งระบบ อัตรแลกเปลี่ยนอากาศ และรูปแบบระบบระบายอากาศ

\*จำนวนติดตั้ง 1 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1 ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา, 2 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2 ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา, 3 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

รูปที่ 4.17 ปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ของหลอด UVC ที่สภาวะด้านรูปแบบการระบายอากาศและสภาวะด้านหลอด UVC ต่าง ๆ

การจัดตำแหน่งช่องระบายอากาศ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศเดียวกัน และจำนวนด้านที่ติดตั้งหลอด UVC เท่ากัน เมื่อติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟขนาด 8 W จะมีค่าปริมาณรังสีในพื้นที่ Upper zone ต่ำที่สุด โดยเมื่อเพิ่มกำลังไฟหลอดเป็น 16 W ปริมาณรังสีจะมีค่าสูงขึ้นด้วยและมีค่าสูงที่สุดเมื่อเพิ่มกำลังไฟหลอด UVC เป็น 30 W ทั้งนี้ สืบเนื่องมาจากการเพิ่มกำลังไฟหลอด UVC มีผลทำให้ความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone สูงขึ้นซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณรังสี UVC

#### 4.4.2.2 ปริมาณรังสี UVC กับจำนวนด้านที่ติดตั้งหลอด UVC

ปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ของระบบ UVGI ที่ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟขนาดเดียวกัน จำนวน 1 หลอด บนผนังห้องจำลองที่ระดับเดียวกันด้วยจำนวนด้านแตกต่างกัน 4 ด้าน 6 รูปแบบ คือ (1) ติดตั้ง 1 ด้าน จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ ที่ผนังด้านหน้าหรือด้านหลัง กับที่ผนังด้านซ้ายหรือด้านขวา (2) ติดตั้ง 2 ด้าน จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ ที่ผนังด้านหน้าและด้านหลัง กับที่ผนังด้านซ้ายกับด้านขวา (3) ติดตั้ง 3 ด้าน ที่ผนังด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา และ (4) ติดตั้ง 4 ด้านที่ผนังด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้ายและด้านขวา มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.17 โดยพบว่า ปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone แปรผันตามจำนวนด้านของผนังที่ติดตั้งหลอด UVC กล่าวคือ ในระบบฯ ที่มีการจัดตำแหน่งช่องระบายอากาศ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศเดียวกัน และกำลังไฟหลอด UVC ขนาดเท่ากัน หลอด UVC ที่ติดตั้งบนผนังห้องเพียง 1 ด้าน จะมีค่าปริมาณรังสี UVC ต่ำสุด และมีค่าสูงขึ้นเมื่อติดตั้งหลอด UVC บนผนังเพิ่มขึ้นเป็น 2 ด้าน 3 ด้าน โดยมีค่าสูงสุดเมื่อติดตั้งครบทั้ง 4 ด้าน ทั้งนี้ เนื่องจากการติดตั้งหลอด UVC บนผนังจำนวนด้านมากขึ้น เป็นการเพิ่มแหล่งกำเนิดรังสี UVC ทำให้ความเข้มรังสีในพื้นที่ Upper zone สูงขึ้นตามจำนวนด้านที่ติดตั้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า การติดตั้งบนผนังห้องด้วยจำนวนที่เท่ากัน ได้แก่ ติดตั้ง 1 ด้าน และติดตั้ง 2 ด้าน การติดตั้งบนผนังห้องด้านหน้าและหรือด้านหลัง จะมีค่าปริมาณรังสี UVC สูงกว่าการติดตั้งบนผนังห้องด้านซ้ายและหรือด้านขวา ทั้งนี้ ผลดังกล่าวเป็นไปตามสมการ (3-2) ความเข้มของรังสีแปรผกผันกับระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของหลอด UVC และจากสมการ (3-2) ดังกล่าวก็ยังพบว่าความเข้มรังสีด้านหน้าหลอดสูงกว่าด้านข้างหลอด ทั้งนี้เนื่องจากห้องจำลองมีความกว้างซึ่งเป็นผนังด้านหน้าหรือด้านหลัง 3.0 m และความลึกซึ่งเป็นผนังด้านซ้ายหรือด้านขวา 3.5 m จึงทำให้ผนังด้านหน้าหรือด้านหลังมีพื้นที่ผนังด้านข้างหลอดน้อยกว่าหลอดที่ติดตั้งผนังด้านซ้ายหรือขวา ดังนั้น เมื่อคำนวณค่าความเข้มรังสีเฉลี่ยจึงมีค่าสูงกว่า และจากปริมาณรังสีซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะเวลากับความเข้มรังสี เมื่อความเข้มรังสีสูงกว่า จึงมีผลทำให้ปริมาณรังสีสูงกว่าด้วย

#### 4.4.2.3 ปริมาณรังสี UVC กับระดับที่ติดตั้งหลอด UVC

เมื่อพิจารณาปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ของหลอด UVC ที่ติดตั้งบนผนังห้องจำลองระดับความสูงจากพื้นแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 2.7 m, 3.0 m และ 3.3 m โดยพบว่า ในทุกรูปแบบของตำแหน่งช่องระบายอากาศ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ และกำลังไฟหลอด UVC ที่ติดตั้งระดับความสูงจากพื้น 3.0 m มีปริมาณรังสี UVC สูงสุด รองลงมาได้แก่ที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 m และ 2.7 m ทั้งนี้ บานเกล็ดทำให้เกิดการสะท้อนรังสีขึ้นด้านบน ระบบที่ติดตั้งใกล้กับเพดานมากกว่าจะเกิดการสะท้อนกลับจากเพดานมากกว่า ค่าเฉลี่ยรังสีของหลอดที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.0 m จึงสูงกว่าที่ติดตั้งสูงจากพื้น 2.7 m ส่วนระบบที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 m แม้จะอยู่ใกล้เพดานห้องมากกว่า แต่พบว่า มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ต่ำกว่าที่ติดตั้งระดับ 3.0 m เนื่องจากมีพื้นที่ใต้ระดับติดตั้งมากกว่า ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวนี้จะมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ต่ำลงมาก โดยได้แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสี UVC ที่ติดตั้งหลอดระดับต่าง ๆ ดังในภาคผนวก ข รูปที่ ข1- ข3

#### 4.4.3 การสรุปปริมาณรังสี UVC สูงสุดที่ได้จากการศึกษา

จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่า สภาวะด้านรูปแบบการระบายอากาศ และสภาวะด้านหลอด UVC ที่ติดตั้งระบบฯ ซึ่งมีผลทำให้ได้ปริมาณรังสี UVC สูงสุด มีค่าเฉลี่ย 4,418.61  $\mu\text{W.s/cm}^2$  เกิดขึ้นภายใต้การติดตั้งระบบฯ ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ระดับการติดตั้งระบบสูงจากพื้น 3 เมตร นอกจากนี้ หากพิจารณาปริมาณรังสี UVC สูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อแปรผันกำลังไฟหลอด UVC และจำนวนด้านที่ติดตั้งหลอด UVC พบผลการศึกษา ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปริมาณรังสี UVC สูงสุด จากระบบ UVGI ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ระดับติดตั้งหลอด UVC 3.0 m ตามกำลังไฟหลอด UVC และจำนวนด้านติดตั้ง

กำลังไฟ (W)	ปริมาณรังสี UVC สูงสุด ( $\mu\text{W.s/cm}^2$ )					
	1 ด้าน <sup>1</sup>	1 ด้าน <sup>2</sup>	2 ด้าน <sup>1</sup>	2 ด้าน <sup>2</sup>	3 ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
8	162.65	144.13	325.30	288.65	499.36	645.06
16	257.23	229.08	514.46	457.16	787.87	257.23
30	1,115.21	1,018.76	2,230.42	2,007.87	3,392.45	4,418.61

หมายเหตุ 1 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1 ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา

2 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2 ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา

3 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

## 4.5 การประเมินอัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC

ค่าอัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC มีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นค่าที่ถูกใช้ในการวัดประสิทธิภาพของหลอด UVC ที่ออกแบบ ระบบที่มีอัตราการฆ่าเชื้อโรคสูง เป็นผลมาจากการติดตั้งหลอด UVC ที่ทำให้เชื้อโรคสัมผัสกับรังสี UVC ในปริมาณมากและมีผลทำให้มีสัดส่วนการรอดชีวิตของเชื้อโรคน้อย ซึ่งสะท้อนถึงการมีประสิทธิภาพสูงของหลอด UVC เมื่อนำผลจากการศึกษาปริมาณรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ตามข้อ 4.4 มาวิเคราะห์หาอัตราการฆ่าเชื้อโรคของระบบฯ ตามสมการ (3-9) เช่น ห้องจำลองที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W บนผนังห้องด้านหน้า 1 ด้าน ที่ระดับความสูง 2.7 m มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC เท่ากับ  $1.37 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และมีระยะเวลาอนุภาคเชื้อไวรัสโรคเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปใน Upper zone เท่ากับ 105.74 วินาที ดังนั้น จึงมีปริมาณรังสีใน Upper zone เท่ากับ  $144.33 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  และเมื่อคำนวณตามสมการ (3-9) สถานะดังกล่าวนี้จะมีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 49.41 ดังตัวอย่างการคำนวณ ต่อไปนี้

จากสมการ (3-9)

$$\text{KR} = (1 - e^{-Z \cdot \text{UV}_{\text{Dose}}}) \times 100$$

โดยที่

$$\text{KR} = \text{อัตราการฆ่าเชื้อโรค (ร้อยละ)}$$

$$Z = \text{ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของเชื้อ}$$

โดยเชื้อไวรัสโรคเท่ากับ  $0.4721 \text{ m}^2/\text{J}$

$$\text{UV}_{\text{Dose}} = \text{ปริมาณรังสี UVC (W}\cdot\text{s}/\text{m}^2)$$

แทนค่า

$$\text{KR} = (1 - \exp(-0.4721 (\text{m}^2/\text{J}) \times 144.33 (\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2))) \times 100$$

$$\text{KR} = (1 - 0.5059) \times 100$$

ดังนั้น

$$\text{KR} = 49.41$$

โดยมีผลการศึกษาอัตราการฆ่าเชื้อโรค ดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข1.1-ข1.3 และรูปที่ 4.18 โดยพบว่า ค่าอัตราการฆ่าเชื้อโรคมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสี UVC โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

### 4.5.1 อัตราการฆ่าเชื้อโรคกับสถานะด้านตำแหน่งช่องระบายอากาศ

#### 4.5.1.1 อัตราการฆ่าเชื้อโรคกับตำแหน่งช่องระบายอากาศ

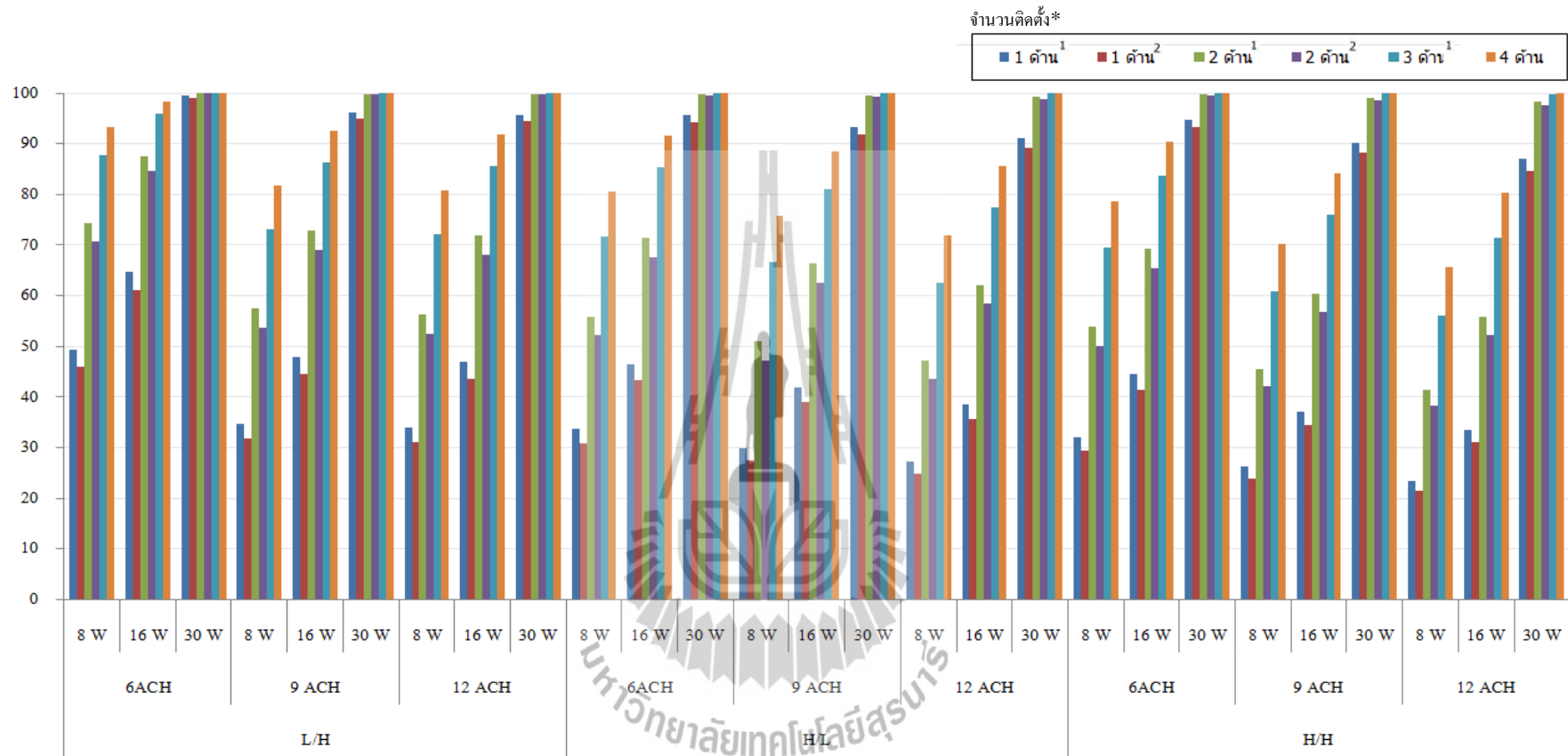
อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC ที่มีการจัดตำแหน่งช่องระบายอากาศ เป็น 3 รูปแบบ คือ L/H, H/L และ H/H มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.18 โดยพบว่า ตำแหน่งช่องระบาย

อากาศแบบ L/H มีอัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงสุดในทุกอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ และกำลังไฟหลอด UVC ร่องลงมา ได้แก่ ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L ส่วนตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H มีอัตราการฆ่าเชื้อโรคต่ำที่สุด ตัวอย่างเช่น หลอด UVC ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H มีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟ 16 W ที่ผนังด้านหน้าด้านเดียว พบว่า มีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 64.69 เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งช่องระบายอากาศเป็นแบบ H/L และ H/H จะมียอัตราการฆ่าเชื้อลดลงเป็น ร้อยละ 46.50 และ 44.55 ตามลำดับ หรืออีกนัยหนึ่ง ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H มีอัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L และ H/H ร้อยละ 18.19 และ 20.12 ตามลำดับ ทั้งนี้ เหตุผลเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้วในการวิเคราะห์ปริมาณรังสี UVC ข้อ 4.4.1.1

#### 4.5.1.2 อัตราการฆ่าเชื้อโรคกับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ

อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC ที่มีการผันแปรอัตราแลกเปลี่ยนอากาศแตกต่างกัน 3 ค่า คือ 6 ACH, 9 ACH และ 12 ACH มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.18 โดยพบว่า อัตราการฆ่าเชื้อโรคแปรผกผันกับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ กล่าวคือ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH มีอัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศเป็น 9 ACH พบว่าอัตราการฆ่าเชื้อโรคมีค่าลดลง และลดลงต่ำสุดเมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศเท่ากับ 12 ACH ตัวอย่างเช่น ระบบฯ ที่มีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟ 16 W ที่ผนังด้านหน้าด้านเดียว พบว่ามีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 64.69 เมื่อเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศเป็น 9 ACH และ 12 ACH จะมียอัตราการฆ่าเชื้อโรคลดลงเป็นร้อยละ 47.88 และ 46.91 ตามลำดับ หรือลดลงร้อยละ 16.81 และ 17.78 ตามลำดับ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากในห้องจำลองที่มีการระบายอากาศด้วยอัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่สูง จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศภายในห้องจำลองเร็วกว่าอัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่ต่ำ ดังนั้น อนุภาคเชื้อโรคจึงมีระยะเวลาเคลื่อนที่อยู่ภายในห้องจำลองและมีโอกาสสัมผัสกับรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ได้สั้นกว่าเมื่อเทียบกับเมื่อมีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศต่ำ ๆ จึงทำให้อัตราการฆ่าเชื้อโรคต่ำตามไปด้วย และจะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศจาก 6 ACH เป็น 9 ACH หรือเพิ่มขึ้น ร้อยละ 50 กับการเพิ่มจาก 6 ACH เป็น 12 ACH หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 100 กลับมีผลทำให้อัตราการฆ่าเชื้อโรคลดลงต่างกันเพียงร้อยละ 0.97 เท่านั้น หรืออีกนัยหนึ่ง การเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศจาก 6 ACH เป็น 9 ACH มีผลทำให้อัตราแลกเปลี่ยนอากาศลดลงมากกว่าการเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศจาก 9 ACH เป็น 12 ACH

อัตราการฆ่าเชื้อโรค (ร้อยละ)



กำลังไฟหลอด UVC จำนวนด้านติดตั้งหลอด ระบบ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ และรูปแบบการระบายอากาศ

\* จำนวนติดตั้ง 1 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1 ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา, 2 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2 ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา, 3 ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

รูปที่ 4.18 อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC ที่สภาวะด้านรูปแบบการระบายอากาศและสภาวะด้านหลอด UVC ต่าง ๆ



## 4.5.2 อัตราการฆ่าเชื้อโรคกับสถานะของหลอด UVC

### 4.5.2.1 อัตราการฆ่าเชื้อโรคกับกำลังไฟของหลอด UVC

อัตราการฆ่าเชื้อโรคของระบบ UVGI ที่ติดตั้งด้วยหลอด UVC ที่มีกำลังไฟแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 8 W, 16 W และ 30 W มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.18 โดยพบว่า อัตราการฆ่าเชื้อโรคแปรผันตามกำลังไฟของหลอด UVC กล่าวคือ ในระบบฯ ที่มีการจัดตำแหน่งช่องระบายอากาศ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศเดียวกัน และจำนวนด้านที่ติดตั้งหลอด UVC เท่ากัน เมื่อติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟขนาด 8 W จะมีอัตราการฆ่าเชื้อโรคต่ำที่สุด โดยเมื่อเพิ่มกำลังไฟหลอดเป็น 16 W อัตราการฆ่าเชื้อโรคจะมีค่าสูงขึ้นด้วยและมีค่าสูงสุดเมื่อเพิ่มกำลังไฟหลอด UVC เป็น 30 W ตัวอย่างเช่น หลอด UVC ที่ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟ 8 W ที่ผนังด้านหน้าด้านเดียว มีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H พบว่า มีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 49.41 เมื่อเพิ่มกำลังไฟของหลอด UVC เป็น 16 W และ 30 W จะมีอัตราการฆ่าเชื้อโรคเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 64.69 และ 99.45 ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.28 และ 50.04 ส่วนการเพิ่มกำลังไฟจาก 16 W เป็น 30 W นั้น จะมีอัตราการฆ่าเชื้อโรคเพิ่มขึ้น ร้อยละ 34.76 ทั้งนี้ สืบเนื่องมาจากการเพิ่มกำลังไฟของหลอด UVC มีผลทำให้ความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone สูงขึ้นซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณรังสีและอัตราการฆ่าเชื้อโรคของระบบ

### 4.5.2.2 อัตราการฆ่าเชื้อโรคกับจำนวนด้านที่ติดตั้งหลอด UVC

อัตราการฆ่าเชื้อโรคของระบบ UVGI ที่ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟขนาดเดียวกัน จำนวน 1 หลอด บนผนังห้องจำลองที่ระดับเดียวกันด้วยจำนวนด้านแตกต่างกัน 4 ด้าน 6 รูปแบบ คือ (1) ติดตั้ง 1 ด้าน จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ ที่ผนังด้านหน้าหรือด้านหลัง กับที่ผนังด้านซ้ายหรือด้านขวา (2) ติดตั้ง 2 ด้าน จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ ที่ผนังด้านหน้าและด้านหลัง กับที่ผนังด้านซ้ายกับด้านขวา (3) ติดตั้ง 3 ด้าน ที่ผนังด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา และ (4) ติดตั้ง 4 ด้านที่ผนังด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้ายและด้านขวา มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.17 โดยพบว่า อัตราการฆ่าเชื้อโรคแปรผันตามจำนวนด้านของผนังที่ติดตั้งหลอด UVC กล่าวคือในระบบฯ ที่มีการจัดตำแหน่งช่องระบายอากาศ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศเดียวกัน และกำลังไฟหลอด UVC ขนาดเท่ากัน หลอด UVC ที่ติดตั้งบนผนังห้องเพียง 1 ด้าน จะมีอัตราการฆ่าเชื้อโรคต่ำสุด และมีค่าสูงขึ้นเมื่อติดตั้งหลอด UVC บนผนังเพิ่มขึ้นเป็น 2 ด้าน 3 ด้าน โดยมีค่าสูงสุดเมื่อติดตั้งครบทั้ง 4 ด้าน ตัวอย่างเช่น ระบบฯ ที่ติดตั้งบนผนังด้านหน้าเพียงด้านเดียวด้วยหลอด UVC กำลังไฟ 16 W มีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH และตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H พบว่า มีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 49.41 แต่เมื่อติดตั้งหลอด UVC ที่ผนังเพิ่มเป็น 2 ด้าน (ด้านหน้าและด้านหลัง) 3 ด้าน (ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้าย) และ 4 ด้าน จะมีอัตราการฆ่าเชื้อโรคเพิ่มขึ้นเป็น

ร้อยละ 87.53, 95.89 และ 98.41 ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 38.12, 46.48 และ 49.00 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนผนังติดตั้งระบบ จาก 1 ด้านเป็น 2 ด้าน มีผลในการเพิ่มอัตราการฆ่าเชื้อโรคของระบบฯ ขึ้นร้อยละ 38.12 หรือมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเพิ่มผนังติดตั้งจาก 2 เป็น 3 ด้าน (เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.36) และจาก 3 เป็น 4 ด้าน (เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.52) นอกจากนี้ยังพบว่า การติดตั้งหลอด UVC บนผนังห้องด้านหน้าและหรือด้านหลัง จะมีอัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าการติดตั้งหลอด UVC บนผนังห้องด้านซ้ายและหรือด้านขวา ตัวอย่างเช่น ระบบฯ ที่ติดตั้งบนผนังด้านหน้าด้านเดียวด้วยหลอด UVC กำลังไฟ 16 W มีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH และตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H พบว่า มีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 64.69 เมื่อเปลี่ยนด้านติดตั้งหลอด UVC เป็นผนังด้านซ้ายเพียงด้านเดียว จะมีอัตราการฆ่าเชื้อลดลงเป็น ร้อยละ 61.09 หรือลดลง ร้อยละ 3.60 ทั้งนี้เนื่องจาก ห้องจำลองมีความกว้างซึ่งเป็นผนังด้านหน้าหรือด้านหลัง 3.0 m และความลึกซึ่งเป็นผนังด้านซ้ายหรือด้านขวา 3.5 m จึงทำให้ผนังด้านหน้าหรือด้านหลังมีพื้นที่ผนังด้านข้างของหลอดน้อยกว่าหลอดที่ติดตั้งผนังด้านซ้ายหรือขวา ดังนั้น เมื่อคำนวณค่าความเข้มข้นรังสีจึงมีค่าสูงกว่า และจากปริมาณรังสีซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะเวลากับความเข้มข้นรังสี เมื่อความเข้มข้นรังสีสูงกว่าจึงมีผลทำให้ปริมาณรังสีและอัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าด้วย

#### 4.5.2.3 อัตราการฆ่าเชื้อโรคกับระดับการติดตั้งหลอด UVC

อัตราการฆ่าเชื้อโรค ในพื้นที่ Upper zone ของระบบ UVGI มีผลการศึกษาสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการศึกษาระดับรังสี UVC ตามข้อ 4.4.2.3 เนื่องจากมีที่มาจากการใช้ค่าความเข้มข้นรังสี UVC ค่าเดียวกันในการคำนวณ โดยพบว่า การติดตั้งหลอด UVC บนผนังห้องที่ระดับความสูงจากพื้นแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 2.7 m, 3.0 m และ 3.3 m ในทุกรูปแบบของตำแหน่งช่องระบายอากาศ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ และกำลังไฟหลอด UVC ระบบฯ ที่ติดตั้งระดับความสูงจากพื้น 3.0 m อัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงสุด รองลงมาได้แก่ที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 m และ 2.7 m ตามลำดับ ทั้งนี้ ได้แสดงการเปรียบเทียบอัตราการฆ่าเชื้อโรคที่ระดับการติดตั้งหลอดต่าง ๆ ดังในภาคผนวก ข รูปที่ ข4.1-ข4.3

#### 4.5.3 อัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงสุดที่ได้จากการศึกษา

สภาวะของระบบ UVGI ที่มีอัตราการฆ่าเชื้อสูงสุด พบดังตารางที่ 4.8 กล่าวคือ ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H ที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟ 30 W บนผนัง 3 ด้าน และ 4 ด้าน ที่ระดับความสูงจากพื้น 2.7 m, 3.0 m และ 3.3 m ตามลำดับ โดยมีอัตราการฆ่าเชื้อโรค เท่ากับ ร้อยละ 100 เนื่องจาก ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ทำให้อนุภาคเชื้อวันโรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone นานที่สุด

**ตารางที่ 4.8** อัตราการฆ่าเชื้อโรค สูงสุด จากระบบ UVGI ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ระดับติดตั้งหลอด UVC 3.0 m ตามกำลังไฟหลอด UVC และจำนวนด้านติดตั้ง

กำลังไฟ (W)	อัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงสุด (ร้อยละ)					
	1 ด้าน <sup>1</sup>	1 ด้าน <sup>2</sup>	2 ด้าน <sup>1</sup>	2 ด้าน <sup>2</sup>	3 ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
8	53.60	49.36	78.47	74.40	90.53	95.24
16	70.31	66.09	91.19	88.45	97.58	99.19
30	99.48	99.18	100.00	99.99	100.00	100.00

**หมายเหตุ** 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา  
 2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา  
 3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

ส่วนหลอด UVC กำลังไฟ 30 W เป็นหลอดที่มีกำลังไฟสูงที่สุด และการติดตั้งบนผนัง 3 ด้าน และ 4 ด้าน เป็นเพิ่มความเข้มรังสีใน Upper zone ให้มีค่าสูงและสูงที่สุดของการติดตั้งในแต่ละระดับ ดังนั้น จึงมีผลทำให้อัตราการฆ่าเชื้อสูงสุดดังกล่าว

#### 4.6 สภาพที่เหมาะสมของหลอด UVC และประเมินประสิทธิภาพ

จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่า ที่สภาวะอัตราแลกเปลี่ยนอากาศต่ำ ๆ และตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H ที่มีช่องจ่ายอากาศเข้าระดับต่ำและช่องดูดอากาศออกระดับสูงที่อยู่ด้านตรงกันข้าม และติดตั้งระบบฯ ด้วยหลอด UVC กำลังไฟสูง ที่ระดับสูงจากพื้น 3.0 m จะทำให้ระบบฯ มีอัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าระบบฯ ที่มีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศสูงและตำแหน่งช่องระบายอากาศรูปแบบอื่นที่มีช่องจ่ายอากาศเข้าระดับสูงและช่องดูดอากาศออกระดับต่ำ หรืออยู่ระดับตรงกัน ได้แก่ H/L หรือ H/H ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ko et al (2000) ที่พบว่าประสิทธิภาพของระบบ UVGI จะสูงเมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศต่ำ ๆ กำลังไฟของหลอดสูง และการศึกษาของ Beggs และ Sleight (2002) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าระบบ UR UVGI สามารถทำงานได้ดีที่อัตราการระบายอากาศต่ำ และประสิทธิภาพลดลงเมื่อมีการติดตั้งตำแหน่งช่องระบายอากาศไว้ระดับสูง โดยพบว่าที่อัตราการระบายอากาศ 2 ACH หลอด UV ขนาด 30 W มีประสิทธิภาพ ร้อยละ 30 และเมื่ออัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 16 ACH แต่ใช้หลอดขนาดเดิม พบว่า ประสิทธิภาพลดลงเหลือ ร้อยละ 23.3 และในการศึกษาของ Zhang Z, Chen Q.(2006) และ Khan JA et al. (2006) ที่ศึกษาถึงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องดูดอากาศกับประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของอนุภาค พบว่า ตำแหน่ง

ติดตั้งใกล้พื้นมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของอนุภาคได้มากกว่า ทั้งนี้ ระบบที่ศึกษาดังกล่าวมีลักษณะตำแหน่งช่องระบายอากาศเช่นเดียวกับแบบ H/L จึงทำเชื้อโรคถูกดูดออกจากห้องเร็วกว่า ระบบ L/H ทำให้ระยะเวลาอยู่ในห้องน้อยกว่า จึงมีระยะเวลาสัมผัสกับรังสี UVC ใน Upper zone น้อยกว่า และส่งผลทำให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อเทียบกับแบบ L/H

นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Miller et al. (2002) ที่ว่าพบอากาศจากท่อจ่ายอากาศถูกดูดออกจากท่อดูดอากาศที่ติดตั้งอยู่ในด้านตรงกันข้ามและระดับเดียวกันโดยตรง เช่นเดียวกับแบบ H/H ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ของอากาศที่จ่ายเข้าภายในห้องแต่ถูกดูดออกโดยตรงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น เชื้อโรคที่อยู่ใน Upper zone ซึ่งอยู่ในระดับเดียวกับระดับติดตั้งท่อจ่ายและดูดอากาศออก จึงถูกดูดออกไปพร้อมกับอากาศอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน ดังนั้น ระยะเวลาอยู่ในห้องจึงมีน้อย ประสิทธิภาพจึงต่ำกว่า และในผลการศึกษาของ Noakes et al. (2004) ได้ทำการศึกษาโดยจำลองการระบายอากาศ 4 ลักษณะ มีการติดตั้งท่อจ่ายอากาศและท่อดูดอากาศไว้บนผนังที่อยู่ฝั่งตรงกันข้ามกันในระดับใกล้กับเพดานหรือใกล้กับพื้น พบว่า ในการศึกษาเมื่อท่อจ่ายอากาศและท่อดูดอากาศออกถูกติดตั้งอยู่ในพื้นที่ส่วนบนของห้องจะทำการผสมอากาศที่ไม่ดีมากที่สุด ซึ่งมีผลในการลดโอกาสการสัมผัสรังสี UVC ของเชื้อโรคในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H ด้วยเหตุผลต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ จึงส่งผลให้ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาเฉพาะการเพิ่มกำลังหลอด UVC เช่น ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH เพิ่มกำลังหลอดจาก 8 W เป็น 16 W และจาก 16 W เป็น 30 W พบมีอัตราการฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้น ร้อยละ 15.28 และ 30.76 พบว่าไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Beggs และ Sleight (2002) ที่พบว่า การเพิ่มกำลังไฟของหลอด UV จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหลอด UVC ขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยพบว่า หลอด UV ขนาด 30 W ที่อัตราการระบายอากาศ 2 ACH ประสิทธิภาพเท่ากับ ร้อยละ 79.9 และเมื่อเพิ่มกำลังหลอด UV เป็น 115 W (เพิ่มขึ้น 3.2 เท่า) กลับพบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียง ร้อยละ 12.3 เท่านั้น ส่วนจำนวนหลอด UVC ที่ติดตั้งพบว่า การติดตั้งหลอดเพิ่มบนผนังด้านตรงกันข้ามตามแนวกว้างของห้องจะมีอัตราการฆ่าเชื้อมากกว่าการติดตั้งตามแนวยาวของห้อง ซึ่งสอดคล้องกับข้อแนะนำของ Miller et al. (2002) ที่ศึกษาถึงตำแหน่งการติดตั้งหลอด UVC พบว่า ปริมาณรังสี UVC จะลดลงเมื่อมีการติดตั้งหลอด UVC เพียงด้านใดด้านหนึ่งของห้องและได้เสนอแนะให้มีการกระจายของ UVGI ในพื้นที่ส่วนบนของห้องให้คล้ายคลึงกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ด้วยการติดตั้งหลอดมากกว่า 1 ด้าน โดยเฉพาะด้านที่อยู่ตรงกันข้าม

กล่าวโดยสรุป การศึกษาสภาวะระบบ UVGI นี้ เพื่อหวังผลในการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคที่ ให้ผลการฆ่าเชื้อสูงสุดและเป็นไปตามมาตรฐานด้านความปลอดภัยในการทำงานสภาวะปกติใน

พื้นที่ที่มีรังสี UVC ของเจ้าหน้าที่ เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง/วัน (ไม่ใช่สภาวะสำหรับผู้ป่วย) โดยหลอด UVC ที่มีความเหมาะสมนั้น จะเป็นระบบฯ ที่มีการจัดรูปแบบการระบายอากาศที่เหมาะสม มีการติดตั้งด้วยหลอด UVC ที่มีกำลังไฟ จำนวนหลอด และตำแหน่งติดตั้งที่ทำให้เกิดความเข้มรังสี UVC สูงถึงระดับที่กำหนด มีการกระจายของรังสีอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง มีปริมาณมากพอ สำหรับการฆ่าเชื้อโรค โดยที่ระดับความสูงจากพื้น 1.7 ม. มีค่าความเข้มรังสีไม่เกิน  $0.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  โดยพบว่า มีเพียงระบบฯ ที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 8 วัตต์ ที่ระดับความสูงจากพื้น 3.0 และ 3.3 m และติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 16 W เฉพาะระดับความสูงจากพื้น 3.3 m เท่านั้นที่มีค่าความเข้มรังสีไม่เกินค่าที่กำหนด ดังตารางที่ 4.9

**ตารางที่ 4.9** ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ระดับความสูงจากพื้น 1.7 m ของระบบ UVGI ติดตั้งบนผนัง ด้วยหลอดกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นต่าง ๆ

กำลังไฟ (W)	ระดับติดตั้ง ระบบ (m)	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )						สรุปความเหมาะสม
		1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	
8	2.7	0.14	0.13	0.29	0.25	0.14	0.54	ไม่ได้ตามมาตรฐาน
	3.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	ได้ตามมาตรฐาน
	3.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	ได้ตามมาตรฐาน
16	2.7	0.31	0.34	0.62	0.68	0.98	1.30	ไม่ได้ตามมาตรฐาน
	3.0	0.31	0.33	0.63	0.66	0.98	1.29	ไม่ได้ตามมาตรฐาน
	3.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	ได้ตามมาตรฐาน
30	2.7	5.49	5.41	10.98	10.82	16.66	21.80	ไม่ได้ตามมาตรฐาน
	3.0	1.76	1.37	3.53	2.75	4.94	6.28	ไม่ได้ตามมาตรฐาน
	3.3	1.77	1.41	3.55	2.83	4.99	6.37	ไม่ได้ตามมาตรฐาน

**หมายเหตุ** 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา  
 2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา  
 3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

ผลการศึกษา ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.19 สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมของระบบ UVGI และประสิทธิภาพของระบบฯ ในที่นี้ได้ใช้อัตราการฆ่าเชื้อโรคในการอธิบายประสิทธิภาพของหลอด UVC ดังนี้

#### 4.6.1 อัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่เหมาะสม

พบว่า หลอด UVC ที่มีการจัดตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ทำให้อุณหภูมิเชื้อวัณโรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone นานที่สุดเฉลี่ย 105.74 วินาที

**ตารางที่ 4.10** สภาพที่เหมาะสมระบบ UVGI และประสิทธิภาพที่ได้จากการศึกษา

กำลังไฟ (W)	ระดับติดตั้ง ระบบ (m)	ประสิทธิภาพของหลอด UVC (ร้อยละ)					
		1 ด้าน <sup>1</sup>	1 ด้าน <sup>2</sup>	2 ด้าน <sup>1</sup>	2 ด้าน <sup>2</sup>	3 ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
8	3.0	53.60	49.36	78.47	74.40	90.53	95.24
	3.3	46.50	43.51	71.38	67.92	85.44	91.82
16	3.3	63.45	60.49	86.64	84.00	95.40	98.19

หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

#### 4.6.2 สภาพของหลอด UVC ที่เหมาะสม

พบว่า ระบบฯ ที่มีความเข้มรังสีระดับสูงไม่เกิน 1.7 m สูงไม่เกิน 0.2  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตามมาตรฐานกำหนด เป็นระบบฯ ที่ติดตั้งหลอด UVC ผนังห้องได้ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ด้าน ด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 8 วัตต์ ที่ระดับความสูงจากพื้น 3.0 และ 3.3 m และติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 16 W เฉพาะระดับความสูงจากพื้น 3.3 m เท่านั้น มีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 53.60-98.19 โดยระบบฯ มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ ระบบฯ ที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 16 W บนผนัง 4 ด้าน (ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้ายและด้านขวา) ที่ระดับความสูงจากพื้น 3.3 m มีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 98.19 และหากพิจารณาตามข้อแนะนำในการจัดสภาพแวดล้อมของห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ. 1/2549 ผลดังตารางที่ 4.11

**ตารางที่ 4.11** สภาพที่เหมาะสมของระบบ UVGI และประสิทธิภาพตามมาตรฐานห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ แบบ วศ. 1/2549\*

กำลังไฟ (W)	ระดับติดตั้ง ระบบ (m)	ประสิทธิภาพของหลอด UVC (ร้อยละ)					
		1 ด้าน <sup>1</sup>	1 ด้าน <sup>2</sup>	2 ด้าน <sup>1</sup>	2 ด้าน <sup>2</sup>	3 ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
8	3.0	30.13	27.21	51.18	47.07	66.73	75.87
	3.3	25.33	23.40	44.24	41.19	59.33	68.92
16	3.3	43.45	40.90	68.02	64.59	82.52	89.70

\* กำหนดมาตรฐานตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L อัตราแลกเปลี่ยนอากาศไม่น้อยกว่า 12 ACH

1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา

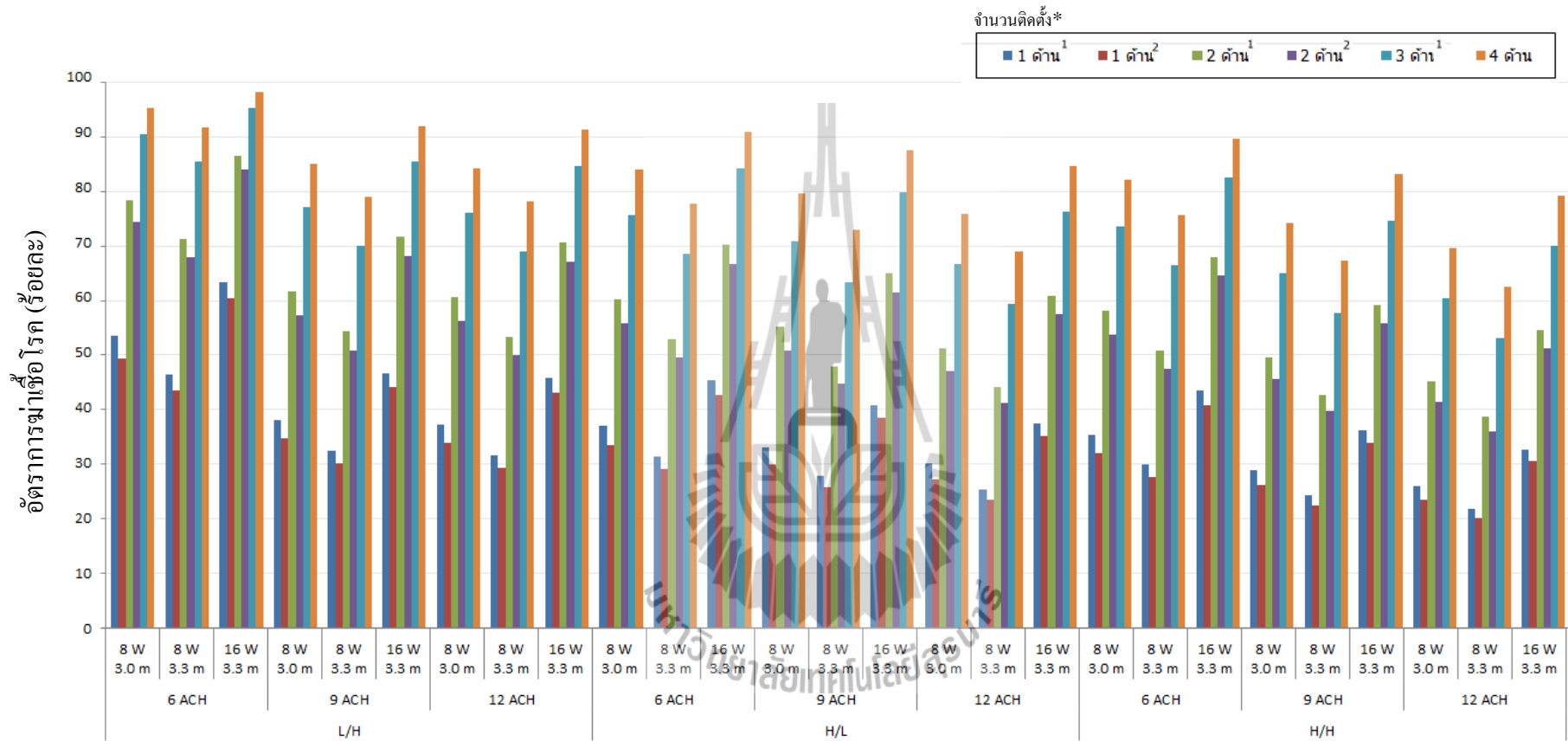
3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

ซึ่งกำหนดให้มีการติดตั้งตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L และอัตราแลกเปลี่ยนอากาศไม่น้อยกว่า 12 ACH ดังนั้นหลอด UVC จะมีประสิทธิภาพลดลงเฉลี่ย ร้อยละ 21.48 โดยมีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 30.13-89.70

#### 4.7 การปรับรูปแบบห้องโดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

เป็นการทดลองขยายผลจากการศึกษา เพื่อพิจารณาถึงความสามารถในการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยเพิ่มการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT ในห้องที่มีรูปแบบแตกต่างออกไปจากการออกแบบทดลองในการศึกษานี้ กล่าวคือ ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในห้องที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศเช่นเดียวกับห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ. 1/2549 ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศเป็นแบบ HL ขนาด (ก x ย)  $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$  อยู่บริเวณหัวเตียงผู้ป่วย ตรงจุดกึ่งกลางผนังด้านขวาได้ขอบหน้าต่าง จากผลการศึกษาด้านสถานะของรูปแบบการระบายอากาศและด้านสถานะของหลอด UVC ในห้องดังกล่าวนี้ พบว่า เป็นระบบที่มีระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาค ปริมาณรังสี UVC และอัตราการฆ่าเชื้อโรคใน Upper zone ต่ำกว่าทุกรูปแบบการระบายอากาศในการศึกษานี้ โดยที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH, 9 ACH และ 12 ACH มีระยะเวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยเท่ากับ 48.09 s, 43.27 s และ 35.58 s ตามลำดับ ดังภาคผนวก ก ตารางที่ ก2 และรูปที่ ก1 มีปริมาณรังสี UVC เฉลี่ยเท่ากับ  $65.65\text{-}1,985.24 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ ,  $59.06\text{-}1,785.99 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  และ  $48.57\text{-}1,468.78 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ และมีอัตราการฆ่าเชื้อโรค เฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 26.65-99.99, 24.33-99.98 และ 20.49-99.09 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม แม้ในภาพรวมระบบฆ่าเชื้อโรคที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/Lnr จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศอื่น ๆ แต่ในทางปฏิบัติยังมีประโยชน์หากนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยการใช้ร่วมกับระบบเดิมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อให้สูงขึ้น



กำลังไฟหลอด UVC ระดับติดตั้ง/จำนวนด้านติดตั้งระบบ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ และรูปแบบระบบระบายอากาศ

จำนวนติดตั้ง 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง, 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา, 2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง, 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา, 3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

รูปที่ 4.19 อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC ที่เหมาะสม ที่สภาวะด้านการระบายอากาศและสภาวะด้านหลอด UVC ต่าง ๆ



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 ตำแหน่งช่องระบายอากาศและอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ

1) ความเร็วของอากาศจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลองเกือบทุกรูปแบบ ตำแหน่งช่องระบายอากาศและอัตราแลกเปลี่ยนอากาศมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าความเร็วอากาศจากการจำลองในแบบจำลองห้องผู้ป่วยด้วย ANSYS FLUENT ยกเว้นตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 9 ACH เท่านั้นที่สูงกว่า ส่วนที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 12 ACH มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน และพบแนวโน้มความเร็วอากาศจากการตรวจวัด มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราแลกเปลี่ยนอากาศสูงขึ้น ทั้งในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H และ H/L ส่วนจากการจำลองฯ พบเฉพาะในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H เท่านั้น

2) ความเร็วอากาศจากการจำลองฯ มีค่าสูงสุด พบในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 12 ACH มีค่าเฉลี่ย 0.137 m/s ส่วนมีค่าต่ำสุด พบในตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L และ H/H โดยอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 9 ACH มีค่าเฉลี่ย 0.080 m/s และ 0.039 m/s

3) ความเร็วอากาศจากการตรวจวัดฯ และจากการจำลองฯ มีความแตกต่างกันเฉพาะในกรณีตำแหน่งช่องระบายอากาศ แบบ L/H ซึ่งอาจมีผลให้ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนในทางที่มีค่าน้อย

4) ระยะเวลาที่อนุภาคฯ เคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone แปรผกผันกับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่เพิ่มขึ้น โดยรูปแบบตำแหน่งช่องระบายอากาศและอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone เป็นเวลานานที่สุดไปสั้นที่สุด คือ ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H, H/L และ H/H และ 6 ACH, 9 ACH และ 12 ACH ตามลำดับ โดยอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH 9 และ 12 ACH ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H ทำให้อนุภาคฯ เคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone เป็นเวลา 105.74 s, 70.44 s และ 62.21 s ตามลำดับ ซึ่งพบว่า เมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ จาก 6 ACH เป็น 9 ACH (ACH เพิ่มขึ้น ร้อยละ 50 ระยะเวลาลดลง ร้อยละ 39.55) กับการเพิ่มจาก 6 ACH เป็น 12 ACH (ACH เพิ่มขึ้น ร้อยละ 100 ระยะเวลาลดลง ร้อยละ 47.78) มีผลทำให้ระยะเวลาต่างกันเพียง 8.28 เท่านั้น

### 5.1.2 สภาพของหลอด UVC

1) การติดตั้งบานเกล็ดบริเวณด้านหน้า เอียงทำมุมขึ้นกับแนวระนาบ 5 องศา มีผลทำให้ค่าความเข้มรังสีของหลอดทุกขนาดมีค่าลดลงใกล้เคียงกัน ประมาณ ร้อยละ 50, 90 และ 97 ที่ระยะห่างจากระบบฯ 1.5 m, 2.25 m และ 3.5 m โดยต่ำกว่าค่าจากการออกแบบ 12.7, 20.6 และ 2.9 เท่าตามลำดับ

2) ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี แปรผกผันกับระยะห่างจากเพดาน ระบบฯ ที่ติดตั้งห่างเพดานน้อยที่สุด (สูงจากพื้น 3.3 m) มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงที่สุด โดยหลอดกำลังไฟ 8 W, 16 W และ 32 W ติดตั้งระดับสูงจากพื้น 3.3 m ทำให้มีค่าเฉลี่ยรังสี UVC เท่ากับ  $4.76 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $6.04 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ  $23.37 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ รองลงมาได้แก่ระดับติดตั้ง 3.0 และ 2.7 m และที่ระดับติดตั้งหลอดมีค่าสูงกว่าที่ระดับต่ำกว่าและสูงกว่าระดับติดตั้งระบบฯ 0.30 m ที่ระดับสูงกว่าระดับติดตั้งระบบฯ 0.30 m ของหลอดกำลังไฟ ขนาด 8 W, 16 W และ 30 W มีค่าสูงกว่าที่ระดับต่ำกว่าระดับติดตั้งระบบฯ 0.30 m เท่ากับ 2.3, 1.3 และ 1.4 เท่า ตามลำดับ

3) ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ Upper zone ของหลอดกำลังไฟทุกขนาดที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.0 m มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ระดับที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 m และ 2.7 m โดยหลอดขนาด 8 W 16 W และ 30 W ติดตั้งระดับสูงจากพื้น 3.0 m ทำให้มีค่าเฉลี่ยรังสี UVC เท่ากับ  $1.53 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $2.43 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ  $10.55 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มกำลังไฟหลอด UVC จาก 8 W เป็น 16 W หรือกำลังไฟ เพิ่มขึ้น 2 เท่า พบค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC เพิ่มขึ้นประมาณ 1.62 เท่า กับการเพิ่มจาก 16 W เป็น 30 W หรือกำลังไฟ เพิ่มขึ้น 1.88 เท่า พบค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC เพิ่มขึ้น ร้อยละ 4.34 เท่า

4) การติดตั้งหลอด UVC กำลังไฟ 8 W, 16 W และ 30 W บนผนังด้านหน้าหรือด้านหลังเพียงด้านเดียว จะมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีมากกว่า ระบบฯ ที่ติดตั้งบนผนังด้านซ้ายหรือขวาเพียงด้านเดียว ร้อยละ 10.9, 10.3 และ 8.5 ตามลำดับ และการติดตั้งบนผนัง 2 ด้านที่อยู่ด้านตรงกันข้ามในระดับเดียวกัน ทำให้ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า การที่ติดตั้งบนผนังด้านหน้าและด้านหลัง จะมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีมากกว่าการที่ติดตั้งบนผนังด้านซ้ายและด้านขวา ประมาณ ร้อยละ 10 ส่วน การที่ติดตั้งด้วยหลอดที่มีกำลังไฟหนึ่ง ๆ จำนวน 2 หลอด บนผนังด้านตรงกันข้ามกัน ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีสูงกว่าระบบที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟสูงกว่า 2 เท่า จำนวน 1 หลอด โดยมีค่าสูงกว่าประมาณร้อยละ 30 การติดตั้งบนผนัง 3 ด้านมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC มากกว่าการติดตั้งบนผนัง 2 ด้านที่ผนังด้านหน้าและด้านหลังเพียงอย่างเดียว ถึงร้อยละ 53.9 ส่วนการติดตั้งบนผนัง 4 ด้าน มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงกว่าการติดตั้งบนผนัง 2 ด้าน ประมาณ 4.4 เท่า

5) ปริมาณรังสี UVC สูงสุดที่ได้จากการศึกษา มีค่าเฉลี่ย  $4,418.61 \mu\text{W}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$

เกิดขึ้นภายใต้การติดตั้งระบบฯ ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟ 30 W บนผนัง 4 ด้าน ระดับการติดตั้งระบบสูงจากพื้น 3 m

### 5.13 การประเมินอัตราการฆ่าเชื้อโรคของระบบ UR UVGI

ระบบฯ ที่มีอัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงสุด มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H ที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 30 W บนผนัง 3 ด้าน และ 4 ด้าน ที่ระดับความสูงจากพื้นทุกระดับ โดยมีอัตราการฆ่าเชื้อโรค เท่ากับ ร้อยละ 100 ส่วนรูปแบบตำแหน่งช่องระบายอากาศที่มีอัตราการฆ่าเชื้อต่ำสุด คือ ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H ที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 12 ACH ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W บนผนัง 1 ด้าน (ซ้ายหรือขวา) ที่ระดับความสูงจากพื้น 3.3 m โดยมีอัตราการฆ่าเชื้อโรค เท่ากับ ร้อยละ 20.08

### 5.1.4 สรุปสถานะที่เหมาะสมของระบบฆ่าเชื้อโรค UR UVG I และประเมินประสิทธิภาพ

การศึกษาสถานะของระบบฆ่าเชื้อโรค UR UVG นี้ เพื่อหวังผลในการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคที่ให้ผลการฆ่าเชื้อสูงสุดและมีค่าตามมาตรฐานกำหนด โดยที่ระดับความสูงจากพื้น 1.7 m มีค่าความเข้มรังสีไม่เกิน  $0.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และใช้อัตราการฆ่าเชื้อโรคในการอธิบายประสิทธิภาพของระบบฯ ดังนี้

1) อัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่เหมาะสม พบว่า ระบบฯ ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L / H ที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 6 ACH ทำให้อนุภาคเชื้อวัณโรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone นานที่สุดเฉลี่ย 105.74 วินาที

2) สถานะของหลอด UVC ที่เหมาะสม เป็นระบบฯ ที่ติดตั้งบนผนังห้องได้ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ด้าน ด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 8 วัตต์ ที่ระดับความสูงจากพื้น 3.0 และ 3.3 m และติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 16 W เฉพาะระดับความสูงจากพื้น 3.3 m เท่านั้น มีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 53.60 - 98.19

3) ระบบฯ ที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 16 W บนผนัง 4 ด้าน ที่ระดับความสูงจากพื้น 3.3 m มีอัตราการฆ่าเชื้อโรค เท่ากับ ร้อยละ 98.19 แต่หากจัดสถานะตามมาตรฐานห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ. 1/2549 ประสิทธิภาพจะลดลงจากเดิมเฉลี่ย ร้อยละ 21.48

## 5.2 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์

1) ห้องพิเศษของโรงพยาบาลชุมชนหรือโรงพยาบาลประจำอำเภอทั่วประเทศส่วนใหญ่เป็นห้องที่มีโครงสร้างตามแบบ วศ. 1/2549 และมีจำนวนมากที่ยังไม่ถูกปรับปรุงเป็นห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศที่ได้มาตรฐาน แต่ยังคงมีความจำเป็นต้องนำผู้ป่วยวัณโรคเข้าไปนอนพักรักษาตัว ในการนำระบบ UVGI นี้ไปใช้งาน จะต้องพิจารณาดำเนินการในเรื่องการจัดทำเป็นห้องปิดสนิทให้มากที่สุด หรือการเพิ่มกำลังและหรือขนาดของพัดลมดูดอากาศเพื่อชดเชยการสูญเสียแรงดูดจากห้องที่ปิดไม่สนิท และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านความปลอดภัยอื่น ๆ ที่จำเป็น

2) ห้องพิเศษที่ถูกปรับปรุงเป็นห้องแยกโรคฯ แต่ไม่ถูกใช้งาน จะมีลักษณะเป็นห้องที่ปิดสนิทอยู่แล้ว ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำระบบ UVGI จากการศึกษาไปติดตั้งใช้งาน

3) ต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมของห้องด้านอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด เนื่องจากมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบฯ และมีผลต่อการเกิดการซ่อมแซม DNA ของเชื้อวัณโรคแล้วทำให้มีความสามารถในการก่อโรคใหม่ได้ในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าร้อยละ 80 ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยติดตั้ง Sensor ตรวจวัดฝ้าระวังและควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมระดับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบอัตโนมัติ

4) การนำระบบฯ ไปใช้เสริมในห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศที่ทำงานปกติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบที่มีอยู่เดิม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงมากกว่า ร้อยละ 95 นั้นสามารถเลือกใช้กำลังไฟหลอด UVC ที่ต่ำลงได้ อีกทั้งยังลดโอกาสในการสัมผัสรังสี UVC ของคนที่อยู่ในห้องลง

5) การนำระบบฯ ไปใช้ในห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศที่ทำงานปกติเพื่อเป็นระบบสำรองในช่วงการซ่อมบำรุงเดิม หรือเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อวัณโรคในช่วงย้ายผู้ป่วยออกหรือพักห้อง จะเพิ่มมาตรการป้องกันควบคุมการแพร่กระจายเชื้อวัณโรคได้มากขึ้น

6) ในขณะที่ใช้งานระบบฯ มีการเปิดใช้รังสี 2 ช่วง คือ ในช่วงที่ผู้ป่วยอยู่ในห้องจะเปิดตลอดเวลา แต่ต้องมีกำหนดช่วงเวลาพักอย่างเหมาะสมซึ่งอาจแตกต่างกันในแต่ละโรงพยาบาล ส่วนในช่วงเตรียมห้องก่อนเข้าผู้ป่วยและหลังผู้ป่วยออกจากห้อง ควรเปิดติดต่อกันอย่างน้อย 30 นาที

## 5.3 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

1) การศึกษาด้านความปลอดภัยของระบบ UVGI ต่อผู้ป่วยที่อยู่ภายในห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ ตามระยะเวลาการรักษาโรค

2) การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ UVGI จากการศึกษาที่ศึกษาด้วย

วิธีการใช้ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของเชื้อโรคจากผลการศึกษาที่ผ่านมา ร่วมกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กับการศึกษาโดยใช้เชื้อชนิดไม่ก่อโรค แทนเชื้อวัณโรคเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพว่าแตกต่างกันอย่างไร

3) การศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกำจัดเชื้อโรคจากการศึกษานี้กับห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ. 1/2549 ที่เป็นห้องความดันลบ และมีระบบฆ่าเชื้อด้วยรังสี UVC ในตู้ระบบกรองอากาศประสิทธิภาพสูง

4) การศึกษาประสิทธิภาพระบบ UVGI ในห้องผู้ป่วยที่มีลักษณะโครงสร้างแบบอื่น เช่น แบบ วศ. 2/2549 หรือแบบอื่น ๆ เพื่อให้ครอบคลุมสภาพห้องที่มีอยู่จริงและเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งาน

5) การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกำจัดเชื้อโรคของห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ. 1/2549 ที่มีอยู่ร่วมกับการติดตั้งระบบ UVGI เพิ่มไปในระบบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในภาพรวมเพิ่มขึ้นอย่างไร

6) การศึกษาด้านการลดการใช้พลังงาน โดยการคงระดับประสิทธิภาพของระบบกำจัดเชื้อโรคของห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ ตามแบบ วศ. 1/2549 ที่มีอยู่ด้วยการติดตั้งระบบ UVGI เพิ่มไปในระบบ และปรับลดอัตราแลกเปลี่ยนอากาศให้ต่ำกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐาน (12 ACH) เช่น 9 ACH หรือ 6 ACH เป็นต้น

7) การศึกษารูปแบบและการติดตั้งบานเกล็ดที่ด้านหน้าชุดติดตั้ง ในด้านขนาด ความถี่ มุมเอียง ระดับการติดตั้งและวัสดุที่ใช้ทำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยของระบบ

## รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมโรค. (2552). **สรุปรายงานการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพของบุคลากรที่ปฏิบัติงานในโรงพยาบาล ปี 2552.** (ม.ป.ท.).
- กิริติ สุกัญญ์. (2553). **พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Computational Fluid Dynamics.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- กองวิศวกรรมการแพทย์ (2549). **คู่มือการใช้งานห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ.** กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ. (ม.ป.ท.).
- เจริญ ชูโชติถาวร. (2551). **วัณโรค.** สถาบันโรคทรวงอก กรมการแพทย์.(ออนไลน์). ได้จาก: [http://www.med.cmu.ac.th/hospital/nis/download/EID\\_August54](http://www.med.cmu.ac.th/hospital/nis/download/EID_August54)
- วันที พันธุ์ประสิทธิ์. (2552). **การระบายอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับนักอุตสาหกรรมอุตสาหกรรมและนักอาชีวอนามัย.** พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ธรรมสาร. กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ. ศูนย์วิศวกรรมการแพทย์ 4 (2554). **สรุปรายงานผลการปฏิบัติงานประจำปี 2554.** (ม.ป.ท.).
- สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์. (2552). **สถิติสาธารณสุข.** สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข.
- สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์. (2553). **สถิติสาธารณสุข.** สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข.
- ACGIH. (2007). **TLVs<sup>®</sup> and BEIs<sup>®</sup>.** American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati.
- AIA (American Institute of Architects). (2006). **Guidelines for design and construction of health care facilities.** Washington, DC: American Institute of Architects.
- American Thoracic Society, CDC and Infectious Disease Society of America. (2003). **Treatment of tuberculosis.** MMWR 2003; 52 (No. RR-11).
- American Thoracic Society, CDC, Infectious Disease Society of America. ( 2000). **Diagnostic standards and classification of tuberculosis in adults and children.** Am J Respir Crit Care Med 2000; 161:1376–95.
- ASHRAE. (1992). Standard 41.2-1987 (RA 92), **Standard Methods for Laboratory Airflow Measurement.** Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

- ASHRAE. (2007). **Health care facilities. In: 2007 ASHRAE handbook-HVAC applications.** Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2008). **Chapter 16, Ultraviolet Lamp Systems.** In: ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- AWWOA. (1999). **Overview of wastewater disinfection.** Alberta Water and Wastewater Operators association.
- Balasubramanian, V., Wiegeshaus, E. H., Taylor, B. T. and Smith, D. W. (1994). **Pathogenesis of Tuberculosis: Pathway to Apical Localization.** Tubercle Lung Disease , 75: 168–178.
- Beggs, C. B., Noakes, C. J., Sleigh, P. A., Fletcher, L. A., & Kerr, K. G. (2006). **Methodology for determining the susceptibility of airborne microorganisms to irradiation by an upper-room UVGI system.** Journal of Aerosol Science, 37(7), 885-902.
- Beggs, C. B., & Sleigh, P. A. (2002). **A quantitative method for evaluating the germicidal effect of upper room UV fields.** Journal of Aerosol Science, 33, 1681–1699.
- Chang, T.-J., Hsieh, Y.-F., Kao, H.-M. (2006). **Numerical investigation of airflow pattern and particulate matter transport in naturally ventilated multi-room buildings.** Indoor Air, 16, 136–152.
- Chung, K.C. (1999). **Three dimensional analysis of airflow and contaminant particle transport in a partitioned enclosure.** Building and Environment, 34, 7–17.
- Canetti G. ( 1955). **The Tubercle bacillus in the pulmonary lesion of man: Histobacteriology and its bearing on the therapy of pulmonary tuberculosis.** New York, NY: Springer Publishing Company, Inc.
- CDC (Centers for Disease Control and Prevention). (1994). **Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings.** MMWR 1994;43 (No. RR-13): (inclusive page numbers).
- CDC (Centers for Disease Control and Prevention). (2005). **Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings.** MMWR 2005; 54 (No. RR-17): (inclusive page numbers).

- CDC (Centers for Disease Control and Prevention). (2005a). **Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings**. MMWR 54(RR-17) [On-line]. Available: <http://www.cdc.gov/mmwr/PDF/rr/rr5417.pdf>
- CDC (Centers for Disease Control and Prevention). (2009). **Environmental Control for Tuberculosis: Basic Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines for Healthcare Settings** [On-line]. Available: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-105/pdfs/2009-105.pdf>
- Chao C.Y.H. and Wan M.P. (2006). **A study of the dispersion of expiratory aerosols in unidirectional downward and ceiling-based mixing type airflows using multiphase approach**. *Indoor Air*, 16, pp. 296-312.
- Davis, Dulbecco, Eisen, Ginsberg. (1973). **Bacterial Physiology: Microbiology, Second Edition**. Maryland: Harper and Row. 96-97.
- Dols, W.S., Walton, G.N. (2000). **CONTANW 2.0 User Manual**. MD, National Institute of Standards and Technology. *Am. Rev. Resp. Dis.* 108: 1175-1184.
- Edward A. Nardell. (2010). **Upper room ultraviolet (UV) air disinfection- Where we and where are we going** [On-line]. Available: [http://iuva.org/sites/default/files/member/news/IUVA\\_news/Vol06/Issue1/060101NardellArticle.pdf](http://iuva.org/sites/default/files/member/news/IUVA_news/Vol06/Issue1/060101NardellArticle.pdf)
- Field MJ, ed. (2001). **Tuberculosis in the workplace**. Washington, DC:National Academy Press.
- First MW, Nardell EA, Chaisson W, Riley R. (1999a). **Guidelines for the application of UR ultraviolet germicidal irradiation for preventing transmission of airborne contagion-part I: basic principles**. *ASHRAE Trans* 105: 869-876.
- Fennelly, K. P., Martyny, J. W., Fulton, K. E., Orme, I. M., Cave, D. M., & Heifets, L. B. (2004). **Cough-generated aerosols of Mycobacterium tuberculosis: a new method to study infectiousness**. [Research Support, U.S. Gov't, P.H.S.]. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 169(5), 604-609
- Fletcher, L. A., Noakes, C. J., Beggs, C. B., Sleight, P. A., & Kerr, K. G. (2003). **The ultraviolet susceptibility of aerosolized microorganisms and the role of photoreactivation**. Second international congress of the IUVA, Vienna, 9-11th July.
- Friedberg E. C., Walker G. C., Siede W. (1995). **DNA repair and mutagenesis**. *American Society for Microbiology Press*. Washington, DC, 698 S., ISBN 1-55581-088-8.



- Gates FL. (1929a). **A study of the bactericidal action of ultra violet light—I: the reaction to monochromatic radiations.** J Gen Physiol, 13(2): 231–248.
- Hardalupas, Y., Taylor, A.M.K.P. (1989). **On the measurement of particle concentration near a stagnation point.** Experiments in Fluids, 8, 113–118.
- Hathway, E. A., Noakes, C. J., Sleigh, P. A., & Fletcher, L. A. (2011). **CFD simulation of airborne pathogen transport due to human activities.** Building and Environment, 46(12), 2500-2511.
- Jensen, M. M. (1964). **Inactivation of airborne viruses by ultraviolet irradiation.** Applied Microbiology, 52, 418–420.
- Kallenbach N. R., Cornelius P. A., Negus D., Montgomerie D., Englander S. (1989). **Curr. Stud.Hematol.** Blood Transfus. No. 56 (J.-J. Morgenthaler, ed.), 70-82.
- Kano et al. (Millipore). (2003). **UV technologies in water purification systems.** RD009, Millipore Corporation, Bedford, MA, USA.
- Kenneth E. Noll. (1999). **Fundamentals of Air Quality Systems : Design of Air Pollution Control Devices.** An American Academy of Environmental Engineers, 611.
- Kenneth Todar. (2012). **Mycobacterium tuberculosis and Tuberculosis** [On-line]. Available: [http://textbookofbacteriology.net/tuberculosis\\_2.html](http://textbookofbacteriology.net/tuberculosis_2.html).
- Khan JA, Feigley CE, Lee E, Ahmed MR, Tamanna S. (2006). **Effects of inlet and exhaust locations and emitted gas density on indoor air contaminant concentrations.** Build Environ 2006;41(7): 851e63.
- Ko, G., First, M. W., & Burge, H. A. (2000). **Influence of relative humidity on particle size and UV sensitivity of Serratia marcescens and Mycobacterium bovis BCG aerosols.** Tubercle and Lung Disease, 80, 217–228.
- Ko G, First MW, Burge HA. (2002). **The characterization of UR ultraviolet germicidal irradiation in inactivating airborne microorganisms.** Environ Health Perspect 110(1):95–101 [On-line]. Available: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/picrender.fcgi?artid=1240698&blobtype=pdf>
- Kowalski W. J., Bahnfleth W. P., Witham D. L., Severin B. F., Whittam T. S. (2000). **Mathematical modeling of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection.** Quantitative Microbiology, 2: 249-270.

- Lai, A. C. K., Wang, K., & Chen, F. Z. (2008). **Experimental and numerical study on particle distribution in a two-zone chamber**. *Atmospheric Environment*, 42(8), 1717-1726.
- Lytle C. D., Sagripanti J-L. (2005). **Predicted inactivation of viruses of relevance to biodefense by solar radiation**. *J. Virol.* 79: 14244-14252.
- Luckiesh M, Holladay LL. (1942). **Designing installations of germicidal lamps for occupied rooms**. *Gen Electric Rev*, 45(6): 343–349.
- Luckiesh, M. (1946). **Applications of germicidal, erythema and infrared energy**. New York: D. Van Nostrand Company Inc.
- Menzies, D., Popa, J., Hanley, J.A., Rand, T. and Milton, D.K. (2003). **Effect of ultraviolet germicidal lights installed in office ventilation systems on workers' health and wellbeing: double-blind multiple crossover trial**. *Lancet* 362(9398): 1785-1791.
- Miller SL, Hernandez M, Fennelly K, Martyny J, Macher J, Kujundzic E, Xu P, Fabian P, Peccia J, Howard C. (2002). **Efficacy of ultraviolet irradiation in controlling the spread of tuberculosis**. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, final report, contract no. 200–97–2602; NTIS No. PB2003–103816. [On-line]. Available: <http://www.cdc.gov/niosh/reports/contract/pdfs/ultrairrTB.pdf>
- Miller, S.L., Nazaroff, W.W. (2001). **Environmental tobacco smoke particles in multizone indoor environments**. *Atmospheric Environment*, 35, 2053–2067.
- M. P. Wan, C. Y. H. Chao, Y. D. Ng, G. N. Sze To & W. C. Yu. (2007): **Dispersion of Expiratory Droplets in a General Hospital Ward with Ceiling Mixing Type Mechanical Ventilation System**. *Aerosol Science and Technology*, 41:3, 244-258
- NIOSH. (1972). **Criteria for a recommended standard: occupational exposure to ultraviolet radiation**. Rockville, MD: U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Health Services and Mental Health Administration, National Institute for Occupational Safety and Health, DHEW (NIOSH) Publication No. HSM 73–11009, NTIS No. PB–214268 [On-line]. Available: <http://www.cdc.gov/niosh/73-11009.html>
- Nicas, M., Nazaroff, W.W., Hubbard, A. (2005). **Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens**. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2, 143–154.

- Noakes, C. J., Beggs, C. B., & Sleigh, P. A. (2004b). **Modelling the performance of upper room ultraviolet germicidal irradiation devices in ventilated rooms: Comparison of analytical and CFD methods.** *Indoor Built Environment*, 13, 477–488.
- Peccia JL. (2000). **The response of airborne bacteria to ultraviolet germicidal radiation.** (Thesis (Ph.D.)). Boulder, CO: University of Colorado, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering.
- Peccia, J., & Hernandez, M. T. (2001). **Photoreactivation in airborne Mycobacterium parafortuitum.** *Applied Environmental Microbiology*, 67, 4225–4232.
- Pei-Shih Chen & Chih-Shan Li. (2005). **Quantification of Airborne Mycobacterium tuberculosis in Health Care Setting Using Real-Time qPCR Coupled to an Air-Sampling Filter Method.** *Aerosol Science and Technology*, Volume 39, Issue 4, 2005, pages 371-376 (Available online: 23 Feb 2007).
- Philips. (2006). **Ultraviolet purification application information.** The Netherlands: Philips Lighting B.V. [On-line]. Available: [http://www.lighting.philips.com/gl\\_en/global\\_sites/application/water\\_purification/pdfs/uvp\\_application\\_brochure.pdf](http://www.lighting.philips.com/gl_en/global_sites/application/water_purification/pdfs/uvp_application_brochure.pdf)
- Rahn, R.O., Xu, P., Miller, S.L. (1999). **Dosimetry of room-air germicidal irradiation using spherical actinometry.** *Photochemistry and Photobiology* 70, 314-318.
- Rea MS, ed. (2000). **The IESNA lighting handbook: reference & application. 9th ed.** New York: Illuminating Engineering Society of North America.
- Rentschler, H. C. (1941). **Bactericidal effect of ultraviolet radiation.** *Journal of Bacteriology*, 42, 745–774.
- Rentschler HC, Nagy R. (1942). **Bactericidal action of ultraviolet radiation on air-borne organisms.** *J Bacteriol* 44(1):85–94. [On-line]. Available: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/picrender.fcgi?artid=373652&blobtype=pdf>
- Riley R. L, Kaufman JE. (1972). **Effect of relative humidity on the inactivation of airborne Serratia marcescens by ultraviolet radiation.** *Applied Environmental Microbiology*, 23(6):1113–1120. [On-line]. Available: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/picrender.fcgi?artid=380516&blobtype=pdf>
- Riley, R. L., Knight, M., & Middlebrook, G. (1976). **Ultraviolet susceptibility of BCG and virulent tubercle bacilli.** *American Review of Respiratory Disease*, 113, 413–418.

- Sharp, D. G. (1938). **A quantitative method of determining the lethal effect of ultraviolet light on bacteria suspended in air.** *Journal of Bacteriology*, 35, 589–599.
- Sharp, G. (1940). **The effects of ultraviolet light on bacteria suspended in air.** *Journal of Bacteriology*, 38, 535–547.
- Sung, M., & Kato, S. (2010). **Method to evaluate UV dose of upper-room UVGI system using the concept of ventilation efficiency.** *Building and Environment*, 45(7), 1626-1631.
- Sylvania. (1981). **Germicidal and short-wave radiation.** GTE Products Corp., Sylvania Engineering Bulletin 0–344.
- Van Osdell D, Foarde K. (2002). **Defining the effectiveness of UV lamps installed in circulating air ductwork.** Arlington, VA: Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute, ARTI–21CR/610–40030–01. [On-line]. Available: <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/810964-SRS2Dd/native/810964.pdf>
- Wells WF, Wells MW. (1936). **Air-borne infection sanitary control.** *J Am Med Assoc*, 107: 1805–1809.
- Wells, W.F. (1955). **Airborne Contagion and Air Hygiene.** Harvard University Press, Cambridge, MA (Chapter 1).
- Westinghouse. (1982). **Sterilamp germicidal ultraviolet tubes.** Bloomfield, NJ: Westinghouse Lamp Commercial Division, Booklet A–8968.
- WHO. (1999). **Guidelines for The Preventing of Tuberculosis in Health Care Settings Facilities in Resource Limited Settings.** WHO/CDS/TB/99.269, World Health Organization, Geneva.
- Xu P. (2000). Quoted in CDC (Centers for Disease Control and Prevention). (2005a). **Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings.** *MMWR* 54(RR–17) [On-line]. Available: <http://www.cdc.gov/mmwr/PDF/rr/rr5417.pdf>
- Xu P. (2001). **Ultraviolet germicidal irradiation for preventing infectious disease transmission** (Thesis (Ph.D.)). Boulder, CO: University of Colorado, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering.

- Zhu, S., Kato, S., Yang, J-H. (2006). **Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment.** Building and Environment 41, 1691–1702.
- Zhang Z, Chen Q. (2006). **Experimental measurements and numerical simulations of particle transport and distribution in ventilation rooms.** Atmos Environ 2006; 40:3396e408.
- Zhao, B., Zhang, Y., Li, X.T., Yang, X.D., Huang, D.T. (2004). **Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method.** Building and Environment, 39, 1–8.



ภาคผนวก ก

ข้อมูลด้านตำแหน่งช่องระบายอากาศและอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ



ตารางที่ ก1 ระยะเวลาที่อนุภาคเชื้อไวรัสโรคเคลื่อนที่ใน Upper Zone จำแนกตามตำแหน่งช่องระบายอากาศ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ และขนาดอนุภาค

พื้นที่	ระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ (sec)																										
	L / H									H / L									H / H								
	6 ACH			9 ACH			12 ACH			6 ACH			9 ACH			12 ACH			6 ACH			9 ACH			12 ACH		
	5 µm	6-20µm	เฉลี่ย	5 µm	6-20µm	เฉลี่ย	5 µm	6-20µm	เฉลี่ย	5 µm	6-20µm	เฉลี่ย	5 µm	6-20µm	เฉลี่ย	5 µm	6-20µm	เฉลี่ย	5 µm	6-20µm	เฉลี่ย	5 µm	6-20µm	เฉลี่ย	5 µm	6-20µm	เฉลี่ย
เฉลี่ยUZ	97.12	122.86	105.74	67.56	70.44	66.19	63.29	64.31	64.31	61.40	72.47	63.53	56.60	59.79	55.20	46.03	51.05	49.36	56.83	65.72	59.90	48.73	51.88	47.16	41.24	45.09	41.50
เฉลี่ยU-UZ	50.02	58.18	51.37	34.57	41.19	35.90	36.63	31.32	34.58	30.47	28.01	27.17	34.14	28.04	28.98	23.31	28.66	26.50	20.58	31.70	26.14	27.65	25.61	24.55	22.39	28.44	23.85
เฉลี่ยL-UZ	47.10	64.69	54.37	32.99	29.25	30.29	26.67	32.99	29.74	30.93	44.46	36.36	22.45	31.76	26.22	22.73	22.39	22.86	36.26	34.02	33.75	21.08	26.27	22.61	18.86	16.65	17.65
U-UZ1	6.31	3.70	4.73	8.69	5.85	6.69	0.27	4.35	2.30	5.59	2.55	3.83	4.94	3.60	3.96	3.45	8.16	6.04	9.27	4.72	6.84	1.91	2.86	2.22	6.64	5.87	5.79
U-UZ2	4.98	8.28	6.18	3.30	3.42	3.17	6.07	5.33	5.79	1.93	2.45	2.01	3.85	0.78	2.13	3.43	3.78	3.63	1.75	3.59	2.76	8.65	2.90	5.30	2.05	2.14	1.95
U-UZ3	2.53	6.22	4.01	6.15	3.25	4.46	6.30	2.05	4.55	2.70	5.59	3.80	4.22	1.10	2.44	1.01	0.41	0.80	0.00	3.08	1.69	0.99	2.26	1.49	2.05	3.02	2.33
U-UZ4	5.43	4.02	4.50	3.09	14.30	8.21	1.55	3.57	2.59	3.60	2.15	2.74	2.75	2.33	2.33	1.60	3.32	2.30	2.55	3.95	3.26	3.27	3.55	3.16	2.09	3.32	2.48
U-UZ5	5.44	6.28	5.64	2.03	2.16	2.06	2.09	3.12	2.55	0.98	4.76	2.67	4.45	3.26	3.54	5.37	4.87	5.37	2.35	3.58	2.96	3.21	3.62	3.16	3.25	2.99	3.08
U-UZ6	1.33	8.16	4.36	1.53	1.59	1.63	6.14	1.32	3.95	2.53	4.52	3.23	1.25	10.29	5.29	2.76	1.59	2.21	0.00	1.85	0.96	2.12	1.88	1.84	1.34	1.95	1.55
U-UZ7	2.49	5.98	3.89	3.86	5.50	4.47	4.35	5.33	4.90	6.46	0.83	3.35	4.26	1.31	2.70	1.45	1.52	1.53	1.20	3.01	2.17	0.48	1.50	0.91	0.78	3.03	1.75
U-UZ8	9.24	8.88	8.80	1.87	3.37	2.41	4.14	2.37	3.12	3.48	2.29	2.76	4.30	3.38	3.66	2.87	2.90	2.86	2.08	3.34	2.67	2.69	3.66	2.94	2.48	2.85	2.52
U-UZ9	12.28	6.66	9.26	4.06	1.74	2.80	5.70	3.87	4.82	3.20	2.86	2.78	4.11	1.99	2.93	1.36	2.12	1.76	1.37	4.57	2.85	4.33	3.38	3.54	1.71	3.27	2.40
L-UZ1	4.12	2.71	3.27	6.12	4.62	5.41	3.50	4.08	3.58	6.04	3.05	4.72	3.25	6.79	4.75	3.34	3.14	3.23	4.34	3.32	3.61	2.49	1.66	1.96	2.68	2.31	2.41
L-UZ2	4.39	2.99	3.76	3.19	2.58	2.79	2.51	5.46	4.03	2.68	5.25	3.84	2.72	2.67	2.67	2.64	2.06	2.25	4.77	4.12	4.62	3.18	2.69	2.69	2.23	2.48	2.30
L-UZ3	4.44	6.71	5.13	2.39	2.70	2.53	4.66	2.67	3.96	1.91	4.90	3.13	3.13	3.50	2.13	1.25	1.56	1.43	3.33	2.47	2.66	0.62	1.84	1.13	2.02	0.67	1.34
L-UZ4	3.56	4.75	4.18	4.07	5.97	4.74	2.17	2.06	2.08	3.58	4.71	3.88	2.19	1.60	1.93	2.79	3.27	3.16	3.81	3.43	3.50	2.28	1.94	2.04	1.34	1.07	1.25
L-UZ5	9.26	6.74	8.28	2.09	0.10	1.01	4.43	5.49	4.76	2.37	9.53	5.63	1.55	6.45	3.84	2.12	1.35	1.69	5.25	5.04	4.72	2.34	4.34	3.40	1.81	1.31	1.46
L-UZ6	2.10	21.52	10.95	0.31	1.08	0.83	1.73	2.10	1.99	1.01	6.17	3.30	1.06	2.32	1.56	1.01	1.11	1.11	2.41	2.73	2.56	4.24	3.03	3.33	1.43	1.16	1.34
L-UZ7	7.08	6.64	6.50	6.28	6.55	6.12	0.59	4.73	2.60	3.68	2.23	2.99	3.77	2.07	2.94	2.67	3.42	3.24	3.90	1.92	2.81	2.24	1.51	1.73	2.81	2.11	2.59
L-UZ8	4.84	6.41	5.71	5.50	4.11	4.55	2.41	3.36	2.92	6.45	3.81	5.31	3.36	4.60	3.83	3.77	1.86	2.84	5.77	6.93	6.14	1.59	5.47	3.55	2.17	2.16	2.28
L-UZ9	7.30	6.21	6.58	3.05	1.54	2.32	4.67	3.04	3.82	3.20	3.91	3.56	3.43	1.77	2.58	3.14	4.63	3.91	2.68	4.07	3.12	2.11	3.80	2.78	2.36	3.38	2.67

ตารางที่ ก2 ระยะเวลาอนุภาคเชื้อไวรัส โรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone ตามรูปแบบการระบายอากาศ และขนาดอนุภาค

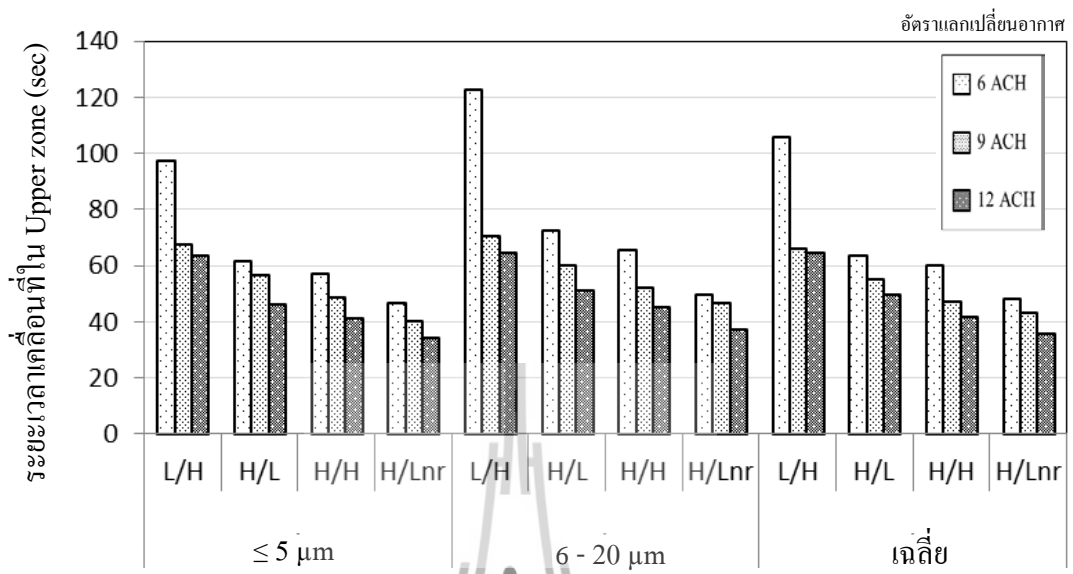
ตำแหน่งช่อง ระบายอากาศ	ระยะเวลาอนุภาคฯ เคลื่อนที่ใน Upper zone (sec)								
	6 ACH			9 ACH			12 ACH		
	≤ 5 μm	6-20 μm	เฉลี่ย	≤ 5 μm	6-20 μm	เฉลี่ย	≤ 5 μm	6-20 μm	เฉลี่ย
L/H	97.12	122.86	105.74	67.56	70.44	69.00	60.10	64.31	62.21
H/L	61.40	72.47	66.94	56.60	59.79	58.19	46.03	51.05	48.54
H/H	56.80	65.72	61.28	48.73	51.88	50.31	41.24	45.09	43.17
H/Lnr*	46.42	49.76	48.09	40.15	46.38	43.27	34.22	36.94	35.58

หมายเหตุ \* H/Lnr = ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L ห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ

วศ.1/1549







รูปแบบการระบายอากาศ และขนาดอนุภาค

หมายเหตุ H/Lnr = ตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L ห้องแยกโรคแพร่เชื้อทางอากาศ

วศ.1/1549

**รูปที่ ก1** ระยะเวลาที่อนุภาคเชื้อไวรัส โรคเคลื่อนที่อยู่ใน Upper zone ตามรูปแบบการระบายอากาศ และขนาดอนุภาค





ภาคผนวก ข

ข้อมูลด้านสถานะปลอด UVC

ตารางที่ ข1.1 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 1 ด้าน (หน้าหรือหลัง) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone 2.1-3.3 m	1.30	1.54	1.25	1.37	1.81	2.43	2.02	2.09	10.30	10.55	10.39	10.41
Upper Zone L1 (2.1-2.7 m)	1.45	0.28	0.06	0.60	2.12	1.10	0.34	1.19	10.96	4.99	5.00	6.99
Upper Zone L2 (2.7-3.3 m)	1.83	2.50	2.09	2.14	2.52	3.65	3.36	3.18	11.79	15.59	15.15	14.18
Upper Zone L1-1	1.37	0.16	0.02	0.52	1.77	0.64	0.21	0.87	10.24	2.85	2.79	5.29
Upper Zone L1-2	4.89	0.63	0.06	1.86	7.69	1.94	0.27	3.30	27.22	6.41	7.72	13.78
Upper Zone L1-3	1.37	0.16	0.02	0.52	1.77	0.64	0.21	0.87	10.24	2.85	2.79	5.29
Upper Zone L1-4	1.19	0.31	0.10	0.53	1.86	1.45	0.44	1.25	11.23	6.13	5.28	7.55
Upper Zone L1-5	2.82	0.98	0.26	1.36	3.60	2.48	0.69	2.25	17.63	8.75	6.84	11.08
Upper Zone L1-6	1.19	0.31	0.10	0.53	1.86	1.45	0.44	1.25	11.23	6.13	5.28	7.55
Upper Zone L1-7	0.23	0.09	0.02	0.11	0.40	0.65	0.33	0.46	5.60	4.95	5.12	5.22
Upper Zone L1-8	0.71	0.30	0.05	0.35	0.94	1.30	0.39	0.87	6.51	5.64	5.74	5.97
Upper Zone L1-9	0.23	0.09	0.02	0.11	0.40	0.65	0.33	0.46	5.60	4.95	5.12	5.22

ตารางที่ ข1.1 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 1 ด้าน (หน้าหรือหลัง) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง (ต่อ)

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone L2-1	1.74	2.13	1.94	1.93	1.92	3.60	3.24	2.92	10.13	14.63	14.62	13.13
Upper Zone L2-2	5.93	8.90	6.98	7.27	7.93	12.67	10.13	10.25	25.82	43.51	42.20	37.18
Upper Zone L2-3	1.74	2.13	1.94	1.93	1.92	3.60	3.24	2.92	10.13	14.63	14.62	13.13
Upper Zone L2-4	1.82	2.00	1.91	1.91	2.39	2.89	3.05	2.78	12.85	15.46	14.03	14.11
Upper Zone L2-5	3.48	4.30	3.62	3.80	4.46	6.01	5.01	5.16	19.14	25.85	22.53	22.50
Upper Zone L2-6	1.82	2.00	1.91	1.91	2.39	2.89	3.05	2.78	12.85	15.46	14.03	14.11
Upper Zone L2-7	0.33	0.76	0.45	0.51	0.85	0.96	1.28	1.03	7.11	6.46	6.94	6.84
Upper Zone L2-8	0.73	1.11	0.89	0.91	1.64	1.58	1.59	1.60	8.11	8.18	8.23	8.17
Upper Zone L2-9	0.33	0.76	0.45	0.51	0.85	0.96	1.28	1.03	7.11	6.46	6.94	6.84

ตารางที่ ข1.2 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 1 ด้าน (ซ้ายหรือขวา) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone 2.1-3.3 m	1.18	1.36	1.14	1.23	1.65	2.17	1.86	1.89	9.61	9.63	9.54	9.59
Upper Zone L1 (2.1-2.7 m)	1.35	0.26	0.05	0.55	2.00	1.01	0.31	1.11	10.39	4.59	4.60	6.52
Upper Zone L2 (2.7-3.3 m)	1.70	2.26	1.94	1.96	2.32	3.41	3.14	2.96	11.13	14.48	14.12	13.24
Upper Zone L1-1	1.06	0.10	0.01	0.39	1.37	0.43	0.15	0.65	7.79	2.01	2.21	4.00
Upper Zone L1-2	5.05	0.54	0.03	1.87	8.09	1.76	0.20	3.35	26.92	5.69	8.04	13.55
Upper Zone L1-3	1.06	0.10	0.01	0.39	1.37	0.43	0.15	0.65	7.79	2.01	2.21	4.00
Upper Zone L1-4	1.25	0.27	0.08	0.53	1.86	1.25	0.40	1.17	11.85	5.42	4.65	7.31
Upper Zone L1-5	3.49	1.06	0.24	1.60	4.69	2.72	0.67	2.69	22.66	9.43	6.45	12.84
Upper Zone L1-6	1.25	0.27	0.08	0.53	1.86	1.25	0.40	1.17	11.85	5.42	4.65	7.31
Upper Zone L1-7	0.36	0.13	0.04	0.18	0.67	0.84	0.36	0.63	6.38	5.30	5.04	5.57
Upper Zone L1-8	1.22	0.50	0.12	0.62	1.54	1.73	0.49	1.25	8.35	6.59	6.06	7.00
Upper Zone L1-9	0.36	0.13	0.04	0.18	0.67	0.84	0.36	0.63	6.38	5.30	5.04	5.57

ตารางที่ ข1.2 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 1 ด้าน (ซ้ายหรือขวา) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง (ต่อ)

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone L2-1	1.30	1.61	1.49	1.47	1.43	2.74	2.52	2.23	7.75	11.09	11.32	10.05
Upper Zone L2-2	6.01	9.09	7.23	7.44	8.21	12.83	10.39	10.48	25.52	43.36	42.69	37.19
Upper Zone L2-3	1.30	1.61	1.49	1.47	1.43	2.74	2.52	2.23	7.75	11.09	11.32	10.05
Upper Zone L2-4	1.87	2.07	1.97	1.97	2.30	3.20	3.28	2.93	12.94	16.16	15.15	14.75
Upper Zone L2-5	4.47	5.99	4.66	5.04	5.49	8.68	6.78	6.98	23.00	34.27	30.11	29.13
Upper Zone L2-6	1.87	2.07	1.97	1.97	2.30	3.20	3.28	2.93	12.94	16.16	15.15	14.75
Upper Zone L2-7	0.56	0.89	0.66	0.71	1.13	1.08	1.52	1.24	8.17	7.78	7.53	7.83
Upper Zone L2-8	1.29	1.59	1.45	1.44	2.32	2.13	2.11	2.19	10.40	11.09	9.84	10.44
Upper Zone L2-9	0.56	0.89	0.66	0.71	1.13	1.08	1.52	1.24	8.17	7.78	7.53	7.83

ตารางที่ ข1.3 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 2 ด้าน (หน้าและหลัง) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone 2.1-3.3 m	2.61	3.08	2.51	2.73	3.61	4.87	4.03	4.17	20.60	21.09	20.77	20.82
Upper Zone L1 (2.1-2.7 m)	2.90	0.56	0.12	1.19	4.24	2.20	0.67	2.37	21.93	9.99	10.01	13.98
Upper Zone L2 (2.7-3.3 m)	3.66	5.01	4.18	4.28	5.05	7.31	6.72	6.36	23.58	31.18	30.30	28.35
Upper Zone L1-1	1.60	0.25	0.05	0.63	2.17	1.30	0.54	1.33	15.84	7.79	7.91	10.51
Upper Zone L1-2	5.59	0.93	0.11	2.21	8.63	3.24	0.65	4.17	33.73	12.05	13.46	19.75
Upper Zone L1-3	1.60	0.25	0.05	0.63	2.17	1.30	0.54	1.33	15.84	7.79	7.91	10.51
Upper Zone L1-4	2.38	0.62	0.19	1.06	3.72	2.90	0.89	2.50	22.45	12.26	10.56	15.09
Upper Zone L1-5	5.64	1.97	0.53	2.71	7.19	4.95	1.38	4.51	35.26	17.51	13.69	22.15
Upper Zone L1-6	2.38	0.62	0.19	1.06	3.72	2.90	0.89	2.50	22.45	12.26	10.56	15.09
Upper Zone L1-7	1.60	0.25	0.05	0.63	2.17	1.30	0.54	1.33	15.84	7.79	7.91	10.51
Upper Zone L1-8	5.59	0.93	0.11	2.21	8.63	3.24	0.65	4.17	33.73	12.05	13.46	19.75
Upper Zone L1-9	1.60	0.25	0.05	0.63	2.17	1.30	0.54	1.33	15.84	7.79	7.91	10.51

ตารางที่ ข1.3 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 2 ด้าน (หน้าและหลัง) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง (ต่อ)

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone L2-1	2.06	2.89	2.38	2.44	2.77	4.55	4.52	3.95	17.25	21.09	21.56	19.96
Upper Zone L2-2	6.66	10.01	7.87	8.18	9.57	14.26	11.72	11.85	33.93	51.69	50.43	45.35
Upper Zone L2-3	2.06	2.89	2.38	2.44	2.77	4.55	4.52	3.95	17.25	21.09	21.56	19.96
Upper Zone L2-4	3.63	4.01	3.81	3.82	4.78	5.77	6.10	5.55	25.69	30.93	28.06	28.23
Upper Zone L2-5	6.95	8.61	7.25	7.60	8.91	12.01	10.03	10.32	38.28	51.69	45.05	45.01
Upper Zone L2-6	3.63	4.01	3.81	3.82	4.78	5.77	6.10	5.55	25.69	30.93	28.06	28.23
Upper Zone L2-7	2.06	2.89	2.38	2.44	2.77	4.55	4.52	3.95	17.25	21.09	21.56	19.96
Upper Zone L2-8	6.66	10.01	7.87	8.18	9.57	14.26	11.72	11.85	33.93	51.69	50.43	45.35
Upper Zone L2-9	2.06	2.89	2.38	2.44	2.77	4.55	4.52	3.95	17.25	21.09	21.56	19.96



ตารางที่ ข1.4 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 2 ด้าน (ซ้ายและขวา) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone 2.1-3.3 m	2.36	2.73	2.28	2.46	3.28	4.32	3.67	3.76	18.81	18.99	18.72	18.84
Upper Zone L1 (2.1-2.7 m)	2.70	0.51	0.11	1.11	4.00	2.01	0.60	2.20	20.48	8.96	8.96	12.80
Upper Zone L2 (2.7-3.3 m)	3.38	4.52	3.86	3.92	4.61	6.58	6.21	5.80	21.86	28.68	27.89	26.14
Upper Zone L1-1	1.42	0.23	0.05	0.57	2.04	1.27	0.52	1.28	14.17	7.31	7.25	9.58
Upper Zone L1-2	6.27	1.05	0.15	2.49	9.63	3.49	0.69	4.61	35.27	12.28	14.09	20.55
Upper Zone L1-3	1.42	0.23	0.05	0.57	2.04	1.27	0.52	1.28	14.17	7.31	7.25	9.58
Upper Zone L1-4	2.50	0.54	0.15	1.06	3.73	2.50	0.80	2.34	23.71	10.84	9.29	14.61
Upper Zone L1-5	6.99	2.13	0.49	3.20	9.39	5.44	1.33	5.39	45.32	18.85	12.90	25.69
Upper Zone L1-6	2.50	0.54	0.15	1.06	3.73	2.50	0.80	2.34	23.71	10.84	9.29	14.61
Upper Zone L1-7	1.42	0.23	0.05	0.57	2.04	1.27	0.52	1.28	14.17	7.31	7.25	9.58
Upper Zone L1-8	6.27	1.05	0.15	2.49	9.63	3.49	0.69	4.61	35.27	12.28	14.09	20.55
Upper Zone L1-9	1.42	0.23	0.05	0.57	2.04	1.27	0.52	1.28	14.17	7.31	7.25	9.58

ตารางที่ ข1.4 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 2 ด้าน (ซ้ายและขวา) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง (ต่อ)

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone L2-1	1.86	2.51	2.16	2.17	2.57	3.82	4.03	3.47	15.92	18.87	18.85	17.88
Upper Zone L2-2	7.30	10.68	8.68	8.89	10.53	14.96	12.50	12.66	35.92	54.45	52.53	47.63
Upper Zone L2-3	1.86	2.51	2.16	2.17	2.57	3.82	4.03	3.47	15.92	18.87	18.85	17.88
Upper Zone L2-4	3.73	4.14	3.95	3.94	4.61	6.40	6.56	5.86	25.87	32.31	30.31	29.50
Upper Zone L2-5	8.95	11.98	9.32	10.08	10.97	17.35	13.55	13.96	46.01	68.54	60.21	58.25
Upper Zone L2-6	3.73	4.14	3.95	3.94	4.61	6.40	6.56	5.86	25.87	32.31	30.31	29.50
Upper Zone L2-7	1.86	2.51	2.16	2.17	2.57	3.82	4.03	3.47	15.92	18.87	18.85	17.88
Upper Zone L2-8	7.30	10.68	8.68	8.89	10.53	14.96	12.50	12.66	35.92	54.45	52.53	47.63
Upper Zone L2-9	1.86	2.51	2.16	2.17	2.57	3.82	4.03	3.47	15.92	18.87	18.85	17.88

ตารางที่ ข1.5 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 3 ด้าน (หน้า หลังและซ้ายหรือขวา) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone 2.1-3.3 m	4.02	4.72	3.86	4.20	5.56	7.45	6.17	6.39	31.25	32.08	31.50	31.61
Upper Zone L1 (2.1-2.7 m)	4.52	1.00	0.24	1.92	6.60	3.50	1.14	3.75	33.66	15.56	15.37	21.53
Upper Zone L2 (2.7-3.3 m)	5.54	7.65	6.42	6.54	7.61	11.12	10.23	9.66	35.42	47.36	45.96	42.91
Upper Zone L1-1	1.96	0.38	0.09	0.81	2.84	2.14	0.91	1.96	22.21	13.09	12.95	16.09
Upper Zone L1-2	6.84	1.20	0.18	2.74	10.49	4.49	1.05	5.34	45.58	17.47	18.11	27.05
Upper Zone L1-3	3.16	0.80	0.21	1.39	4.15	2.41	1.08	2.55	26.11	12.11	11.83	16.68
Upper Zone L1-4	3.60	1.12	0.32	1.68	5.26	4.63	1.38	3.76	30.80	18.85	16.62	22.09
Upper Zone L1-5	9.14	3.03	0.77	4.31	11.88	7.67	2.05	7.20	57.92	26.93	20.13	35.00
Upper Zone L1-6	8.25	1.84	0.61	3.56	12.77	5.59	1.73	6.70	52.95	21.55	21.19	31.90
Upper Zone L1-7	1.96	0.38	0.09	0.81	2.84	2.14	0.91	1.96	22.23	13.09	12.96	16.09
Upper Zone L1-8	6.84	1.20	0.18	2.74	10.49	4.49	1.05	5.34	45.58	17.47	18.11	27.05
Upper Zone L1-9	2.96	0.63	0.16	1.25	3.90	2.12	0.95	2.32	25.10	11.15	11.21	15.82

ตารางที่ ข1.5 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 3 ด้าน (หน้า หลังและซ้ายหรือขวา) แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง (ต่อ)

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone L2-1	2.62	3.78	3.05	3.15	3.90	5.63	6.04	5.19	25.42	28.86	29.08	27.79
Upper Zone L2-2	8.53	12.08	9.84	10.15	11.87	17.46	15.00	14.78	46.86	67.84	65.58	60.10
Upper Zone L2-3	3.49	5.05	4.33	4.29	4.33	8.02	7.58	6.64	25.32	34.35	35.03	31.57
Upper Zone L2-4	4.93	5.59	5.26	5.26	7.11	7.90	8.21	7.74	36.10	42.01	37.90	38.67
Upper Zone L2-5	11.42	14.60	11.91	12.64	14.40	20.69	16.81	17.30	61.29	85.96	75.16	74.14
Upper Zone L2-6	9.86	13.85	11.68	11.80	13.32	19.47	17.13	16.64	51.86	76.99	73.18	67.34
Upper Zone L2-7	2.62	3.79	3.05	3.15	3.90	5.63	6.04	5.19	25.43	28.89	29.12	27.81
Upper Zone L2-8	8.53	12.08	9.84	10.15	11.87	17.46	15.00	14.78	46.86	67.84	65.58	60.10
Upper Zone L2-9	3.45	4.82	4.14	4.13	4.31	7.70	7.32	6.44	25.28	33.39	34.01	30.89

ตารางที่ ข1.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 4 ด้าน แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone 2.1-3.3 m	5.22	6.10	5.01	5.44	7.23	9.64	8.04	8.30	40.95	41.79	41.10	41.28
Upper Zone L1 (2.1-2.7 m)	5.78	1.12	0.23	2.38	8.50	4.34	1.32	4.72	43.63	19.48	19.50	27.54
Upper Zone L2 (2.7-3.3 m)	7.33	9.92	8.36	8.54	10.05	14.47	13.40	12.64	46.93	62.10	60.25	56.43
Upper Zone L1-1	3.02	0.48	0.10	1.20	4.21	2.57	1.06	2.61	30.00	15.10	15.16	20.09
Upper Zone L1-2	8.09	1.47	0.26	3.28	12.36	5.74	1.46	6.52	57.43	22.89	22.75	34.36
Upper Zone L1-3	3.01	0.48	0.10	1.20	4.20	2.56	1.06	2.61	29.93	15.09	15.15	20.06
Upper Zone L1-4	8.65	1.66	0.34	3.55	13.36	6.39	1.58	7.11	57.72	24.54	24.65	35.64
Upper Zone L1-5	12.63	4.10	1.01	5.91	16.58	10.39	2.71	9.89	80.58	36.36	26.58	47.84
Upper Zone L1-6	8.65	1.66	0.34	3.55	13.36	6.39	1.58	7.11	57.72	24.54	24.65	35.64
Upper Zone L1-7	3.02	0.48	0.10	1.20	4.21	2.57	1.06	2.61	30.00	15.10	15.16	20.09
Upper Zone L1-8	8.09	1.47	0.26	3.28	12.36	5.74	1.46	6.52	57.43	22.89	22.75	34.36
Upper Zone L1-9	3.02	0.48	0.10	1.20	4.21	2.57	1.06	2.61	30.00	15.10	15.16	20.09

ตารางที่ ข1.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ใน Upper zone ของหลอด UVC ติดตั้งบนผนัง 4 ด้าน แบ่งตามกำลังไฟและระดับความสูงจากพื้นที่ติดตั้ง (ต่อ)

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )											
	กำลังไฟ 8W				กำลังไฟ 16W				กำลังไฟ 30W			
	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย	2.7 m	3 m	3.3 m	เฉลี่ย
Upper Zone L2-1	3.92	5.40	4.54	4.62	5.33	8.37	8.55	7.42	33.16	39.95	40.40	37.84
Upper Zone L2-2	10.39	14.15	11.82	12.12	14.18	20.66	18.28	17.71	59.80	84.00	80.73	74.84
Upper Zone L2-3	3.91	5.38	4.53	4.61	5.33	8.35	8.53	7.40	33.09	39.85	40.28	37.74
Upper Zone L2-4	10.93	14.69	12.49	12.70	15.31	20.73	18.60	18.22	61.61	85.37	80.59	75.86
Upper Zone L2-5	15.90	20.59	16.56	17.68	19.88	29.36	23.58	24.28	84.29	120.23	105.27	103.26
Upper Zone L2-6	10.93	14.69	12.49	12.70	15.31	20.73	18.60	18.22	61.61	85.37	80.59	75.86
Upper Zone L2-7	3.92	5.40	4.54	4.62	5.33	8.37	8.55	7.42	33.16	39.95	40.40	37.84
Upper Zone L2-8	10.39	14.15	11.82	12.12	14.18	20.66	18.28	17.71	59.80	84.00	80.73	74.84
Upper Zone L2-9	3.92	5.40	4.54	4.62	5.33	8.37	8.55	7.42	33.16	39.95	40.40	37.84

ตารางที่ ข2.1 ค่าความเข้มรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 8 W จำแนกตามระดับตามระดับการติดตั้งระบบ และจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ

พื้นที่	ค่าความเข้มรังสี UVC ใน Upper Zone ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )																							
	ระดับติดตั้งระบบ 2.7 m						ระดับติดตั้งระบบ 3.0 m						ระดับติดตั้งระบบ 3.0 m						เฉลี่ยทุกระดับ					
	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4ด้าน
เฉลี่ยUZ	1.37	1.23	2.73	2.46	4.20	5.44	1.30	1.18	2.61	2.36	4.02	5.22	1.54	1.36	3.08	2.73	4.72	6.10	1.25	1.14	2.51	2.28	3.86	5.01
เฉลี่ยU-UZ	0.60	0.55	1.19	1.11	1.92	2.38	1.45	1.35	2.90	2.70	4.52	5.78	0.28	0.26	0.56	0.51	1.00	1.12	0.06	0.05	0.12	0.11	0.24	0.23
เฉลี่ยL-UZ	2.14	1.96	4.28	3.92	6.54	8.54	1.83	1.70	3.66	3.38	5.54	7.33	2.50	2.26	5.01	4.52	7.65	9.92	2.09	1.94	4.18	3.86	6.42	8.36
U-UZ1	1.93	1.47	2.44	2.17	3.15	4.62	1.74	1.30	2.06	1.86	2.62	3.92	2.13	1.61	2.89	2.51	3.78	5.40	1.94	1.49	2.38	2.16	3.05	4.54
U-UZ2	7.27	7.44	8.18	8.89	10.15	12.12	5.93	6.01	6.66	7.30	8.53	10.39	8.90	9.09	10.01	10.68	12.08	14.15	6.98	7.23	7.87	8.68	9.84	11.82
U-UZ3	1.93	1.47	2.44	2.17	4.29	4.61	1.74	1.30	2.06	1.86	3.49	3.91	2.13	1.61	2.89	2.51	5.05	5.38	1.94	1.49	2.38	2.16	4.33	4.53
U-UZ4	1.91	1.97	3.82	3.94	5.26	12.70	1.82	1.87	3.63	3.73	4.93	10.93	2.00	2.07	4.01	4.14	5.59	14.69	1.91	1.97	3.81	3.95	5.26	12.49
U-UZ5	3.80	5.04	7.60	10.08	12.64	17.68	3.48	4.47	6.95	8.95	11.42	15.90	4.30	5.99	8.61	11.98	14.60	20.59	3.62	4.66	7.25	9.32	11.91	16.56
U-UZ6	1.91	1.97	3.82	3.94	11.80	12.70	1.82	1.87	3.63	3.73	9.86	10.93	2.00	2.07	4.01	4.14	13.85	14.69	1.91	1.97	3.81	3.95	11.68	12.49
U-UZ7	0.51	0.71	2.44	2.17	3.15	4.62	0.33	0.56	2.06	1.86	2.62	3.92	0.76	0.89	2.89	2.51	3.79	5.40	0.45	0.66	2.38	2.16	3.05	4.54
U-UZ8	0.91	1.44	8.18	8.89	10.15	12.12	0.73	1.29	6.66	7.30	8.53	10.39	1.11	1.59	10.01	10.68	12.08	14.15	0.89	1.45	7.87	8.68	9.84	11.82
U-UZ9	0.51	0.71	2.44	2.17	4.13	4.62	0.33	0.56	2.06	1.86	3.45	3.92	0.76	0.89	2.89	2.51	4.82	5.40	0.45	0.66	2.38	2.16	4.14	4.54
L-UZ1	0.52	0.39	0.63	0.57	0.81	1.20	1.37	1.06	1.60	1.42	1.96	3.02	0.16	0.10	0.25	0.23	0.38	0.48	0.02	0.01	0.05	0.05	0.09	0.10
L-UZ2	1.86	1.87	2.21	2.49	2.74	3.28	4.89	5.05	5.59	6.27	6.84	8.09	0.63	0.54	0.93	1.05	1.20	1.47	0.06	0.03	0.11	0.15	0.18	0.26
L-UZ3	0.52	0.39	0.63	0.57	1.39	1.20	1.37	1.06	1.60	1.42	3.16	3.01	0.16	0.10	0.25	0.23	0.80	0.48	0.02	0.01	0.05	0.05	0.21	0.10
L-UZ4	0.53	0.53	1.06	1.06	1.68	3.55	1.19	1.25	2.38	2.50	3.60	8.65	0.31	0.27	0.62	0.54	1.12	1.66	0.10	0.08	0.19	0.15	0.32	0.34
L-UZ5	1.36	1.60	2.71	3.20	4.31	5.91	2.82	3.49	5.64	6.99	9.14	12.63	0.98	1.06	1.97	2.13	3.03	4.10	0.26	0.24	0.53	0.49	0.77	1.01
L-UZ6	0.53	0.53	1.06	1.06	3.56	3.55	1.19	1.25	2.38	2.50	8.25	8.65	0.31	0.27	0.62	0.54	1.84	1.66	0.10	0.08	0.19	0.15	0.61	0.34
L-UZ7	0.11	0.18	0.63	0.57	0.81	1.20	0.23	0.36	1.60	1.42	1.96	3.02	0.09	0.13	0.25	0.23	0.38	0.48	0.02	0.04	0.05	0.05	0.09	0.10
L-UZ8	0.35	0.62	2.21	2.49	2.74	3.28	0.71	1.22	5.59	6.27	6.84	8.09	0.30	0.50	0.93	1.05	1.20	1.47	0.05	0.12	0.11	0.15	0.18	0.26
L-UZ9	0.11	0.18	0.63	0.57	1.25	1.20	0.23	0.36	1.60	1.42	2.96	3.02	0.09	0.13	0.25	0.23	0.63	0.48	0.02	0.04	0.05	0.05	0.16	0.10

หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = 1 ด้านหน้าหรือหลัง , 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = 1 ด้านหน้าและหลัง , 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = 1 ด้านหน้า ด้านหลังและด้านข้างซ้ายหรือขวา

ตารางที่ ข2.2 ค่าความเข้มรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 16 W จำแนกตามระดับตามระดับการติดตั้งระบบ และจำนวนด้านที่ติดตั้ง ระบบ

พื้นที่	ค่าความเข้มรังสี UVC ใน Upper Zone ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )																							
	ระดับติดตั้งระบบ 2.7 m						ระดับติดตั้งระบบ 3.0 m						ระดับติดตั้งระบบ 3.0 m						เฉลี่ยทุกระดับ					
	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
เฉลี่ยUZ	2.09	1.89	4.17	3.76	6.39	8.30	1.81	1.65	3.61	3.28	5.56	7.23	2.43	2.17	4.87	4.32	7.45	9.64	2.02	1.86	4.03	3.67	6.17	8.04
เฉลี่ยU-UZ	1.19	1.11	2.37	2.20	3.75	4.72	2.12	2.00	4.24	4.00	6.60	8.50	1.10	1.01	2.20	2.01	3.50	4.34	0.34	0.31	0.67	0.60	1.14	1.32
เฉลี่ยL-UZ	3.18	2.96	6.36	5.80	9.66	12.64	2.52	2.32	5.05	4.61	7.61	10.05	3.65	3.41	7.31	6.58	11.12	14.47	3.36	3.14	6.72	6.21	10.23	13.40
U-UZ1	2.92	2.23	3.95	3.47	5.19	7.42	1.92	1.43	2.77	2.57	3.90	5.33	3.60	2.74	4.55	3.82	5.63	8.37	3.24	2.52	4.52	4.03	6.04	8.55
U-UZ2	10.25	10.48	11.85	12.66	14.78	17.71	7.93	8.21	9.57	10.53	11.87	14.18	12.67	12.83	14.26	14.96	17.46	20.66	10.13	10.39	11.72	12.50	15.00	18.28
U-UZ3	2.92	2.23	3.95	3.47	6.64	7.40	1.92	1.43	2.77	2.57	4.33	5.33	3.60	2.74	4.55	3.82	8.02	8.35	3.24	2.52	4.52	4.03	7.58	8.53
U-UZ4	2.78	2.93	5.55	5.86	7.74	18.22	2.39	2.30	4.78	4.61	7.11	15.31	2.89	3.20	5.77	6.40	7.90	20.73	3.05	3.28	6.10	6.56	8.21	18.60
U-UZ5	5.16	6.98	10.32	13.96	17.30	24.28	4.46	5.49	8.91	10.97	14.40	19.88	6.01	8.68	12.01	17.35	20.69	29.36	5.01	6.78	10.03	13.55	16.81	23.58
U-UZ6	2.78	2.93	5.55	5.86	16.64	18.22	2.39	2.30	4.78	4.61	13.32	15.31	2.89	3.20	5.77	6.40	19.47	20.73	3.05	3.28	6.10	6.56	17.13	18.60
U-UZ7	1.03	1.24	3.95	3.47	5.19	7.42	0.85	1.13	2.77	2.57	3.90	5.33	0.96	1.08	4.55	3.82	5.63	8.37	1.28	1.52	4.52	4.03	6.04	8.55
U-UZ8	1.60	2.19	11.85	12.66	14.78	17.71	1.64	2.32	9.57	10.53	11.87	14.18	1.58	2.13	14.26	14.96	17.46	20.66	1.59	2.11	11.72	12.50	15.00	18.28
U-UZ9	1.03	1.24	3.95	3.47	6.44	7.42	0.85	1.13	2.77	2.57	4.31	5.33	0.96	1.08	4.55	3.82	7.70	8.37	1.28	1.52	4.52	4.03	7.32	8.55
L-UZ1	0.87	0.65	1.33	1.28	1.96	2.61	1.77	1.37	2.17	2.04	2.84	4.21	0.64	0.43	1.30	1.27	2.14	2.57	0.21	0.15	0.54	0.52	0.91	1.06
L-UZ2	3.30	3.35	4.17	4.61	5.34	6.52	7.69	8.09	8.63	9.63	10.49	12.36	1.94	1.76	3.24	3.49	4.49	5.74	0.27	0.20	0.65	0.69	1.05	1.46
L-UZ3	0.87	0.65	1.33	1.28	2.55	2.61	1.77	1.37	2.17	2.04	4.15	4.20	0.64	0.43	1.30	1.27	2.41	2.56	0.21	0.15	0.54	0.52	1.08	1.06
L-UZ4	1.25	1.17	2.50	2.34	3.76	7.11	1.86	1.86	3.72	3.73	5.26	13.36	1.45	1.25	2.90	2.50	4.63	6.39	0.44	0.40	0.89	0.80	1.38	1.58
L-UZ5	2.25	2.69	4.51	5.39	7.20	9.89	3.60	4.69	7.19	9.39	11.88	16.58	2.48	2.72	4.95	5.44	7.67	10.39	0.69	0.67	1.38	1.33	2.05	2.71
L-UZ6	1.25	1.17	2.50	2.34	6.70	7.11	1.86	1.86	3.72	3.73	12.77	13.36	1.45	1.25	2.90	2.50	5.59	6.39	0.44	0.40	0.89	0.80	1.73	1.58
L-UZ7	0.46	0.63	1.33	1.28	1.96	2.61	0.40	0.67	2.17	2.04	2.84	4.21	0.65	0.84	1.30	1.27	2.14	2.57	0.33	0.36	0.54	0.52	0.91	1.06
L-UZ8	0.87	1.25	4.17	4.61	5.34	6.52	0.94	1.54	8.63	9.63	10.49	12.36	1.30	1.73	3.24	3.49	4.49	5.74	0.39	0.49	0.65	0.69	1.05	1.46
L-UZ9	0.46	0.63	1.33	1.28	2.32	2.61	0.40	0.67	2.17	2.04	3.90	4.21	0.65	0.84	1.30	1.27	2.12	2.57	0.33	0.36	0.54	0.52	0.95	1.06

หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = 1 ด้านหน้าหรือหลัง , 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = 1 ด้านหน้าและหลัง , 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = 1 ด้านหน้า ด้านหลังและด้านข้างหรือขวา



ตารางที่ ข2.3 ค่าความเข้มรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 30 W จำแนกตามระดับตามระดับการติดตั้งระบบ และจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ

พื้นที่	ค่าความเข้มรังสี UVC ใน Upper Zone ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )																							
	ระดับติดตั้งระบบ 2.7 m						ระดับติดตั้งระบบ 3.0 m						ระดับติดตั้งระบบ 3.0 m						เฉลี่ยทุกระดับ					
	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
เฉลี่ยUZ	10.41	9.59	20.82	18.84	31.61	41.28	10.30	9.61	20.60	18.81	31.25	40.95	10.55	9.63	21.09	18.99	32.08	41.79	10.39	9.54	20.77	18.72	31.50	41.10
เฉลี่ยU-UZ	6.99	6.52	13.98	12.80	21.53	27.54	10.96	10.39	21.93	20.48	33.66	43.63	4.99	4.59	9.99	8.96	15.56	19.48	5.00	4.60	10.01	8.96	15.37	19.50
เฉลี่ยL-UZ	14.18	13.24	28.35	26.14	42.91	56.43	11.79	11.13	23.58	21.86	35.42	46.93	15.59	14.48	31.18	28.68	47.36	62.10	15.15	14.12	30.30	27.89	45.96	60.25
U-UZ1	13.13	10.05	19.96	17.88	27.79	37.84	10.13	7.75	17.25	15.92	25.42	33.16	14.63	11.09	21.09	18.87	28.86	39.95	14.62	11.32	21.56	18.85	29.08	40.40
U-UZ2	37.18	37.19	45.35	47.63	60.10	74.84	25.82	25.52	33.93	35.92	46.86	59.80	43.51	43.36	51.69	54.45	67.84	84.00	42.20	42.69	50.43	52.53	65.58	80.73
U-UZ3	13.13	10.05	19.96	17.88	31.57	37.74	10.13	7.75	17.25	15.92	25.32	33.09	14.63	11.09	21.09	18.87	34.35	39.85	14.62	11.32	21.56	18.85	35.03	40.28
U-UZ4	14.11	14.75	28.23	29.50	38.67	75.86	12.85	12.94	25.69	25.87	36.10	61.61	15.46	16.16	30.93	32.31	42.01	85.37	14.03	15.15	28.06	30.31	37.90	80.59
U-UZ5	22.50	29.13	45.01	58.25	74.14	103.26	19.14	23.00	38.28	46.01	61.29	84.29	25.85	34.27	51.69	68.54	85.96	120.23	22.53	30.11	45.05	60.21	75.16	105.27
U-UZ6	14.11	14.75	28.23	29.50	67.34	75.86	12.85	12.94	25.69	25.87	51.86	61.61	15.46	16.16	30.93	32.31	76.99	85.37	14.03	15.15	28.06	30.31	73.18	80.59
U-UZ7	6.84	7.83	19.96	17.88	27.81	37.84	7.11	8.17	17.25	15.92	25.43	33.16	6.46	7.78	21.09	18.87	28.89	39.95	6.94	7.53	21.56	18.85	29.12	40.40
U-UZ8	8.17	10.44	45.35	47.63	60.10	74.84	8.11	10.40	33.93	35.92	46.86	59.80	8.18	11.09	51.69	54.45	67.84	84.00	8.23	9.84	50.43	52.53	65.58	80.73
U-UZ9	6.84	7.83	19.96	17.88	30.89	37.84	7.11	8.17	17.25	15.92	25.28	33.16	6.46	7.78	21.09	18.87	33.39	39.95	6.94	7.53	21.56	18.85	34.01	40.40
L-UZ1	5.29	4.00	10.51	9.58	16.09	20.09	10.24	7.79	15.84	14.17	22.21	30.00	2.85	2.01	7.79	7.31	13.09	15.10	2.79	2.21	7.91	7.25	12.95	15.16
L-UZ2	13.78	13.55	19.75	20.55	27.05	34.36	27.22	26.92	33.73	35.27	45.58	57.43	6.41	5.69	12.05	12.28	17.47	22.89	7.72	8.04	13.46	14.09	18.11	22.75
L-UZ3	5.29	4.00	10.51	9.58	16.68	20.06	10.24	7.79	15.84	14.17	26.11	29.93	2.85	2.01	7.79	7.31	12.11	15.09	2.79	2.21	7.91	7.25	11.83	15.15
L-UZ4	7.55	7.31	15.09	14.61	22.09	35.64	11.23	11.85	22.45	23.71	30.80	57.72	6.13	5.42	12.26	10.84	18.85	24.54	5.28	4.65	10.56	9.29	16.62	24.65
L-UZ5	11.08	12.84	22.15	25.69	35.00	47.84	17.63	22.66	35.26	45.32	57.92	80.58	8.75	9.43	17.51	18.85	26.93	36.36	6.84	6.45	13.69	12.90	20.13	26.58
L-UZ6	7.55	7.31	15.09	14.61	31.90	35.64	11.23	11.85	22.45	23.71	52.95	57.72	6.13	5.42	12.26	10.84	21.55	24.54	5.28	4.65	10.56	9.29	21.19	24.65
L-UZ7	5.22	5.57	10.51	9.58	16.09	20.09	5.60	6.38	15.84	14.17	22.23	30.00	4.95	5.30	7.79	7.31	13.09	15.10	5.12	5.04	7.91	7.25	12.96	15.16
L-UZ8	5.97	7.00	19.75	20.55	27.05	34.36	6.51	8.35	33.73	35.27	45.58	57.43	5.64	6.59	12.05	12.28	17.47	22.89	5.74	6.06	13.46	14.09	18.11	22.75
L-UZ9	5.22	5.57	10.51	9.58	15.82	20.09	5.60	6.38	15.84	14.17	25.10	30.00	4.95	5.30	7.79	7.31	11.15	15.10	5.12	5.04	7.91	7.25	11.21	15.16

หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = 1 ด้านหน้าหรือหลัง , 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = 1 ด้านหน้าและหลัง , 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = 1 ด้านหน้า ด้านหลังและด้านข้างหรือขวา

ตารางที่ ข3.1 ปริมาณรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อ ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ และระดับต่าง ๆ จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ

กำลังไฟ หลอด UVC (W)	ระดับติดตั้ง ระบบ (m)	ปริมาณรังสี UVC ใน Upper zone ( $\mu\text{W}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ )																	
		6 ACH						9 ACH						12 ACH					
		1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
8	2.7	137.88	125.11	275.76	249.75	425.31	551.51	86.30	78.31	172.61	156.33	266.22	345.20	83.86	76.09	167.72	151.90	258.68	335.43
	3.0	162.65	144.13	325.30	288.65	499.36	645.06	101.81	90.21	203.61	180.67	312.56	403.76	98.92	87.66	197.85	175.56	303.71	392.33
	3.3	132.50	120.97	265.01	240.85	408.18	530.18	82.94	75.72	165.88	150.75	255.49	331.85	80.59	73.58	161.18	146.48	248.26	322.46
	เฉลี่ย	144.34	130.07	288.69	259.75	444.28	575.58	90.35	81.42	180.70	162.58	278.09	360.27	87.79	79.11	175.58	157.98	270.21	350.07
16	2.7	191.08	174.07	382.16	346.66	587.60	764.08	119.60	108.95	239.20	216.98	367.80	478.26	116.21	105.87	232.43	210.84	357.38	464.72
	3.0	257.23	229.08	514.46	457.16	787.87	1,019.02	161.01	143.39	322.02	286.15	493.15	637.83	156.45	139.33	312.90	278.04	479.18	619.77
	3.3	213.18	196.69	426.37	388.19	652.14	849.97	133.44	123.12	266.88	242.98	408.19	532.02	129.66	119.63	259.32	236.10	396.63	516.96
	เฉลี่ย	220.50	199.94	441.00	397.34	675.87	877.69	138.02	125.15	276.03	248.70	423.05	549.37	134.11	121.61	268.21	241.66	411.07	533.81
30	2.7	1,089.17	1,016.18	2,178.35	1,988.98	3,304.07	4,330.48	681.75	636.06	1,363.49	1,244.96	2,068.12	2,710.58	662.44	618.04	1,324.88	1,209.71	2,009.55	2,633.81
	3.0	1,115.21	1,018.76	2,230.42	2,007.87	3,392.45	4,418.61	698.04	637.67	1,396.09	1,256.79	2,123.43	2,765.74	678.27	619.61	1,356.55	1,221.19	2,063.30	2,687.41
	3.3	1,098.38	1,008.34	2,196.76	1,979.94	3,330.49	4,346.00	687.51	631.15	1,375.02	1,239.30	2,084.66	2,720.29	668.04	613.28	1,336.08	1,204.20	2,025.62	2,643.25
	เฉลี่ย	1,100.92	1,014.43	2,201.84	1,992.26	3,342.34	4,365.03	689.10	634.96	1,378.20	1,247.02	2,092.07	2,732.20	669.58	616.98	1,339.17	1,211.70	2,032.82	2,654.83

หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง , 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง , 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

ตารางที่ ข3.2 ปริมาณรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อ ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ และระดับต่าง ๆ

จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ

กำลังไฟ หลอด UVC (W)	ระดับติดตั้ง ระบบ (m)	ปริมาณรังสี UVC ใน Upper zone ( $\mu\text{W}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ )																	
		6 ACH				9 ACH				12 ACH									
		1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
8	2.7	82.84	75.16	165.67	150.05	255.52	331.34	71.98	65.31	143.96	130.38	222.04	287.92	64.37	58.41	128.73	116.59	198.55	257.46
	3.0	97.72	86.59	195.43	173.42	300.01	387.55	84.91	75.24	169.82	150.69	260.69	336.76	75.93	67.28	151.86	134.75	233.12	301.14
	3.3	79.61	72.68	159.21	144.70	245.23	318.53	69.17	63.16	138.35	125.73	213.09	276.78	61.86	56.48	123.72	112.44	190.55	247.51
	เฉลี่ย	86.72	78.15	173.44	156.05	266.92	345.80	75.36	67.90	150.71	135.60	231.94	300.48	67.38	60.72	134.77	121.26	207.41	268.70
16	2.7	114.80	104.58	229.60	208.27	353.02	459.05	99.75	90.87	199.51	180.97	306.76	398.89	89.20	81.26	178.40	161.83	274.31	356.70
	3.0	154.54	137.63	309.08	274.65	473.34	612.21	134.29	119.59	268.58	238.66	411.31	531.98	120.08	106.94	240.17	213.42	367.80	475.71
	3.3	128.08	118.17	256.16	233.22	391.80	510.65	111.29	102.68	222.59	202.66	340.45	443.73	99.52	91.82	199.04	181.22	304.44	396.80
	เฉลี่ย	132.47	120.12	264.95	238.72	406.05	527.31	115.11	104.38	230.22	207.43	352.84	458.20	102.94	93.34	205.87	185.49	315.52	409.74
30	2.7	654.36	610.51	1,308.73	1,194.96	1,985.05	2,601.71	568.61	530.50	1,137.21	1,038.35	1,724.90	2,260.74	508.47	474.39	1,016.93	928.53	1,542.46	2,021.62
	3.0	670.01	612.06	1,340.01	1,206.31	2,038.15	2,654.65	582.20	531.84	1,164.40	1,048.21	1,771.03	2,306.75	520.62	475.59	1,041.24	937.35	1,583.72	2,062.76
	3.3	659.90	605.80	1,319.79	1,189.52	2,000.93	2,611.03	573.41	526.41	1,146.83	1,033.63	1,738.69	2,268.84	512.76	470.73	1,025.53	924.31	1,554.79	2,028.87
	เฉลี่ย	661.42	609.46	1,322.84	1,196.93	2,008.04	2,622.46	574.74	529.58	1,149.48	1,040.07	1,744.88	2,278.78	513.95	473.57	1,027.90	930.06	1,560.32	2,037.75

หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง , 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง , 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

ตารางที่ ข3.3 ปริมาณรังสี UVC ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อ ที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/H ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ และระดับต่าง ๆ

จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ

กำลังไฟ หลอด UVC (W)	ระดับติดตั้ง ระบบ (m)	ปริมาณรังสี UVC ใน Upper zone ( $\mu\text{W}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ )																	
		6 ACH						9 ACH						12 ACH					
		1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
8	2.7	78.10	70.87	156.20	141.47	240.91	312.39	61.49	55.79	122.98	111.38	189.68	245.95	54.11	49.10	108.22	98.01	166.91	216.43
	3.0	92.13	81.64	184.26	163.50	282.85	365.38	72.54	64.28	145.07	128.73	222.70	287.67	63.83	56.56	127.66	113.27	195.96	253.14
	3.3	75.05	68.52	150.11	136.42	231.21	300.31	59.09	53.95	118.18	107.41	182.03	236.44	52.00	47.47	104.00	94.52	160.18	208.06
	เฉลี่ย	81.76	73.68	163.52	147.13	251.66	326.03	64.37	58.01	128.74	115.84	198.13	256.69	56.65	51.04	113.29	101.93	174.35	225.88
16	2.7	108.23	98.60	216.47	196.36	332.83	432.80	85.21	77.63	170.43	154.60	262.05	340.75	74.99	68.31	149.97	136.04	230.59	299.85
	3.0	145.70	129.76	291.41	258.95	446.27	577.20	114.72	102.16	229.43	203.88	351.36	454.45	100.95	89.90	201.89	179.40	309.18	399.90
	3.3	120.75	111.41	241.51	219.89	369.39	481.45	95.07	87.72	190.14	173.12	290.83	379.06	83.66	77.19	167.32	152.34	255.92	333.56
	เฉลี่ย	124.90	113.26	249.79	225.06	382.83	497.15	98.33	89.17	196.67	177.20	301.41	391.42	86.53	78.46	173.06	155.93	265.23	344.43
30	2.7	616.94	575.60	1,233.89	1,126.62	1,871.53	2,452.92	485.73	453.18	971.47	887.01	1,473.50	1,931.24	427.43	398.78	854.85	780.54	1,296.63	1,699.42
	3.0	631.69	577.06	1,263.38	1,137.32	1,921.59	2,502.84	497.34	454.33	994.69	895.44	1,512.91	1,970.54	437.64	399.79	875.29	787.95	1,331.31	1,734.01
	3.3	622.16	571.16	1,244.32	1,121.50	1,886.50	2,461.72	489.84	449.68	979.68	882.98	1,485.28	1,938.16	431.04	395.71	862.08	776.99	1,306.99	1,705.51
	เฉลี่ย	623.60	574.60	1,247.19	1,128.48	1,893.21	2,472.49	490.97	452.40	981.94	888.48	1,490.56	1,946.65	432.04	398.09	864.07	781.83	1,311.64	1,712.98

หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง , 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง , 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

ตารางที่ ข4.1 อัตราการฆ่าเชื้อไวรัสโรค ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ L/H ติดตั้งระบบด้วยหลอดกำลังไฟ และระดับ ต่าง ๆ จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ

กำลังไฟ หลอด UVC (W)	ระดับติดตั้ง ระบบ (m)	อัตราการฆ่าเชื้อไวรัสโรค ใน Upper zone (ร้อยละ)																	
		6 ACH						9 ACH						12 ACH					
		1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
8	2.7	47.84	44.60	72.80	69.24	86.57	92.60	33.46	30.91	55.73	52.19	71.54	80.40	32.69	30.18	54.70	51.18	70.51	79.48
	3.0	53.60	49.36	78.47	74.40	90.53	95.24	38.16	34.68	61.76	57.38	77.14	85.14	37.31	33.89	60.70	56.34	76.16	84.31
	3.3	46.50	43.51	71.38	67.92	85.44	91.82	32.40	30.06	54.30	50.92	70.07	79.13	31.65	29.34	53.28	49.92	69.03	78.18
	เฉลี่ย	49.41	45.89	74.41	70.66	87.72	93.39	34.72	31.91	57.39	53.59	73.10	81.75	33.93	31.17	56.35	52.57	72.08	80.85
16	2.7	59.43	56.03	83.54	80.54	93.76	97.29	43.14	40.21	67.67	64.10	82.38	89.54	42.23	39.33	66.62	63.04	81.50	88.85
	3.0	70.31	66.09	91.19	88.45	97.58	99.19	53.24	49.18	78.13	74.10	90.25	95.08	52.22	48.20	77.17	73.09	89.59	94.64
	3.3	63.45	60.49	86.64	84.00	95.40	98.19	46.74	44.08	71.63	68.24	85.44	91.89	45.78	43.15	70.60	67.20	84.63	91.29
	เฉลี่ย	64.69	61.09	87.53	84.68	95.89	98.41	47.88	44.61	72.83	69.09	86.43	92.52	46.91	43.68	71.81	68.05	85.64	91.96
30	2.7	99.42	99.17	100.00	99.99	100.00	100.00	96.00	95.04	99.84	99.72	99.99	100.00	95.62	94.59	99.81	99.67	99.99	100.00
	3.0	99.48	99.18	100.00	99.99	100.00	100.00	96.29	95.07	99.86	99.74	100.00	100.00	95.93	94.63	99.83	99.69	99.99	100.00
	3.3	99.44	99.14	100.00	99.99	100.00	100.00	96.11	94.92	99.85	99.71	99.99	100.00	95.73	94.47	99.82	99.66	99.99	100.00
	เฉลี่ย	99.45	99.17	100.00	99.99	100.00	100.00	96.14	95.01	99.85	99.72	99.99	100.00	95.76	94.57	99.82	99.67	99.99	100.00

หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง , 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง , 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

ตารางที่ ข4.2 อัตราการฆ่าเชื้อไวรัส โคร ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อ ที่มีที่ติดตั้งช่องระบายอากาศแบบ H/L ติดตั้งระบบด้วยหลอดกำลังไฟ และระดับต่าง ๆ จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศแลจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ

กำลังไฟ หลอด UVC (W)	ระดับติดตั้ง ระบบ (m)	อัตราการฆ่าเชื้อไวรัส โคร ใน Upper zone (ร้อยละ)																	
		6 ACH						9 ACH						12 ACH					
		1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
8	2.7	32.37	29.87	54.26	50.76	70.07	79.08	28.81	26.53	49.32	45.97	64.94	74.31	26.20	24.10	45.54	42.33	60.83	70.34
	3.0	36.96	33.55	60.25	55.90	75.74	83.95	33.03	29.90	55.14	50.90	70.79	79.60	30.13	27.21	51.18	47.07	66.73	75.87
	3.3	31.33	29.04	52.84	49.50	68.58	77.77	27.86	25.78	47.96	44.77	63.43	72.93	25.33	23.40	44.24	41.19	59.33	68.92
	เฉลี่ย	33.60	30.85	55.90	52.13	71.64	80.46	29.94	27.43	50.91	47.28	66.55	75.79	27.25	24.92	47.07	43.59	62.44	71.88
16	2.7	41.84	38.96	66.17	62.59	81.11	88.55	37.56	34.88	61.01	57.45	76.50	84.79	34.37	31.86	56.93	53.42	72.61	81.44
	3.0	51.79	47.78	76.76	72.66	89.30	94.44	46.95	43.14	71.86	67.59	85.66	91.89	43.27	39.64	67.82	63.49	82.38	89.42
	3.3	45.37	42.76	70.16	66.75	84.27	91.03	40.87	38.42	65.04	61.59	79.96	87.69	37.49	35.18	60.92	57.50	76.24	84.64
	เฉลี่ย	46.50	43.28	71.37	67.60	85.30	91.70	41.93	38.91	66.27	62.44	81.10	88.50	38.49	35.64	62.16	58.34	77.45	85.55
30	2.7	95.45	94.40	99.79	99.65	99.99	100.00	93.17	91.83	99.53	99.26	99.97	100.00	90.93	89.35	99.18	98.75	99.93	99.99
	3.0	95.77	94.44	99.82	99.66	99.99	100.00	93.60	91.88	99.59	99.29	99.98	100.00	91.44	89.41	99.27	98.80	99.94	99.99
	3.3	95.56	94.27	99.80	99.64	99.99	100.00	93.33	91.67	99.55	99.24	99.97	100.00	91.11	89.16	99.21	98.73	99.94	99.99
	เฉลี่ย	95.60	94.37	99.81	99.65	99.99	100.00	93.37	91.79	99.56	99.26	99.97	100.00	91.16	89.31	99.22	98.76	99.94	99.99

หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง , 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง , 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

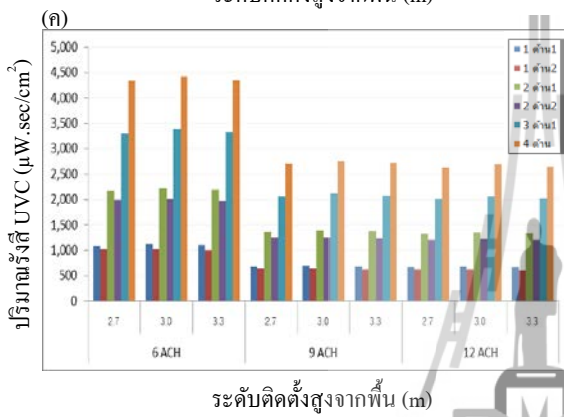
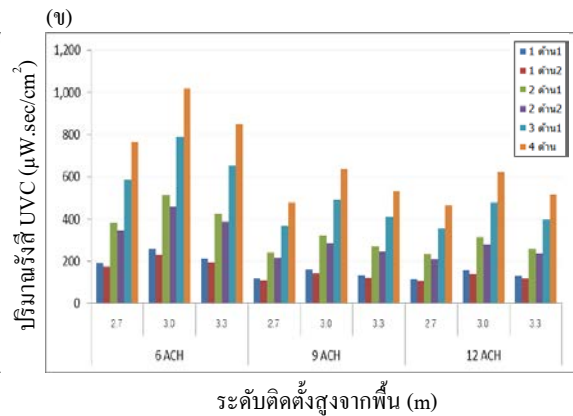
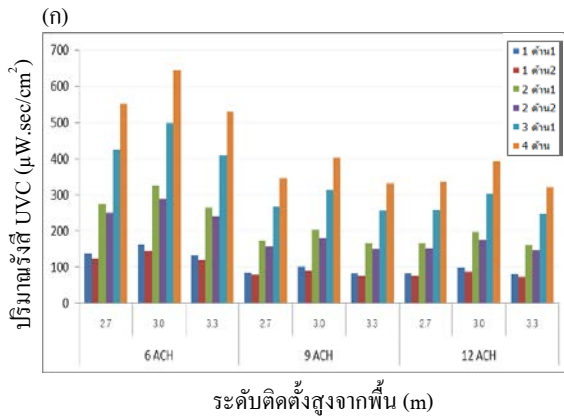
ตารางที่ ข4.3 อัตราการฆ่าเชื้อไวรัส โคร ใน Upper Zone ของระบบฆ่าเชื้อ ที่มีที่ติดตั้งช่องระบายอากาศแบบ H/H ติดตั้งระบบด้วยหลอดกำลังไฟ และระดับต่าง ๆ จำแนกตามอัตราแลกเปลี่ยนอากาศแลจำนวนด้านที่ติดตั้งระบบ

กำลังไฟ หลอด UVC (W)	ระดับติดตั้ง ระบบ (m)	อัตราการฆ่าเชื้อไวรัส โคร ใน Upper zone (ร้อยละ)																	
		6 ACH						9 ACH						12 ACH					
		1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน	1ด้าน <sup>1</sup>	1ด้าน <sup>2</sup>	2ด้าน <sup>1</sup>	2ด้าน <sup>2</sup>	3ด้าน <sup>1</sup>	4 ด้าน
8	2.7	30.84	28.43	52.17	48.72	67.93	77.12	25.20	23.16	44.04	40.89	59.16	68.69	22.54	20.69	40.00	37.04	54.52	64.00
	3.0	35.27	31.98	58.10	53.79	73.69	82.18	29.00	26.17	49.58	45.54	65.05	74.29	26.02	23.43	45.27	41.42	60.35	69.73
	3.3	29.84	27.64	50.77	47.48	66.43	75.77	24.34	22.49	42.76	39.77	57.66	67.25	21.77	20.08	38.80	36.00	53.06	62.55
	เฉลี่ย	32.02	29.38	53.79	50.07	69.52	78.54	26.21	23.96	45.55	42.12	60.76	70.23	23.46	21.41	41.42	38.20	56.09	65.57
16	2.7	40.01	37.22	64.01	60.43	79.22	87.04	33.12	30.68	55.27	51.80	70.98	79.99	29.81	27.57	50.74	47.39	66.33	75.72
	3.0	49.74	45.80	74.73	70.55	87.84	93.45	41.82	38.26	66.15	61.81	80.96	88.30	37.91	34.58	61.45	57.13	76.77	84.86
	3.3	43.45	40.90	68.02	64.59	82.52	89.70	36.16	33.91	59.25	55.84	74.67	83.30	32.63	30.54	54.61	51.29	70.13	79.29
	เฉลี่ย	44.55	41.41	69.25	65.44	83.59	90.43	37.14	34.36	60.48	56.68	75.90	84.24	33.54	30.96	55.83	52.10	71.41	80.33
30	2.7	94.57	93.40	99.70	99.51	99.99	100.00	89.91	88.23	98.98	98.48	99.90	99.99	86.71	84.78	98.23	97.49	99.78	99.97
	3.0	94.93	93.44	99.74	99.53	99.99	100.00	90.44	88.29	99.09	98.54	99.92	99.99	87.33	84.85	98.40	97.58	99.81	99.97
	3.3	94.70	93.26	99.72	99.50	99.99	100.00	90.10	88.03	99.02	98.45	99.91	99.99	86.93	84.56	98.29	97.45	99.79	99.97
	เฉลี่ย	94.73	93.36	99.72	99.51	99.99	100.00	90.15	88.18	99.03	98.49	99.91	99.99	86.99	84.73	98.31	97.51	99.80	99.97

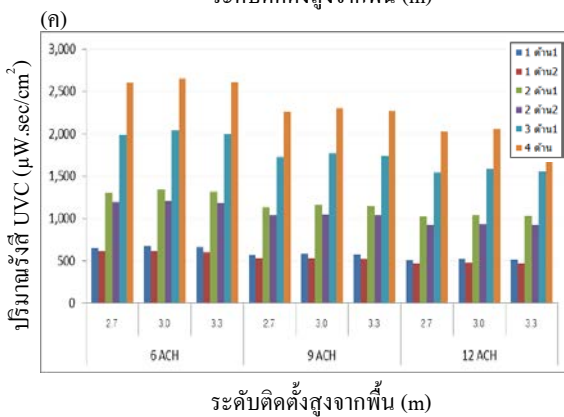
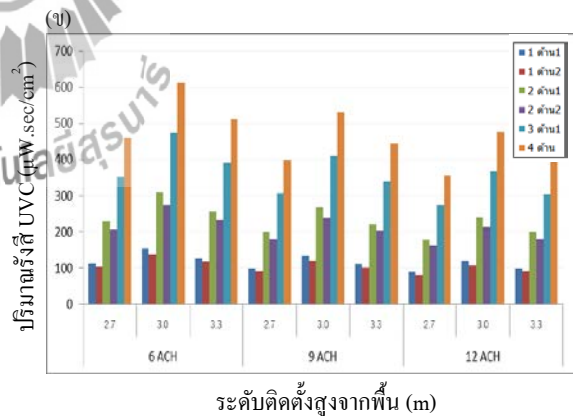
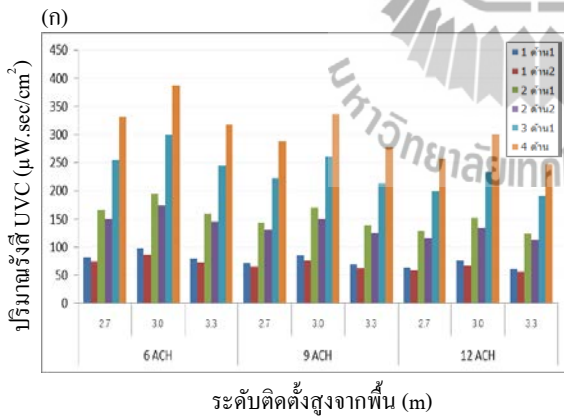
หมายเหตุ 1ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าหรือด้านหลัง , 1ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายหรือด้านขวา

2ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้าและด้านหลัง , 2ด้าน<sup>2</sup> = ด้านซ้ายและด้านขวา

3ด้าน<sup>1</sup> = ด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายหรือด้านขวา

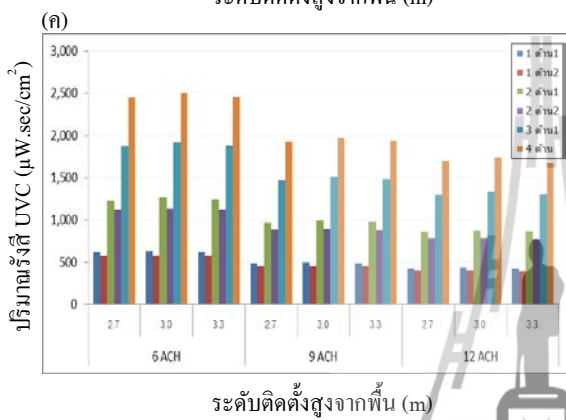
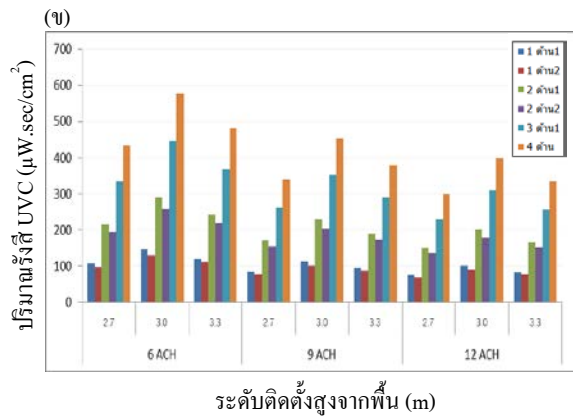
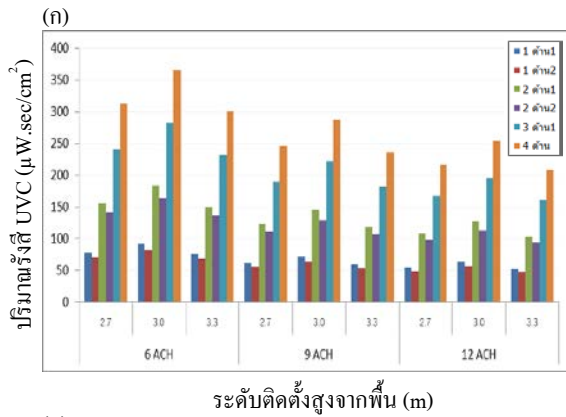


รูปที่ ข1 ปริมาณรังสี UVC ของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่างๆ โดยมีระบบระบายอากาศแบบ L/H  
 (ก) กำลังไฟหลอด UVC 8 W  
 (ข) กำลังไฟหลอด UVC 16 W  
 (ค) กำลังไฟหลอด UVC 30 W



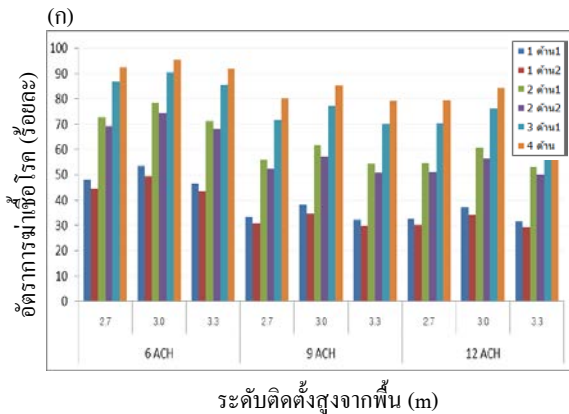
รูปที่ ข2 ปริมาณรังสี UVC ของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่างๆ โดยมีระบบระบายอากาศแบบ H/L  
 (ก) กำลังไฟหลอด UVC 8 W  
 (ข) กำลังไฟหลอด UVC 16 W  
 (ค) กำลังไฟหลอด UVC 30 W



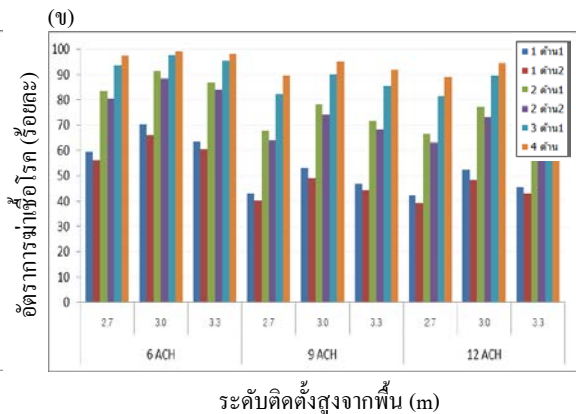


รูปที่ ข3 ปริมาณรังสี UVC ของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่างๆ โดยมีระบบระบายอากาศแบบ H/H  
 (ก) กำลังไฟหลอด UVC 8 W  
 (ข) กำลังไฟหลอด UVC 16 W  
 (ค) กำลังไฟหลอด UVC 30 W

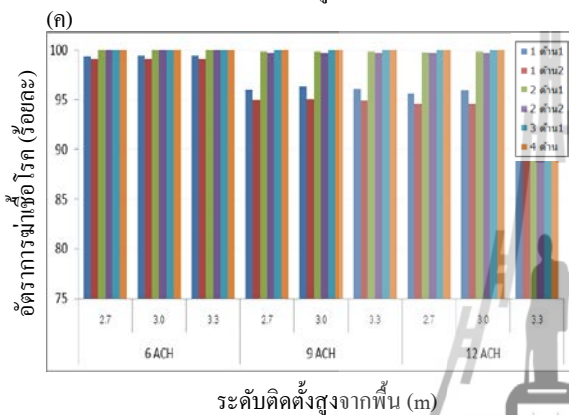




ระดับติดตั้งสูงจากพื้น (m)

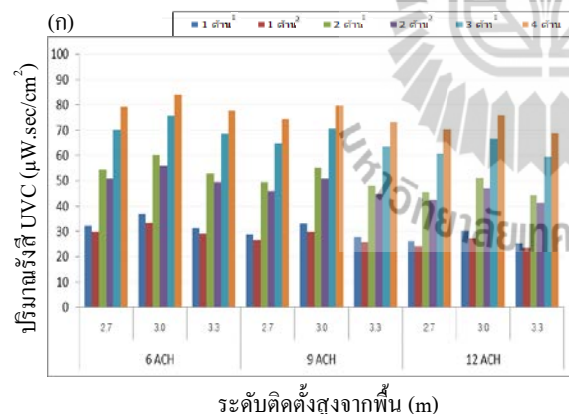


ระดับติดตั้งสูงจากพื้น (m)

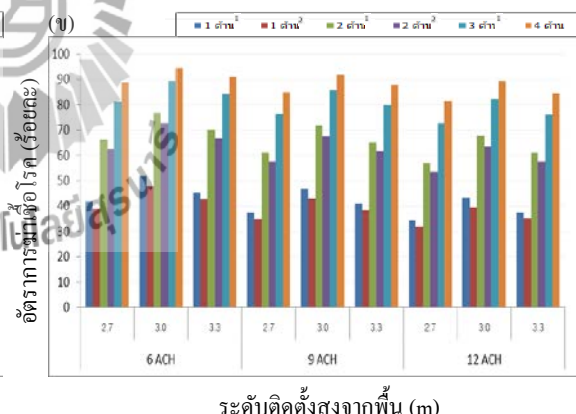


ระดับติดตั้งสูงจากพื้น (m)

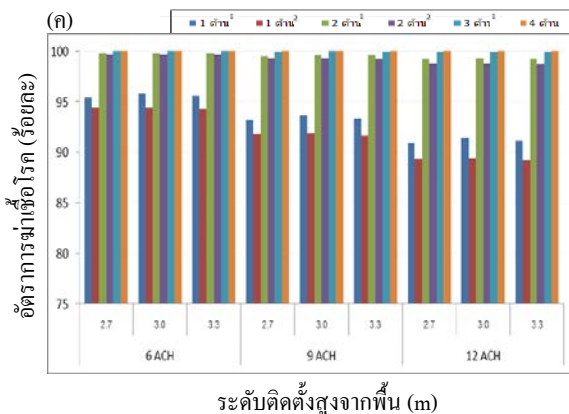
รูปที่ ๒4 อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่าง ๆ โดยมีระบบระบายอากาศแบบ L/H  
(ก) กำลังไฟหลอด UVC 8 W  
(ข) กำลังไฟหลอด UVC 16 W  
(ค) กำลังไฟหลอด UVC 30 W



ระดับติดตั้งสูงจากพื้น (m)

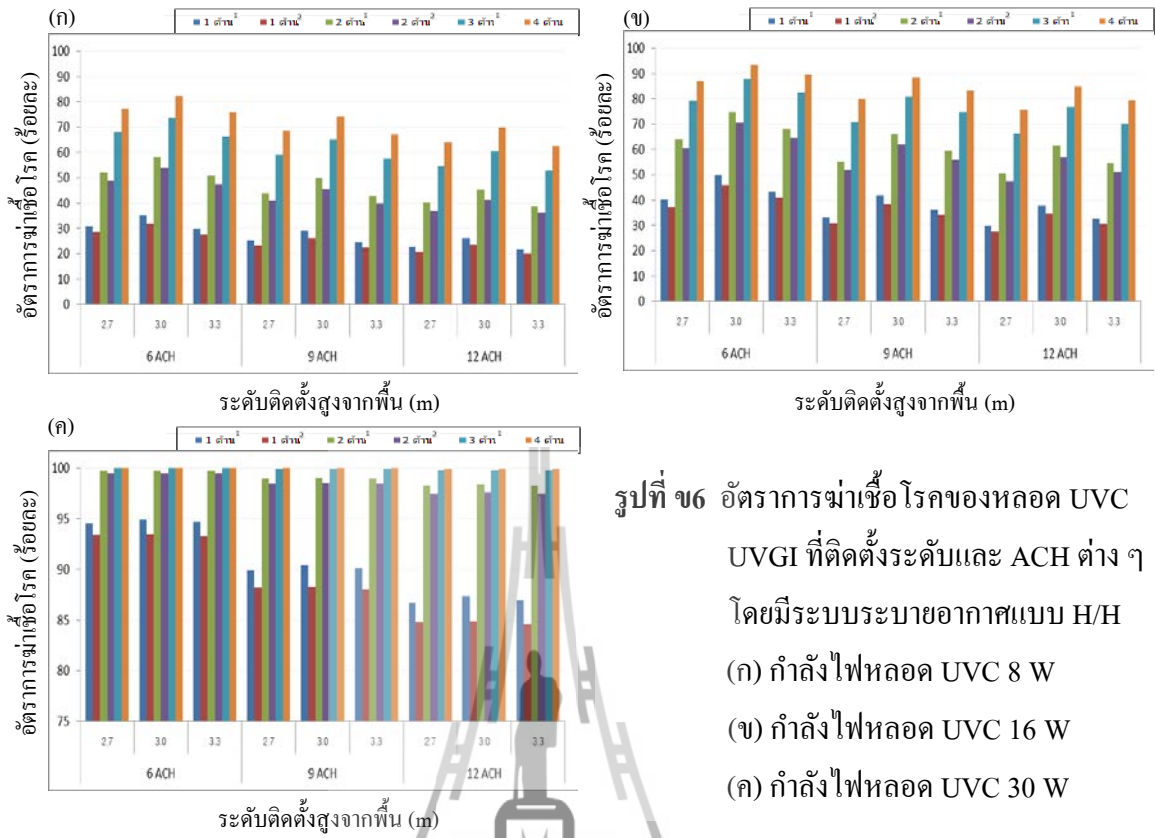


ระดับติดตั้งสูงจากพื้น (m)



ระดับติดตั้งสูงจากพื้น (m)

รูปที่ ๒5 อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่าง ๆ โดยมีระบบระบายอากาศแบบ H/L  
(ก) กำลังไฟหลอด UVC 8 W  
(ข) กำลังไฟหลอด UVC 16 W  
(ค) กำลังไฟหลอด UVC 30 W



รูปที่ ๖ อัตราการฆ่าเชื้อโรคของหลอด UVC UVGI ที่ติดตั้งระดับและ ACH ต่าง ๆ โดยมีระบบระบายอากาศแบบ H/H  
 (ก) กำลังไฟหลอด UVC 8 W  
 (ข) กำลังไฟหลอด UVC 16 W  
 (ค) กำลังไฟหลอด UVC 30 W



ตารางที่ ข5 ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ระหว่างการตรวจวัดค่าความเข้มรังสี UVC ในห้อง  
ผู้ป่วยจำลอง วันที่ 7 กุมภาพันธ์ - 8 พฤษภาคม 2556

วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)			ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)		
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
1	24.2	25.1	24.5	42	44	43.3
2	24	24.3	24.1	44	44	44.0
3	24.8	25.3	25.1	45	45	45.0
4	24.1	24.5	24.3	40	42	41.0
5	24.4	25.5	24.9	49	55	52.7
6	24.1	24.6	24.3	48	51	49.0
7	24.1	24.7	24.4	58	60	59.0
8	25.9	26	25.9	40	41	40.3
9	24.2	24.5	24.3	42	46	44.3
10	24.3	24.7	24.5	43	47	44.7
11	24.4	25	24.7	40	41	40.7
12	24.3	24.7	24.5	58	60	59.0
13	24.6	25.1	24.8	42	46	44.0
14	24.3	25	24.6	57	59	58.0
15	24.1	24.6	24.3	55	59	57.7
16	26	26	26.0	41	43	41.7
17	24.1	24.5	24.3	56	59	57.7
18	24.4	25.3	24.8	58	60	59.0
19	25.3	25.9	25.6	41	43	42.0
20	24	24.3	24.1	54	60	57.7
21	24.8	25.3	25.0	44	47	46.0
22	24	24	24.0	41	44	42.7
23	24.8	25.2	25.0	40	40	40.0
24	25.4	25.9	25.7	41	44	42.7
25	26	26	26.0	40	40	40.0

ตารางที่ ข5 ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ระหว่างการตรวจวัดค่าความเข้มรังสี UVC ในห้อง  
ผู้ป่วยจำลอง วันที่ 7 กุมภาพันธ์ - 8 พฤษภาคม 2556 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)			ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)		
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
26	24	24.5	24.3	59	60	59.3
27	25.7	25.8	25.8	40	41	40.7
28	24	24.1	24.1	42	44	42.7
29	24.1	24.4	24.3	44	47	45.7
30	24.4	24.8	24.6	47	49	48.0
31	25.6	25.9	25.7	46	49	47.7
32	24.6	25.6	25.0	57	59	58.0
33	24.4	24.9	24.5	55	59	56.7
34	24.2	24.7	24.5	52	56	54.7
35	24	24	24.0	58	59	58.3
36	24.1	24.5	24.3	57	59	58.0
37	25.5	26	25.8	59	60	59.3
38	24.1	24.5	24.3	55	57	56.0
39	24	24.1	24.1	53	59	56.7
40	24.5	25.2	24.8	58	60	59.0
41	24.1	24.7	24.4	51	57	55.0
42	25.6	25.9	25.8	44	48	46.0
43	25.4	25.7	25.5	45	47	46.0
44	24	24.2	24.1	44	48	45.7
45	25.7	25.9	25.8	40	43	41.3
46	24.1	24.1	24.1	57	58	57.7
47	24.7	25.4	25.0	42	49	45.7
48	24	24	24.0	41	46	43.3
49	24.7	25.3	25.0	40	41	40.3
50	25.5	25.8	25.7	42	44	43.3
51	25.9	26	26.0	40	40	40.0

ตารางที่ ข5 ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ระหว่างการตรวจวัดค่าความเข้มรังสี UVC ในห้อง  
ผู้ป่วยจำลอง วันที่ 7 กุมภาพันธ์ - 8 พฤษภาคม 2556 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)			ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)		
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
52	24.1	24.5	24.3	57	60	58.7
53	24	24.6	24.3	46	51	48.7
54	24.1	24.6	24.4	58	59	58.7
55	25.9	26	26	40	40	40.0
56	24.1	24.5	24.3	42	45	43.7
57	25.1	25.5	25.3	40	42	41.0
58	24	24.6	24.3	58	59	58.3
59	25.9	26	26	40	44	42.3
60	24.3	24.9	24.6	47	50	48.3
61	25.4	25.8	25.6	41	43	42.0
62	24.2	24.6	24.4	51	56	53.0
63	24	24.1	24	44	48	46.3
64	24.4	24.8	24.6	42	45	43.0
65	25.5	25.9	25.7	44	47	45.0
66	24	24.3	24.2	56	59	57.7
67	25.3	25.7	25.5	45	46	45.3
68	24.2	24.4	24.3	58	60	59.0
69	25.4	25.8	25.6	43	47	44.7
70	24.3	24.5	24.4	56	59	57.7
71	24.1	24.3	24.2	55	57	56.3
72	24.2	24.6	24.4	56	59	57.7
ค่าเฉลี่ย	24.6	25	24.8	47.9	50.5	49.2
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.7	0.6	0.6	7.0	7.2	7.1
ค่าสูงสุด	26	26	26	26	26	59.3
ค่าต่ำสุด	24	24	24	24	24	24

ภาคผนวก ค

การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค1 ข้อมูลการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบและค่าเริ่มต้นการจำลอง





### ค1.1 การคัดเลือกขนาดอนุภาคเชื้อไวรัสที่ใช้ในการจำลองด้วย CFD

อนุภาคเชื้อไวรัส เป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2-0.5  $\mu\text{m}$  ยาว 2-4  $\mu\text{m}$  เมื่อผู้ป่วยไอ จามออกมาจะรวมกับละอองน้ำลายขนาดต่าง ๆ โดยอนุภาคฯ และละออง น้ำลายขนาดเล็ก (ขนาดไม่เกิน 20  $\mu\text{m}$ ) จะมีพฤติกรรมเป็นอนุภาคลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลานาน ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่ (ขนาดใหญ่กว่า 20  $\mu\text{m}$ ) จะตกลงสู่พื้นตามแรงดึงดูดของโลกในระยะเวลาไม่นาน

ดังนั้น การคัดเลือกขนาดอนุภาคฯ ในการจำลองจะพิจารณาเฉพาะในกลุ่มอนุภาคขนาดเล็ก โดยจัดแบ่งเป็นกลุ่มย่อย 2 ขนาด คือ ขนาดไม่เกิน 5  $\mu\text{m}$  ที่สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนปลายได้ทันที และกลุ่มขนาดเกินกว่า 5  $\mu\text{m}$  แต่ไม่เกิน 20  $\mu\text{m}$  โดยขั้นตอนการคัดเลือกขนาดอนุภาค ดังตารางที่ ค1.1-ค1.3

#### 1.1 คุณลักษณะทางกายภาพของเชื้อไวรัสจากการศึกษาที่ผ่านมา

- 1.1.1 ขนาด - เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 0.2-0.5  $\mu\text{m}$   
- ยาว 2-4  $\mu\text{m}$  (CDC, 2005)
- 1.1.2 น้ำหนัก  $1 \times 10^{-12}$  g (Davis, Dulbecco, Eisen, Ginsberg, 1973)
- 1.1.3 ประมวลการค่าความหนาแน่น  $3.466 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>

#### 1.2 การพิจารณาการกระจายจำนวน ขนาดและประมาณของเชื้อไวรัสจากการศึกษาที่ผ่านมา

ตารางที่ ค1.1 การกระจายจำนวนตามขนาดของอนุภาคและ droplet nuclei ที่ถูกไอออกมาต่อวินาที (0.4 L/s) จากการศึกษาของ M.P. Wan et al. (2007)

อนุภาคเริ่มต้น					ขนาด droplet nuclei ( $\mu\text{m}$ )
ขนาดอนุภาคเริ่มต้น ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน (อนุภาค)	ร้อยละ	จำนวนต่อปริมาตร ( $\text{cm}^{-3}$ )	L/s	
1.5	500	1.01	1.3	0.00417	0.6
3	2,900	5.83	7.3	0.023416	1.5
6	9,700	19.51	24.3	0.077947	2.4
12	16,000	32.17	40	0.128308	4.7
20	8,700	17.49	21.8	0.0699	7.8

ตารางที่ ค1.1 การกระจายจำนวนตามขนาดของอนุภาคและ droplet nuclei ที่ถูกไอออกมาต่อวินาที (0.4 L/s) จากการศึกษาของ M.P.Wan et al. (2007) (ต่อ)

อนุภาคเริ่มต้น					ขนาด droplet nuclei (μm)
ขนาดอนุภาคเริ่มต้น (μm)	จำนวน (อนุภาค)	ร้อยละ	จำนวนต่อปริมาตร (cm <sup>-3</sup> )	L/s	
28	4,200	8.45	10.5	0.0337	11
36	2,400	4.83	6	0.0192	14.1
45	1,100	2.21	2.8	0.0090	17.6
62.5	1,400	2.82	3.5	0.0112	24.5
87.5	850	1.71	2.1	0.0067	34.3
112.5	480	0.97	1.2	0.0038	44.2
137.5	380	0.76	1	0.0032	54
175	350	0.70	0.9	0.0029	68.5
225	290	0.58	0.7	0.0022	88.1
375	340	0.68	0.9	0.0029	146.8
750	120	0.24	0.3	0.0010	293.6
1500	20	0.04	0.1	0.0003	587.2
รวม	47,730	100		0.4	-

### 1.3 การพิจารณาการกระจายจำนวนตามขนาดของอนุภาคและ droplet nuclei ที่ถูกไอออกมา

ตารางที่ ค1.2 การกระจายจำนวนตามขนาดของอนุภาคและ droplet nuclei ที่ถูกไอออกมาต่อวินาที ประเมินค่าจากผลการศึกษารอง M.P.Wan et al. (2007)

ขนาด droplet nuclei ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน (อนุภาค)	ร้อยละ	จำนวนต่อปริมาตร ( $\text{cm}^{-3}$ )	L/s
0.6	500	1.01	0.52	0.0017
1.5	2,900	5.83	3.65	0.0117
2.4	9,700	19.51	9.72	0.0312
4.7	16,000	32.17	15.67	0.0503
7.8	8,700	17.49	8.50	0.0273
11	4,200	8.45	4.13	0.0132
14.1	2,400	4.83	2.35	0.0075
17.6	1,100	2.21	1.10	0.0035
24.5	1,400	2.82	1.37	0.0044
34.3	850	1.71	0.82	0.0026
44.2	480	0.97	0.47	0.0015
54	380	0.76	0.39	0.0013
68.5	350	0.70	0.35	0.0011
88.1	290	0.58	0.27	0.0009
146.8	340	0.68	0.35	0.0011
293.6	120	0.24	0.12	0.0004
587.2	20	0.04	0.04	0.0001
รวม	47,730	100	49.82	0.1599

#### 1.4 การจัดกลุ่มและคัดเลือกขนาด droplet nuclei ที่ใช้ในการจำลองในการศึกษา

ตารางที่ ค1.3 การกระจายจำนวนตามกลุ่มขนาดของอนุภาคและ droplet nuclei ที่ใช้ในการจำลองในการศึกษา

กลุ่มขนาด droplet nuclei	ขนาด droplet nuclei ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน (อนุภาค)	ร้อยละ	จำนวนต่อปริมาตร ( $\text{cm}^{-3}$ )	L/s
ขนาดเล็ก (การจำลอง)	$\leq 5$	29,100	58.5	29.56	0.0948
	6-20	16,400	33.0	16.07	0.0516
ขนาดใหญ่	$>20$	4,230	8.5	4.19	0.0135
รวม	-	49,730	100	49.82	0.1599



ตารางที่ ค1.4 โดเมน เงื่อนไขขอบพื้นที่ผิวผนัง ค่าเริ่มต้นและรายละเอียดต่าง ๆ ในการจำลองการเคลื่อนที่อนุภาคเชื้อไวรัสโรคนในแบบจำลอง

รายการ	Model		
	L/H	H/L	H/H
Domain WxDxH (m <sup>3</sup> )	3x3.5x3.3	3x3.5x3.3	3x3.5x3.3
Mesh (cells)	580,391 Tetrahedral	578,469 Tetrahedral	579,763 Tetrahedral
Model			
- Viscous	k- $\epsilon$ , Standard Wall Function	k- $\epsilon$ , Standard Wall Function	k- $\epsilon$ , Standard Wall Function
- Discrete Phase Model			
Injection			
Injection Type	Surface	Surface	Surface
Release from Surface	Mouth	Mouth	Mouth
Particle Type	Inert	Inert	Inert
Material	TB particle	TB particle	TB particle
Diameter Distribution	Uniform	Uniform	Uniform
Point Property	(<5 $\mu$ m /6-20 $\mu$ m)	(<5 $\mu$ m /6-20 $\mu$ m)	(<5 $\mu$ m /6-20 $\mu$ m)
X-Velocity (m/s)	0 / 0	0 / 0	0 / 0
Y-Velocity (m/s)	15.3 / 15.3	15.3 / 15.3	15.3 / 15.3
Z-Velocity (m/s)	0 / 0	0 / 0	0 / 0
Total Flow Rate (kg/s)	0.0948 / 0.0516	0.0948 / 0.0516	0.0948 / 0.0516
Turbulence Dispersion	(<5 $\mu$ m /6-20 $\mu$ m)	(<5 $\mu$ m /6-20 $\mu$ m)	(<5 $\mu$ m /6-20 $\mu$ m)
Discrete Random Walk Model	x / x	x / x	x / x
Random Eddy Lifetime	x / x	x / x	x / x
Material			
- Fluid	Air	Air	Air
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.225	1.225	1.225
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05	1.7894e-05	1.7894e-05

ตารางที่ ค1.4 โดเมน เงื่อนไขขอบพื้นที่ผิวผนัง ค่าเริ่มต้นและรายละเอียดต่าง ๆ ในการจำลองการเคลื่อนที่อนุภาคเชื้อไวรัสโรคนในแบบจำลอง (ต่อ)

รายการ	Model		
	L/H	H/L	H/H
- Inert Particle	TB particle	TB particle	TB particle
Weight (kg)	$10^{-15}$	$10^{-15}$	$10^{-15}$
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	3,466	3,466	3,466
Boundary Condition			
- Inlet			
Dimension WxL ( $\text{m}^2$ )	0.18x024	0.18x024	0.18x024
Type	Velocity-Inlet	Velocity-Inlet	Velocity-Inlet
Momentum			
Velocity magnitude 6ACH/9ACH/12ACH (m/s)	1.337/2.005/2.674	1.337/2.005/2.674	1.337/2.005/2.674
Initial Gauge Pressure (Pascal)	0	0	0
Turbulence			
Turbulence Kinetic Energy ( $\text{kg/m}^3$ )	1	1	1
Dissipation Rate ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )	1	1	1
- Outlet			
Radius (m)	0.1	0.1	0.1
Type	Pressure-Outlet	Pressure-Outlet	Pressure-Outlet
Momentum			
Gauge Pressure (Pascal)	0	0	0
Backflow Direction Specification Method	Normal to Boundary	Normal to Boundary	Normal to Boundary
Turbulence			
Backflow Turbulence Kinetic Energy ( $\text{kg/m}^3$ )	1	1	1
Backflow Turbulence Dissipation Rate ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )	1	1	1

ตารางที่ ค1.4 โดเมน เงื่อนไขขอบพื้นที่ผิวผนัง ค่าเริ่มต้นและรายละเอียดต่าง ๆ ในการจำลองการเคลื่อนที่อนุภาคเชื้อไวรัสโรคนในแบบจำลอง (ต่อ)

รายการ	Model		
	L/H	H/L	H/H
DPM			
Discrete Phase BC Type	Escape	Escape	Escape
- Wall	No Slip	No Slip	No Slip
- Initialization Methods	Standard	Standard	Standard
- Iteration	3,000	3,000	3,000







## ก2.1 รูปแบบและทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศภายในแบบจำลอง

1. การเคลื่อนที่ของอากาศในห้องจำลองที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศเดียวกัน เมื่อเพิ่มอัตราแลกเปลี่ยนอากาศสูงขึ้น ความเร็วอากาศจะสูงขึ้น ทิศทางการเคลื่อนที่จะที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่รูปแบบการหมุนของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมเล็กน้อย ดังรูปที่ ก2.11-ก2.14

2. ห้องจำลองที่มีตำแหน่งช่องระบายอากาศแบบ H/L และ H/H ซึ่งมีช่องจ่ายอากาศเข้าเหมือนกัน จะมีรูปแบบและทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศในแนวดิ่งและแนวราบคล้ายคลึงกัน ดังรูปที่ ก2.11 (ข)-(ค) และ ดังรูปที่ ก2.12 (ข)-(ค)

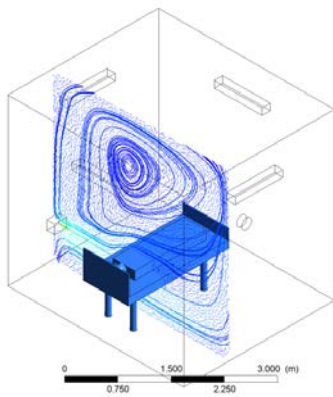
3. ตำแหน่งช่องระบายอากาศ แบบ L/H ทำให้อากาศเคลื่อนที่ผ่านและหมุนวนอยู่ใน Upper zone นานที่สุด รองลงได้แก่ แบบ H/L และ H/H ตามลำดับ

4. ทิศทางและรูปแบบการเคลื่อนที่อากาศในแต่ละรูปแบบตำแหน่งช่องระบายอากาศ

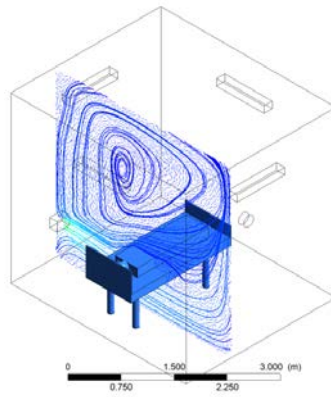
### 4.1 ช่องระบายอากาศแบบ L/H

4.1.1 ที่ระนาบตรงช่องจ่ายอากาศเข้าในแนวดิ่ง ดังรูปที่ ก2.15 (ก) พบว่า อากาศที่ผ่านเข้ามาจะหมุนวนภายในห้องจากล่างขึ้นบนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาโดยส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ผ่านใต้เตียงไปหลังห้อง มีบางส่วนที่ผ่านด้านบนของเตียง หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่สูงขึ้นผ่านเหนือเตียงและหมุนวนอยู่บริเวณเหนือเตียงระดับสูงจากพื้นประมาณ 2.5 m ส่วนในแนวราบ ดังรูปที่ ก2.15 (ข) พบว่า อากาศที่ผ่านเข้ามาจะหมุนวนภายในห้องในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาผ่านใต้เตียงจากขวาไปซ้าย มีบางส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาอยู่บริเวณมุมซ้ายด้านหลังของห้อง เมื่อเคลื่อนที่วนมาถึงใกล้ช่องจ่ายอากาศอีกครั้ง จะถูกแรงของอากาศที่เข้ามาจากช่องจ่ายอากาศเข้าบังคับให้หมุนกลับไปโดยส่วนที่เคลื่อนสูงขึ้นถึงระดับเตียงจะเคลื่อนที่รอบขอบเตียงตามเข็มนาฬิกาแล้วหมุนวนทวนเข็มนาฬิกาอยู่บริเวณปลายเตียง

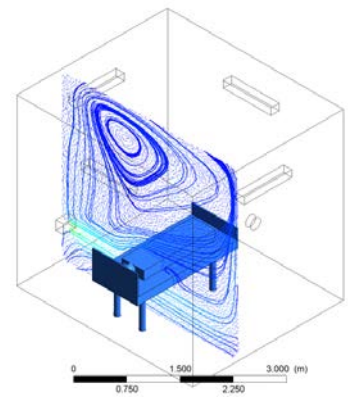
4.1.2 ที่ระนาบตรงช่องดูดอากาศออกในแนวดิ่ง ดังรูปที่ ก2.15 (ค) พบว่า อากาศที่เคลื่อนที่หมุนวนภายในห้องจากล่างขึ้นบนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา หมุนวนอยู่ระดับสูงใกล้เตียง ช่องดูดอากาศออก อากาศที่หมุนอยู่รอบนอกที่เคลื่อนมาจากด้านล่างจะถูกดูดออกไปเมื่อเคลื่อนที่มาถึงระดับช่องดูดอากาศออก ส่วนในแนวราบระดับตรงกับช่องจ่ายอากาศ ดังรูปที่ ก2.15 (ง) พบว่า เมื่ออากาศเคลื่อนสูงขึ้นมาถึงระดับ



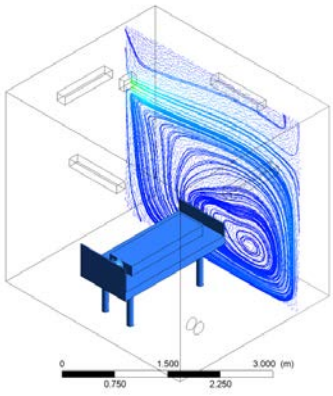
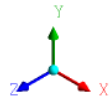
(ก-1) 6 ACH



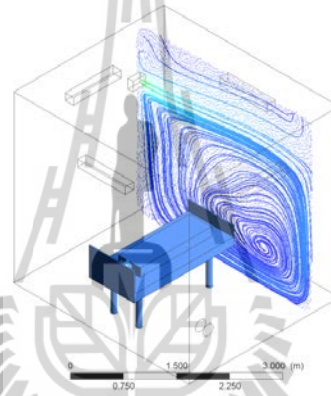
(ก-2) 9 ACH



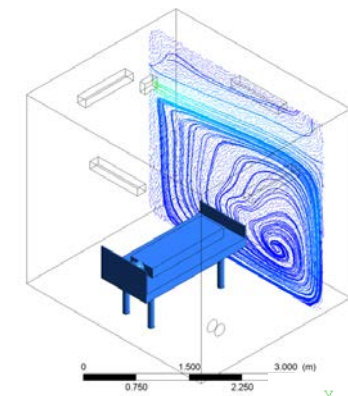
(ก-3) 12 ACH



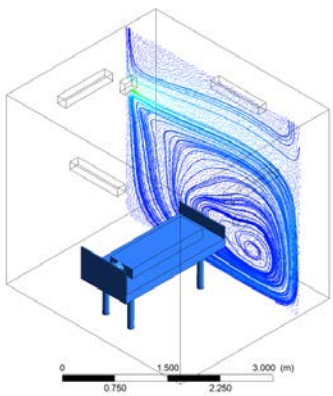
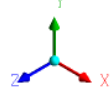
(ข-1) 6 ACH



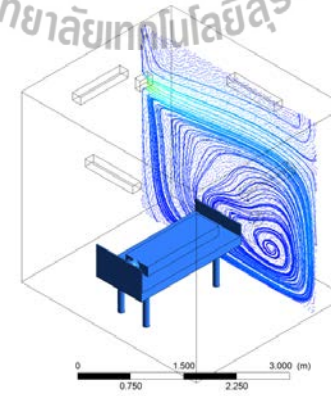
(ข-2) 9 ACH



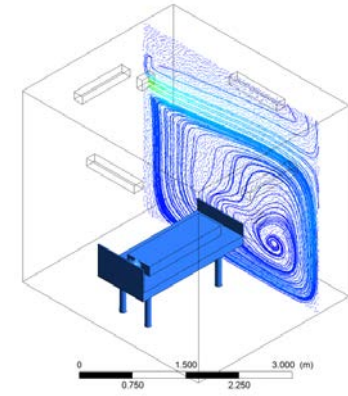
(ข-3) 12 ACH



(ค-1) 6 ACH



(ค-2) 9 ACH



(ค-3) 12 ACH

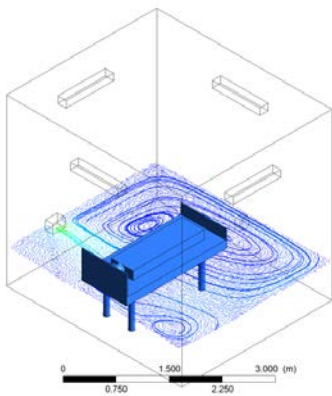


รูปที่ ค2.11 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ แนวแกน XY ระยะช่องจ่ายอากาศเข้า

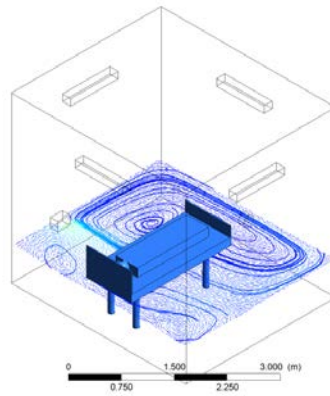
(ก) L/H

(ข) H/L

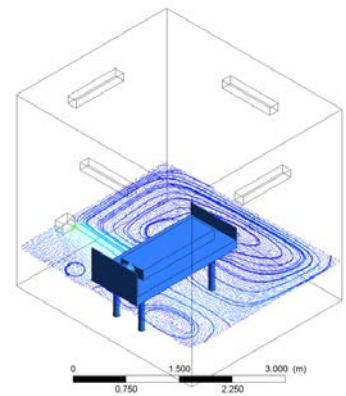
(ค) H/H



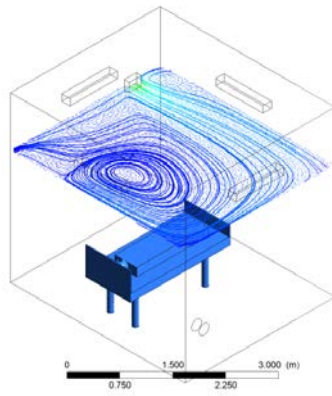
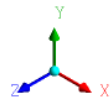
(ก-1) 6 ACH



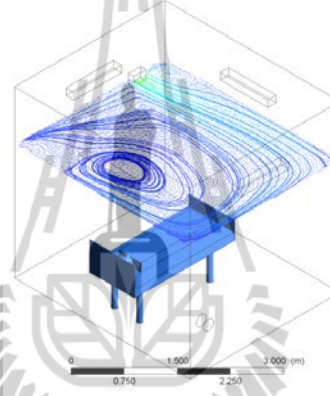
(ก-2) 9 ACH



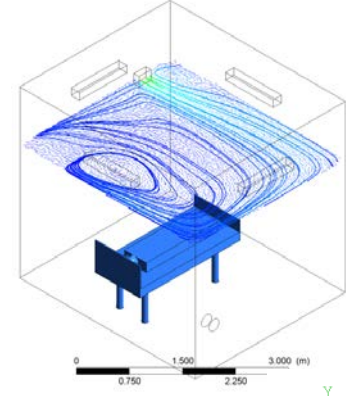
(ก-3) 12 ACH



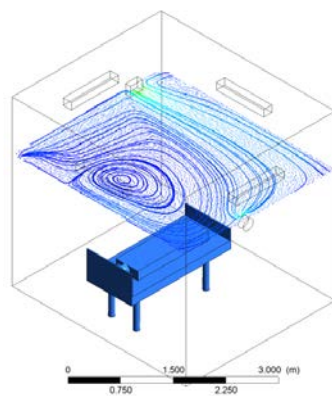
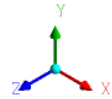
(ข-1) 6 ACH



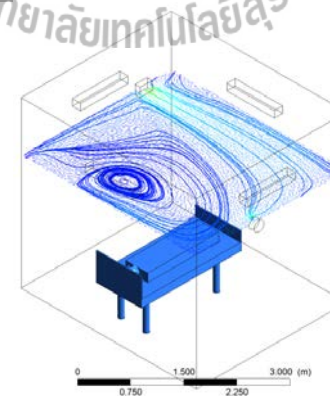
(ข-2) 9 ACH



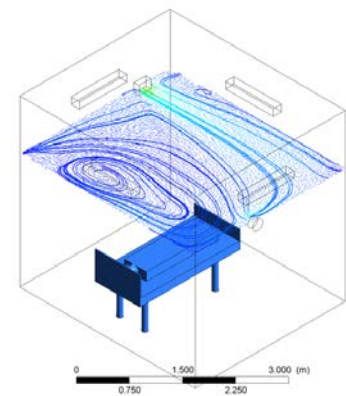
(ข-3) 12 ACH



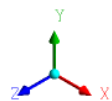
(ค-1) 6 ACH



(ค-2) 9 ACH



(ค-3) 12 ACH

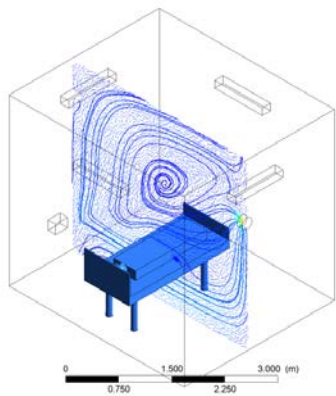


รูปที่ ค2.12 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ แนวแกน XZ ระดับช่องจ่ายอากาศเข้า

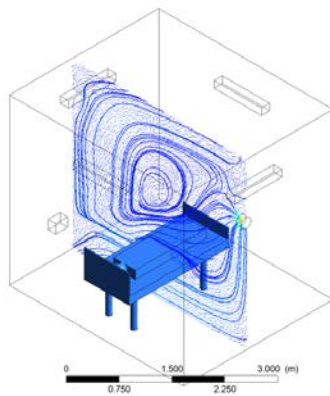
(ก) L/H

(ข) H/L

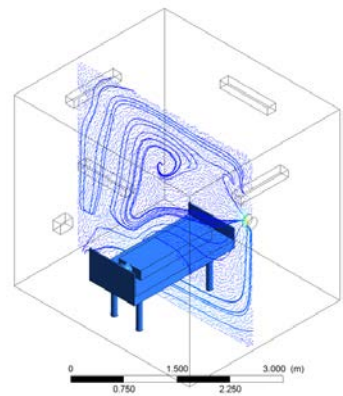
(ค) H/H



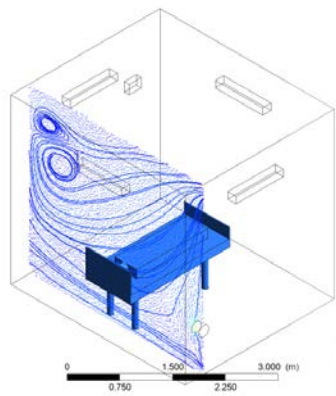
(ก-1) 6 ACH



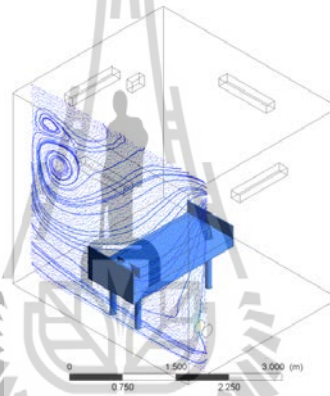
(ก-2) 9 ACH



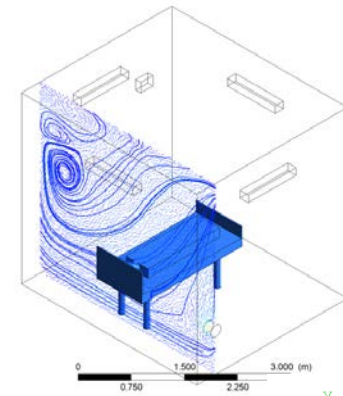
(ก-3) 12 ACH



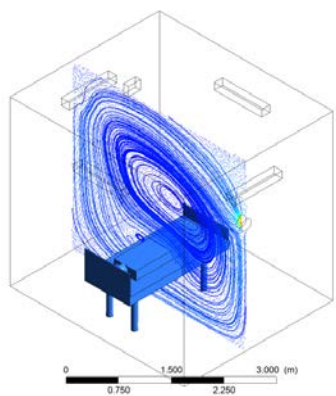
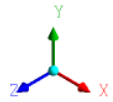
(ข-1) 6 ACH



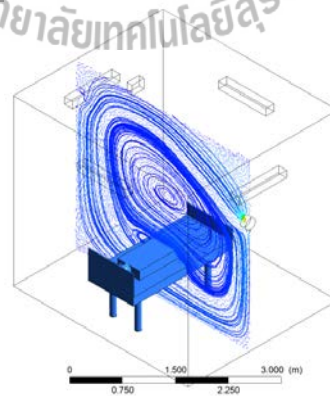
(ข-2) 9 ACH



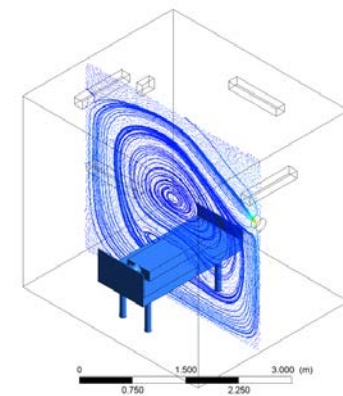
(ข-3) 12 ACH



(ค-1) 6 ACH



(ค-2) 9 ACH



(ค-3) 12 ACH

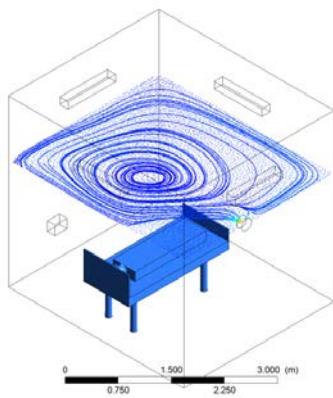


รูปที่ ค2.13 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ แนวแกน XY ระยะช่องดูดอากาศออก

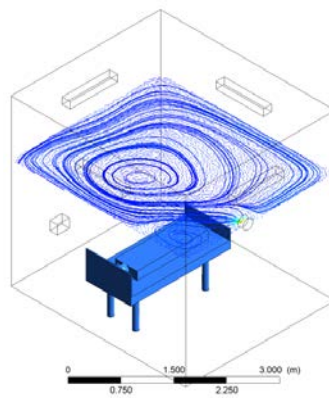
(ก) L/H

(ข) H/L

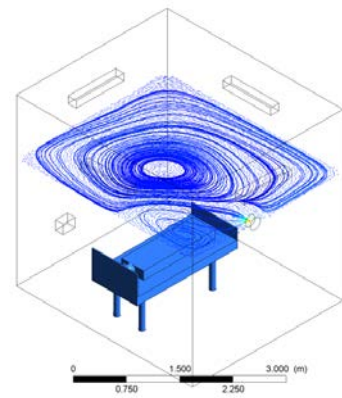
(ค) H/H



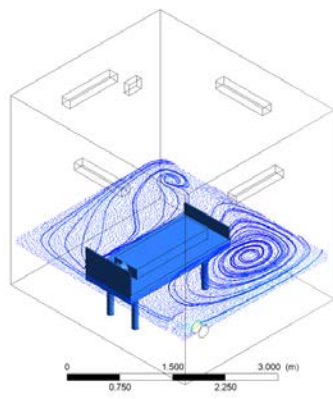
(ก-1) 6 ACH



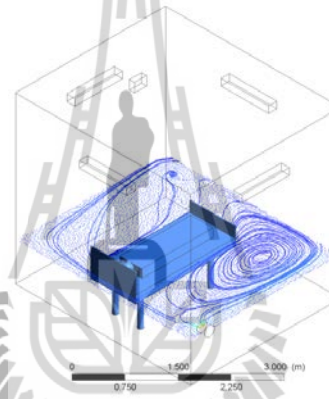
(ก-2) 9 ACH



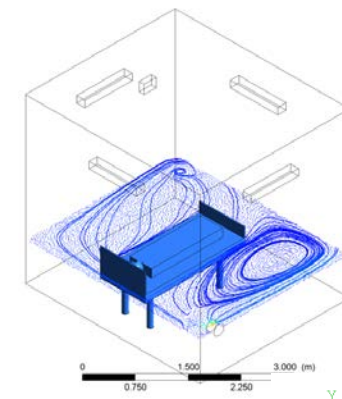
(ก-3) 12 ACH



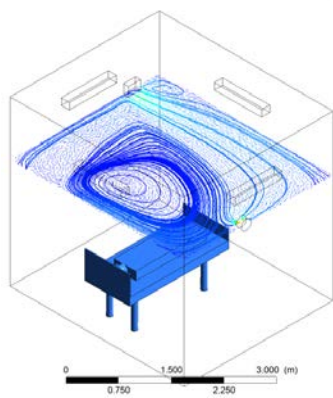
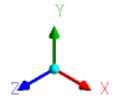
(ข-1) 6 ACH



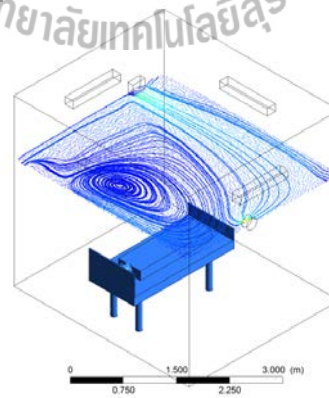
(ข-2) 9 ACH



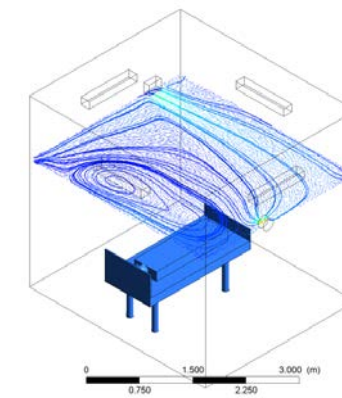
(ข-3) 12 ACH



(ค-1) 6 ACH



(ค-2) 9 ACH



(ค-3) 12 ACH



รูปที่ ค2.14 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ แนวแกน XZ ระดับช่องดูดอากาศออก

(ก) L/H

(ข) H/L

(ค) H/H

ช่องคู่อากาศออก จะหมุนวนทวนเข็มนาฬิกาอยู่กลางห้องเหนือเตียงผู้ป่วย โดยอากาศที่ถูกคู่ออกไปจะเป็นส่วนเคลื่อนที่วนอยู่รอบนอก

#### 4.2 ช่องระบายอากาศแบบ H/L

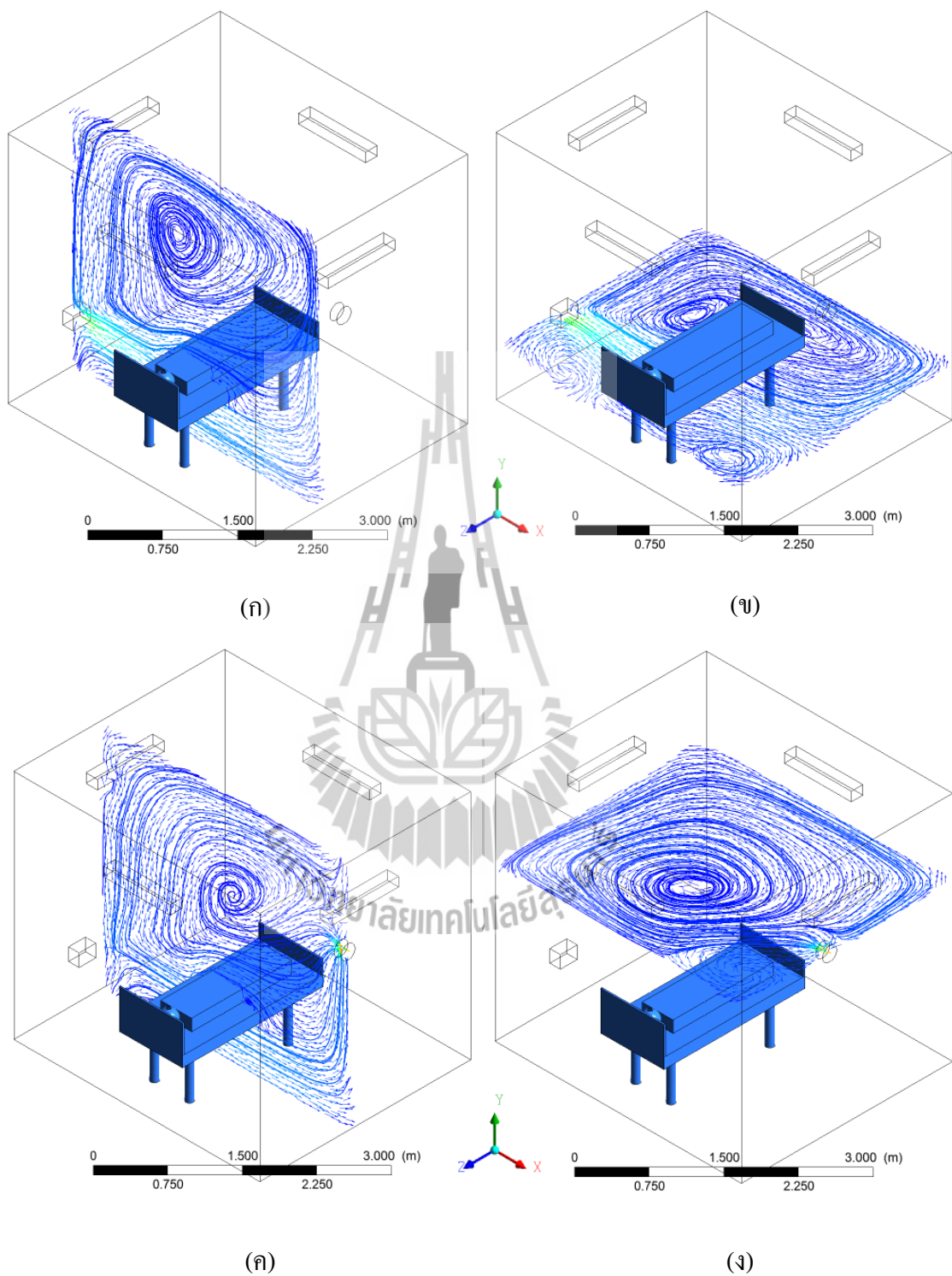
4.2.1 ที่ระนาบตรงช่องจ่ายอากาศเข้าในแนวดิ่ง ดังรูปที่ ค2.16 (ก) พบว่า อากาศที่ผ่านเข้ามาจะเคลื่อนที่ไปด้านหลังห้องแล้วหมุนวนลงล่างในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ส่วนที่วนกลับขึ้นมาด้านบนใกล้ช่องจ่ายอากาศอีกครั้ง จะถูกแรงของอากาศที่เข้ามาจากช่องจ่ายอากาศเข้าข้างค้ำให้หมุนกลับไปทิศทางเดิม ทำให้มีศูนย์กลางเป็นรูปก้นหอยวงรีอยู่ที่มุมซ้ายด้านหลังของห้อง ระดับสูงจากพื้นประมาณ 0.6 m ส่วนในแนวราบ ดังรูปที่ ค2.16 (ข) พบว่า อากาศที่ผ่านเข้ามาจะหมุนวนภายในห้องในทิศทางตามเข็มนาฬิกาผ่านไปเหนือเตียงจากซ้ายไปขวา และมีอากาศที่หมุนวนขึ้นมาจากด้านล่างบริเวณมุมขวาด้านหน้าห้องที่บังค้ำทิศทางให้อากาศที่เคลื่อนที่จากช่องจ่ายอากาศเข้าหมุนวนอยู่เหนือเตียงรูปก้นหอยจุดศูนย์กลางอยู่ห่างจากผนังด้านขวาสูงจากพื้นประมาณ 1 m

4.2.2 ที่ระนาบตรงช่องคู่อากาศออกในแนวดิ่ง ดังรูปที่ ค2.16 (ค) พบว่า อากาศเคลื่อนที่หมุนวนภายในห้องจากล่างขึ้นมาบนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และหมุนวนจากหลังห้องระดับใกล้เพดานห้องลงมาด้านหน้าเป็นก้นหอยวงกลม 2 วง ทิศทางตรงกันข้ามกัน ส่วนในแนวราบระดับตรงกับช่องคู่อากาศ ดังรูปที่ ค2.16 (ง) พบว่าอากาศเคลื่อนที่หมุนวนตามเข็มนาฬิกาและวนเป็นรูปก้นหอยที่ปลายเตียงมุมซ้ายด้านหลังห้อง โดยอากาศที่ถูกคู่ออกไปจะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่อยู่รอบนอก

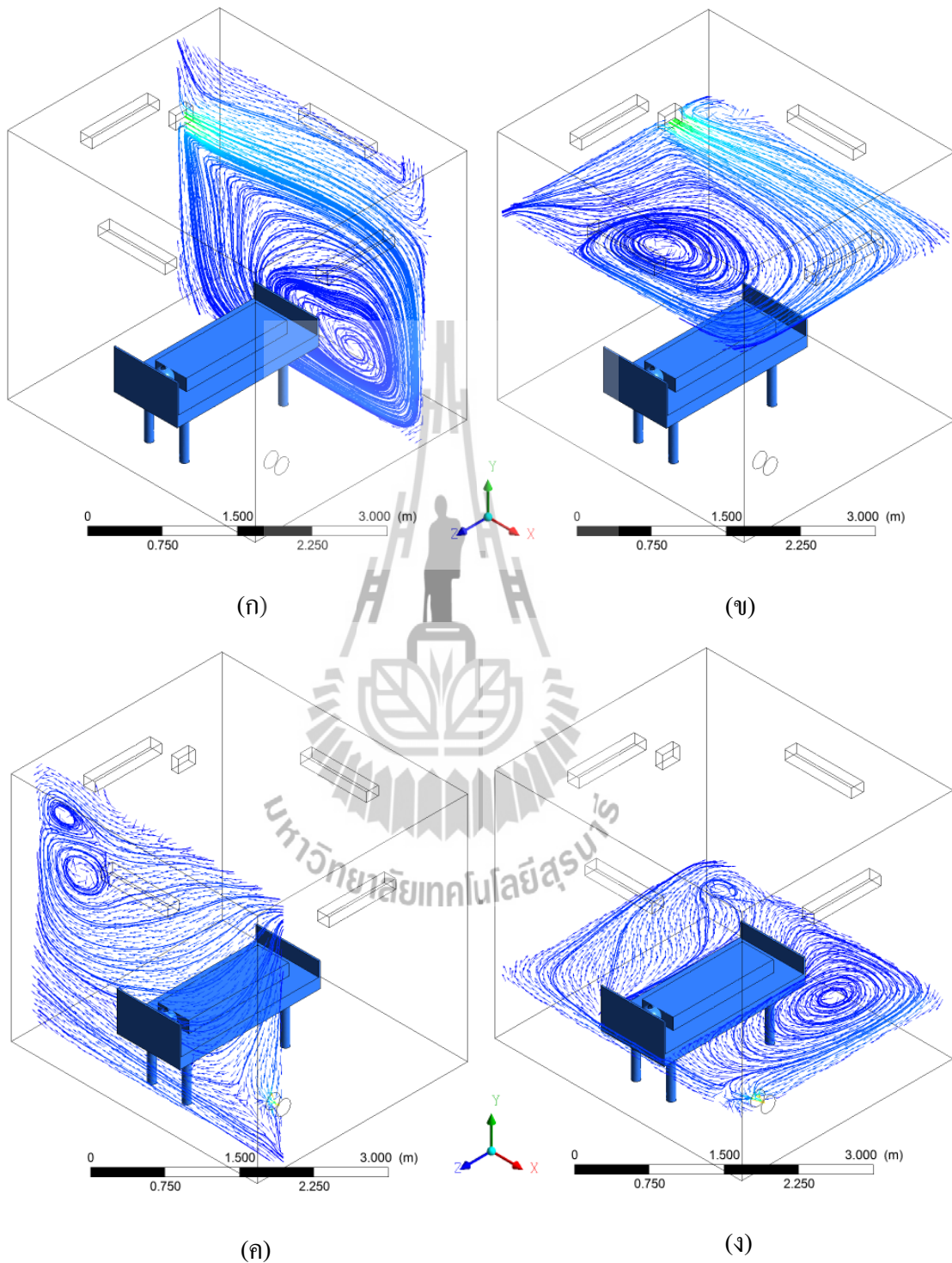
#### 4.3 ช่องระบายอากาศแบบ H/H

4.3.1 ที่ระนาบตรงช่องจ่ายอากาศเข้าในแนวดิ่ง ดังรูปที่ ค2.17 (ก) และแนวราบ ดังรูปที่ ค2.17 (ข) พบว่า มีรูปแบบและทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศคล้ายกับแบบ H/L

4.3.2 ที่ระนาบตรงช่องคู่อากาศออกในแนวดิ่ง ดังรูปที่ ค2.17 (ค) พบว่า อากาศเคลื่อนที่หมุนวนภายในห้องจากล่างขึ้นมาบนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เป็นรูปก้นหอยวงรีขนาดใหญ่ลักษณะเอียงจากด้านหน้าเทลงมาด้านหลัง มีศูนย์กลางอยู่เหนือเตียงสูงจากพื้นประมาณ 2.0 m โดยอากาศที่ถูกคู่ออกไปจะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่จากหลังห้องด้านล่างผ่านใต้และเหนือเตียง โดยส่วนที่อยู่รอบนอกจะถูกคู่ออกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านช่องคู่อากาศออก ส่วนในแนวราบ ดังรูปที่ ค2.17 (ง) พบว่ามีรูปแบบและทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศคล้ายกับแบบ H/L



รูปที่ 2.15 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ ตำแหน่งช่องระบายอากาศ L/H 6 ACH  
 (ก) ช่องจ่ายอากาศเข้า แนวแกน XY (ข) ช่องจ่ายอากาศเข้า แนวแกน XZ  
 (ค) ช่องดูดอากาศออก แนวแกน XY (ง) ช่องดูดอากาศออก แนวแกน XZ

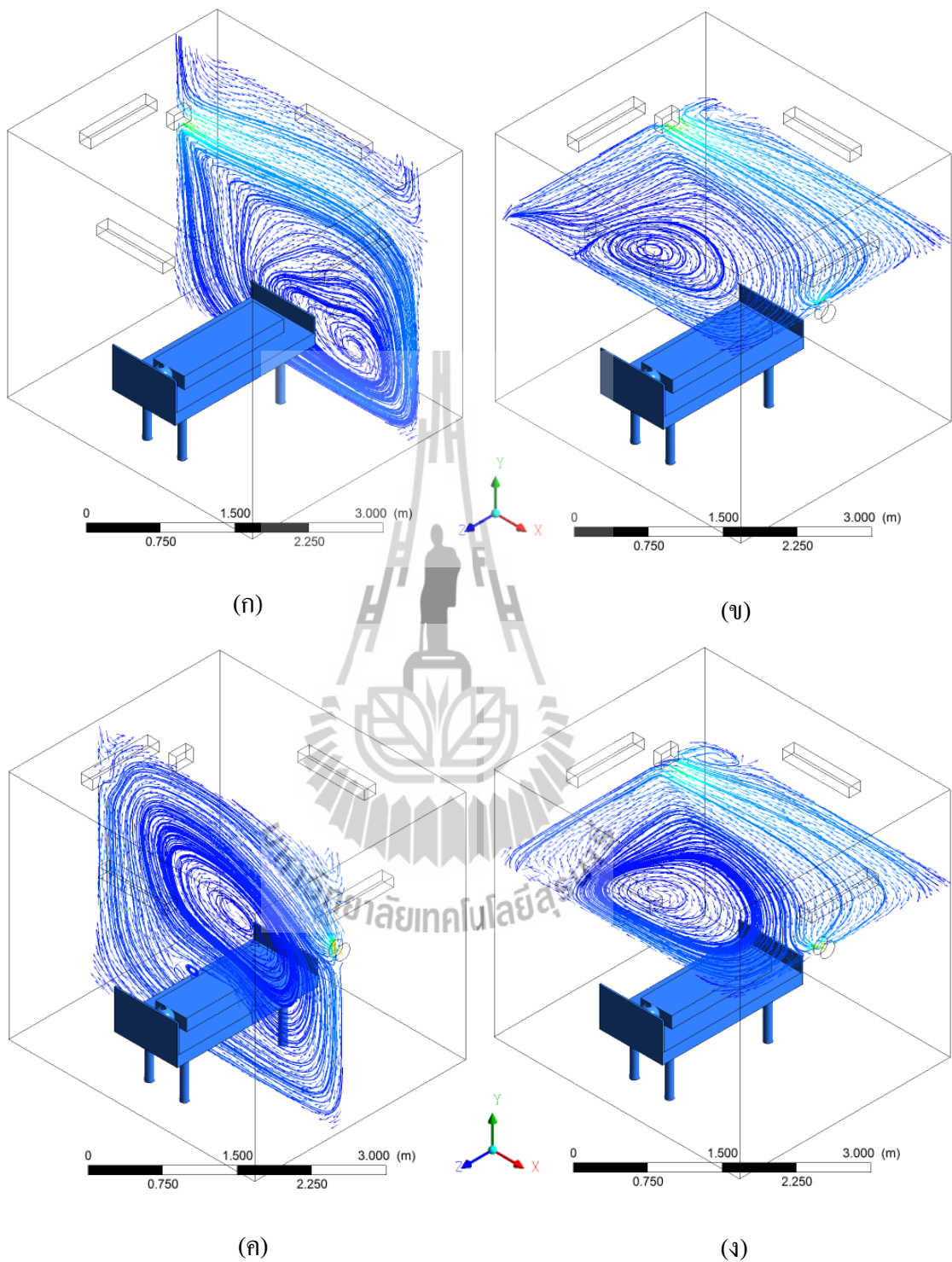


รูปที่ 2.16 เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ ตำแหน่งช่องระบายอากาศ H/L 6 ACH

(ก) ช่องจ่ายอากาศเข้า แนวแกน XY (ข) ช่องจ่ายอากาศเข้า แนวแกน XZ

(ค) ช่องดูดอากาศออก แนวแกน XY (ง) ช่องดูดอากาศออก แนวแกน XZ





รูปที่ ๒.๑๗ เส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วอากาศ ตำแหน่งช่องระบายอากาศ H/H 6 ACH

(ก) ช่องจ่ายอากาศเข้า แนวแกน XY (ข) ช่องจ่ายอากาศเข้า แนวแกน XZ

(ค) ช่องดูดอากาศออก แนวแกน XY (ง) ช่องดูดอากาศออก แนวแกน XZ

## ค2.2 รูปแบบและทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อไวรัสโรคภายในแบบจำลอง

อนุภาคเชื้อไวรัสโรคที่ถูกผู้ป่วยไอออกมา จะเคลื่อนต่อไประยะหนึ่งด้วยความเร็วต้นจากการไอแล้วเคลื่อนที่ตามกระแสอากาศ ระยะทางที่ได้เรียกว่า Stopping distance (Stokes' number) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (ผ2) (Kenneth E.Noll,1999)

จากคุณสมบัติของอนุภาคเชื้อไวรัสโรค เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 0.2-0.5  $\mu\text{m}$  ยาว 2-4  $\mu\text{m}$  น้ำหนัก  $1 \times 10^{-12}$  g ความหนาแน่น  $3.466 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  กรณีถูกไอออกมาด้วยความเร็วเฉลี่ย 15.3 m/s สามารถคำนวณหา Stopping distance

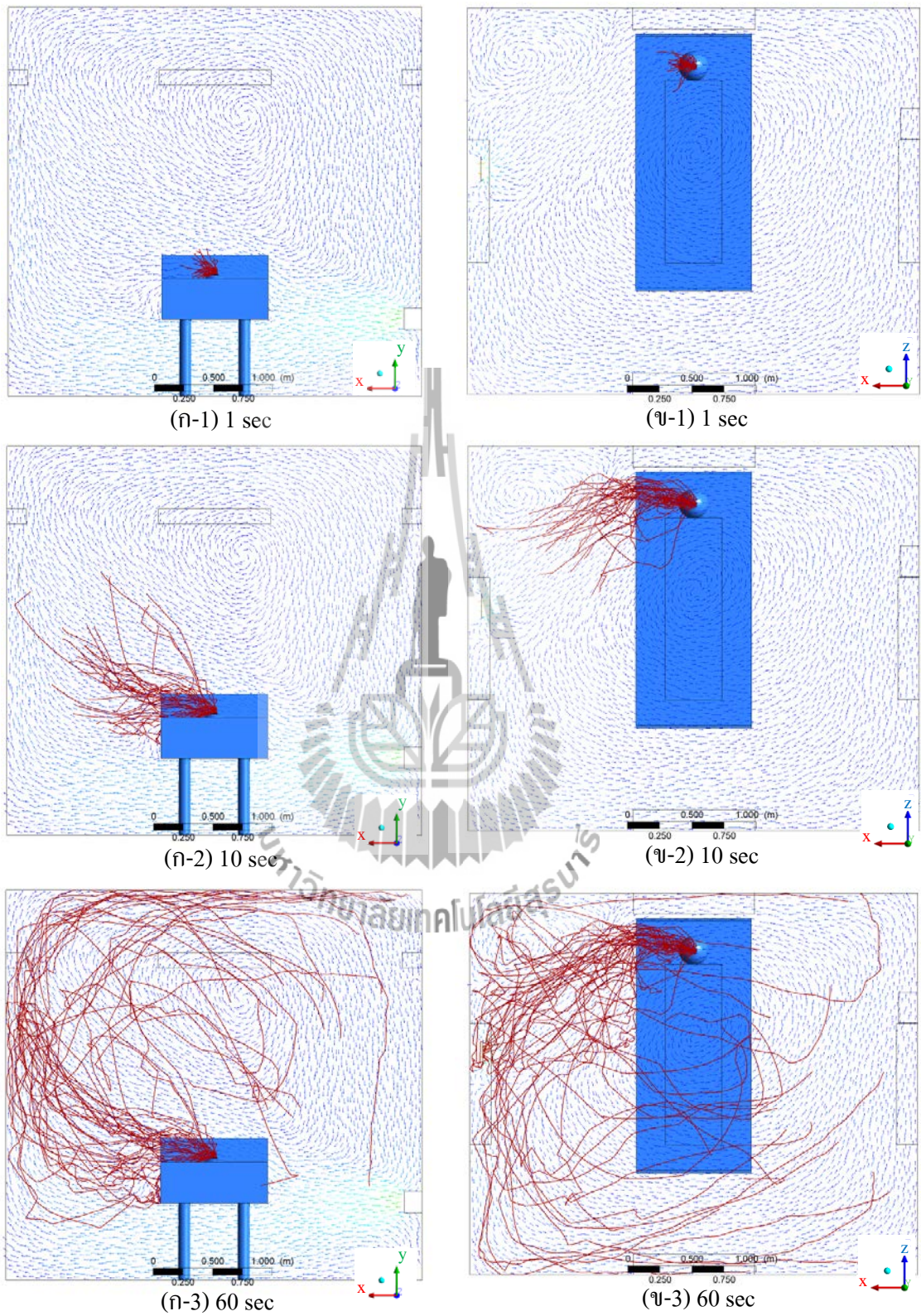
จากสมการ  $F = ma$  (ผ1)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{3\pi\mu v_p d_p}{C_c} = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{dv_p}{dt} \\
 \frac{dv_p}{dt} &= \frac{18\mu v_p}{d_p^2 \rho_p C_c} \\
 \int_{v=v_0}^{v=0} dv_p &= \frac{18\mu v_p}{d_p^2 \rho_p C_c} \int_{x=0}^{x=x} dx \\
 x_{\text{stokes stopping}} &= \frac{v_0 d_p^2 \rho_p C_c}{18\mu} \quad \text{(ผ2)}
 \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}
 x_{\text{stokes stopping}} &= \frac{(15.3 \frac{\text{m}}{\text{s}})(4 \times 10^{-6} \text{ m})^2 (3,466 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{18(1.8 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}})} \\
 x_{\text{stokes stopping}} &= 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น อนุภาคจะเคลื่อนที่หลังจากผู้ป่วยไอออกมาเป็นระยะทาง 2.9 mm แล้วหยุดนิ่ง จากนั้นจึงเคลื่อนที่ต่อด้วยแรงจากการพาของอากาศภายในห้องจำลอง ดังรูปที่ ค2.2 ซึ่งระยะที่ได้นี้ ได้ถูกนำเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของค่าเริ่มต้นที่กำหนดในการจำลอง ในขั้นการประมวลผลก่อน



รูปที่ ๓.๒ รูปแบบ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อไวรัส โครนาแบบจำลอง แบบ L/H และ 6ACH

(ก) แนวแกน XY

(ข) แนวแกน XZ



ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความเร็วของอากาศจากการตรวจวัดในห้องผู้ป่วยจำลองกับการจำลองในแบบจำลองแยกตามตำแหน่งช่องระบายอากาศและอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ

	Paired Difference					t	df	P-value
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair1 L/H 6ACH ตรวจวัด-คำนวณ	-0.0706	0.0342	0.0153	-0.1131	-0.0280	-4.608	4	0.010*
Pair2 L/H 9ACH ตรวจวัด-คำนวณ	-0.086	0.041	0.018	-0.137	-0.035	-4.677	4	0.009*
Pair3 L/H 12ACH ตรวจวัด-คำนวณ	-0.079	0.029	0.013	-0.115	-0.043	-6.142	4	0.004*
Pair4 H/L 6ACH ตรวจวัด-คำนวณ	-0.047	0.056	0.025	-0.117	0.023	-1.873	4	0.134
Pair5 H/L 9ACH ตรวจวัด-คำนวณ	-0.030	0.108	0.048	-0.163	0.104	-0.619	4	0.570
Pair6 H/L ตรวจวัด-คำนวณ	-0.005	0.136	0.061	-0.174	0.165	-0.074	4	0.944
Pair7 H/H 6ACH ตรวจวัด-คำนวณ	-0.046	0.051	0.023	-0.109	0.017	-2.021	4	0.113
Pair8 H/H9ACH ตรวจวัด-คำนวณ	-0.087	0.059	0.026	-0.161	-0.014	-3.307	4	0.030*
Pair9 H/H-12ACH ตรวจวัด-คำนวณ	-0.015	0.110	0.049	-0.151	0.121	-0.310	4	0.772

\* ระดับนัยสำคัญ 0.5

ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา



## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

วิเศษ วิศวรางกุล, สุดจิต ครุจิต. (มีนาคม 2557). การวิเคราะห์การกระจายความเข้มรังสี UV ของระบบฆ่าเชื้อโรคในห้องผู้ป่วยจำลอง. ใน ประเสริฐ ดปนิยางกูรและคณะ. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 13 ประจำปี พ.ศ. 2557 (หน้า 1-8). กรุงเทพฯ: โรงแรม เดอะ ทวิน เทาเวอร์.





# การวิเคราะห์การกระจายความเข้มรังสี UV ของระบบฆ่าเชื้อโรคใน ห้องผู้ป่วยจำลอง

## UV Intensity Distribution Analysis of Germicidal System in Simulation Room

วิเศษ วรวิสารกุล<sup>1\*</sup> และ สุกจิต กระจูจิต<sup>2</sup>

Wisaed Warissarakul<sup>1\*</sup> and Sujit Karuchit<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษามัธยมศึกษา; <sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 300000

\*โทรศัพท์ : 0-4422-4451, โทรสาร : 0-4422-4220, E-mail : naipo492@gmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายความเข้มรังสี UVC ของระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Germicidal Irradiation System; UVGI) ในห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศของโรงพยาบาลชุมชน โดยทำการศึกษาในห้องจำลองที่ติดตั้งระบบ UVGI ด้วยหลอด UVC ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ ขนาด 8 16 และ 30 วัตต์ ในจุดติดตั้งพร้อมบานเกล็ด ที่ระดับความสูงจากพื้น 2.7 3.0 และ 3.3 ม. ตามลำดับ ภายใต้สภาวะแวดล้อมคงที่ที่อุณหภูมิ 24-26 °C ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 40-60 วิเคราะห์ลักษณะการกระจายของรังสี UVC ที่ได้จากการทดลองแปรผันปัจจัยเกี่ยวกับหลอดรังสี UVC ได้แก่ กำลังไฟ ตำแหน่งการติดตั้ง และจำนวนหลอด ผลการศึกษาพบการกระจายความเข้มรังสี UVC ของระบบ UVGI ในห้องจำลองที่มีความปลอดภัยมีเพียงระบบที่ติดตั้งด้วยหลอด UVC กำลังไฟขนาด 8 ระดับความสูงจากพื้น 3.0 และ 3.3 ม. และติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 16 วัตต์ เฉพาะระดับความสูงจากพื้น 3.3 ม. เท่านั้น โดยมีการกระจายความเข้มรังสีในพื้นที่ Upper Zone มีค่าเท่ากับ 1.54 1.25 และ 2.02 ไมโครวัตต์/ตร.ซม. ตามลำดับ และระบบที่ติดตั้ง 2 ชุด ด้วยหลอดกำลังไฟขนาดเดียวกันที่ผนังด้านตรงกันข้ามมีผลเพิ่มความเข้มรังสี เป็น 2 เท่า และมีอัตราการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าระบบที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟรวมที่เท่ากันแต่ติดตั้งที่ผนังเพียงด้านเดียว

**คำสำคัญ :** รังสีอัลตราไวโอเลต; ระบบฆ่าเชื้อโรค; โรคแพร่เชื้อทางอากาศ; ห้องแยกโรค; โรงพยาบาล

### Abstract

This research aims to study Ultraviolet radiation intensity distribution of Ultraviolet germicidal irradiation system (UVGI) in airborne infection isolation room of a local hospital. It was done in simulation room which has UVGI system installed. With UVC lamps 254 nanometres in wave length, in 8, 16 and 30 watts with louver at the height of 2.7, 3.0 and 3.3 metres respectively under fixed environment at the temperature of 24-26 °C and relative humidity of 40-60%, UVC distribution retrieved from variation experiment involving UVC lamp factors, which are electric power, installation position, and the numbers





of the lamps, was analysed. It is found that the UVC intensity distribution of UVGI system occurred only in safe simulation room with the system installed with 8 watts UVC lamp at the height of 3.0 and 3.3 metres, and another which is installed with 16 watts lamp at the height of 3.3 metres. The upper zone radiation intensity distribution resulted in 1.54, 1.25 and 2.02 microwatts/square centimetre respectively, and the system which is installed with 2 sets of equal electrical power lamps on the opposite sides of the wall have doubled the power of radiation intensity. In addition, the latter has higher germicidal rates than that which is installed with one-side embedded equal collective electrical power lamp.

**Keywords :** ultraviolet radiation; disinfection system; airborne diseases; isolation room; hospital

## บทนำ

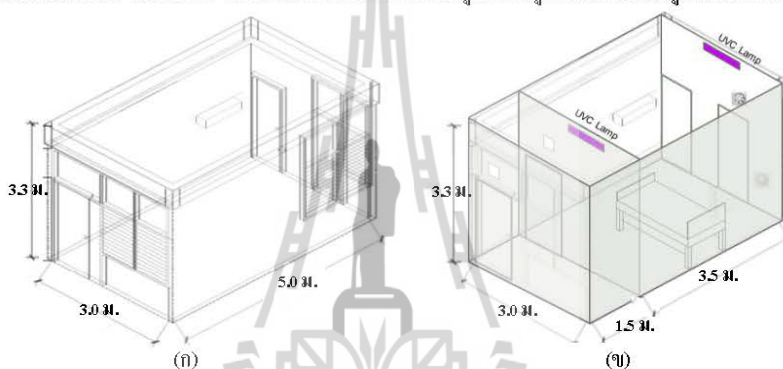
ปัจจุบันทั่วโลกพบผู้ป่วยรายใหม่ติดเชื้อวัณโรคประมาณ 9 ล้านคน เสียชีวิตเกือบ 2 ล้านคน [1] ส่วนในประเทศไทยพบผู้ป่วยติดเชื้อวัณโรค 40,000 คน และเสียชีวิต 13,000 คนต่อปี (สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์, 2553) นอกจากนี้ ยังพบผู้ป่วย 1 ใน 10 คน เกิดการติดเชื้อในโรงพยาบาลขึ้น (Nosocomial infection) [2] โรงพยาบาลชุมชนทุกระดับทั่วประเทศไทยมีห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศ เฉลี่ย 1 ห้อง/แห่ง เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านงบประมาณและสถานที่ (กองวิศวกรรมกรมแพทย์, 2549) แต่ในขณะเดียวกันก็พบว่าโรงพยาบาล ร้อยละ 56.1 อาจมีผู้ป่วยวัณโรคเข้ารับการรักษา โดยเฉลี่ย 1-6 คนต่อวัน [3] ผู้ป่วยส่วนเกินถูกนำมาเข้าพักรักษาตัวอยู่ในห้องที่ไม่มีระบบฆ่าเชื้อใด ๆ จึงมีโอกาสแพร่กระจายเชื้อไปยังพื้นที่อื่น ๆ และทำให้เกิดการติดเชื้อวัณโรคในโรงพยาบาลขึ้นได้ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องควบคุมป้องกันการแพร่ระบาดของวัณโรคภายในโรงพยาบาล [4] ระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Germicidal Irradiation System; UVGI) เป็นวิธีทางวิศวกรรม ที่ถูกนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคภายในห้องผู้ป่วยเพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศ โดยอาศัยคุณสมบัติของรังสี UVC ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ทำลาย DNA ของเชื้อโรค [1] การศึกษาที่ผ่านมาซึ่งขาดข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับการออกแบบการติดตั้งระบบ UVGI ให้มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงสุด โดยยังคงความปลอดภัยกับผู้ป่วยที่อยู่ในห้อง ทั้งนี้ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพ ได้แก่ ความเข้มของรังสี และระยะเวลาการสัมผัส ในส่วนของปัจจัยแรกนั้น การออกแบบที่ดีควรทำให้มีการกระจายความเข้มรังสี UVC สูงในพื้นที่ส่วนบนของห้อง และต่ำในพื้นที่ส่วนล่าง ส่วนการประเมินประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อวัณโรคของระบบ UVGI ด้วยการศึกษากับเชื้อโดยตรงมีข้อจำกัดและทำได้ยาก [5] การประเมินจากอัตราการฆ่าเชื้อวัณโรค (Killing rate) ทำได้ง่ายกว่าและสามารถใช้ประเมินกับเชื้อโรคได้หลายชนิดโดยเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่สำคัญของเชื้อโรคแต่ละชนิดตามสภาพแวดล้อม เช่น อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ และกำลังไฟและการติดตั้งหลอด UV-C เป็นต้น ในการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการใช้วิธีนี้ในการประเมินอัตราการฆ่าเชื้อวัณโรคของระบบ UVGI โดยพบว่า ระบบ 1 มีอัตราการฆ่าเชื้อ ร้อยละ 62 - 84 ซึ่งใกล้เคียงกับการประเมินจากอัตราการตายของเชื้อวัณโรคโดยตรงในการศึกษาอื่น [6] บทความนี้นำผลการศึกษาในส่วนของกระจายของรังสี UVC โดยทำการศึกษาในห้องจำลองที่สร้างขึ้นให้มีโครงสร้างตามแบบของห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศของโรงพยาบาลชุมชน และวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของรังสี UVC ที่ได้จากการทดลองแปรต้นปัจจัยเกี่ยวกับหลอดรังสี UVC ได้แก่ จำนวน ตำแหน่งการติดตั้งหลอดและกำลังไฟ

## อุปกรณ์และวิธีการ

ห้องจำลอง การศึกษาการกระจายความเข้มรังสี UV ของระบบฆ่าเชื้อโรคในห้องจำลองในการศึกษานี้ เป็นการศึกษา ระบบฆ่าเชื้อด้วยรังสี UVC ในพื้นที่ส่วนบนของห้อง (Upper Room Ultraviolet Germicidal Irradiation ; UR UVGI) ที่ติดตั้งในห้องจำลองที่สร้างขึ้นให้มีขนาดโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพคล้ายห้องแยกโรคผู้ป่วยแพร่เชื้อทางอากาศของโรงพยาบาลชุมชน [7] ขนาด 60 ตารางเมตร (ก x ย x ล) 3 x 5 x 3.3 ลบ.ม. ดังรูปที่ 1-(ก) ผนังห้องบุด้วยสปรอตบอร์ดหนา 4 มม. ทั้ง 5 ด้าน



และจัดทำผนังกันแบ่งห้องเป็นสองส่วน ส่วนหน้าเป็นห้องก่อนห้องแยกผู้ป่วย (Anle room) ขนาดห้อง 3 x 1.5 x 3.3 ลบ.ม. และส่วนหลังเป็นห้องแยกผู้ป่วย (Isolation room) ขนาดห้อง 3 x 3.5 x 3.3 ลบ.ม. ภายในห้องแยกผู้ป่วยจัดทำช่องเติมอากาศเข้า ขนาด (ก x ย) 18 x 24 ตร.ซม. จำนวน 1 ชุด ที่จุดกึ่งกลางใต้ขอบหน้าต่างที่ติดประตูเข้าห้องแยกผู้ป่วย ส่วนระบบการดูดอากาศออกทำการติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาดใบพัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. จำนวน 1 ชุด ที่ผนังหลังห้องแยกผู้ป่วยตำแหน่งเหนือประตูทางออก 1 ชุด พื้นผิวภายในห้องทาสีครีมอ่อน มีเตียงผู้ป่วย ขนาด 0.90 x 2.0 x 0.65 ซม. จำนวน 1 เตียง ตั้งอยู่กลางห้องในลักษณะหัวเตียงชิดผนังด้านขวามือ ภายในห้องก่อนห้องแยกผู้ป่วย ติดตั้งเครื่องปรับอากาศและเครื่องทำไอหมอกไว้เพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องแยกผู้ป่วย และเนื่องจากไม่ได้ศึกษาถึงผลของภาวะบรรยากาศโดยธรรมชาติ (ผลจากช่องเปิดของประตูหน้าต่าง) จึงไม่มีการติดตั้งประตูและหน้าต่างบานบังแสงเช่นเดียวกับห้องจริง มีเพียงประตูสำหรับเป็นทางเข้าออกห้องทดลอง ขนาด 0.9 ม. x 2.0 ม. เท่านั้น นอกจากนี้ ห้องจำลองไม่ได้จัดทำห้องน้ำผู้ป่วยที่อยู่ต่อจากห้องแยกผู้ป่วยไปด้านหลัง ดังรูปที่ 1 (ข)



รูปที่ 1 แบบโครงสร้างห้อง (ก) ห้องพิเศษ อาคารผู้ป่วยในโรงพยาบาลชุมชน (ข) ห้องจำลอง

ระบบฆ่าเชื้อด้วยรังสี UVC ในพื้นที่ส่วนบนของห้อง (Upper Room Ultraviolet Germicidal Irradiation ; UR UVGI) ติดตั้งชุด UVGI แบบติดผนัง ที่ระบุมความสูง ตั้งแต่ 2.7 3.0 และ 3.3 ม. โดยใช้หลอด UVC ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ชนิด low-pressure mercury vapour กำลังไฟฟ้า 8 วัตต์, 16 วัตต์ และ 30 วัตต์ ติดตั้งในชุดติดตั้งหลอด UVC ที่สร้างขึ้น ขนาด 0.135 x 0.95 x 16.75 ลบ.ม. พร้อมมีบานเกล็ด (louver) ด้านหน้าในเชิงทามุมขึ้น 5 องศา ไม่มีระบบสะท้อนแสง (reflex) โดยชุดติดตั้งสามารถปรับเลื่อนขึ้นลงในแนวดิ่งได้

การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของห้องจำลอง ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ขนาด 18,000 บีทียู และเครื่องทำไอหมอก ขนาด 1-5 ไมโครเมตร ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 24-26 องศาเซลเซียส เพื่อให้ความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ระหว่างร้อยละ 40 - 60

การตรวจวัดความเข้มรังสี UVC ตรวจวัดด้วยเครื่อง UVC light meter Model UVC-254SD (accuracy  $\pm 4\%$  Full Scale + 2 digit) ตามวิธีของ Miller [8] ที่ระดับความสูงจากพื้น 2.4 2.7 3.0 และ 3.3 ม. ระดับละ 5-9 จุด รวม 576 ตัวอย่าง

การประมาณปริมาณรังสี UVC ปริมาณรังสี UVC เป็นผลคูณของความเข้มรังสี UVC (I) ที่ได้จากการตรวจวัดในการทดลองจริงตามข้อ (4) กับระยะเวลาสัมผัสกับรังสี UVC (t) ของเชื้อ โรคที่ได้จากการประมาณค่าที่เหมาะสม ดังสมการ (1) [9]

$$UV_{Dose} = It \quad (1)$$

โดยที่  $UV_{Dose}$  = ปริมาณรังสี UVC (วัตต์.วินาที/ตร.ม.)

I = ความเข้มรังสี UVC (วัตต์/ตร.ม.) จากการตรวจวัดจริงในห้องจำลอง

t = ระยะเวลาสัมผัสรังสี UVC (วินาที) จากการประมาณค่าจากการศึกษาที่ผ่านมา คือ 1 นาที [6]

และระยะเวลาการฉาย 1.5 2 2.5 3 นาที ตามลำดับ



การคาดการณ์อัตราการฆ่าเชื้อโรคของ ระบบ UR UVGI (Killing Rate) โดยใช้เชื้อวันโรคเป็นตัวแทน ในการศึกษาใช้วิธีประมาณจากปริมาณรังสี UVC แทนการประเมินจากอัตราการตายหรืออัตราการรอดของเชื้อวันโรคโดยตรง โดยใช้ปริมาณรังสี UVC ที่ได้ตรวจวัดในห้องจำลอง ประมาณค่าร่วมกับค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของเชื้อวันโรค (Z) ที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมา ดังนั้น ในการประเมินอัตราการฆ่าเชื้อวันโรค killing rate (KR) [10] ของระบบจึงประมาณค่าได้ตามสมการ (2)

$$KR = 1 - e^{-Z \cdot UV_{Dose}} \quad (2)$$

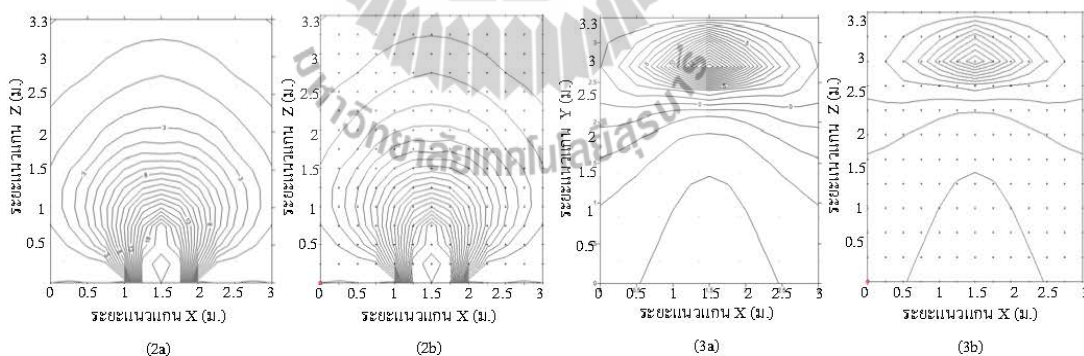
โดยที่ Z = ค่าคงที่ความไวต่อรังสี UVC ของเชื้อวันโรค (ตร.ม./จุล) คือ 0.4721 ตร.ม./จุล

$UV_{Dose}$  = ปริมาณรังสี UVC (วัตต์.วินาที/ตร.ม.)

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### การวิเคราะห์การกระจายความเข้มรังสีในพื้นที่แนวราบและแนวตั้งที่ไม่ได้ตรวจวัด

การวิเคราะห์การกระจายความเข้มรังสีในพื้นที่แนวราบและแนวตั้งที่ไม่ได้ตรวจวัดโดยการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) และการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) ด้วยโปรแกรม Winsurf ในรูปแบบเส้นระดับความเข้มรังสี UVC (Contour line) ทำให้ได้จุดพิกัดกริดและค่าประมาณความเข้มรังสีในแนวราบแนว XZ จาก 4 ระดับ (2.4 2.7 3.0 3.3 ม.) เพิ่มขึ้น 12 ระดับ (0.0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7, 3.0, และ 3.3 ม.) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 และในแนวตั้งแนว XY จาก 3 ชั้น (0.75, 1.75 2.25 ม.) เพิ่มขึ้น 14 ชั้น (0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.75, 3.0, 3.25 และ 3.5 ม.) ดังตัวอย่างรูปที่ 3 และในแนวตั้งแนว ZY จาก 3 ชั้น (0.5, 1.5 2.75 ม.) เพิ่มขึ้น 12 ชั้น (0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.75, และ 3.0 ม.) ซึ่งค่าความเข้มรังสี UVC ที่ได้จากการประมาณค่าดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์การกระจายรังสี UVC ในห้องจำลองในการศึกษานี้



รูปที่ 2 เส้นระดับความเข้มรังสี จุดพิกัดกริด แนวแกน XZ

ประมาณการความเข้มรังสี UVC หลอดกำลังไฟ  
8 วัตต์ ในแนวราบระดับความสูงจากพื้น 2.7 ม.

รูปที่ 3 เส้นระดับความเข้มรังสี จุดพิกัดกริด แนวแกน XY

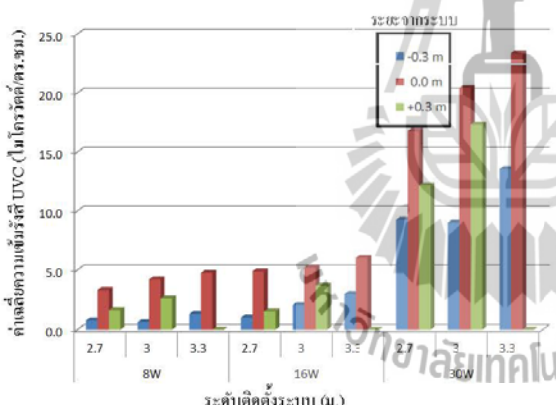
ประมาณการความเข้มรังสี UVC หลอดกำลังไฟ  
8 วัตต์ ในแนวตั้งระยะห่างจากผนังด้านหน้า 1.0 ม.

#### การกระจายรังสี UVC ในแนวราบและแนวตั้ง

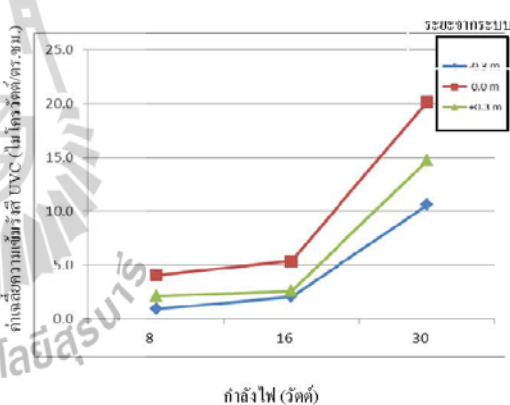
การกระจายความเข้มรังสี UVC ระดับติดตั้งระบบและแนวตั้ง ผลจากการติดตั้งระบบ UVGI ด้วยหลอดหลอด UVC กำลังไฟ 8 วัตต์ 16 วัตต์ และ 30 วัตต์ ตามลำดับ ที่ระดับความสูงต่างๆ ทำให้มีการกระจายของความเข้มรังสี UVC แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4 ดังนั้น ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในแนวราบระดับเดียวกับที่ติดตั้งระบบ แปรผกผันกับระยะห่างจากเพดาน กล่าวคือ ระบบ A ที่

ติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 ม. มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงที่สุด โดยมีค่า 4.46 6.04 และ 23.37 ไมโครวัตต์/ตร.ซม. ตามลำดับ ส่วนระบบฯ ที่ติดตั้งระดับความสูงจากพื้น 3.0 และ 2.7 ม. จะมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ลดต่ำลง ทั้งนี้ เป็นผลจากเกิดการสะท้อนของรังสีกับเพดานห้อง โดยระบบฯ ที่ติดตั้งใกล้เพดานห้องมากกว่าจะเกิดการสะท้อนของรังสีมากกว่า ประกอบกับบานเกล็ดที่ติดตั้งเอียงทำมุมขึ้นในแนวตั้ง 5 องศาบริเวณด้านหน้าของชุดติดตั้งระบบฯ ที่เพิ่มการสะท้อนของรังสี UVC ขึ้นด้านบน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในแนวราบระดับติดตั้งระบบฯ ที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 8 วัตต์ 16 วัตต์ และ 30 วัตต์ แปรผันตามกำลังไฟที่สูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 4.09 5.83 และ 20.19 ไมโครวัตต์/ตร.ซม. ตามลำดับ

ส่วนค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในแนวตั้ง ดังรูปที่ 5 โดยพิจารณาจากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในแนวราบของระดับที่ติดตั้งระบบฯ กับระดับต่ำและสูงกว่าระดับติดตั้งระบบฯ 0.30 ม. พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ที่ระดับติดตั้งระบบฯ ด้วยหลอดกำลังไฟทุกขนาดมีค่าสูงกว่าที่ระดับต่ำและสูงระดับติดตั้งระบบฯ 0.30 ม. นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ที่ระดับสูงกว่าระดับติดตั้งระบบฯ 0.30 ม. ของหลอดกำลังไฟขนาด 8 16 และ 30 วัตต์ มีค่าสูงกว่าที่ระดับต่ำกว่าระดับติดตั้งระบบฯ 0.30 ม. เท่ากับ 2.3 1.3 และ 1.4 เท่า ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของความเข้มรังสีดังกล่าวเป็นผลจากบานเกล็ดที่ติดตั้งหน้าระบบฯ เพื่อควบคุมการกระจายรังสีลงสู่พื้นที่ส่วนล่างของห้อง โดยทำหน้าที่สะท้อนรังสีขึ้นด้านบนของห้อง จึงเป็นการเพิ่มปริมาณรังสีในระดับสูงกว่าระดับติดตั้งควบคู่กับการลดค่าความเข้มรังสีได้ระบบ แต่ในขณะที่เดียวกันก็มีผลไปลดความเข้มรังสีในแนวราบของระดับติดตั้งระบบด้วย



รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ระดับติดตั้งระบบ



รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ระดับสูงและต่ำกว่าระดับติดตั้งระบบ 0.3 ม.

การกระจายรังสี UVC ในพื้นที่ส่วนบนของห้องกับตำแหน่งติดตั้งระบบ UVGI จากการติดตั้งระบบ UVGI ในห้องจำลองด้วยหลอด UVC 1 หลอด กำลังไฟ 3 ขนาด (8 16 และ 30 วัตต์) ที่ผนังห้องด้านเดียว มีตำแหน่งติดตั้ง 3 ระดับ (2.7 3.3 และ 3.3 ม.) พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ส่วนบนของห้อง(Upper Zone) ซึ่งเป็นพื้นที่ในการฆ่าเชื้อโรค มีค่า 1.37 2.09 และ 10.41 ไมโครวัตต์/ตร.ซม. ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 โดยพบว่า ระบบฯ ของหลอดกำลังไฟทุกขนาดที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.0 ม. มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงที่สุด รองลงมาได้แก่ระบบฯ ที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 ม. และ 2.7 ม. ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องมาจากการประมาณค่าค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC คัดเฉพาะช่วงระดับความสูงจากพื้น 2.1-3.3 ม. หรือ มีช่วงกว้าง 1.2 ม. และดังได้กล่าวมาแล้วว่าบานเกล็ดทำให้เกิดการสะท้อนรังสีขึ้นด้านบน และระบบที่ติดตั้งในตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับเพดานกว่าจะเกิดการสะท้อนกลับจากเพดานมากกว่า จึงทำให้ค่าเฉลี่ยรังสีของระบบที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.0 ม. สูงกว่า ที่ติดตั้งสูงจากพื้น 2.7 ม. ส่วนระบบที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 ม. แม้จะอยู่ใกล้เพดานห้องมากกว่าแต่พบว่า มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ต่ำกว่าที่ติดตั้งระดับ 3.0 ม. เนื่องจากมีพื้นที่



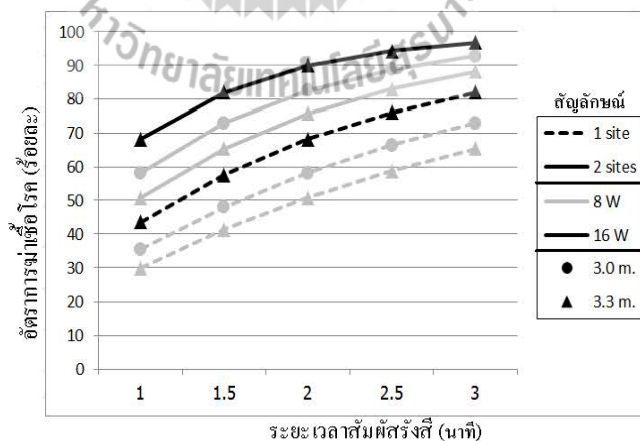
ได้ระดับติดตั้งมากกว่า ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวนี้จะมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ต่ำลงมาก เป็นผลมาจากบานเกล็ดที่ทำหน้าที่สะท้อนรังสีขึ้นด้านบน ในขณะที่จะลดการกระจายรังสีลงสู่ด้านล่างไปพร้อม ๆ กัน

#### ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC กำลังไฟ และระดับติดตั้งระบบ UVGI ในห้องจำลอง

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC (ไมโครวัตต์/ตร.ซม.)											
	8 วัตต์				16 วัตต์				30 วัตต์			
	2.7 ม.	3.0 ม.	3.3 ม.	เฉลี่ย	2.7 ม.	3.0 ม.	3.3 ม.	เฉลี่ย	2.7 ม.	3.0 ม.	3.3 ม.	เฉลี่ย
1.7 ม.	0.14	0.00	0.00	0.05	0.31	0.31	0.00	0.21	5.49	1.77	1.77	3.01
Upper Zone	1.30	1.54	1.25	1.37	1.81	2.43	2.02	2.09	10.30	10.55	10.39	10.41

การกระจายความเข้มรังสี UVC กับจำนวนหลอด UVC การติดตั้งระบบฯ ที่มีกำลังหลอดไฟเท่าเดิมเพิ่ม 1 ชุดที่ผนังด้านตรงกันข้ามในระดับเดียวกัน มีผลทำให้ค่าเฉลี่ยเข้มรังสี UVC ใน Upper zone เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เนื่องจากการเพิ่มแหล่งกำเนิดของรังสี UVC ที่มีความเข้มเท่าเดิมแต่มีทิศทางตรงกันข้าม และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบฯ ที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 8 วัตต์ ที่ผนังด้านตรงกันข้ามกันในระดับเดียวกันละ 1 หลอด รวม 2 หลอด รวมเท่ากับ 16 วัตต์ กับที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ 16 วัตต์ จำนวน 1 หลอด จะพบว่า การติดตั้งกรณีแรกจะมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีสูงกว่ากรณีที่สอง

การคาดการณ์อัตราการฆ่าเชื้อโรค การวิเคราะห์การกระจายของความเข้มรังสี UVC ในห้องจำลองของการศึกษานี้ เพื่อหวังผลในการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคที่ให้ผลการฆ่าเชื้อสูงสุดและมีความปลอดภัยต่อผู้ที่อยู่ในห้อง โดยจะคัดเลือกจากระบบฯ ที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟ จำนวนหลอด และตำแหน่งติดตั้งที่ทำให้เกิดการกระจายของความเข้มรังสี UVC ที่ระดับความสูงจากพื้น 1.7 ม. มีค่าความเข้มรังสีไม่เกิน 0.2 ไมโครวัตต์/ตร.ซม. ดังตารางที่ 1 ผลการศึกษพบว่า ระบบ UVGI ที่ติดตั้งที่ผนัง 1 ด้านและมีความปลอดภัย เป็นระบบที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 8 วัตต์ ระดับความสูงจากพื้น 3.0 และ 3.3 ม. และติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 16 วัตต์ เฉพาะระดับความสูงจากพื้น 3.3 ม. เท่านั้น โดยเมื่อนำค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ของระบบที่ติดตั้งด้วยหลอด



รูปที่ 7 อัตราการฆ่าเชื้อโรคของระบบ UVGI กับกำลังไฟ ระดับการติดตั้งและจำนวนหลอด UVC

UVC จำนวน 1 และ 2 ด้าน ที่ได้จากการตรวจวัด ไปประมาณค่าเพื่อคาดการณ์ประสิทธิภาพระบบจากอัตราการฆ่าเชื้อของระบบ และเวลาที่เชื้อโรคล้มผัสรังสี ตามสมการ (2) ดังรูปที่ 7 พบว่าระบบฯ ที่ติดตั้ง 1 ด้าน เมื่อเชื้อโรคล้มผัสรังสี UVC นาน 1.15 2.25 และ 3 นาที จะมีอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 29.8-43.6, 41.4-57.6, 50.7-68.2, 58.7 76.1 และ 65.4-82.0 ตามลำดับ และเมื่อติดตั้งระบบฯ เพิ่มอีก 1 ด้าน ที่ผนังด้านตรงกันข้ามในระดับเดียวกัน พบว่า ระบบมีค่าเฉลี่ยอัตราการฆ่าเชื้อโรค ร้อยละ 50.7-68.2, 65.4-82.0, 75.7-89.9, 83.0-94.3 และ 88.1-96.8 ตามลำดับ กล่าวโดยสรุป การติดตั้งระบบเพิ่มอีกหนึ่งด้าน ด้วยหลอดกำลังไฟ 8 วัตต์ และ 16 วัตต์ จะทำให้อัตราการฆ่าเชื้อโรคเพิ่มขึ้น ร้อยละ 21.30 และ 14.6 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสรังสี UVC ของเชื้อโรคและจำนวนหลอด UVC มีผลในการเพิ่มอัตราการฆ่าเชื้อโรค

### สรุป

ผลจากการติดตั้งระบบ UVGI ในห้องจำลอง ทำการแปรผันกำลังไฟ ตำแหน่งการติดตั้ง ระดับความสูงจากพื้น 2.7 3.0 และ 3.0 ม. และจำนวนหลอด UVC พบว่า ระบบที่ติดตั้งด้วยหลอด ขนาด 8 วัตต์ 16 วัตต์ และ 30 วัตต์ จำนวน 1 หลอด ที่ผนังด้านเดียว ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในแนวราบระดับเดียวกับที่ติดตั้งระบบ แปรผกผันกับระยะห่างจากเพดาน ระบบฯ ที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.3 ม. มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงที่สุด มีค่า 4.46 6.04 และ 23.37 ไมโครวัตต์/ตร.ซม. ตามลำดับ และแปรผันตามกำลังไฟที่สูงขึ้น มีค่าเท่ากับ 4.09 5.83 และ 20.19 ไมโครวัตต์/ตร.ซม. ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ที่ระดับติดตั้งระบบฯ มีค่าสูงกว่าที่ระดับสูงและต่ำกว่าระดับติดตั้งระบบฯ 0.30 ม. และที่ระดับสูงกว่าระดับติดตั้งระบบฯ 0.30 ม. มีค่าสูงกว่าที่ระดับต่ำกว่าระดับติดตั้งระบบฯ 0.30 ม. เท่ากับ 2.3 1.3 และ 1.4 เท่า ตามลำดับ ผลดังกล่าวนี้บ่งชี้ว่าด้านบนของห้องจึงเป็นการเพิ่มปริมาณรังสีในระดับสูงกว่าระดับติดตั้งควบคู่กับการลดค่าความเข้มรังสีได้ระบบ ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC ในพื้นที่ส่วนบนของห้อง(Upper Zone) ของหลอด UVC กำลังไฟ 8 วัตต์ 16 วัตต์ และ 30 วัตต์ มีค่า 1.37 2.09 และ 10.41 ไมโครวัตต์/ตร.ซม. โดยพบว่า ระบบฯ ของหลอดกำลังไฟทุกขนาดที่ติดตั้งสูงจากพื้น 3.0 ม. มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสี UVC สูงที่สุด นอกจากนี้ การติดตั้งระบบฯ ด้วยหลอดกำลังไฟขนาดเท่ากันที่ผนังด้านตรงกันข้ามในระดับเดียวกันเพิ่มอีก 1 ด้าน พบว่า มีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีเพิ่มเป็นสองเท่าและมีค่าสูงกว่าการติดตั้งด้วยหลอดที่มีกำลังไฟรวมเท่ากันแต่ติดตั้งเพียงด้านเดียว จากการศึกษาพบว่า ระบบ UVGI ที่ติดตั้งและมีความปลอดภัยเป็นระบบที่ติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 8 วัตต์ ระดับความสูงจากพื้น 3.0 และ 3.3 ม. และติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 16 วัตต์ ระดับความสูงจากพื้น 3.3 ม. และการติดตั้งระบบเพิ่มอีกหนึ่งด้าน ด้วยหลอดกำลังไฟ 8 วัตต์ และ 16 วัตต์ มีผลในการเพิ่มอัตราการฆ่าเชื้อขึ้น ร้อยละ 21.30 และ 14.6 ตามลำดับ

ผลจากการศึกษานี้ ทำให้ได้ข้อมูลการกระจายความเข้มรังสี UVC ที่อยู่ในระดับปลอดภัย ด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 8 วัตต์ ระดับความสูงจากพื้น 3.0 และ 3.3 ม. และติดตั้งด้วยหลอดกำลังไฟขนาด 16 วัตต์ ระดับความสูง 3.3 ม. ซึ่งความเข้มรังสี UVC นี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยด้านระยะเวลาที่เชื้อโรคสัมผัสรังสี UVC ภายในห้อง และประเมินอัตราการฆ่าเชื้อโรคของระบบในห้องผู้ป่วยในงานวิจัยต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล ที่ให้แนวคิดในการพัฒนาประเด็นการวิจัย ขอขอบคุณ ผศ.ดร.จริยา ยัมรัตนบวร ผศ.ดร.กิริติ สุลักษณ์ และ อ.ดร.อภิชน วัชรนทรวิวงศ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะการปรับปรุงขอบเขตการทดลองให้มีความชัดเจน และขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุจิตต์ คุรุจิต อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้โอกาส ข้อเสนอแนะทุกด้าน การกระตุ้นติดตามด้วยความเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดตลอดระยะเวลาทำการศึกษา



### เอกสารอ้างอิง

- [1] WHO (World Health Organization). 2011. Global tuberculosis control 2011 . [Internet]. [cited 2012 Mar 10]., Available: [http://www.who.int/tb/publications/global\\_report/2011/gtbr11\\_full.pdf](http://www.who.int/tb/publications/global_report/2011/gtbr11_full.pdf)
- [2] Mertens, R., G. Kegels, A. Stroobant, G. Reybrouck and J.M. Lanotte *et al.*, 1987. The national prevalence survey of nosocomial infections in Belgium. *J. Hosp. Infect.*, 9: 219-229.
- [3] Charern Chooshotrat. 2008. Tuberculosis.[Internet]. [cited 2012 Mar 10]. Available: [http://www.med.cmu.ac.th/hospital/ris/download/EID\\_August54.html](http://www.med.cmu.ac.th/hospital/ris/download/EID_August54.html)
- [4] CDC (Centers for Disease Control and Prevention). 2005. Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings., *MMWR* 2005; 54 (No. RR-17): (inclusive page numbers).
- [5] Fennelly, K. P., Martyny, J. W., Fulton, K. E., Orme, I. M., Cave, D. M., Heifets, L. B. 2004. Cough-generated aerosols of Mycobacterium tuberculosis: a new method to study infectiousness. [Research Support, U.S. Gov't, P.H.S.]. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 169(5), 604-609.
- [6] Sung, M., Kato, S. 2010. Method to evaluate UV dose of upper-room UVGI system using the concept of ventilation efficiency. *Building and Environment*, 45(7), 1626-1631.
- [7] Division of medical engineering. 2006. Airborne Infection Isolation Room manual. The Department of health services support.
- [8] Miller SL, Hernandez M, Fennelly K, Martyny J, Macher J, Kujundzic E, Xu P, Fabian P, Peccia J, Howard C. 2002. Efficacy of ultraviolet irradiation in controlling the spread of tuberculosis. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, final report, contract no. 200-97-2602; NTIS No. PB2003-103816. [online], Available: <http://www.cdc.gov/niosh/reports/contract/pdfs/ultrairrTB.pdf>
- [9] Lytle C. D., Sagripanti J-L. 2005. Predicted inactivation of viruses of relevance to biodefense by solar radiation. *J. Virol.* 79: 14244-14252.
- [10] Kowalski W. J., Bahnfleth W. P., Witham D. L., Severin B. F., Whittam T. S. 2000. Mathematical modeling of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Quantitative Microbiology*, 2: 249-270.

## ประวัติผู้เขียน

นายวิเศษ วัชรานกุล เกิดเมื่อวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2511 ที่อำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ เป็นบุตรของนายคำ นางสุดใจ สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดทุ่งสว่าง ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบุญวัฒนา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา พ.ศ. 2528 จากนั้นเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาในปี 2533 และสาขาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช สำเร็จการศึกษาในปี 2542 และในปี พ.ศ. 2553 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

ประวัติการทำงาน เมื่อสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2533 ได้สอบบรรจุเข้าเป็นข้าราชการสังกัดกระทรวงสาธารณสุข ตำแหน่งนักวิชาการสุขาภิบาล ระดับ 3 กลุ่มงานอนามัยสิ่งแวดล้อมและอาชีวอนามัย สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดยะลา และในปี พ.ศ. 2536 ย้ายไปปฏิบัติราชการตำแหน่งนักวิชาการสุขาภิบาล ระดับ 4 หัวหน้าฝ่ายสุขาภิบาลและป้องกันโรค โรงพยาบาลชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา เป็นระยะเวลา 7 ปี จึงโอนย้ายไปปฏิบัติงานในตำแหน่งนักวิชาการสาธารณสุข ระดับ 7 หัวหน้างานอาชีวอนามัย กลุ่มงานอาชีวอนามัย ศูนย์อนามัยสิ่งแวดล้อม เขต 5 นครราชสีมา กรมอนามัย จากนั้นในปี พ.ศ. 2546 มีการปฏิรูประบบราชการ ปรับโครงสร้างหน่วยงาน ถูกโอนย้ายไปสังกัดสำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 5 นครราชสีมา กรมควบคุมโรค ตำแหน่งนักวิชาการสาธารณสุข ระดับ 7 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งนักวิชาการสาธารณสุข ชำนาญการพิเศษ หัวหน้ากลุ่มงานโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 5 นครราชสีมา ภาระหน้าที่สำคัญ คือ การเฝ้าระวัง ป้องกัน และควบคุมโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม ในพื้นที่ภาคอีสานตอนล่าง ได้แก่ นครราชสีมา ชัยภูมิ บุรีรัมย์ และสุรินทร์ โดยเฉพาะปัญหาโรคและภัยจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมทางด้านกายภาพ เคมี

ผลงานวิชาการ ได้รับรางวัลผลงานวิชาการดีเด่น (ด้านอาชีวอนามัย) กระทรวงสาธารณสุข ปี พ.ศ. 2550 และผลงานวิชาการในระหว่างการศึกษาต่อระดับปริญญาโท ได้เสนอบทความเข้าร่วมการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 13 ประจำปี พ.ศ. 2557 (13<sup>th</sup> National Environmental Conference) เรื่อง “การวิเคราะห์การกระจายความเข้มรังสี UV ของระบบฆ่าเชื้อโรคในห้องผู้ป่วยจำลอง”