

การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร  
โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง



นางสาวลดาธัญญา พุ่มแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2564

AN INDOOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM  
PERFORMANCE ENHANCEMENT USING  
SWITCHED-BEAM TECHNIQUE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master in Telecommunication and Computer Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2021

การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร  
โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีอนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. เศรษฐวิทย์ ภูฉายา)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. มนต์ทิพย์ภา อุตารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. พิชญา ชัยปัญญา)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร. ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ลดาธัญญา พุ่มแก้ว : การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายใน  
อาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง (AN INDOOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION  
SYSTEM PERFORMANCE ENHANCEMENT USING SWITCHED-BEAM TECHNIQUE)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล, 99 หน้า.

คำสำคัญ : การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น/วิธีเชิงพันธุกรรม/หลอดแอลอีดี

ปัจจุบันระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (Visible Light Communication: VLC) เป็นเทคโนโลยีทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากสามารถใช้หลอดแอลอีดี (Light Emitting Diode: LED) ในการส่งข้อมูลแทนการใช้สายอากาศ โดยปกติระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารมักถูกออกแบบให้มีการส่งสัญญาณได้แค่หนึ่งชุดข้อมูลผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีที่ติดตั้งให้กับผู้ใช้งานเพียงคนเดียวภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ส่งผลให้ปริมาณผู้ใช้งานต่อหน่วยเวลา (throughput) น้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง (switched-beam) ผ่านการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม (circular array LED) สามารถรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีแต่ละดวงด้วยวิธีการแยกชุดข้อมูล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารให้สามารถเพิ่มปริมาณผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน โดยพิจารณาค่าพื้นที่ครอบคลุม (coverage area) ซึ่งวิเคราะห์จากพื้นที่ที่สามารถทำการสื่อสารได้ ณ ตำแหน่งบนระนาบภาครับที่มีค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate: BER) น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดบนพื้นฐานของแสงสว่างครอบคลุม (coverage illuminance) ตามมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคารของ International Commission on Illumination: CIE นอกจากนี้เสนอการใช้วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ในการค้นหาตำแหน่งของพารามิเตอร์การออกแบบให้มีความเหมาะสมต่อสถานการณ์ในการจำลอง เพื่อให้มีพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบได้ และลดเวลาในการค้นหาผลลัพธ์ลงได้ประมาณ 382 นาที ในทุกสถานการณ์จำลองแบบที่นำเสนอ

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา ลดาธัญญา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ม.

LADATHUNYA PUMKAEW : AN INDOOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION  
SYSTEM PERFORMANCE ENHANCEMENT USING SWITCHED-BEAM TECHNIQUE  
ADVISOR : ASSOC.PROF.MONTHIPPA UTHANSAKUL, Ph.D., 99 PP.

Keyword : Visible Light Communication/Genetic Algorithm/Light Emitting Diode

Nowadays, Visible Light Communication (VLC) is an attractive alternative technology for wireless communication because it can use some simple Light Emitting Diodes (LEDs) instead of antennas. Typically, indoor VLC is designed to transmit only one dataset through multiple LED beams at a time. As a result, the number of users per unit of time (throughput) is relatively low. Therefore, this paper proposes the design of an indoor VLC system using switched-beam technique through computer simulation. The LED lamps are designed to be arranged in a circular array and the signal can be transmitted through the beam of each LED lamp with the method of separating the dataset to increase the number of simultaneous users for enhancing the indoor VLC. The coverage area is determined from the area where the communication can be performed at a location on the receiving plane with a Bit Error Rate less than or equal to the specified value based on coverage illuminance according to International Commission on Illumination (CIE) standards. In this paper, Genetic Algorithm is used to find the suitable solution for designing parameters to achieve maximum coverage area. The results show that a Genetic Algorithm can be used to find a suitable solution and reduce the computational time approximately 382 minutes in proposed scenarios.

School of Telecommunication Engineering  
Academic Year 2021

Student's Signature ลดาธิญญา  
Advisor's Signature ม.ป.อ.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือเป็นอย่างดี ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและคณะบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำปรึกษาแนะนำและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยังต้องงานวิจัยให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐวิทย์ ภูญาษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชิตพงศ์ เวชโรสงค์ และอาจารย์ ดร.พีรสันต์ คำสาลี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ด้านวิชาการและให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ยังต้องงานวิจัย

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณคุณวีรินทร์ อาจหาญ เลขานุการสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้คำปรึกษาและจัดการด้านเอกสารตลอดระยะเวลาการศึกษา และขอบคุณพี่ เพื่อน น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา และญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักยิ่งตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ลดาธัญญา พุ่มแก้ว

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ซ

## บทที่

<b>1</b>	<b>บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3	สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4	ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.5	วิธีดำเนินการวิจัย .....	4
1.6	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
1.7	ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	4
<b>2</b>	<b>ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>6</b>
2.1	กล่าวนำ.....	6
2.2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2.1	การสื่อสารทางแสง.....	6
2.2.2	วิวัฒนาการและประเภทของหลอดแอลอีดี .....	9
2.2.3	การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น .....	13
2.2.4	เทคนิคการสลับลำแสง .....	14
2.3	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.3.1	โครงสร้างการทำงานของ การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น .....	15
2.3.2	วิวัฒนาการของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3	การใช้งานหลอดแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลมในปัจจุบัน.....	17
2.3.4	การเพิ่มประสิทธิภาพโดยการใช้เทคนิคการก่อรูปลำแสง .....	19
2.4	แบบจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร .....	21
2.4.1	การคำนวณค่าการส่องสว่างตามแนวนอน .....	21
2.4.2	การคำนวณค่าพลังงานที่รับได้.....	22
2.4.3	การคำนวณค่าอัตราส่วนของสัญญาณเทียบกับสัญญาณแทรกสอด.....	24
2.4.4	การคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิต.....	25
2.5	กล่าวสรุป .....	26
<b>3</b>	<b>การออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง.....</b>	<b>27</b>
3.1	กล่าวนำ.....	27
3.2	การออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง..	27
3.2.1	การออกแบบแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลม .....	27
3.2.2	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบ .....	32
3.2.3	การปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม .....	32
3.3	อัลกอริทึม.....	34
3.3.1	การค้นหาทั้งหมด .....	35
3.3.2	วิธีเชิงพันธุกรรม.....	35
3.3.3	การออกแบบวิธีเชิงพันธุกรรม.....	35
3.4	กล่าวสรุป .....	40
<b>4</b>	<b>ผลการจำลองแบบ.....</b>	<b>41</b>
4.1	กล่าวนำ.....	41
4.2	การตั้งค่าการจำลองแบบ .....	41
4.3	ผลการจำลองแบบ .....	42
4.3.1	การจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม .....	42
4.3.2	ประสิทธิภาพระหว่างการค้นหาทั้งหมดและวิธีเชิงพันธุกรรม .....	53
4.3.3	ประสิทธิภาพทางด้านการส่องสว่าง .....	55
4.3.4	ประสิทธิภาพทางด้านการสื่อสาร.....	58



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.5	ประสิทธิภาพระหว่างเทคนิคการสลับลำแสงและแบบดั้งเดิม.....	60
4.4	กล่าวสรุป .....	65
<b>5</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>66</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	66
5.2	ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	67
5.3	การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นจริงในปัจจุบัน .....	67
	รายการอ้างอิง .....	73
	ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา .....	77
	ประวัติผู้เขียน.....	99

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	มาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคารของ CIE..... 28
3.2	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรม MATLAB ..... 32
4.1	การตั้งค่าการจำลองแบบ..... 42
4.2	ผลการจำลองแบบของสถานการณ์ที่ 1..... 53
4.3	ผลการจำลองแบบของสถานการณ์ที่ 2..... 53
4.4	ผลการจำลองแบบของสถานการณ์ที่ 3..... 54
4.5	ผลการจำลองแบบของสถานการณ์ที่ 4..... 54

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ภาพการส่งสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร .....	2
2.1	สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและย่านแสงที่มองเห็น .....	7
2.2	องค์ประกอบพื้นฐานของการสื่อสารทางแสง .....	7
2.3	หลอดไฟชนิดต่าง ๆ .....	10
2.4	การไบอัสตรงของหลอดแอลอีดี .....	11
2.5	หลอดแอลอีดีขนาดเล็ก .....	11
2.6	หลอดแอลอีดีพลังงานสูง .....	12
2.7	การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร .....	13
2.8	การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายนอกอาคาร .....	14
2.9	การส่งสัญญาณโดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง .....	15
2.10	โครงสร้างการทำงานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น .....	16
2.11	โไฟโตโฟน .....	17
2.12	การจัดเรียงหลอดแอลอีดีแถวลำดับ .....	18
2.13	การจัดเรียงหลอดแอลอีดีแถวลำดับในงานวิจัยของ (Priyanka et al., 2018).....	19
2.14	ภาพการทำงานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น .....	20
2.15	เครื่องกำเนิดสัญญาณทางแสง (LC 2012 Spatial Light Modulator) .....	20
2.16	แบบจำลองการคำนวณค่าการส่องสว่างตามแนวนอน .....	21
2.17	แบบจำลองการคำนวณค่าพลังงานที่รับได้ .....	23
3.1	การออกแบบหลอดแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลม .....	31
3.2	พารามิเตอร์ที่ต้องปรับเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม .....	33
3.3	ขั้นตอนการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม .....	36
3.4	การออกแบบขั้นตอนการสร้างประชากรต้นแบบ .....	37
3.5	การออกแบบขั้นตอนการสลับสายพันธุ และขั้นตอนการกลายพันธุ .....	39
4.1	ผลการจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 1 .....	44
4.2	ผลการจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 2 .....	47
4.3	ผลการจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 3 .....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	ผลการจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 4 .....	52
4.5	การแพร่กระจายความเข้มแสงของการส่องสว่าง .....	57
4.6	การแพร่กระจายค่าอัตราความผิดพลาดบิต .....	59
4.7	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคนิคการสลับลำแสงและแบบดั้งเดิม .....	61
4.8	ตัวอย่างการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมในสถานการณ์ที่ 1 .....	63
4.9	ตัวอย่างการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมในสถานการณ์ที่นำเสนอ .....	64
5.1	ชุดสาธิตไฟถนน .....	68
5.2	ชุดสาธิตไฟรถยนต์เปิดไม่กั้น .....	69
5.3	ชุดสาธิตพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะ .....	70
5.4	ชุดสาธิตการส่งผ่านข้อมูลบนคอมพิวเตอร์แบบไร้สายผ่านหลอดแอลอีดี .....	70
5.5	ชุดสาธิตหมวกแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนัง .....	71
5.6	ชุดสาธิตเครื่องให้แสงแอลอีดีแบบพกพาเพื่อรักษาผิวหนัง .....	72
5.7	ชุดสาธิตหน้ากากแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหน้า .....	72

# บทที่ 1

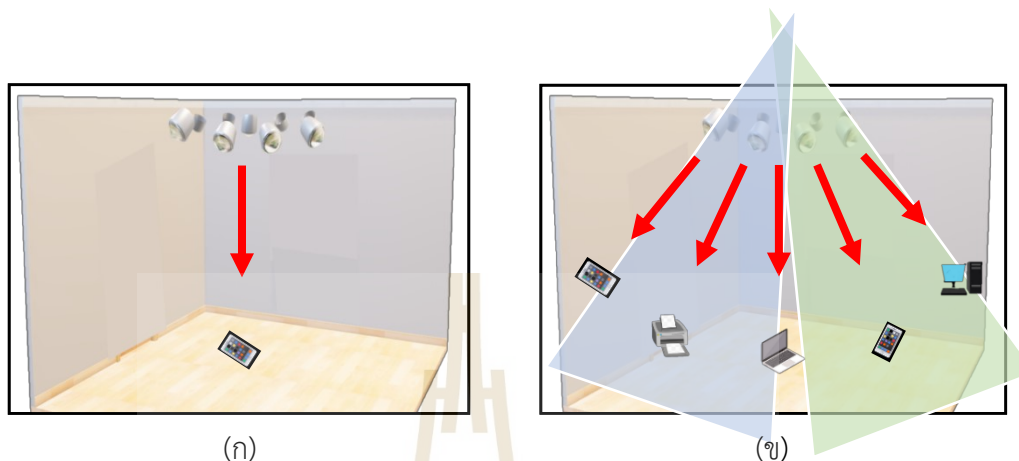
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบการสื่อสารไร้สายเป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (Visible Light Communication: VLC) ถือเป็นเทคโนโลยีทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ เนื่องจากระบบการสื่อสารด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF) ที่ใช้งานอยู่ใน ปัจจุบันมีข้อจำกัดทางด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูล หรือแบนด์วิดท์ที่ใช้งานนั้นไม่สามารถรองรับ จำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้นได้ อีกทั้งยังเกิดการรบกวนกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นจึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพอีกระดับของการสื่อสารไร้สายในอนาคต เนื่องจากสามารถลด ปัญหาการรบกวนกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยใช้แสงเป็นตัวกลางในการรับส่งสัญญาณแทนการ ใช้คลื่นความถี่วิทยุ การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นคือ ประเภทของการสื่อสารที่ข้อมูลถูกส่งผ่านด้วย ด้วยการกล้ำความเข้มของคลื่นแสง (Intensity Modulation) จากสเปกตรัมย่านแสงที่มองเห็น (visible light) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 380 nm – 780 nm โดยใช้หลอดแอลอีดี (Light Emitting Diode: LED) ในการส่งข้อมูล เนื่องจากเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความสว่าง สามารถ ประหยัดพลังงานได้สูง และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าหลอดไฟแบบเดิม ซึ่งจะเข้ามามีบทบาท ทางด้านของแสงสว่างอัจฉริยะ (smart lighting) ที่สามารถให้ทั้งการส่องสว่างและใช้ในการสื่อสารได้ ในเวลาเดียวกัน จากนั้นจะใช้โฟโตไดโอด (photodiode) ในการตรวจจับสัญญาณแสงที่รับมาได้ โดย การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นสามารถแบ่งประเภทตามการใช้งานได้เป็น การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร (indoor visible light communication) เช่น การสื่อสารในห้องสำนักงาน การประยุกต์ใช้งานบนเครื่องบิน หรือแม้กระทั่งการสื่อสารภายในโรงพยาบาล เป็นต้น และการ สื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายนอกอาคาร (outdoor visible light communication) เช่น การ สื่อสารระหว่างยานพาหนะ (Vehicle-to-Vehicle communications: V2V) หรือ การสื่อสาร ระหว่างยานพาหนะกับสภาพแวดล้อมบนถนน (Vehicle-to-Infrastructure communication: V2I)

โดยปกติระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารมักถูกออกแบบให้มีการติดตั้ง หลอดแอลอีดีสำหรับทำการสื่อสารภายในอาคาร โดยจะสามารถรับส่งข้อมูลผ่านลำแสงของหลอด แอลอีดีทุกดวง ได้เพียงแค่นิ่งชุดข้อมูลต่อหนึ่งผู้ใช้งานภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ส่งผลให้จำนวน ผู้ใช้งานต่อหน่วยเวลา (throughput) มีปริมาณน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบระบบ การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง (switched-beam) ผ่าน การจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบ

วงกลม (circular array LED) ซึ่งสามารถรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีแต่ละดวงด้วยวิธีการแยกชุดข้อมูล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารให้สามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ภาพการส่งสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร

(ก) ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารแบบเดิม

(ข) ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง (switched-beam)

โดยพิจารณาค่าพื้นที่ครอบคลุม (coverage area) ซึ่งวิเคราะห์จากพื้นที่ที่สามารถทำการสื่อสารได้ ณ ตำแหน่งบนระนาบภาครับที่มีค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate: BER) น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดบนพื้นฐานของการส่องสว่างครอบคลุม (coverage illuminance) จากตำแหน่งบนระนาบภาครับที่มีค่าความสว่างมากกว่าหรือเท่ากับ 300 ลักซ์ ขึ้นไปตามมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคารของ International Commission on Illumination: CIE นอกจากนี้เสนอการใช้วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ในการค้นหาตำแหน่งของพารามิเตอร์การออกแบบ เช่น รัศมีของหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม และมุมการวางของหลอดแอลอีดีให้มีความเหมาะสมต่อสถานการณ์ในการจำลอง เพื่อให้มีพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด และนำประสิทธิภาพมาเปรียบเทียบกับการค้นหาทั้งหมด (exhaustive search)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษากระบวนการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง
- 1.2.2 ออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง
- 1.2.3 เพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสงเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นแบบเดิม
- 1.2.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของพารามิเตอร์การออกแบบ โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมและการค้นหาทั้งหมด

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 การออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสงจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารแบบเดิม
- 1.3.2 การใช้เทคนิคการสลับลำแสง โดยการแยกลำแสงในการรับส่งข้อมูลให้แต่ละผู้ใช้งาน จะสามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน
- 1.3.3 การใช้เทคนิคการสลับลำแสง โดยการรวมลำแสงที่อยู่ใกล้กับผู้ใช้งานมากที่สุดตั้งแต่สองลำแสงขึ้นไปจะสามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้
- 1.3.4 วิธีเชิงพันธุกรรมจะสามารถใช้ค้นหาตำแหน่งของพารามิเตอร์การออกแบบให้มีความเหมาะสมต่อสถานการณ์ในการจำลองแบบ

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 จำลองแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.4.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพิจารณาจากค่าพื้นที่ครอบคลุมและค่าอัตราความผิดพลาดบิต บนพื้นฐานของการส่องสว่างตามมาตรฐานการใช้งานภายในอาคาร

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

### 1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

1.5.1.1 สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

1.5.1.2 ศึกษาและออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลํ้าแสง

1.5.1.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างผลจากการจำลองแบบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมและการค้นหาทั้งหมด

### 1.5.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารโทรคมนาคม อาคารเครื่องมือ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

### 1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1.5.3.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

1.5.3.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นแบบเดิม

1.6.2 สามารถใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาตำแหน่งของพารามิเตอร์การออกแบบให้มีความเหมาะสม

1.6.3 ได้แบบจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลํ้าแสง

## 1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

สำหรับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผล โดยประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท

**บทที่ 1** กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

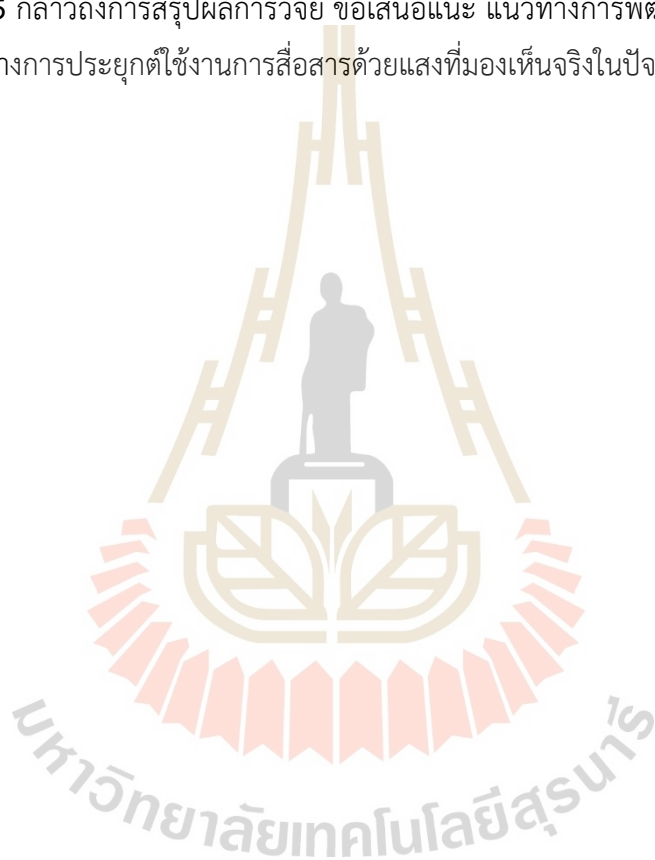
**บทที่ 2** กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร



**บทที่ 3** กล่าวถึงการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง และวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำมาใช้ในการค้นหาตำแหน่งของพารามิเตอร์การออกแบบให้มีความเหมาะสมต่อสถานการณ์ในการจำลองแบบ โดยพิจารณาจากค่าการส่องสว่างครอบคลุม และค่าพื้นที่ครอบคลุม

**บทที่ 4** กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการจำลองแบบของวิธีเชิงพันธุกรรมเปรียบเทียบกับการค้นหาทั้งหมด และนำเสนอวิธีการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง

**บทที่ 5** กล่าวถึงการสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ แนวทางการพัฒนาต่อในอนาคตของการวิจัย และแนวทางการประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นจริงในปัจจุบัน



## บทที่ 2

### ปรัทัศนัวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

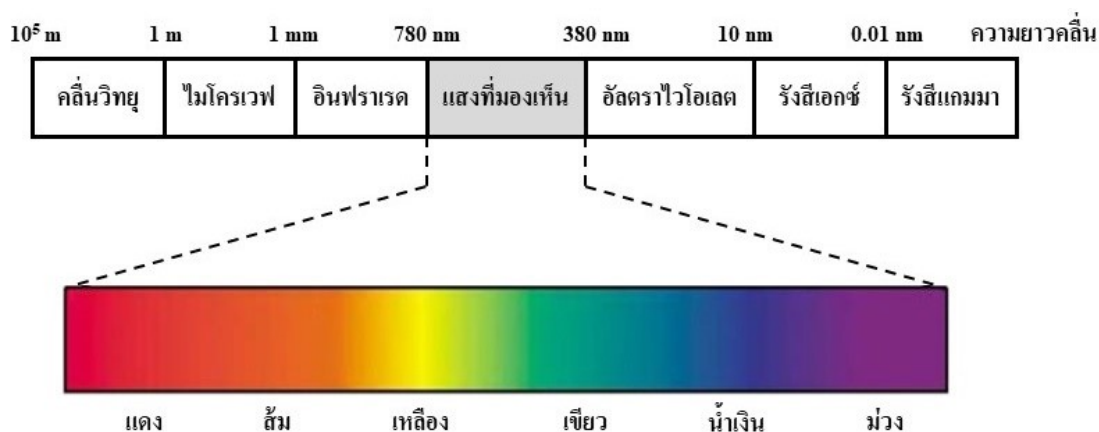
#### 2.1 กล่าวนำ

การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น ถือเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ประโยชน์จากย่านความถี่คลื่นแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่ามาใช้ในการสื่อสาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นให้สามารถรองรับและตอบสนองความต้องการในการใช้งานของผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงมีความจำเป็นต้องดำเนินการสำรวจและศึกษาปรัทัศนัวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัย โดยผู้วิจัยได้ออกแบบการใช้เทคนิคการสลับลำแสงและนำไปประยุกต์ใช้กับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยสามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานต่อหน่วยเวลาให้มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารแบบเดิม เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงปรัทัศนัวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ 1) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารทางแสง 2) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร และ 3) แบบจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร

#### 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.2.1 การสื่อสารทางแสง

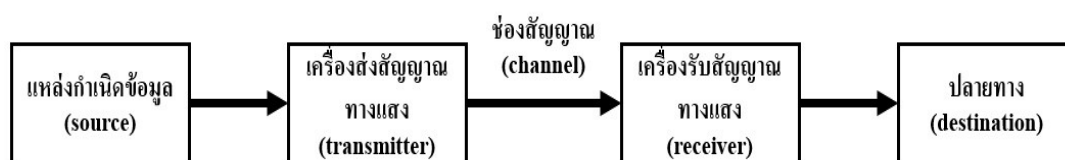
แสง คือพลังงานที่มีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 380-780 นาโนเมตร สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศหรือสุญญากาศด้วยความเร็วประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที แสงถือว่ามีสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ เพราะเป็นส่วนที่ช่วยในการมองเห็นทำให้มนุษย์สามารถรับรู้และดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันได้ ซึ่งหากไม่มีแสงส่องกระทบไปยังวัตถุหรือบริเวณที่ต้องการมองเห็นก็ไม่สามารถมองเห็นได้ โดยแสงที่สายตาของมนุษย์สามารถมองเห็น คือช่วงของแสงตั้งแต่แสงสีม่วงจนถึงแสงสีแดงตามสเปกตรัมย่านแสงที่มองเห็น (visible light) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสงสีขาวจะเกิดจากการรวมตัวกันของแสงทุกสีที่มีความยาวคลื่นต่างกัน



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและย่านแสงที่มองเห็น  
(ที่มา: Pathak et al., 2015)

โดยทั่วไปแสงจะเกิดตามธรรมชาติจากแหล่งกำเนิดแสงจากธรรมชาติ (natural light) เช่น ดวงอาทิตย์ และแสงจากสัตว์บางชนิดที่มีแสงในตัวเอง เป็นต้น ซึ่งจะสามารถใช้ประโยชน์จากแสงได้เพียงแค่วันเวลากลางวันเท่านั้น ดังนั้นจึงมีการคิดค้นแสงจากการประดิษฐ์ของมนุษย์ (artificial light) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์ได้พัฒนาขึ้นโดยอาศัยเทคโนโลยี เพื่อเลียนแบบแสงจากธรรมชาติ เช่น เทียนไข ตะเกียง และหลอดไฟชนิดต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากนี้แสงจะถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการสื่อสารที่ทันสมัยแล้วนั้น ในปัจจุบันยังมีการศึกษาวิจัยที่มีการนำแสงมาใช้ประโยชน์ทางการสื่อสารอีกด้วย

การสื่อสารทางแสง (optical communication) คือการสื่อสารรูปแบบหนึ่งที่ใช้แสงเป็นตัวกลางในการสื่อสาร (Khalighi and Uysal, 2014) โดยองค์ประกอบพื้นฐานของการสื่อสารทางแสงแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบพื้นฐานของการสื่อสารทางแสง

- แหล่งกำเนิดข้อมูล (source)
 

แหล่งกำเนิดข้อมูล คือเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณที่ใช้สำหรับการสื่อสาร ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบของสัญญาณภาพ สัญญาณเสียง หรือสัญญาณข้อมูลอื่น ๆ ที่ผู้ใช้งานต้องการที่จะทำการสื่อสาร
- เครื่องส่งสัญญาณทางแสง (optical transmitter)
 

เครื่องส่งสัญญาณทางแสง คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งข้อมูล เช่น หลอดแอลอีดี เลเซอร์ไดโอด เป็นต้น ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณที่ได้รับมาจากแหล่งกำเนิดข้อมูลให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อนจะนำไปผสมกับสัญญาณคลื่นพาห์ที่มีความถี่เชิงแสง หรือเรียกว่าการผสมเชิงความเข้มแสง (Intensity Modulation: IM) เพื่อให้ได้สัญญาณแสงออกมา
- ช่องสัญญาณทางแสง (optical channel)
 

ช่องสัญญาณทางแสงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

  - 1) ช่องสัญญาณที่ผ่านอากาศ ระบบนี้ไม่มีการใช้สายนำสัญญาณในการส่งสัญญาณ แต่จะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณแทน โดยสัญญาณแสงจะถูกส่งออกไปในรูปแบบของลำแสงไปยังภาครับโดยตรง ซึ่งการส่งสัญญาณแสงในลักษณะนี้อาจได้รับการรบกวนจากแสงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอื่น ๆ และอาจมีผลให้สัญญาณที่รับได้นั้นผิดเพี้ยนจากสัญญาณต้นฉบับ
  - 2) ช่องสัญญาณที่ผ่านเส้นใยนำแสง ระบบนี้จะใช้เส้นใยนำแสง (fiber optic) เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ โดยเส้นใยนำแสงมีลักษณะเป็นท่อนำสัญญาณแสงรูปทรงกระบอกตันขนาดเล็ก ทำจากวัสดุโปร่งแสง ซึ่งภายในประกอบไปด้วย เส้นใยแก้ว หรือพลาสติกคุณภาพสูงขนาดเล็กหลาย ๆ เส้น โดยสามารถส่งสัญญาณได้ในระยะทางไกล มีคุณสมบัติในการลดทอนสัญญาณต่ำ และมีความปลอดภัยในการสื่อสารสูง เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถรบกวนได้
- เครื่องรับสัญญาณทางแสง (optical receiver)
 

เครื่องรับสัญญาณทางแสง คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณ เช่น โฟโตไดโอด (photodiode) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการตรวจจับสัญญาณแสงและเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า หรือเรียกว่าการตรวจจับแบบตรง (Direct Detection: DD) โดยการแยกสัญญาณข้อมูลออกจากสัญญาณคลื่นพาห์ จากนั้นตัวประมวลผลการตรวจจับแสงจะทำหน้าที่ในการขยายและกรองสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณจากแหล่งกำเนิดข้อมูลที่ส่งมา

## 2.2.2 วิวัฒนาการและประเภทของหลอดแอลอีดี

ในอดีตความต้องการในการใช้แสงสว่างของมนุษย์เริ่มมาจากการก่อกองไฟในการปรุงอาหารหรือเพิ่มความอบอุ่น การใช้แสงไฟจากตะเกียงหรือเทียนไขเพื่อเป็นไฟส่องสว่างในเวลากลางคืน จนกระทั่งมีนักวิทยาศาสตร์มากมายได้ศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับการประดิษฐ์หลอดไฟ โดยในปี พ.ศ. 2422 โทมัส อัลวา เอดิสัน (Thomas Alva Edison) นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันได้ประดิษฐ์หลอดไฟไส้คาร์บอนสำเร็จ และได้ออกแบบสวิตช์เปิด-ปิดหลอดไฟที่ติดตั้งในบ้านเรือน ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาหลอดไฟ และในปัจจุบันได้มีการนำหลอดแอลอีดีมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถลดการใช้พลังงานด้านการส่องสว่างได้มากกว่าหลอดไฟชนิดอื่น ๆ โดยวิวัฒนาการของหลอดไฟชนิดต่าง ๆ ก่อนที่จะมาเป็นหลอดแอลอีดีที่นิยมใช้งานกันในปัจจุบันแสดงในรูปที่ 2.3 เริ่มต้นจาก

- หลอดไส้ (Incandescent)

หลอดไส้มีคุณสมบัติเป็นหลอดไฟที่ทำจากทังสเตน (tungsten filament) ที่เมื่อกระแสไฟไหลผ่านแล้วจะทำให้อุณหภูมิที่ตัวไส้หลอดสูงขึ้นและทำให้เกิดแสงสว่างออกมา ให้ความร้อนสูงมาก ซึ่งใช้พลังงานในการส่องสว่างมากแต่ประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างต่ำประมาณ 10-15 ลูเมนต่อวัตต์ และอายุการใช้งานค่อนข้างต่ำ ในปัจจุบันจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากเป็นหลอดไฟที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาก

- หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent)

หลอดฟลูออเรสเซนต์หรือที่นิยมเรียกกว่า หลอดนีออน มีประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างปานกลาง ใช้พลังงานในการส่องสว่างปานกลาง และมีอายุการใช้งานนานกว่าหลอดไส้ประมาณ 7-8 เท่า แต่ข้อเสียคือมีสารปรอทซึ่งเป็นสารอันตรายบรรจุอยู่ในหลอดจึงไม่นิยมใช้ในปัจจุบัน

- หลอดฮาโลเจน (Halogen)

หลอดฮาโลเจนถูกพัฒนามาจากหลอดไส้ โดยมีก๊าซฮาโลเจนบรรจุอยู่ในหลอดทำให้มีความทนทานมากกว่าหลอดไส้ปกติ ส่วนใหญ่ใช้ในพื้นที่ที่ต้องการแสงสว่างมากเป็นพิเศษ แต่ในปัจจุบันไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากใช้พลังงานในการส่องสว่างมากและมีอายุการใช้งานค่อนข้างต่ำ

- หลอดแสงจันทร์ (Mercury lamp)

หลอดแสงจันทร์ทำงานด้วยหลักการปล่อยประจุความเข้มสูง (High Intensity Discharge: HID) คือใช้ไฟฟ้าแรงสูงผ่านไอปรอทที่อยู่ภายในหลอดเพื่อให้เกิดแสงสว่าง โดยมีปริมาณแสงสว่างต่อวัตต์สูง และแสงสามารถส่องสว่างได้ไกลกว่าหลอดชนิดอื่น ๆ เหมาะสำหรับใช้งานตามถนน โรงงานอุตสาหกรรม หรือสนามกีฬา เป็นต้น

- หลอดคอมแพคต์ฟลูออเรสเซนต์ (Compact fluorescent lamp)  
หลอดคอมแพคต์ฟลูออเรสเซนต์หรือที่นิยมเรียกว่า หลอดตะเกียบ เนื่องจากมีรูปร่างเป็นแบบตะเกียบหรือรูปทรงเกลียว ลักษณะการทำงานคล้ายกับหลอดฟลูออเรสเซนต์แต่จะมีอายุการใช้งานที่มากกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์

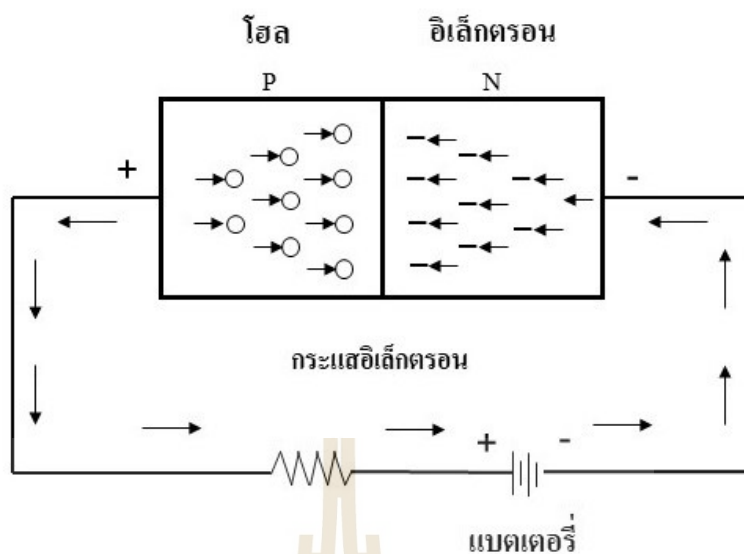


รูปที่ 2.3 หลอดไฟชนิดต่าง ๆ

- (ก) หลอดไส้
- (ข) หลอดฟลูออเรสเซนต์
- (ค) หลอดฮาโลเจน
- (ง) หลอดแสงจันทร์
- (จ) หลอดคอมแพคต์ฟลูออเรสเซนต์

(ที่มา: <https://www.wazzadu.com/article/4005, 2564>)

- หลอดแอลอีดี (Light Emitting Diode: LED)  
หลอดแอลอีดี เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับไดโอด ซึ่งประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และสารกึ่งตัวนำชนิด N มีคุณสมบัติในการเปล่งแสงเมื่อถูกกระตุ้นทางไฟฟ้าแบบไบอัสตรง (forward bias) เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจุดเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด (P-N Junction) อิเล็กตรอน (electron) และโฮล (hole) ที่อยู่ภายในสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนที่มารวมตัวกันทำให้เกิดการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงสว่างหรือโฟตอน (photon) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยในปัจจุบันหลอดแอลอีดีได้รับการพัฒนาให้มีความเข้มแสงสูงมากขึ้น และสามารถเปล่งแสงที่ครอบคลุมย่านความถี่กว้างมากขึ้นตั้งแต่ย่านอินฟราเรดถึงย่านแสงที่มองเห็น โดยที่ใช้พลังงานในการส่องสว่างต่ำ สิ่งนี้ส่งผลให้หลอดแอลอีดีได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย (Singh, 2009)



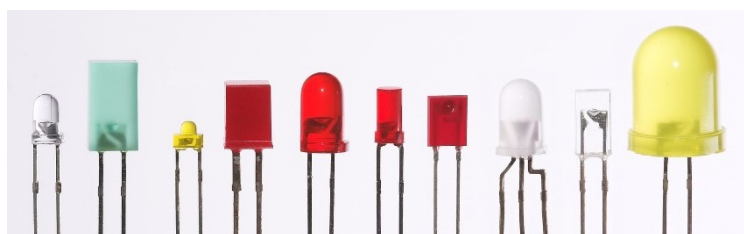
รูปที่ 2.4 การไบอัสตรงของหลอดแอลอีดี

(ที่มา: <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7237-2017-06-11-14-15-33>, 2564)

โดยสามารถจำแนกประเภทของหลอดแอลอีดีได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ

- 1) หลอดแอลอีดีขนาดเล็ก (Miniature LED)
- 2) หลอดแอลอีดีพลังงานสูง (High power LED)

1) หลอดแอลอีดีขนาดเล็ก  
เป็นหลอดแอลอีดีที่มีขนาดเล็กประมาณ 2-8 มิลลิเมตร กระแสไฟฟ้า 1-20 มิลลิแอมแปร์ และมีหลายรูปทรง เช่น แบบกลม แบบโดม และแบบแบน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าตามบ้านเรือน เช่น รีโมทไฟ แสดงสถานะของโทรทัศน์ หน้าจอคอมพิวเตอร์ หรือโทรศัพท์มือถือ



รูปที่ 2.5 หลอดแอลอีดีขนาดเล็ก

(ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Verschiedene\\_LEDs.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Verschiedene_LEDs.jpg), 2564)

## 2) หลอดแอลอีดีพลังงานสูง

เป็นหลอดแอลอีดีที่มีพลังงานสูง ขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 100 มิลลิแอมป์ขึ้นไป มีความเข้มการส่องสว่างสูงมาก ในบางชนิดสามารถเปล่งความเข้มแสงได้มากกว่า 1,000 ลูเมน โดยลักษณะของหลอดแอลอีดีประเภทนี้จะมีการติดตั้งลงบนแผ่นวงจรพิมพ์หรือแผ่นพีซีบี (Printed Circuit Board: PCB) เช่น Surface Mount LED: SMD ส่วนใหญ่ถูกนำมาผลิตเป็นหลอดไฟ โคมไฟ ที่มีหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หลอดแอลอีดีพลังงานสูง

(ที่มา: <https://www.electronicshub.org/led-light-emitting-diode, 2564>)

### ประโยชน์ของหลอดแอลอีดี

- 1) สามารถประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าหลอดไฟชนิดอื่น
- 2) มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าหลอดไฟชนิดอื่น ซึ่งหากเปิดใช้งานวันละ 8-10 ชั่วโมง สามารถใช้งานได้ยาวนานไม่ต่ำกว่า 10 ปี
- 3) ให้แสงสว่างสูง และมีการกระพริบของแสงที่ความถี่สูงเกินกว่าสายตาของมนุษย์จะรับรู้ได้ ทำให้สบายตามากกว่าหลอดไฟชนิดอื่น
- 4) ปล่อยความร้อนออกมาน้อยมากเมื่อเทียบกับหลอดไฟชนิดอื่น ๆ จึงสามารถช่วยลดอุณหภูมิในห้องได้
- 5) สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

นอกจากการนำหลอดแอลอีดีมาใช้ประโยชน์ทางด้านการส่องสว่างแล้วนั้น ในปัจจุบันยังมีการประยุกต์ใช้งานหลอดไฟแอลอีดีในด้านของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น โดยการนำหลอดแอลอีดีมาใช้เป็นเครื่องส่งสัญญาณให้กับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นอีกด้วย



### 2.2.3 การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น

การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นคือ ประเภทของการสื่อสารที่ใช้แสงเป็นตัวกลางในการสื่อสาร โดยข้อมูลจะถูกส่งผ่านด้วยการกล้ำความเข้มของคลื่นแสงจากสเปกตรัมย่านแสงที่มองเห็น (visible light) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 380 –780 นาโนเมตร โดยใช้หลอดแอลอีดีในการส่งข้อมูล เนื่องจากเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความสว่าง สามารถประหยัดพลังงานได้สูง และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าหลอดไฟแบบเดิม ซึ่งจะเข้ามามีบทบาททางด้านของแสงสว่างอัจฉริยะที่สามารถให้ทั้งการส่องสว่างและใช้ในการสื่อสารได้ในเวลาเดียวกัน (Matheus et al., 2019) โดยการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นสามารถแบ่งประเภทตามการใช้งานได้เป็น 2 ประเภทคือ 1) การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร (indoor visible light communication) เช่น การสื่อสารภายในห้องสำนักงาน การสื่อสารภายในโรงพยาบาล หรือแม้กระทั่งการประยุกต์ใช้งานบนเครื่องบิน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เป็นต้น และ 2) การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายนอกอาคาร (outdoor visible light communication) เช่น การสื่อสารระหว่างยานพาหนะ (Vehicle-to-Vehicle communications: V2V) หรือการสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับสภาพแวดล้อมบนถนน (Vehicle-to-Infrastructure communication: V2I) (Kocharoen, 2016) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยส่วนใหญ่การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นจะนิยมใช้งานภายในอาคาร เนื่องจากการรบกวนของแสงอื่น ๆ ที่อยู่โดยรอบนั้นมีน้อยมากเมื่อเทียบกับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายนอกอาคารที่ได้รับการรบกวนอย่างมากจากแสงอาทิตย์



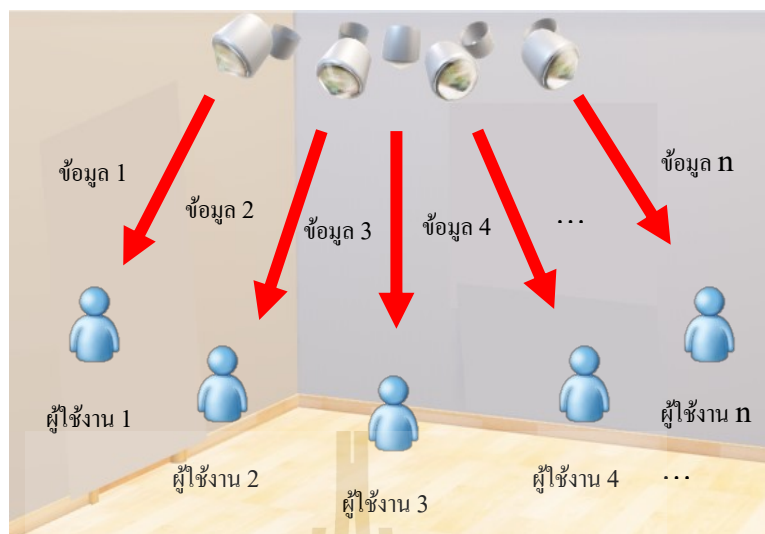
รูปที่ 2.7 การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร



รูปที่ 2.8 การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายนอกอาคาร

#### 2.2.4 เทคนิคการสลับลำแสง

งานวิจัยนี้เสนอการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง ผ่านการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยวัตถุประสงค์ของการใช้เทคนิคการสลับลำแสงคือ การเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน ด้วยการออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีแต่ละดวงได้ด้วยวิธีการแยกชุดข้อมูล โดยแต่ละลำแสงจะส่งข้อมูลต่างกัน ส่งผลให้ผู้ใช้งานสามารถทำการสื่อสารได้ในเวลาเดียวกันมากกว่าหนึ่งคนดังแสดงในรูปที่ 2.9 เทคนิคนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยสามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานต่อหน่วยเวลาให้มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารแบบเดิมที่มีการออกแบบให้หลอดแอลอีดีทุกดวงส่งข้อมูลชุดเดียวกัน ทำให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้เพียงหนึ่งคนภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น แต่การใช้เทคนิคสลับลำแสงจะทำให้เกิดการแทรกสอด (interference) ของแสงที่แทรกสอดกันในระหว่างแต่ละลำแสง เนื่องจากหลอดแอลอีดีแต่ละดวงส่งข้อมูลแตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการปรับค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม เพื่อให้มีพื้นที่ครอบคลุมหรือพื้นที่ที่สามารถใช้ในการสื่อสารมากที่สุด และเสนอวิธีการลดสัญญาณแทรกสอดด้วยเทคนิคการสลับลำแสง โดยการรวมลำแสงที่อยู่ใกล้กับผู้ใช้งานมากที่สุดตั้งแต่สองลำแสงขึ้นไป ซึ่งจะมีรายละเอียดกล่าวในบทต่อไป



รูปที่ 2.9 การส่งสัญญาณโดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง

## 2.3 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 โครงสร้างการทำงานของ การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น

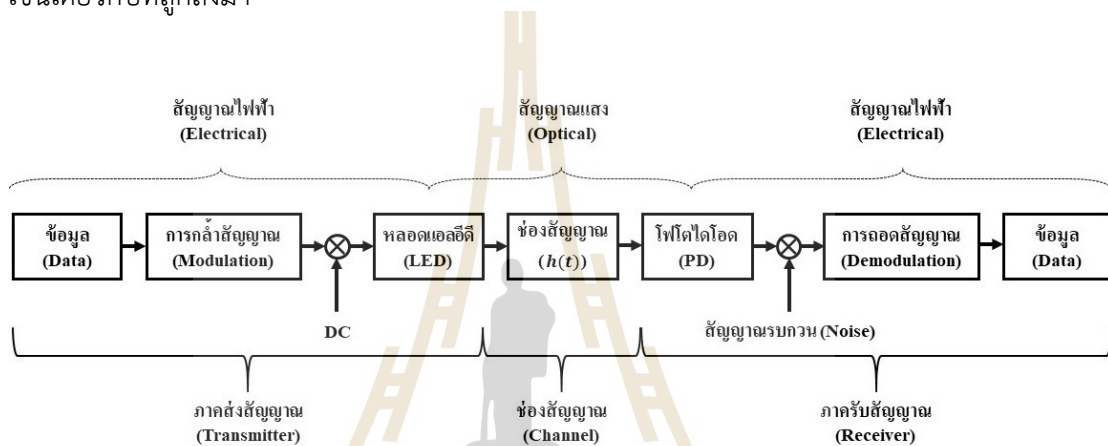
ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น เป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถใช้หลอดแอลอีดีในการส่งข้อมูลที่ให้ประโยชน์ทางด้านแสงสว่างอัจฉริยะ ซึ่งสามารถให้ทั้งการส่องสว่างและใช้ในการสื่อสารได้ในเวลาเดียวกัน โดยทั่วไปโครงสร้างการทำงานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) ภาคส่งสัญญาณ 2) ช่องสัญญาณ และ 3) ภาครับสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (Ndjiongue et al., 2000)

1) ภาคส่งสัญญาณ (Transmitter) เมื่อผู้ใช้งานต้องการส่งข้อมูลที่ใช้สำหรับทำการสื่อสารเข้าสู่ระบบ สัญญาณข้อมูลนั้นจะถูกกล้ำสัญญาณ (Modulation) ด้วยเทคนิคที่ใช้ในการกล้ำสัญญาณ เช่น On-Off Keying: OOK ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ เนื่องจากเป็นรูปแบบพิเศษของการกล้ำสัญญาณแบบ Amplitude Shift Keying: ASK ที่มีความซับซ้อนต่ำ โดยสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งสัญญาณ คือหลอดแอลอีดี ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง และส่งข้อมูลโดยการกระพริบของแสงที่มีความถี่สูงเกินกว่าสายตาของมนุษย์จะรับรู้ได้ผ่านทางช่องสัญญาณ โดยมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) จ่ายไฟเข้าหลอดแอลอีดีเพื่อให้ทำงาน

2) ช่องสัญญาณ (Channel) ในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นจะส่งสัญญาณแสงผ่านทางช่องสัญญาณที่เป็นอากาศว่าง โดยในขณะการส่งสัญญาณตัวรับสัญญาณต้องอยู่ในแนวระดับของตัวส่ง (Line Of Sight: LOS) ซึ่งในสถานการณ์จริงอาจเกิดการสูญเสียคุณภาพของสัญญาณ

เนื่องจากสัญญาณแสงรบกวนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงอื่น ๆ ในบริเวณที่กำลังส่งสัญญาณ สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ตัวกรองสัญญาณแสง (optical bandpass filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวน

3) ภาครับสัญญาณ (Receiver) อุปกรณ์ที่ใช้รับสัญญาณ คือโฟโตไดโอด ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณแสงที่ถูกส่งมาและเปลี่ยนกลับเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยจะมีวงจรขยายสัญญาณ (amplifier) ทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณรบกวนออกและขยายสัญญาณหลักที่ตรวจจับได้จากสัญญาณที่มีความเข้มแสงสูง เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีและถูกต้องตามต้นฉบับมากที่สุด จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการถอดสัญญาณ (Demodulation) เพื่อแปลงกลับให้เป็นสัญญาณข้อมูลเช่นเดียวกับที่ถูกส่งมา

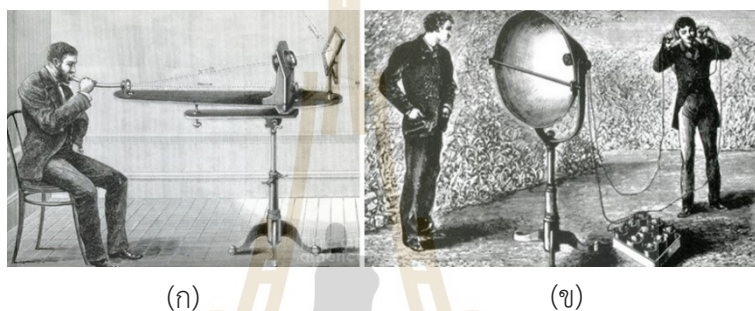


รูปที่ 2.10 โครงสร้างการทำงานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น  
(ที่มา: Ndjiongue et al., 2000)

### 2.3.2 วิวัฒนาการของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น

แสงสว่าง ถูกใช้ประโยชน์ทางด้านของการสื่อสารตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น โฟโตโฟน เป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สายเครื่องแรกที่สามารถส่งสัญญาณเสียงพูดผ่านแสง จากดวงอาทิตย์ได้ประมาณ 100 เมตร ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นของการสื่อสารด้วยแสง ถูกคิดค้นเมื่อปี พ.ศ. 2423 โดยอเล็กซานเดอร์ เกรแฮม เบลล์ (Alexander Graham Bell) โครงสร้างของอุปกรณ์นี้ แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11 โดยหลักการการทำงานเริ่มจาก เมื่อแสงอาทิตย์สะท้อนลงบนพื้นผิวกระจก ทางด้านภาคส่งสัญญาณ คลื่นแสงจะถูกส่งผ่านโดยการสั่นสะท้อนตามเสียงของผู้ใช้งานไปยังเลนส์ที่เป็นกระจกโค้งสะท้อนแสงติดตั้งอยู่ที่ภาครับสัญญาณ (Bell, 1880) โดยหลังจากที่มีคิดค้นอุปกรณ์สื่อสารที่สามารถส่งสัญญาณผ่านทางแสงอาทิตย์เครื่องแรกได้สำเร็จ จึงเริ่มมีการศึกษาและพัฒนาการสื่อสารไร้สายทางแสงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2543 หลอดแอลอีดีเริ่มได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น ในงานวิจัยของ (Tanaka et al., 2003) มีการทดลองใช้หลอดแอลอีดีสีขาวสำหรับการสื่อสารภายในอาคารเป็นครั้งแรก และใน

งานวิจัยของ (Haas et al., 2020) เมื่อปี พ.ศ. 2554 มีการเสนอแนวคิดเกี่ยวกับเทคโนโลยี Light Fidelity: LiFi ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีการทำงานคล้ายคลึงกับ Wireless Fidelity: WiFi เพียงแต่จะใช้หลอดแอลอีดีเป็นตัวส่งสัญญาณอินเทอร์เน็ตด้วยแสง โดยส่งข้อมูลผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (amplitude) ผ่านทางหลอดแอลอีดีที่สายตาของมนุษย์ไม่สามารถรับรู้ถึงการกระพริบได้ และสามารถรับส่งข้อมูลผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีทุกดวง ได้เพียงแค่ว่าหนึ่งชุดข้อมูลต่อหนึ่งผู้ใช้งาน ภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งเทคโนโลยี LiFi ถือเป็นแอปพลิเคชันแรกของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร



รูปที่ 2.11 โฟโตโฟน

(ก) ภาคส่งสัญญาณ

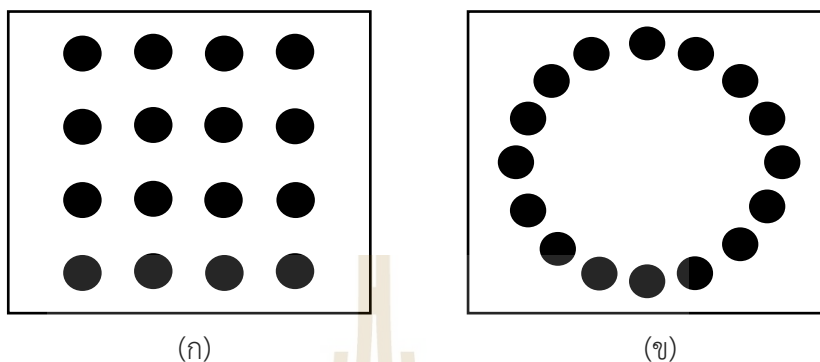
(ข) ภาครับสัญญาณ

(ที่มา: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photophone>, 2564)

### 2.3.3 การใช้งานหลอดแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลมในปัจจุบัน

ในปัจจุบันหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับ (array LED) นิยมนำมาใช้ในการส่องสว่างและการสื่อสารมากขึ้น เนื่องจากการติดตั้งหลอดไฟในสถานการณ์จริงนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าความสว่างที่เพียงพอต่อการใช้งานตามมาตรฐานความสว่าง ซึ่งการติดตั้งหลอดแอลอีดีเพียงดวงเดียวอาจให้ความสว่างที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ทำให้เสียสุขภาพสายตาได้ ดังนั้นในงานวิจัยจำนวนมากจึงมีการออกแบบและพัฒนาหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้มีความสว่างและความสม่ำเสมอของแสงเพียงพอต่อการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารได้อีกด้วย ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักจะนิยมจัดเป็นรูปแบบสี่เหลี่ยมและรูปแบบวงกลมดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยในงานวิจัยของ (Niaz et al., 2016) ได้มีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบสี่เหลี่ยม และหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม พบว่าหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบสี่เหลี่ยมให้การกระจายแสงได้ไม่ดี

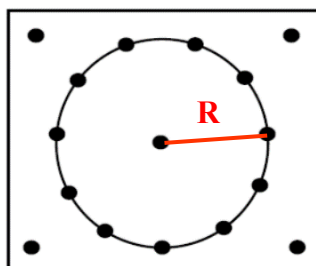
เท่ากับหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม ซึ่งจะทำให้ความสม่ำเสมอของการส่องสว่างได้ดีกว่า



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงหลอดแอลอีดีแถวลำดับ

- (ก) รูปแบบสี่เหลี่ยม
- (ข) รูปแบบวงกลม

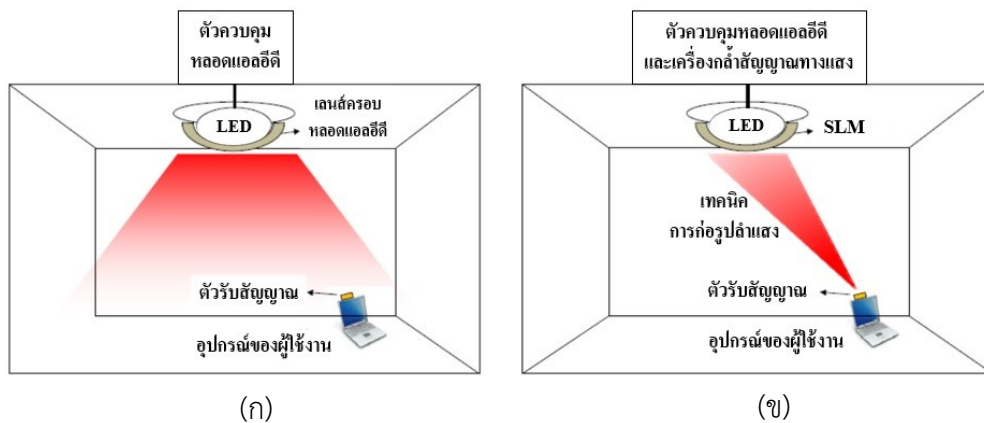
ในงานวิจัยของ (Priyanka et al., 2018) เสนอการจัดเรียงที่เหมาะสมที่สุดของหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น โดยจะใช้หลอดแอลอีดีลำแสงสีขาวทั้งหมด 16 ดวง ในปริมาตรขนาด  $5 \times 5 \times 3$  ลูกบาศก์เมตร จัดวางหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม โดยออกแบบให้หลอดแอลอีดี 4 ดวง จัดวางตำแหน่งมุมของพื้นที่ และหลอดแอลอีดี 1 ดวงจัดวางตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่ล้อมรอบด้วยหลอดแอลอีดีที่เหลืออีก 11 ดวง จัดเรียงเป็นวงกลมดังแสดงในรูปที่ 2.13 ในการจำลองได้ทำการปรับเปลี่ยนรัศมีของหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลมตั้งแต่ 1.5 – 2.3 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.2 เมตร ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าที่รัศมี 2.1 เมตร ระบบให้ความสม่ำเสมอของการส่องสว่าง (uniformity) ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่มากที่สุด และยังคงสามารถรับส่งข้อมูลผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีทุกดวง ได้เพียงแค่นั่งชุดข้อมูลต่อหนึ่งผู้ใช้งานภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 2.13 การจัดเรียงหลอดแอลอีดีแถวลำดับในงานวิจัยของ (Priyanka et al., 2018)

### 2.3.4 การเพิ่มประสิทธิภาพโดยการใช้เทคนิคการก่อรูปลำแสง

การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นในปัจจุบันสามารถทำได้โดยการใช้เทคนิคการก่อรูปลำแสง (optical beamforming) คือการควบคุมลำแสงให้สามารถมุ่งเน้นไปยังอุปกรณ์เป้าหมายที่ภาครับได้โดยตรง ทำให้ไม่สูญเสียพลังงานออกไปในทิศทางที่ไม่จำเป็น และสามารถเพิ่มคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งในงานวิจัยของ (Kim, 2013) ได้มีการนำอุปกรณ์กล้ำสัญญาณทางแสง (Spatial Light Modulator: SLM) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 มาใช้ในการก่อรูปลำแสง โดยเครื่องกล้ำสัญญาณทางแสงเปรียบเสมือนเลนส์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกล้ำสัญญาณเชิงขนาด (Amplitude Modulation: AM) หรือกล้ำสัญญาณเชิงเฟส (Phase Modulation: PM) ซึ่งภายในมีโมเลกุลผลึกเหลว (liquid crystal) เรียงตัวกันอยู่ สามารถควบคุมได้โดยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมในการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโมเลกุลผลึกเหลวที่เรียงตัวกันอยู่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้เฟสเปลี่ยนไป ดังนั้นทิศทางของลำแสงจึงเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่มุ่งเน้นไปยังอุปกรณ์เป้าหมายที่ภาครับได้โดยตรง (Reményi et al., 2003) ในการทดลองทำการสร้างสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารโดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) และสัญญาณจะถูกกล้ำสัญญาณเข้าหลอดแอลอีดีที่เป็นอุปกรณ์ในการส่งสัญญาณ จากนั้นลำแสงจากหลอดแอลอีดีจะถูกส่งผ่านเครื่องขยายลำแสง เพื่อควบคุมขนาดของลำแสงในการทดสอบ และเข้าสู่เครื่องกล้ำสัญญาณทางแสงที่ควบคุมโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมลำแสงให้สามารถมุ่งเน้นไปยังอุปกรณ์เป้าหมายที่ภาครับได้โดยตรง โดยผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าก่อนการใช้เทคนิคการก่อรูปลำแสง สัญญาณที่รับได้นั้นไม่สามารถทำการถอดสัญญาณได้ตามปกติ เพราะความแรงของสัญญาณอ่อนเกินไป แต่หลังจากที่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำแสงแล้ว พบว่าสามารถเพิ่มความแรงของสัญญาณที่รับได้โดยมีค่าอัตราส่วนของสัญญาณเทียบกับสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) เพิ่มขึ้นจากเดิม



รูปที่ 2.14 ภาพการทำงานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น

(ก) ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นแบบดั้งเดิม

(ข) ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น โดยการก่อรูปลำแสง

(ที่มา: Kim, 2013)

รูปที่ 2.15 เครื่องกล้ำสัญญาณทางแสง (LC 2012 Spatial Light Modulator)  
(ที่มา: <https://holoeye.com/lc-2012-spatial-light-modulator>, 2564)

นอกจากนี้ในงานวิจัยของ (Kim, (2018 ยังสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการก่อรูปลำแสงกับเทคนิคการเข้าถึงแบบหลายช่องทาง (multiple access) เช่น การเข้าถึงหลายช่องทางแบบการแบ่งพื้นที่ (Space Division Multiple Access: SDMA) และการเข้าถึงหลายช่องทางแบบการแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) เพื่อรองรับกับผู้ใช้จำนวนมากในสถานการณ์จริง ซึ่งเทคนิคการก่อรูปลำแสงโดยการเข้าถึงหลายช่องทางแบบการแบ่งพื้นที่ คือการแบ่งลำแสงออกเป็นพื้นที่เท่า ๆ กัน และส่งสัญญาณโดยการมุ่งเน้นลำแสงไปยังอุปกรณ์เป้าหมายที่ภาครับโดยตรง การใช้เทคนิคนี้สามารถช่วยให้ผู้ใช้หลายคนสามารถรับ - ส่งข้อมูลพร้อม ๆ กันได้



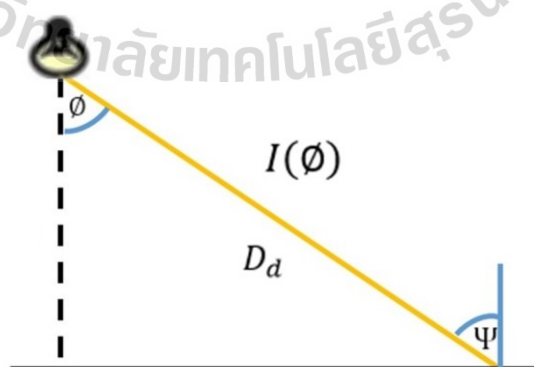
แต่ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะลดลงตามจำนวนของผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนเทคนิคการก่อรูปลำแสงโดยการเข้าถึงหลายช่องทางแบบการแบ่งเวลา คือลำแสงทั้งหมดจะถูกส่งโดยการมุ่งเน้นไปยังอุปกรณ์เป้าหมายแต่ละเครื่องในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถส่งสัญญาณได้อย่างเต็มความสามารถ แต่ปริมาณการรับส่งข้อมูลจะลดลงตามจำนวนของผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน จะเห็นว่าการใช้เทคนิคการก่อรูปลำแสงโดยการใช้เครื่องกล้ำสัญญาณทางแสง สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารได้เป็นอย่างดี โดยสามารถเพิ่มคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ให้ดีขึ้น แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของค่าใช้จ่าย เพราะเครื่องกล้ำสัญญาณทางแสงมีราคาค่อนข้างสูงมาก

จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ทำการศึกษาผ่านมา พบว่าส่วนใหญ่ในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารแบบเดิม จะสามารถรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีทุกดวง ได้เพียงแค่ว่าหนึ่งชุดข้อมูลต่อหนึ่งผู้ใช้งานภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ส่งผลให้จำนวนผู้ใช้งานต่อหน่วยเวลามีปริมาณน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลัดลำแสง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารให้สามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน

## 2.4 แบบจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร

### 2.4.1 การคำนวณค่าการส่องสว่างตามแนวนอนของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น

การส่องสว่างตามแนวนอน (The horizontal illuminance:  $E_{hor}$ ) หมายถึงปริมาณของแสงสว่างที่กระจายบนพื้นผิวที่ส่องสว่าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 2.16 (Komine and Nakagawa, 2004)



รูปที่ 2.16 แบบจำลองการคำนวณค่าการส่องสว่างตามแนวนอน

$$E_{hor} = \frac{I(\phi)}{D_d^2} \cdot \cos(\psi) \quad (2.1)$$

- โดยที่  $D_d$  คือ ระยะทางจากเครื่องส่งสัญญาณถึงเครื่องรับสัญญาณ  
 $\phi$  คือ มุมการแผ่รังสี  
 $\psi$  คือ มุมตกกระทบ  
 $I(\phi)$  คือ ความเข้มการส่องสว่างตามคุณสมบัติการแผ่รังสีแบบแลมเบิร์ตเซียน (Lambertian) ของหลอดแอลอีดี ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$I(\phi) = I(0) \cos^m(\phi) \quad (2.2)$$

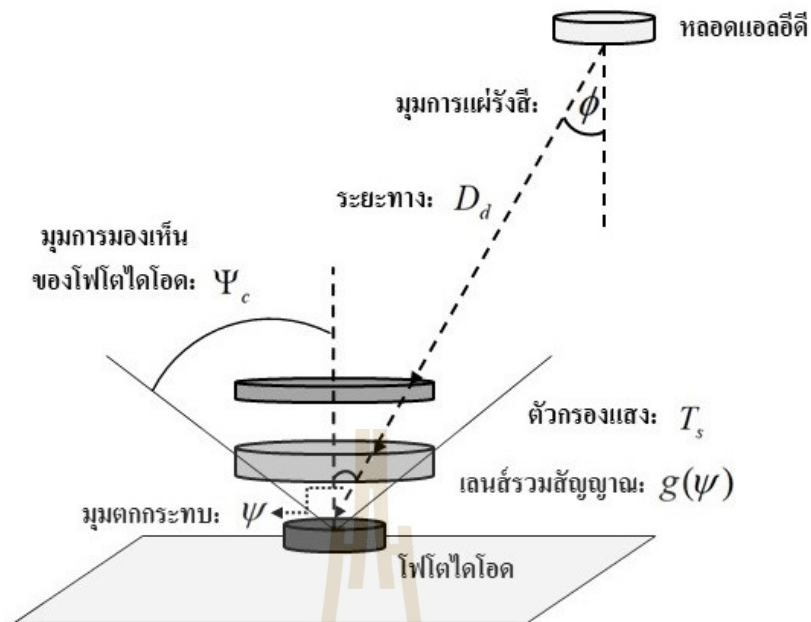
- โดยที่  $I(0)$  คือ ความเข้มการส่องสว่างของหลอดแอลอีดี ณ ตำแหน่งที่ตั้งฉากกับระนาบที่ภาครับ  
 $m$  คือ เลขลำดับการแพร่กระจายของแสงแบบแลมเบิร์ตเซียน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\phi_{1/2}))} \quad (2.3)$$

- โดยที่  $\phi_{1/2}$  คือ มุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี

#### 2.4.2 การคำนวณค่าพลังงานที่ได้รับ

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะพลังงานแสงที่ได้รับจากความเข้มแสงที่ส่องโดยตรงเท่านั้น (directed light) ซึ่งไม่คำนึงถึงผลกระทบของแสงสะท้อนจากผนัง ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยค่าพลังงานที่ได้รับ (The received optical power:  $P_r$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.17 แบบจำลองการคำนวณค่าพลังงานที่ได้รับ  
(ที่มา: Zeng et al., 2008)

$$P_r = H(0) \cdot P_t \quad (2.4)$$

โดยที่  $P_t$  คือ พลังงานแสงที่ส่งผ่าน  
 $H(0)$  คือ อัตราขยายของช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c, \\ 0, & \psi > \Psi_c, \end{cases} \quad (2.5)$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่ทางกายภาพของโฟโตไดโอด  
 $D_d$  คือ ระยะทางจากเครื่องส่งสัญญาณถึงเครื่องรับสัญญาณ  
 $\phi$  คือ มุมการแผ่รังสี  
 $\psi$  คือ มุมตกกระทบ  
 $T_s$  คือ อัตราขยายของตัวกรองแสง (gain of an optical filter)  
 $\Psi_c$  คือ มุมการมองเห็นของเครื่องรับสัญญาณ (Field Of View: FOV)

$g(\psi)$  คือ อัตราขยายของเลนส์รวมสัญญาณ (gain of an optical concentrator) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c, \\ 0, & 0 \geq \Psi_c, \end{cases} \quad (2.6)$$

โดยที่  $n$  คือ ค่าดัชนีการหักเหของแสง

### 2.4.3 การคำนวณค่าอัตราส่วนของสัญญาณเทียบกับสัญญาณแทรกสอด

ผู้วิจัยได้ออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม โดยหลอดแอลอีดีแต่ละดวงจะส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดี โดยค่าอัตราส่วนของสัญญาณเทียบกับสัญญาณแทรกสอด (Signal to Interference Plus Noise Ratio:  $SINR$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 (Rahaim and Little, 2013 และ Zeng et al., 2008)

$$SINR = \frac{(R P_{r,x})^2}{(R \sum_{i \neq x} P_{r,i})^2 + \sigma_{total}^2} \quad (2.7)$$

โดยที่  $R$  คือ ค่าการตอบสนองของโฟโตไดโอด

$P_r$  คือ พลังงานที่รับได้

$\sigma_{total}^2$  คือ ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนทั้งหมด (total noise variance) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{amplifier}^2 \quad (2.8)$$

โดยที่  $\sigma_{shot}^2$  คือ ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนจากการปล่อยอิเล็กตรอนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (shot noise variance)

$\sigma_{amplifier}^2$  คือ ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนวงจรรขยายสัญญาณ (amplifier noise variance) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ

$$\sigma_{shot}^2 = 2qR(P_{rx} + P_n)B_n \quad (2.9)$$

$$\sigma_{amplifier}^2 = i_{amplifier}^2 B_a \quad (2.10)$$

- โดยที่  $P_n$  คือ กำลังงานของสัญญาณรบกวนจากแสงโดยรอบ (noise power of ambient light)
- $q$  คือ มวลของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C
- $i$  คือ ความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนจากวงจรถ่ายสัญญาณ (amplifier noise density)
- $B_a$  คือ แบนด์วิดท์วงจรถ่ายสัญญาณ (amplifier bandwidth)
- $B_n$  คือ แบนด์วิดท์สัญญาณรบกวน (noise-bandwidth) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$B_n = I_2 R_b \quad (2.11)$$

- โดยที่  $I_2$  คือ ตัวประกอบแบนด์วิดท์สัญญาณรบกวน (noise bandwidth factor)
- $R_b$  คือ อัตราการส่งข้อมูล (data rate)

#### 2.4.4 การคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิต

ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (The Bit Error Rate: *BER*) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$BER = Q(\sqrt{SINR}) \quad (2.12)$$

- โดยที่ ฟังก์ชัน  $Q_{(x)}$  คือ ความน่าจะเป็นที่ตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐาน (standard normal random variable) ใช้ค่าที่มากกว่า  $x$

$$\text{ฟังก์ชัน } Q_{(x)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

โดยค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่สามารถยอมรับได้สำหรับการสื่อสารด้วยสัญญาณเสียง (voice) ในระบบการสื่อสารด้วยแสงแบบไร้สาย และการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร คือค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่  $10^{-3}$  (Putri et al., 2019) และในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าพื้นที่ครอบคลุม จากพื้นที่ที่สามารถทำการสื่อสารได้ ณ ตำแหน่งบนระนาบภาครับที่มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $10^{-3}$

## 2.5 กล่าวสรุป

จากเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นในบทนี้ พบว่าส่วนใหญ่ในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารแบบเดิม จะสามารถรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีทุกดวง ได้เพียงแค่นั้นซึ่งชุดข้อมูลต่อหนึ่งผู้ใช้งานภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ส่งผลให้จำนวนผู้ใช้งานต่อหน่วยเวลามีปริมาณน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลัดลำแสง ซึ่งเป็นการออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลมที่สามารถรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีแต่ละดวงด้วยวิธีการแยกชุดข้อมูล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารให้สามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน โดยพิจารณาค่าพื้นที่ครอบคลุม ซึ่งวิเคราะห์จากพื้นที่ที่สามารถทำการสื่อสารได้ ณ ตำแหน่งบนระนาบภาครับที่มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $10^{-3}$  บนพื้นฐานของการส่องสว่างครอบคลุมที่มีค่าความสว่างมากกว่าหรือเท่ากับ 300 ลักซ์ ขึ้นไปตามมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคาร

## บทที่ 3

### การออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง

#### 3.1 กล่าวนำ

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ผ่านมา พบว่าส่วนใหญ่ในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารแบบเดิม มีปริมาณผู้ใช้งานต่อหน่วยเวลาน้อย เนื่องจากการรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีทุกดวงนั้นสามารถทำได้เพียงแค่อื่นๆ ข้อมูลต่อหนึ่งผู้ใช้งานภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลมที่สามารถรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีแต่ละดวงด้วยวิธีการแยกชุดข้อมูล เพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ 1) การออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง รวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบ เพื่อหาดำแหน่งที่เหมาะสม และ 2) อัลกอริทึมที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งของพารามิเตอร์การออกแบบ

#### 3.2 การออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง

##### 3.2.1 การออกแบบหลอดแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลม

ในการออกแบบการติดตั้งหลอดแอลอีดีจำเป็นต้องพิจารณาความสว่างให้เพียงพอกับการใช้งานที่เหมาะสม ซึ่งจะต้องมีความสว่างอย่างน้อย 300-2000 ลักซ์ ตามค่ามาตรฐานความสว่างภายในอาคารของ International Commission on Illumination: CIE (CIE, 2001) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการใช้งานได้ดังตารางที่ 3.1 เช่นการทำงานทั่วไปภายในอาคาร ต้องการความสว่างที่เพียงพออย่างน้อยประมาณ 300-700 ลักซ์ หรือในการทำงานที่ใช้ความละเอียดสูง ทำให้ต้องใช้ความสว่างมากเป็นพิเศษประมาณ 1000-2000 ลักซ์ เป็นต้น ดังนั้นในสถานการณ์จริงจึงไม่สามารถติดตั้งหลอดแอลอีดีเพียงดวงเดียวได้ เนื่องจากจะให้ความสว่างไม่เพียงพอตามมาตรฐานการใช้งาน เป็นผลให้ในงานวิจัยนี้เสนอการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยจำลองการติดตั้งหลอดแอลอีดีหลายดวง (multiple LED) ให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม เพื่อให้มีความสว่างเพียงพอตามมาตรฐาน CIE

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคารของ CIE

ลักษณะการใช้งาน	ความสว่าง (ลักซ์)
งานทั่วไป	300-700
งานละเอียด	500-750
งานละเอียดปานกลาง	750-1000
งานละเอียดพิเศษ	1000-2000

ผู้วิจัยออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง ผ่านการจำลองแบบด้วยโปรแกรม MATLAB โดยจำลองการติดตั้งหลอดแอลอีดีลำแสงสีขาว ที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลมเป็นตัวส่งสัญญาณในระบบ โดยมีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์กระจายสัญญาณ (access point) ที่ติดตั้งกลางพื้นที่เปิดโล่งโดยสามารถแพร่กระจายลำแสงไปยังเครื่องรับได้ทุกทิศทาง เพื่อแยกส่งสัญญาณให้กับผู้ใช้งานหลายคนในเวลาเดียวกัน ในการออกแบบหลอดแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลมจะกำหนดให้มีหลอดแอลอีดีหนึ่งดวงอยู่ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่เสมอ และล้อมรอบด้วยหลอดแอลอีดีดวงที่เหลือซึ่งเอียงออกจากหลอดแอลอีดีดวงกลางจัดเรียงในลักษณะวงกลม การรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีแต่ละดวงใช้วิธีการแยกชุดข้อมูล โดยแต่ละลำแสงจะส่งข้อมูลต่างกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารให้มีปริมาณผู้ใช้งานต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้นจากเดิม

หลอดแอลอีดีตรงกลาง: หลอดแอลอีดีหนึ่งดวงได้รับการออกแบบให้จัดวางไว้ที่กึ่งกลางของพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) มุมการแผ่รังสีของหลอดแอลอีดี (the angle of irradiance:  $\phi$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{h}{D}\right) \quad (3.1)$$

โดยที่  $h$  คือ ความสูงระหว่างเครื่องส่งสัญญาณถึงระนาบที่ภาครับ มีค่าเท่ากับ 2.15 เมตร

$D$  คือ ระยะทางจากเครื่องส่งสัญญาณถึงเครื่องรับสัญญาณที่ตำแหน่งของผู้ใช้งานบนระนาบภาครับ



หลอดแอลอีดีโดยรอบ: หลอดแอลอีดีดวงที่เหลือได้รับการออกแบบให้เอียงออกจากหลอดแอลอีดีตรงกลางและจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม ส่งผลให้มุมการแผ่รังสีของหลอดแอลอีดีเปลี่ยนไปแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) ดังนั้นมุมการแผ่รังสีใหม่ของหลอดแอลอีดี (the new angle of irradiance:  $\alpha$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\cos \alpha = \left( \frac{D^2 + Y^2 - B^2}{2DY} \right) \quad (3.2)$$

โดยที่  $D$  คือ ระยะทางจากเครื่องส่งสัญญาณถึงเครื่องรับสัญญาณที่ตำแหน่งของผู้ใช้งานบนระนาบภาครับ

$Y$  คือ ระยะทางระหว่างหลอดแอลอีดีและจุดพิกัดลำแสง

$B$  คือ ระยะทางระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่ตำแหน่งของผู้ใช้งานบนระนาบภาครับและจุดพิกัดลำแสง

จุดพิกัดลำแสง (beam coordinate) คือ พิกัดที่ลำแสงตรงกลางของหลอดแอลอีดีพุ่งตกลงบนระนาบภาครับดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ค) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$Beam = r + L \quad (3.3)$$

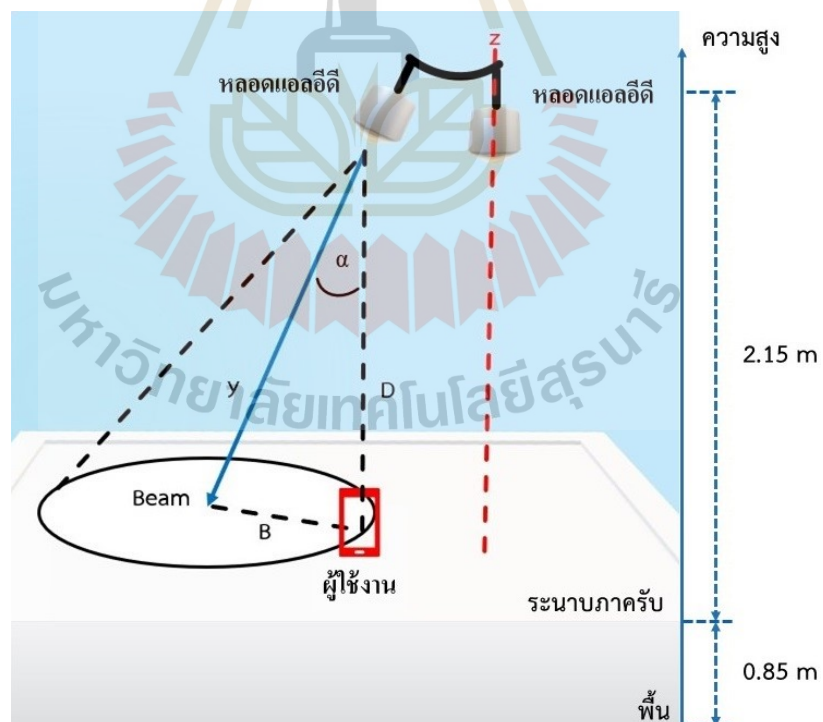
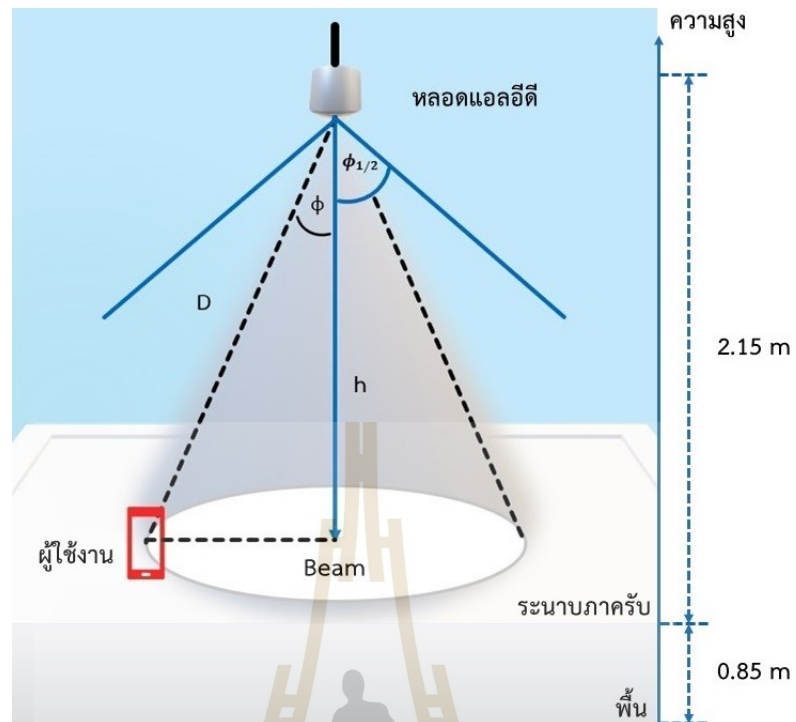
โดยที่  $r$  คือ รัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลม

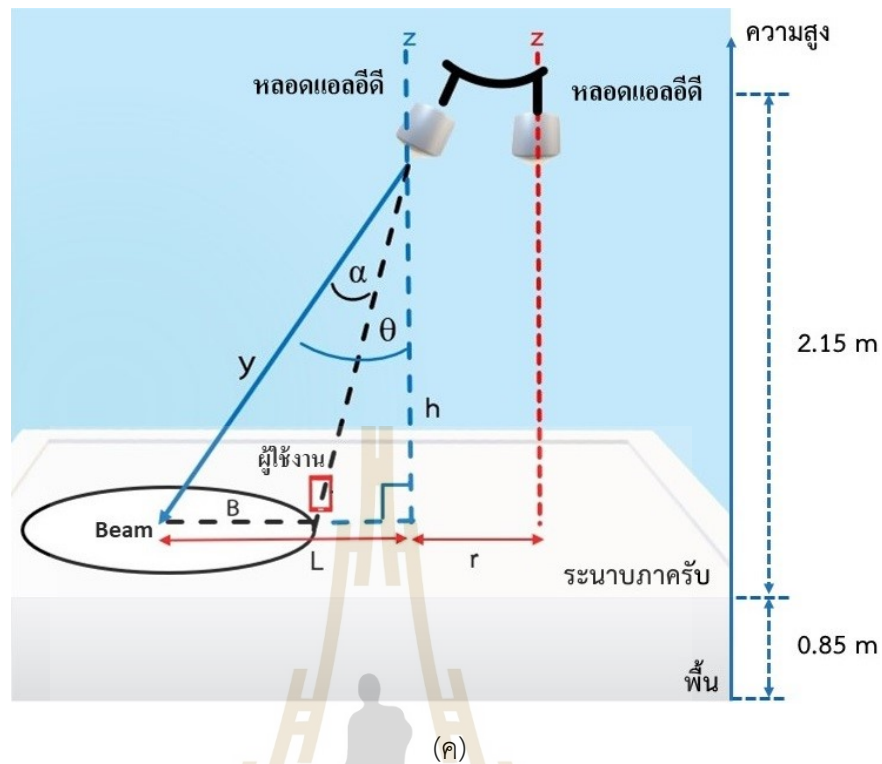
$L$  คือ ระยะทางระหว่างจุดพิกัดลำแสงและจุดพิกัดบนระนาบภาครับที่ตั้งฉากกับหลอดแอลอีดี สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$L = \tan \theta \cdot h \quad (3.4)$$

โดยที่  $\theta$  คือ มุมเอียงที่หลอดแอลอีดีโดยรอบเอียงออกจากหลอดแอลอีดีตรงกลาง (z-angle)

$h$  คือ ความสูงระหว่างเครื่องส่งสัญญาณถึงระนาบที่ภาครับ





รูปที่ 3.1 การออกแบบหลอดแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลม

- (ก) การออกแบบหลอดแอลอีดีตรงกลาง
- (ข) การออกแบบหลอดแอลอีดีโดยรอบ I
- (ค) การออกแบบหลอดแอลอีดีโดยรอบ II

นอกจากประสิทธิภาพทางการส่องสว่างที่ต้องคำนึงถึงค่าความสว่างที่เพียงพอต่อการใช้งานตามมาตรฐานความสว่างภายในอาคารแล้วนั้น ในงานวิจัยนี้ยังพิจารณาถึงประสิทธิภาพทางการสื่อสารที่ต้องมีพื้นที่ครอบคลุมในการสื่อสารมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยวิเคราะห์จากพื้นที่ที่สามารถทำการสื่อสารได้ ณ ตำแหน่งบนระนาบภาครับที่มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $10^{-3}$  ตามค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่สามารถยอมรับได้สำหรับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร ซึ่งหลังจากที่ได้โครงสร้างของหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลมตามที่ยกแบบในงานวิจัยนี้แล้ว จำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมในการสื่อสารสูงสุด บนพื้นฐานของการส่องสว่างครอบคลุมที่เพียงพอต่อการใช้งานตามวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย โดยในงานวิจัยนี้ได้เสนอการใช้วิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยสถานการณ์จำลองต่าง ๆ

### 3.2.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบ

ค่าพารามิเตอร์การจำลองแบบในโปรแกรม MATLAB แสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งขนาดของพื้นที่ที่ถูกกำหนดจากขนาดห้องมาตรฐานภายในอาคารที่นิยมใช้งานกันทั่วไป ความสูงระหว่างหลอดแอลอีดีถึงระนาบที่ภาครับอยู่ที่ประมาณ 2.15 เมตร และโดยส่วนใหญ่หลอดแอลอีดีดวงเดียวจะมีกำลังไฟประมาณ 7-10 วัตต์ เท่านั้น ส่งผลให้การติดตั้งหลอดแอลอีดีในสถานการณ์จริงต้องเพิ่มจำนวนหลอดโดยการใช้หลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับ ซึ่งต้องใช้หลอดแอลอีดีประมาณ 8-12 ดวง เพื่อให้แสงสว่างที่เพียงพอต่อการใช้งาน

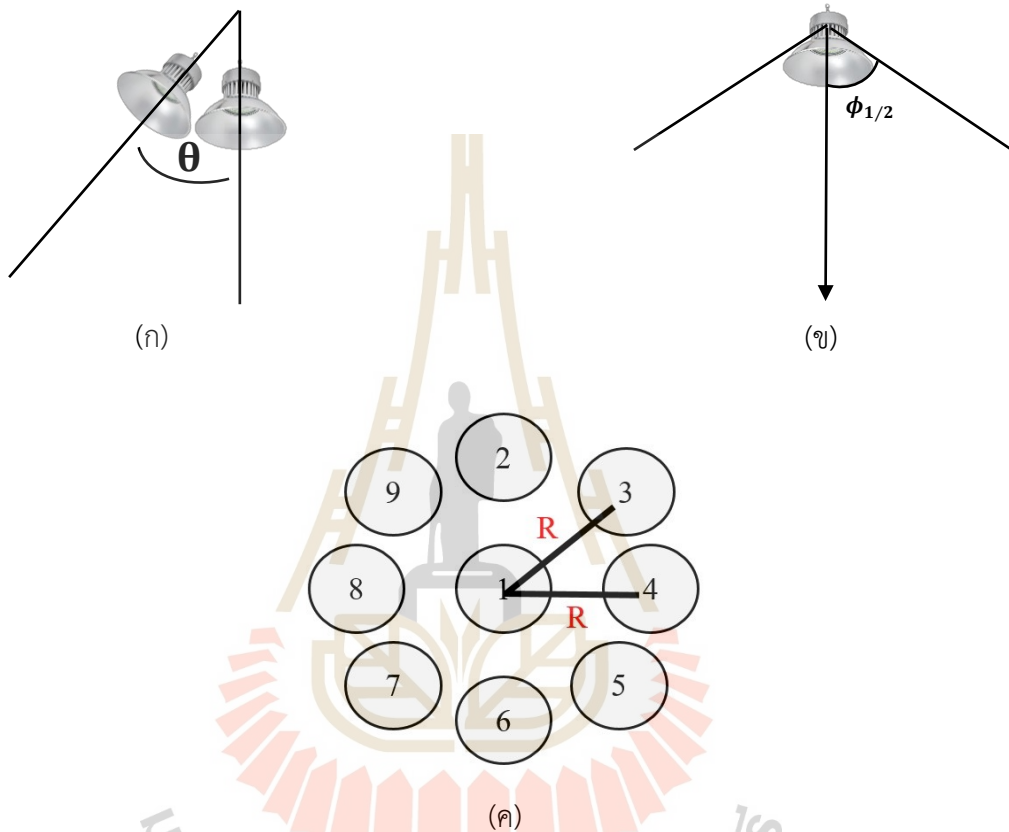
ตารางที่ 3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรม MATLAB

พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์
จำนวนหลอดแอลอีดีแถวลำดับ	8, 9, 12
กำลังงานหลอดแอลอีดีหนึ่งดวง (วัตต์)	7, 10
ปริมาตร (กxยxส) (ลูกบาศก์เมตร)	5x5x3, 4x5x3, 6x6x3
ความสูงระหว่างหลอดแอลอีดีถึงระนาบที่ภาครับ (เมตร)	2.15
พื้นที่โฟโตไดโอด (ตารางเซนติเมตร)	1
ดัชนีการหักเหของแสงที่โฟโตไดโอด	1.5
การตอบสนองของโฟโตไดโอด	0.55
มุมมองมองเห็นของโฟโตไดโอด (องศา)	60

### 3.2.3 การปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม

จากการออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม ผู้วิจัยได้ออกแบบให้หลอดแอลอีดีแต่ละดวงส่งข้อมูลต่างกัน ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดี ซึ่งบริเวณที่ลำแสงเกิดการแทรกสอดคือบริเวณที่ไม่สามารถใช้ในการสื่อสารได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดี และให้มีพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ในการสื่อสารสูงสุดในแต่ละสถานการณ์จำลองที่สร้างขึ้นมา โดยพารามิเตอร์การออกแบบที่ต้องใช้วิธีเชิงพันธุกรรมค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ 3.2 ได้แก่

- 1) มุมเอียง (z-angle) คือมุมที่หลอดแอลอีดีโดยรอบเอียงออกจากหลอดแอลอีดีตรงกลาง
- 2) มุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี (semi-angle at half power) คือมุมของเลนส์กระจายแสงที่ครอบหลอดแอลอีดี
- 3) รัศมีของหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม (radius)



รูปที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ต้องปรับเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม

- (ก) มุมเอียง
- (ข) มุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี
- (ค) รัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับ

### 3.3 อัลกอริทึม

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) คือ กระบวนการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาต่าง ๆ โดยส่วนใหญ่สามารถกำหนดเป็นสมการรูปแบบปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization problem) ที่สามารถระบุเป้าหมายที่ต้องการในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ซึ่งมักมุ่งเน้นให้ได้ผลลัพธ์เป็นค่าของฟังก์ชันที่น้อยที่สุด (minimization problem) หรือค่าของฟังก์ชันที่มากที่สุด (maximization problem) ภายใต้เงื่อนไขหรือข้อจำกัด (constraint) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหลายสาขาวิชา ไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิทยาศาสตร์ ด้านเศรษฐศาสตร์ หรือแม้แต่ด้านวิศวกรรมศาสตร์ โดยทั่วไปปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดมีทั้งแบบวัตถุประสงค์เดียว (single objective optimization problem) และแบบหลายวัตถุประสงค์ (multiobjective optimization problem)

ในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น วิธีที่นิยมที่สุดในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการกระจายความส่องสว่างให้สม่ำเสมอในระบบขึ้นอยู่กับการจัดวางตำแหน่งของหลอดแอลอีดี หรือการจัดสรรพลังงานของหลอดแอลอีดี (Do et al., 2013 และ Azizan et al., 2014) ซึ่งโดยทั่วไปการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นจะนิยมเลือกค่าของพารามิเตอร์เพียงบางค่ามาคำนวณ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นสามารถอนุมานได้ว่าในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดหากทำการเลือกค่าของพารามิเตอร์ทั้งหมดในช่วงข้อมูลที่เป็นไปได้มาคำนวณจะทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

การคำนวณในงานวิจัยนี้มีความซับซ้อนมาก เนื่องจากปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบเป็นแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงทั้งค่าพื้นที่ครอบคลุมที่สูงที่สุด และการส่องสว่างครอบคลุมตามมาตรฐานการใช้งานภายในอาคาร ดังนั้นอัลกอริทึมที่เหมาะสมจะใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อลดการคำนวณที่ซับซ้อนในงานวิจัยนี้มีสองประเภทคือ การค้นหาทั้งหมด และวิธีการฮิวริสติก โดยการค้นหาทั้งหมดจะตรวจสอบค่าทุกจุดภายในขอบเขตการค้นหา เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดและถูกต้องแม่นยำมากที่สุด แต่ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากจึงไม่เหมาะสำหรับปัญหาที่มีขอบเขตการค้นหาขนาดใหญ่ และวิธีการฮิวริสติก มีจุดประสงค์เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือคำตอบที่ใกล้เคียงที่ดีที่สุด ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม ซึ่งวิธีเชิงพันธุกรรมถือเป็นหนึ่งในวิธีการฮิวริสติกที่ได้รับความนิยมมากที่สุด และถูกใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (Kumar et al., 2010, Kamalakis et al., 2020 และ Liu et al., 2014) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมสูงสุดและการส่องสว่างครอบคลุมตามมาตรฐาน เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาในชุดข้อมูลขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ประสิทธิภาพของวิธีเชิงพันธุกรรมจะถูกวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหาทั้งหมด

### 3.3.1 การค้นหาทั้งหมด

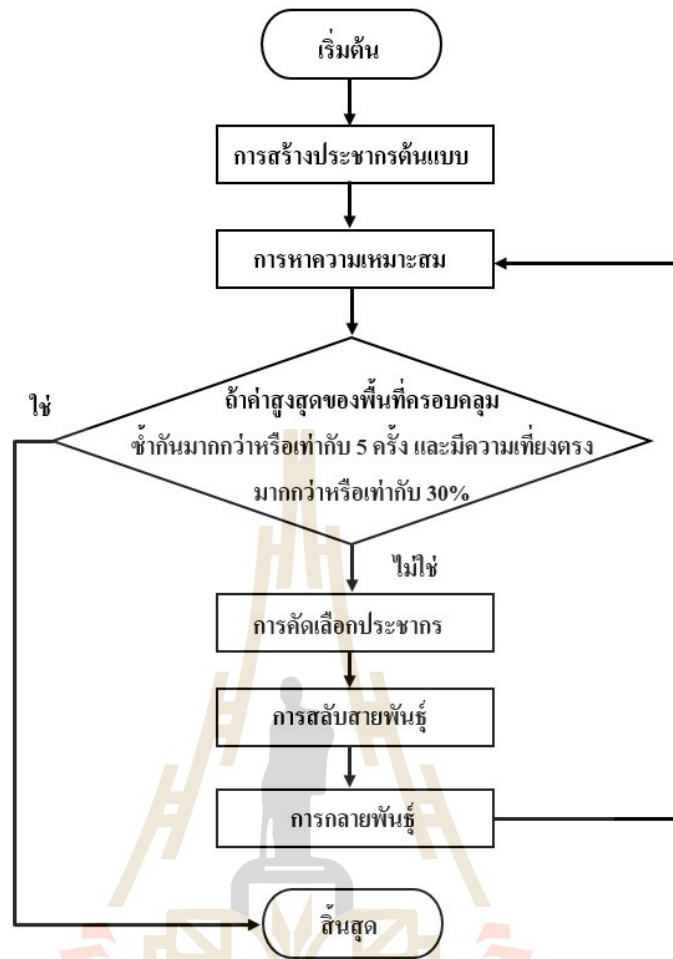
การค้นหาทั้งหมด เป็นอัลกอริทึมที่ตรวจสอบค่าทุกจุดที่เป็นไปได้ภายในปริภูมิการค้นหา (search space) ซึ่งต้องใช้เวลามากในการคำนวณ เนื่องจากต้องตรวจสอบทุกจุด ด้วยเหตุนี้การค้นหาทั้งหมดจึงไม่นิยมใช้กับปัญหาที่มีขอบเขตการค้นหาขนาดใหญ่ (Hang and Woods, 1995) ดังนั้นอัลกอริทึมใหม่ที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงกว่าจึงถูกคิดค้นขึ้น เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณและเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

### 3.3.2 วิธีเชิงพันธุกรรม

วิธีเชิงพันธุกรรม เป็นวิธีการในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีแนวคิดมาจากกระบวนการคัดเลือกโดยธรรมชาติ (natural selection) ที่มีลักษณะการทำงานเลียนแบบวิวัฒนาการทางชีววิทยา คือบุคคลที่เหมาะสมที่สุดจะได้รับการคัดเลือกสำหรับการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมเพื่อผลิตลูกหลานในรุ่นต่อไป แนวคิดดังกล่าวนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดโดยจอห์น ฮอลแลนด์ (John Holland) ในปี พ.ศ. 2518 (Yang, 2020) หลักการสำคัญของวิธีเชิงพันธุกรรม คือการสุ่มเลือกคำตอบจากคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยรักษาคำคำตอบที่ดีที่สุดไว้และพัฒนาค่าของคำตอบให้ดีขึ้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดหรือผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงที่ดีที่สุด โดยวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดหลากหลายรูปแบบ เนื่องจากมีจุดเด่นในด้านของความทนทานต่อความผิดพลาดในการหาค่าคำตอบจากปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่มีความซับซ้อน และยุ่งยากในการสร้างแบบจำลองด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ด้วยเหตุนี้วิธีเชิงพันธุกรรมจึงกลายเป็นหนึ่งในอัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด (Schmitt, 2001 และ McCall, 2005)

### 3.3.3 การออกแบบวิธีเชิงพันธุกรรม

งานวิจัยนี้ออกแบบวิธีเชิงพันธุกรรมผ่านโปรแกรม MATLAB โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรมได้เป็น 5 ขั้นตอนหลักได้แก่ 1) ขั้นตอนการสร้างประชากรต้นแบบ (initiation) 2) ขั้นตอนการหาความเหมาะสม (fitness Function) 3) ขั้นตอนการคัดเลือกประชากร (selection) 4) ขั้นตอนการสลับสายพันธุ์ (crossover) และ 5) ขั้นตอนการกลายพันธุ์ (mutation) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม

1) ขั้นตอนการสร้างประชากรต้นแบบ: ขั้นตอนการทำงานเริ่มต้นด้วยการกำหนดขอบเขตปริภูมิการค้นหา ของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเพื่อค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมประกอบด้วย

- มุมเอียง คือมุมที่หลอดแอลอีดีโดยรอบเอียงออกจากหลอดแอลอีดีตรงกลาง โดยกำหนดขอบเขตให้อยู่ในช่วง 1-70 องศา โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 องศา
- มุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี คือมุมของเลนส์กระจายแสงที่ครอบหลอดแอลอีดี โดยกำหนดขอบเขตให้อยู่ในช่วง 10-90 องศา โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 องศา
- รัศมีของหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม โดยกำหนดขอบเขตให้อยู่ในช่วง 0.1-1 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 เมตร

ในการกำหนดขอบเขตของมุมเอียงและรัศมีของหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม ผู้วิจัยจะกำหนดขอบเขตของแต่ละพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับขนาดของพื้นที่ โดย



พิจารณาจากลำแสงของหลอดแอลอีดีที่สามารถครอบคลุมลงบนพื้นที่ทั้งหมดได้ และสำหรับมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี ค่าที่เป็นไปได้ของมุมนี้ได้ถูกอธิบายไว้ในหลายสถานการณ์ (Feng et al., 2013 และ Zeng et al., 2009) ซึ่งมุมนี้สามารถขยายสูงสุดได้ถึง 90 องศา ตามข้อจำกัดของหลอดแอลอีดี

เมื่อกำหนดขอบเขตของแต่ละพารามิเตอร์แล้วจากนั้นผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมในการสร้างประชากรต้นแบบ โดยให้วิธีเชิงพันธุกรรมสามารถสุ่มเลือกองค์ประกอบของประชากรต้นแบบ (population) จากปริญญการค้นหา โดยมีแต่ละองค์ประกอบของประชากรที่ถูกเรียกว่า โครโมโซม (Chromosome) จำนวนหลายโครโมโซมประกอบกัน ซึ่งภายในโครโมโซมแต่ละชุดจะประกอบไปด้วยยีน (Genes) ที่แทนด้วยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบคือ มุมเอียง มุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี และรัศมีของหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลมดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การออกแบบขั้นตอนการสร้างประชากรต้นแบบ

2) ขั้นตอนการหาความเหมาะสม: ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดความสามารถของแต่ละโครโมโซม โดยมีหลักการคือ โครโมโซมแต่ละชุดที่วิธีเชิงพันธุกรรมสุ่มออกมาได้จะถูกนำไปแทนค่าในฟังก์ชันการคำนวณค่าความเหมาะสม เพื่อคำนวณค่าพื้นที่ที่ครอบคลุม บนเงื่อนไขของการส่องสว่างครอบคลุมที่ต้องเท่ากับ 100% คือทุกจุดในพื้นที่ต้องมีค่าความสว่างมากกว่าหรือเท่ากับ 300 ลักซ์ ขึ้นไปตามมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคาร ซึ่งโครโมโซมที่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีจะถูกตัดออกไป เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการโครโมโซมหรือตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบที่ให้ค่าพื้นที่ครอบคลุมสูงสุดเพียงค่าเดียวเท่านั้น

3) ขั้นตอนการคัดเลือกประชากร: ขั้นตอนนี้เป็นการคัดเลือกองค์ประกอบของโครโมโซมที่เหมาะสมที่สุด และส่งต่อยีนของแต่ละโครโมโซมไปยังรุ่นต่อไป ซึ่งองค์ประกอบของโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูงจะยิ่งเพิ่มโอกาสให้ได้รับการคัดเลือกมากขึ้น ในงานวิจัยนี้จะทำการคัดเลือกโครโมโซมที่มีค่าพื้นที่ครอบคลุมสูงสุดมาจับคู่ เพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการสลับสายพันธุ์ต่อไป โดยจะกำหนดค่าน้ำหนักมาก ๆ (weight) ให้กับโครโมโซมที่มีค่าพื้นที่ครอบคลุมสูง เพื่อเพิ่ม

โอกาสในการค้นพบโครโมโซมที่มีค่าพื้นที่ครอบคลุมดีขึ้นเรื่อย ๆ และทำการสุ่มจับคู่โครโมโซมพ่อแม่ตามค่าน้ำหนัก เพื่อเข้าสู่กระบวนการสลับสายพันธุโครโมโซมรุ่นใหม่ต่อไป

ในการคำนวณค่าน้ำหนักของแต่ละโครโมโซม:  $weight_{(i)}$  ของงานวิจัยนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$weight_{(i)} = \frac{ratio_{(i)}}{ratio_{total}} \quad (3.5)$$

โดยที่  $ratio_{(i)}$  คือ อัตราส่วนของค่าพื้นที่ครอบคลุมแต่ละโครโมโซมต่อค่าพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด

$ratio_{total}$  คือ ผลรวมอัตราส่วนของค่าพื้นที่ครอบคลุมแต่ละโครโมโซมต่อค่าพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6

$$ratio_{total} = \sum ratio_{(i)} \quad (3.6)$$

4) ขั้นตอนการสลับสายพันธุ: เมื่อจับคู่โครโมโซมพ่อแม่แต่ละคู่เรียบร้อยแล้ว ในงานวิจัยนี้จะทำการสุ่มตำแหน่งการสลับสายพันธุซึ่งจะถูกสุ่มภายในยีน โดยกำหนดตำแหน่งการสลับสายพันธุคือ ตำแหน่งที่ 1 หรือ ตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ตัวอย่างเช่น วิธีเชิงพันธุกรรมสุ่มตำแหน่งการสลับสายพันธุได้เป็นตำแหน่งที่ 1 จากนั้นจะดำเนินการสลับสายพันธุ ซึ่งจะปรากฏโครโมโซมรุ่นใหม่คือ โครโมโซมลูกหลานสองโครโมโซมจากการแลกเปลี่ยนยีนของโครโมโซมพ่อแม่หนึ่งคู่ โดยจำนวนประชากรจะมีขนาดคงที่เสมอ เมื่อโครโมโซมรุ่นใหม่ก่อตัวขึ้นโครโมโซมรุ่นเก่าที่มีค่าความเหมาะสมน้อยที่สุดจะถูกกำจัดออกไป ทำให้มีพื้นที่ว่างสำหรับโครโมโซมรุ่นใหม่ที่ให้ค่าความเหมาะสมสูงกว่า

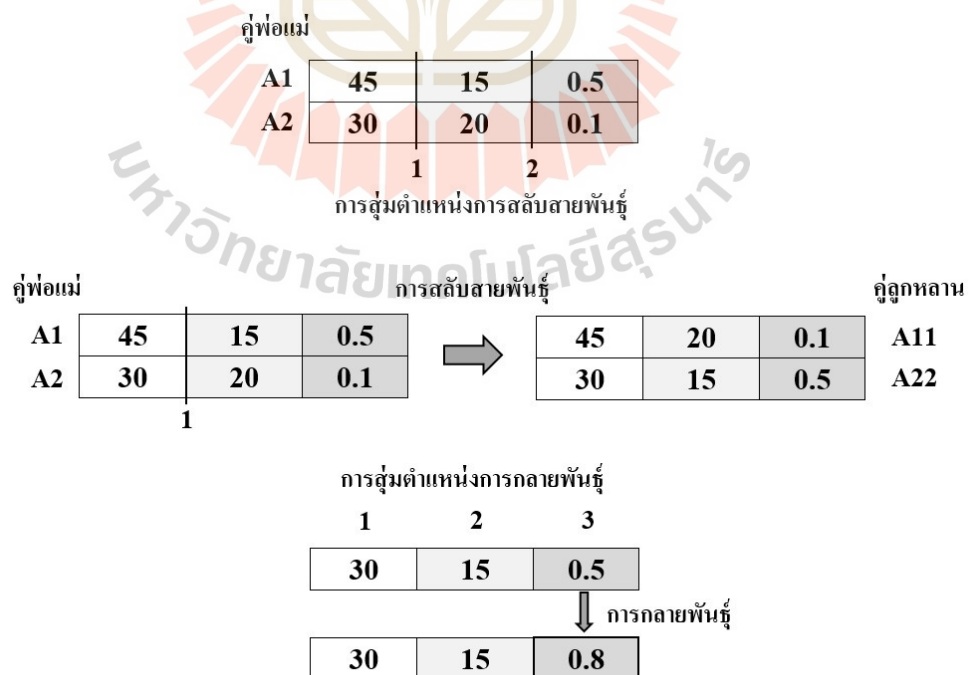
5) ขั้นตอนการกลายพันธุ: ขั้นตอนนี้เป็นการเพิ่มโอกาสในการค้นพบโครโมโซมใหม่ที่ให้ค่าความเหมาะสมที่ดีขึ้น ด้วยกระบวนการกลายพันธุของยีนบางตัวในโครโมโซมลูกหลานรุ่นใหม่ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตำแหน่งการกลายพันธุไว้ทุกตำแหน่งของยีนในโครโมโซม โดยจะทำการสุ่มโอกาสในการกลายพันธุทุกตำแหน่งในยีน หากยีนใดที่มีโอกาสกลายพันธุ ค่าของพารามิเตอร์ที่อยู่ในยีนนั้นจะถูกสุ่มเพื่อหาค่าใหม่อีกครั้งดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า โครโมโซมรุ่นใหม่แต่ละรุ่นยอมให้ค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าโครโมโซมรุ่นก่อน ทำให้สามารถค้นพบโครโมโซมที่มีค่าพื้นที่ครอบคลุมสูงสุดที่สุดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ขั้นตอนสุดท้ายของวิธีเชิงพันธุกรรมคือ การนำโครโมโซมรุ่นใหม่มาคำนวณค่าความเหมาะสมในฟังก์ชันการคำนวณค่าความเหมาะสม เพื่อคำนวณค่าพื้นที่ครอบคลุม จากนั้นจะทำการตรวจสอบว่า ค่าสูงสุดของพื้นที่ครอบคลุมซ้ำกันมากกว่าหรือเท่ากับ 5 ครั้ง และมีความเที่ยงตรงมากกว่าหรือเท่ากับ 30% หรือไม่ หากไม่ใช่จะดำเนินการคัดเลือกประชากร การสลับสายพันธุ์ และการกลายพันธุ์ใหม่อีกครั้ง แต่หากใช่ วิธีเชิงพันธุกรรมจะยุติลง และจะได้ผลลัพธ์คือตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

ความเที่ยงตรง (precision) ของวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยนี้ คือความใกล้เคียงกันของกลุ่มผลลัพธ์กับค่าพื้นที่ครอบคลุมที่มากที่สุด โดยค่าความเที่ยงตรง: *precision* คำนวณจากสมการที่ 3.7

$$precision = \frac{ratio_{total}}{n_{pop}} \times 100 \quad (3.7)$$

โดยที่  $ratio_{total}$  คือ ผลรวมอัตราส่วนของค่าพื้นที่ครอบคลุมแต่ละโครโมโซมต่อค่าพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด  
 $n_{pop}$  คือ จำนวนประชากร



รูปที่ 3.5 การออกแบบขั้นตอนการสลับสายพันธุ์ และขั้นตอนการกลายพันธุ์

### 3.4 กล่าวสรุป

จากเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นในบทนี้ได้อธิบายถึงการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลมที่สามารถรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีแต่ละดวงด้วยวิธีการแยกชุดข้อมูล เพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน และเสนอการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ในการสื่อสารสูงสุดบนพื้นฐานของมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคาร นอกจากนี้ประสิทธิภาพของวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการค้นหาทั้งหมด ซึ่งจะมีรายละเอียดกล่าวในบทถัดไป



## บทที่ 4

### ผลการจำลองแบบ

#### 4.1 กล่าวนำ

จากการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยการออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม และการออกแบบวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ในการสื่อสารสูงสุดบนพื้นฐานของมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคารในบทที่ผ่านมา เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการตั้งค่าการจำลองแบบ และผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรม MATLAB โดยประสิทธิภาพของวิธีเชิงพันธุกรรมถูกวิเคราะห์จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการค้นหาทั้งหมด ทั้งทางด้านการส่องสว่างและทางด้านการสื่อสาร นอกจากนี้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้งานด้วยเทคนิคการสลับลำแสงและแบบดั้งเดิม

#### 4.2 การตั้งค่าการจำลองแบบ

ผู้วิจัยได้ออกแบบสถานการณ์ในการจำลองแบบ โดยกำหนดขนาดของพื้นที่เท่ากับขนาดห้องมาตรฐานที่นิยมใช้งานทั่วไปภายในอาคาร จำนวนของหลอดแอลอีดี และกำลังงานของหลอดแอลอีดี ถูกกำหนดให้มีความเหมาะสมกับขนาดของพื้นที่ โดยจะแบ่งสถานการณ์ในการจำลองออกเป็นสี่สถานการณ์ดังตารางที่ 4.1 จากนั้นจะใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มาค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบหลอดแอลอีดีที่มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุด ซึ่งถูกกำหนดจากพื้นที่ที่สามารถทำการสื่อสารได้ที่มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $10^{-3}$  บนพื้นฐานของการส่องสว่างครอบคลุมที่มีค่าความสว่างมากกว่าหรือเท่ากับ 300 ลักซ์ ขึ้นไปตามมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคาร โดยขั้นตอนการจำลองแบบจะแบ่งออกเป็น 5 กรณี ได้แก่

1) การจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบที่กล่าวในข้างต้น เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุด บนพื้นฐานของการส่องสว่างครอบคลุมตามมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคาร

2) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการค้นหาทั้งหมดในการค้นหาผลลัพธ์จากทุกค่าที่อยู่ในขอบเขตของปริภูมิการค้นหา และวิธีเชิงพันธุกรรม

- 3) การวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางการส่องสว่าง
- 4) การวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางการสื่อสาร
- 5) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคนิคการสลับลำแสงและแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 4.1 การตั้งค่าการจำลองแบบ

สถานการณ์	ปริมาตร (กxยxส) (ลูกบาศก์เมตร)	จำนวนหลอดแอลอีดี (ดวง)	กำลังงานหลอดแอลอีดี หนึ่งดวง (วัตต์)
1	5x5x3	9	10
2	5x5x3	12	7
3	4x5x3	8	7
4	6x6x3	12	10

### 4.3 ผลการจำลองแบบ

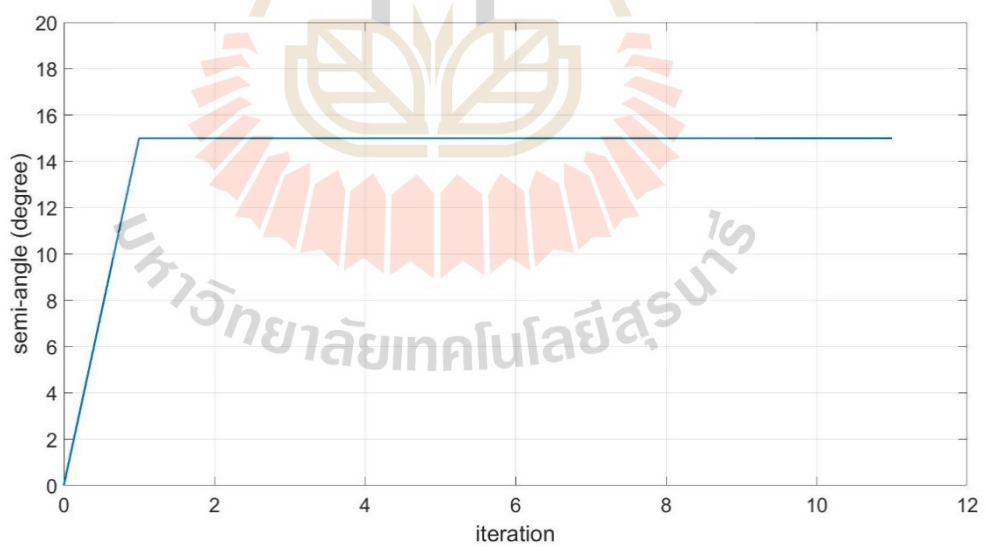
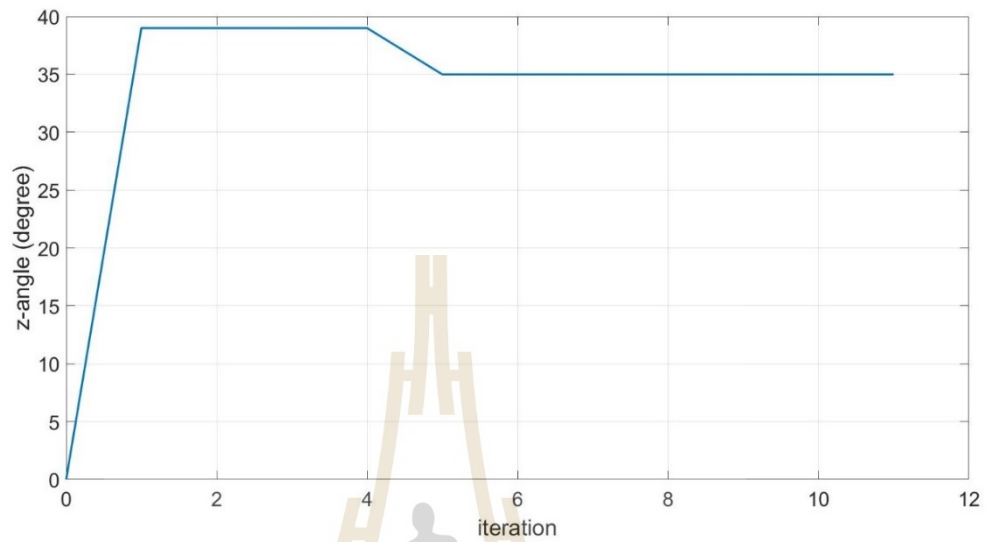
#### 4.3.1 การจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้จำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบ เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุด บนพื้นฐานของการส่องสว่างครอบคลุมตามมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคาร ผ่านโปรแกรม MATLAB ซึ่งผู้วิจัยได้คัดเลือกผลลัพธ์ที่ดีที่สุดหลังจากดำเนินการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง ในแต่ละสถานการณ์ตามที่เสนอดังต่อไปนี้

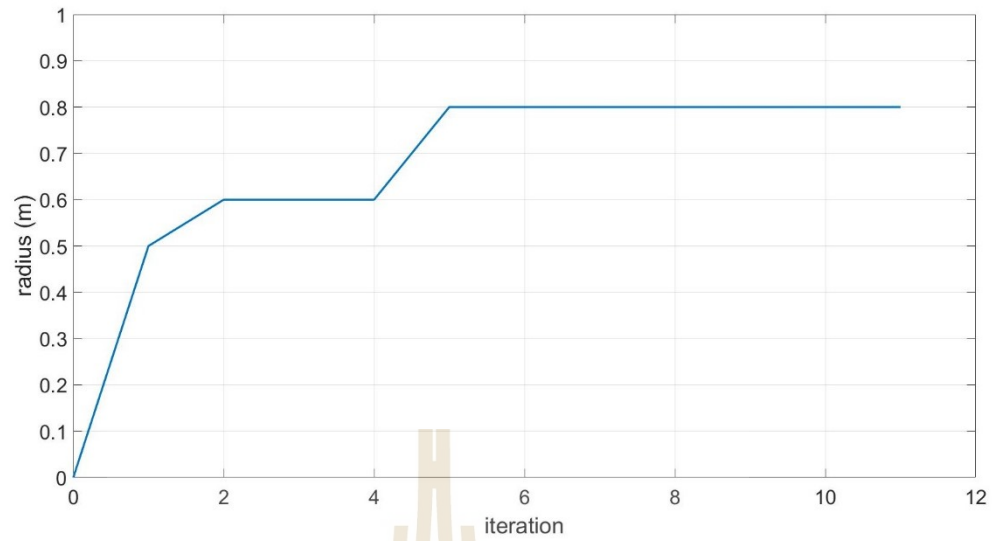
**สถานการณ์ที่ 1:** ปริมาตรขนาด 5x5x3 ลูกบาศก์เมตร หลอดแอลอีดีจำนวน 9 ดวง และกำลังงานของหลอดแอลอีดีหนึ่งดวงเท่ากับ 10 วัตต์

รูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 1 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดหลังจากการทดสอบ 5 ครั้ง โดยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีเชิงพันธุกรรมที่สามารถค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุดหลังจากการวนซ้ำทั้งหมด 11 รอบ ในรูปที่ 4.1 (ก) แสดงการวนซ้ำของมุมเอียง โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของมุมเอียงเท่ากับ 35 องศา รูปที่ 4.1 (ข) แสดงการวนซ้ำของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดีเท่ากับ 15 องศา รูปที่ 4.1 (ค) แสดงการวนซ้ำของรัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับ โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของรัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับเท่ากับ 0.8 เมตร และในรูปที่ 4.1 (ง) แสดงการวนซ้ำของพื้นที่ครอบคลุม

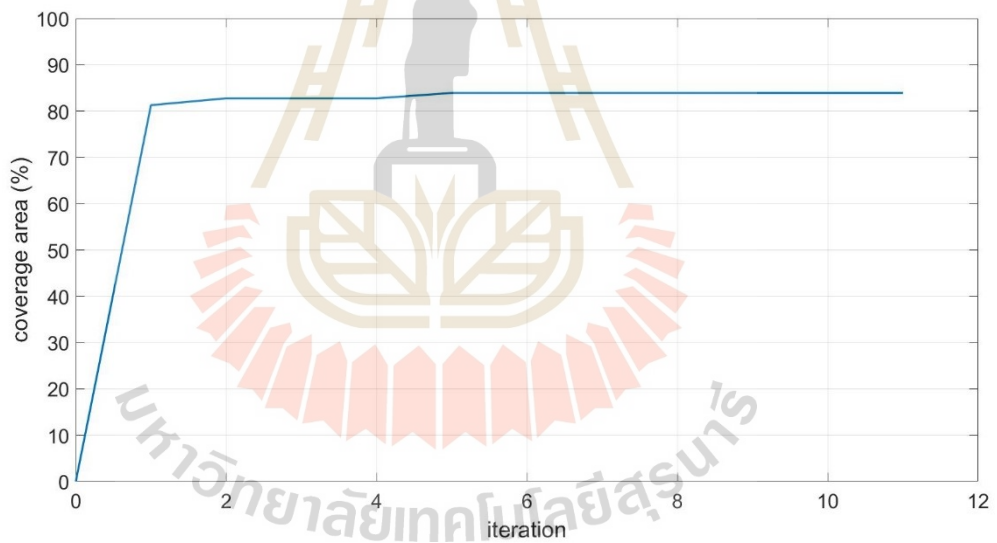
สูงสุด ซึ่ง ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบจะมีค่าพื้นที่ครอบคลุมเท่ากับ 83.922%



(ข)



(ค)



(ง)

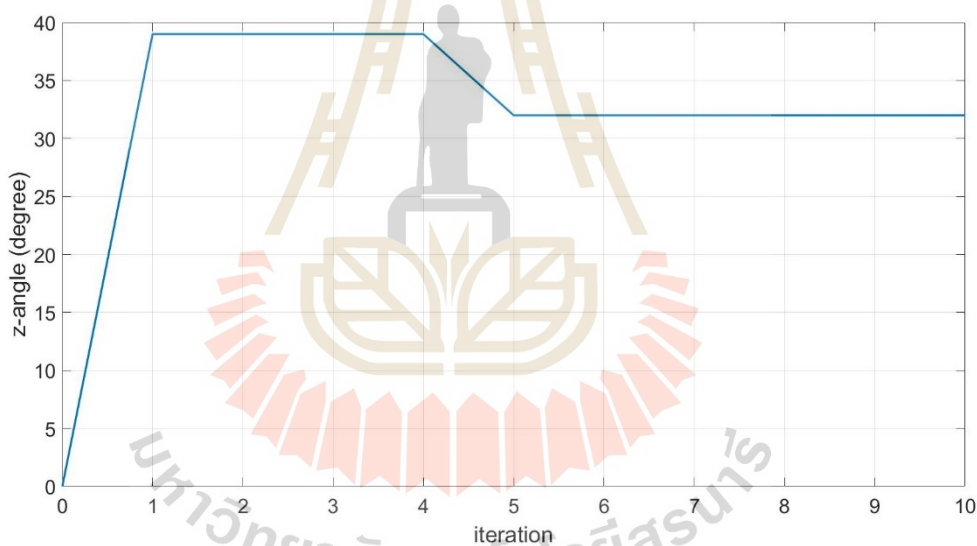
**รูปที่ 4.1** ผลการจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 1

- (ก) การวนซ้ำของมุมเอียงถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ข) การวนซ้ำของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดีถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ค) การวนซ้ำของรัศมีหลอดแอลอีดีแถวลำดับถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ง) การวนซ้ำของพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด

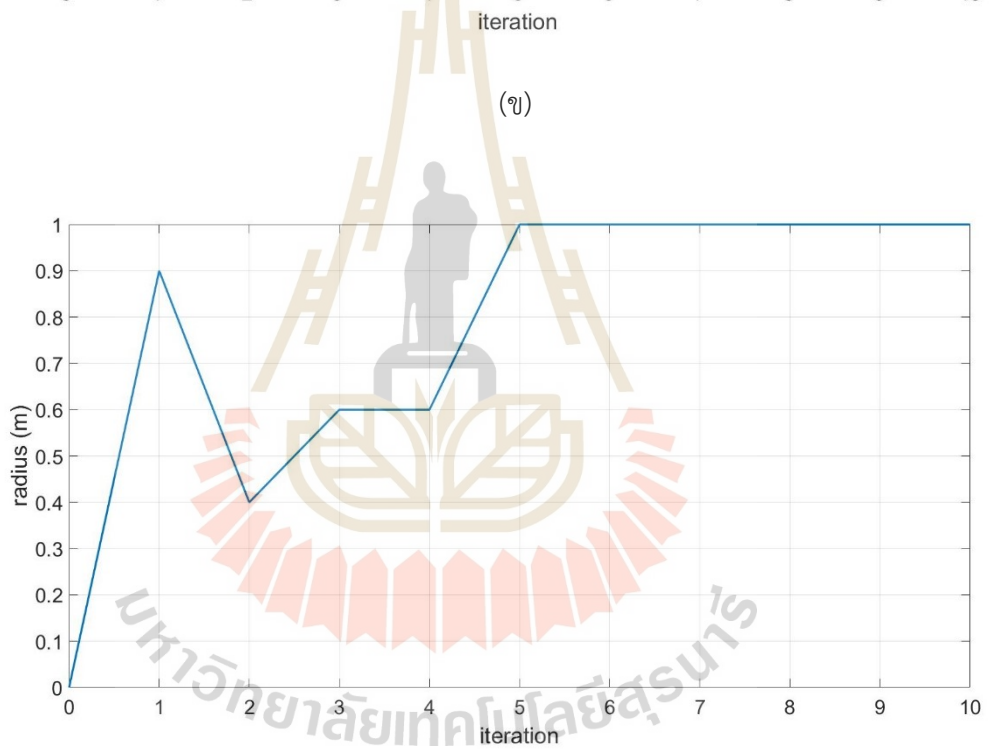
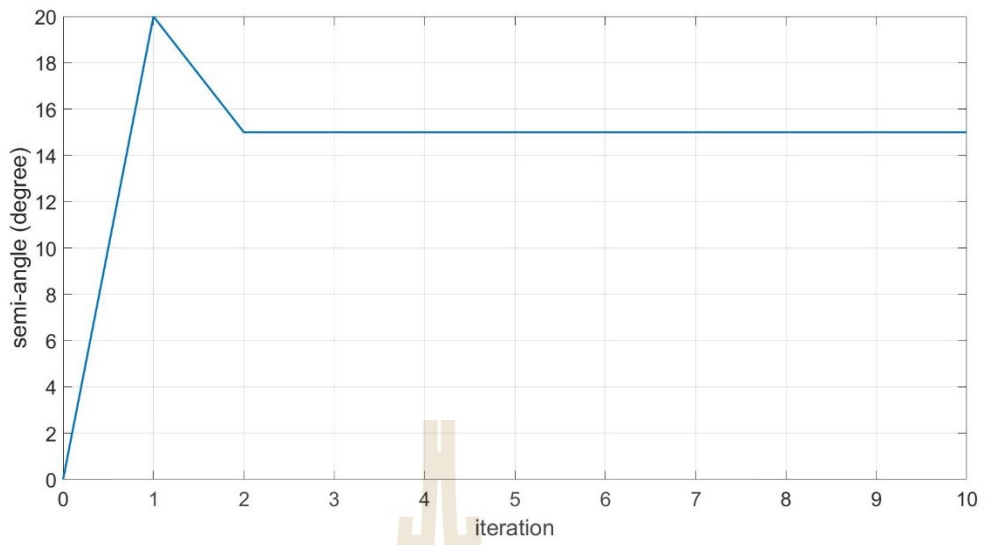


**สถานการณ์ที่ 2:** ปริมาตรขนาด  $5 \times 5 \times 3$  ลูกบาศก์เมตร หลอดแอลอีดีจำนวน 12 ดวง และกำลังงานของหลอดแอลอีดีหนึ่งดวงเท่ากับ 7 วัตต์

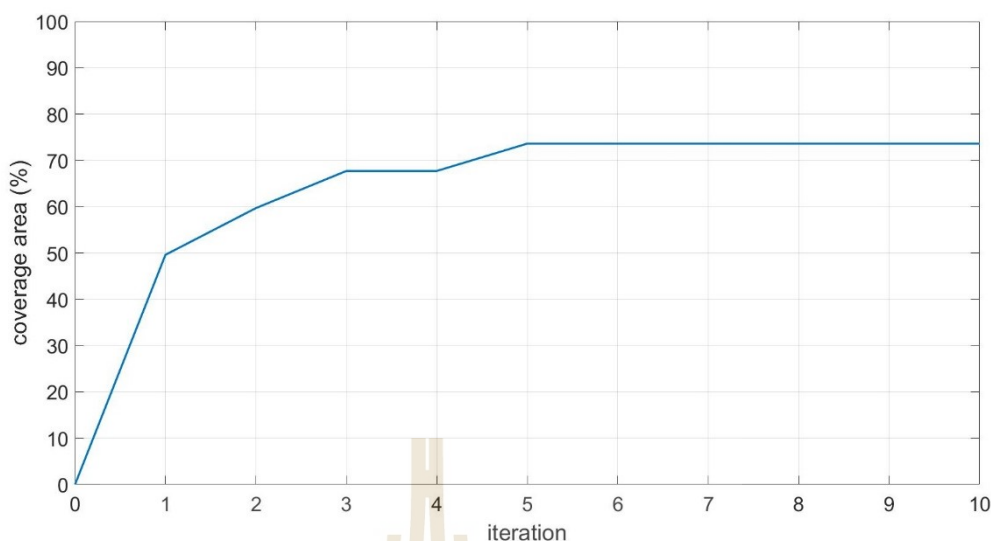
รูปที่ 4.2 แสดงผลการจำลองแบบโดยการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 2 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดหลังจากการทดสอบ 5 ครั้ง โดยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีเชิงพันธุกรรมที่สามารถค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุดหลังจากการวนซ้ำทั้งหมด 10 รอบ ในรูปที่ 4.2 (ก) แสดงการวนซ้ำของมุมเอียง โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของมุมเอียงเท่ากับ 32 องศา รูปที่ 4.2 (ข) แสดงการวนซ้ำของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดีเท่ากับ 15 องศา รูปที่ 4.2 (ค) แสดงการวนซ้ำของรัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับ โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของรัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับเท่ากับ 1 เมตร และในรูปที่ 4.2 (ง) แสดงการวนซ้ำของพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด ซึ่ง ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบจะมีค่าพื้นที่ครอบคลุมเท่ากับ 73.622%



(ก)



(ค)



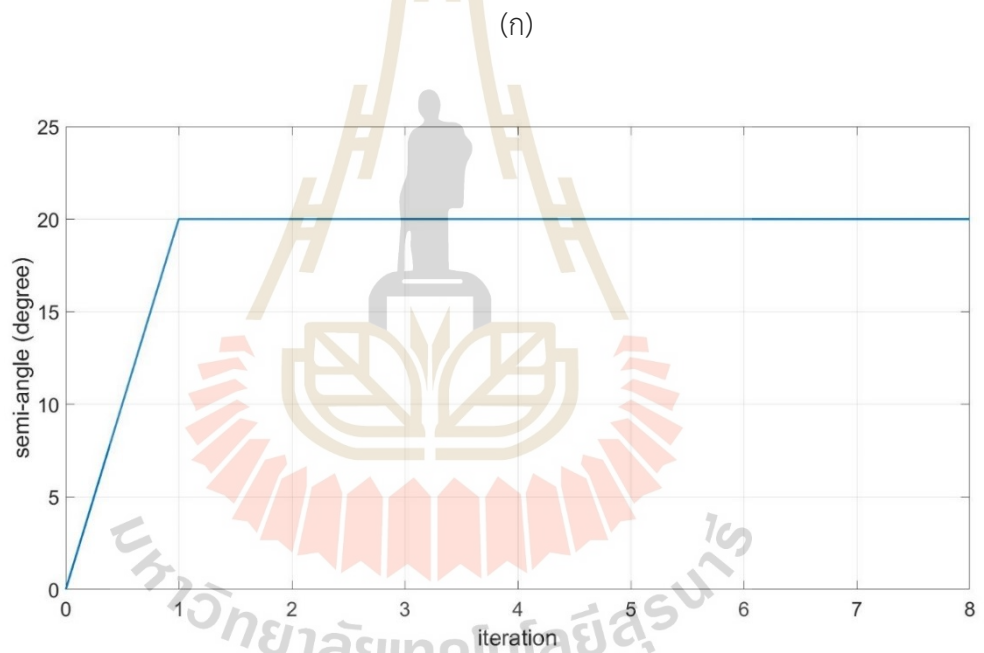
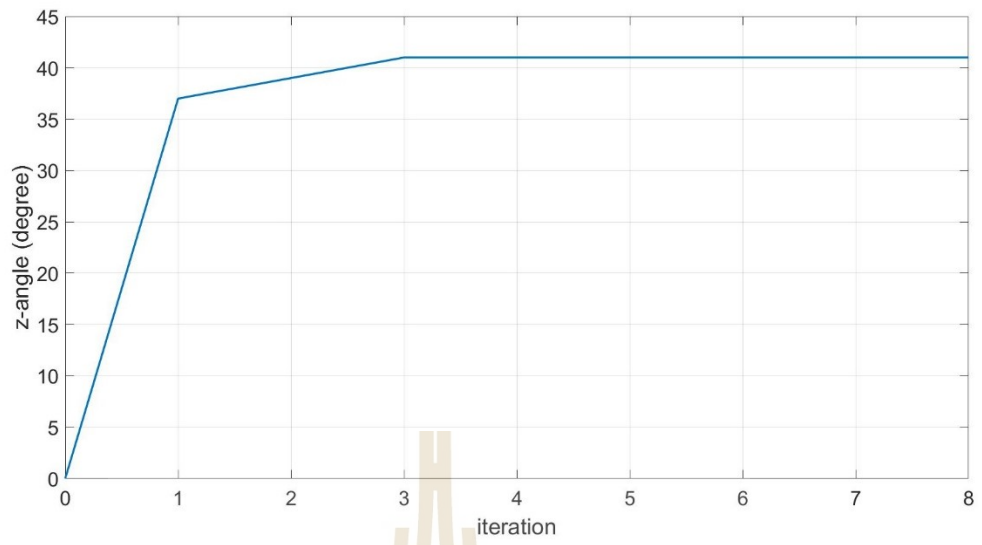
(ง)

#### รูปที่ 4.2 ผลการจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 2

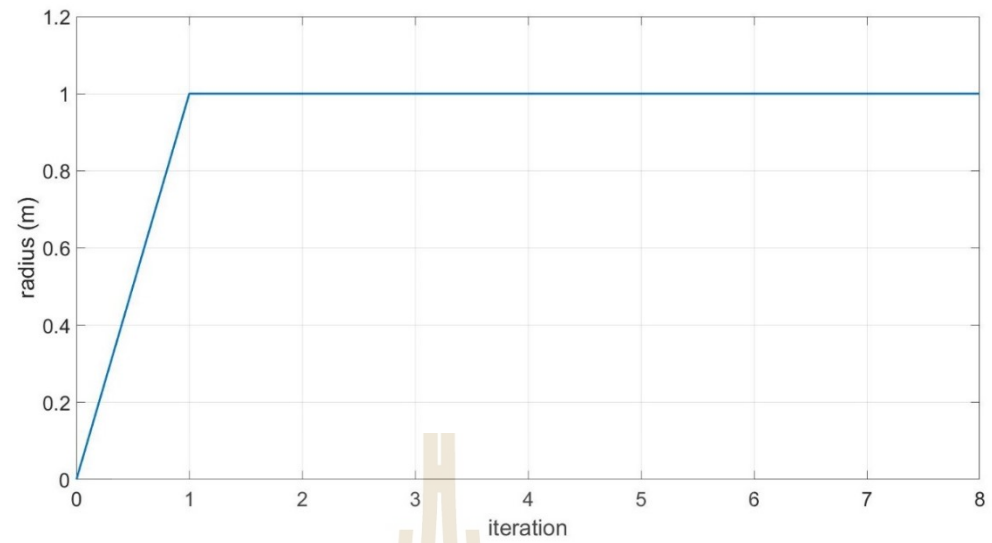
- (ก) การวนซ้ำของมุมเอียงถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ข) การวนซ้ำของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดีถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ค) การวนซ้ำของรัศมีหลอดแอลอีดีแถวลำดับถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ง) การวนซ้ำของพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด

**สถานการณ์ที่ 3:** ปริมาตรขนาด  $4 \times 5 \times 3$  ลูกบาศก์เมตร หลอดแอลอีดีจำนวน 8 ดวง และกำลังงานของหลอดแอลอีดีหนึ่งดวงเท่ากับ 7 วัตต์

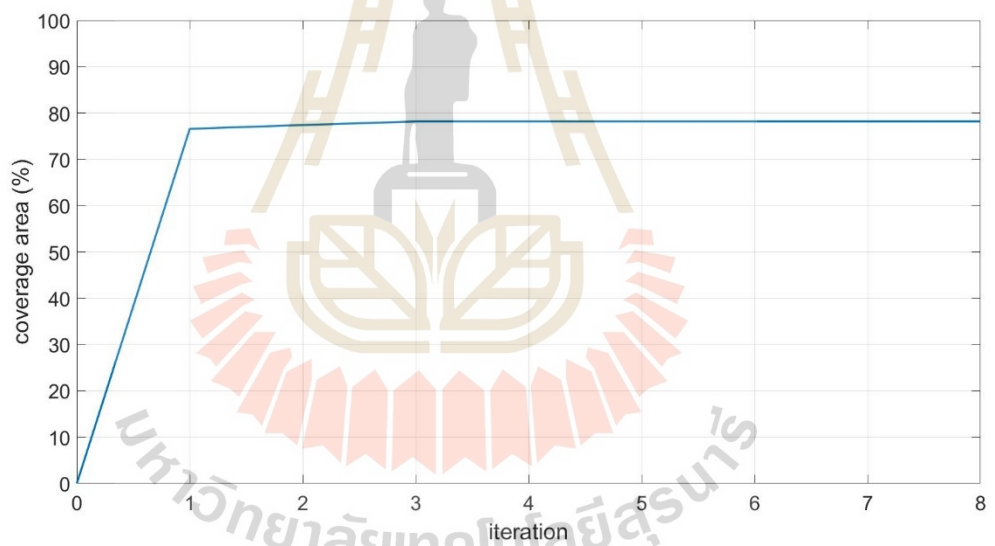
รูปที่ 4.3 แสดงผลการจำลองแบบโดยการใช่วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 3 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดหลังจากการทดสอบ 5 ครั้ง โดยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีเชิงพันธุกรรมที่สามารถค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุดหลังจากการวนซ้ำทั้งหมด 8 รอบ ในรูปที่ 4.3 (ก) แสดงการวนซ้ำของมุมเอียง โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของมุมเอียงเท่ากับ 41 องศา รูปที่ 4.3 (ข) แสดงการวนซ้ำของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดีเท่ากับ 20 องศา รูปที่ 4.3 (ค) แสดงการวนซ้ำของรัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับ โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของรัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับเท่ากับ 1 เมตร และในรูปที่ 4.3 (ง) แสดงการวนซ้ำของพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด ซึ่ง ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบจะมีค่าพื้นที่ครอบคลุมเท่ากับ 78.181%



(ข)



(ค)



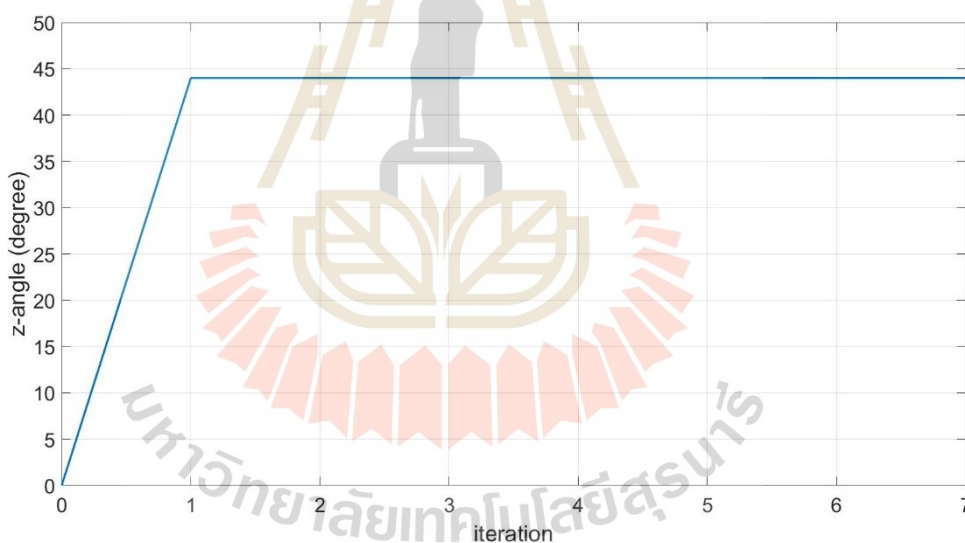
(ง)

### รูปที่ 4.3 ผลการจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 3

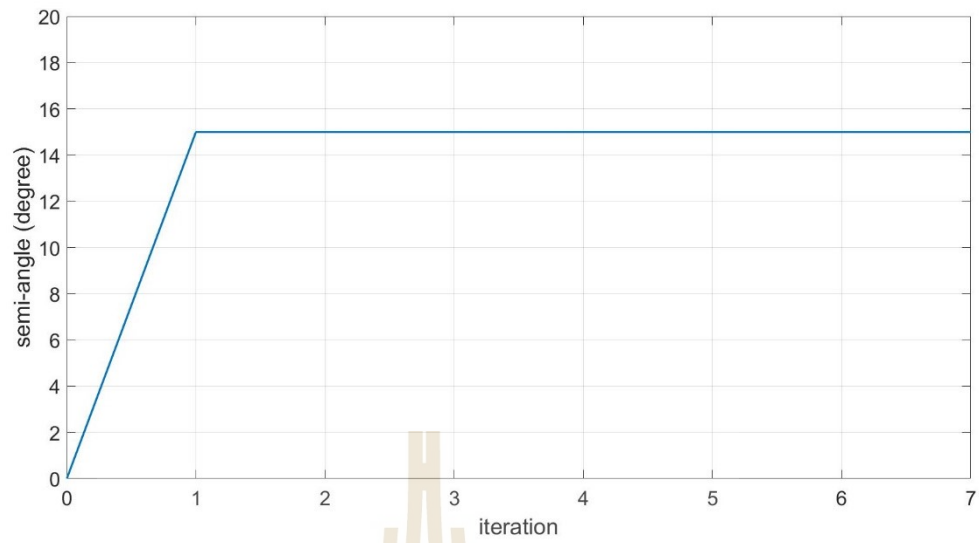
- (ก) การวนซ้ำของมุมเอียงถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ข) การวนซ้ำของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดีถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ค) การวนซ้ำของรัศมีหลอดแอลอีดีแถวลำดับถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ง) การวนซ้ำของพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด

**สถานการณ์ที่ 4:** ปริมาตรขนาด  $6 \times 6 \times 3$  ลูกบาศก์เมตร หลอดแอลอีดีจำนวน 12 ดวง และกำลังงานของหลอดแอลอีดีหนึ่งดวงเท่ากับ 10 วัตต์

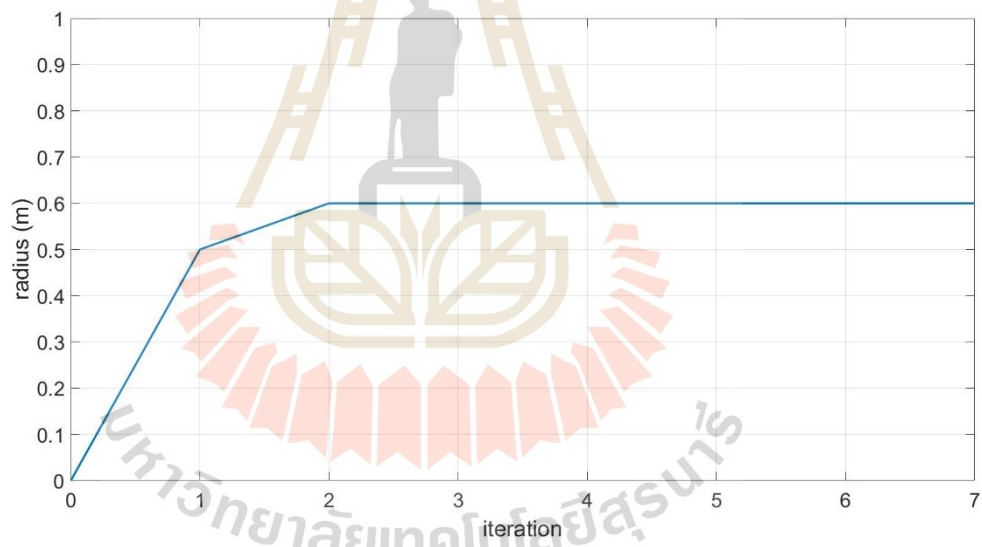
รูปที่ 4.4 แสดงผลการจำลองแบบโดยการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 4 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดหลังจากการทดสอบ 5 ครั้ง โดยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีเชิงพันธุกรรมที่สามารถค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุดหลังจากการวนซ้ำทั้งหมด 7 รอบ ในรูปที่ 4.4 (ก) แสดงการวนซ้ำของมุมเอียง โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของมุมเอียงเท่ากับ 44 องศา รูปที่ 4.4 (ข) แสดงการวนซ้ำของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดีเท่ากับ 15 องศา รูปที่ 4.4 (ค) แสดงการวนซ้ำของรัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับ โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของรัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับเท่ากับ 0.6 เมตร และในรูปที่ 4.4 (ง) แสดงการวนซ้ำของพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด ซึ่ง ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบจะมีค่าพื้นที่ครอบคลุมเท่ากับ 73.677%



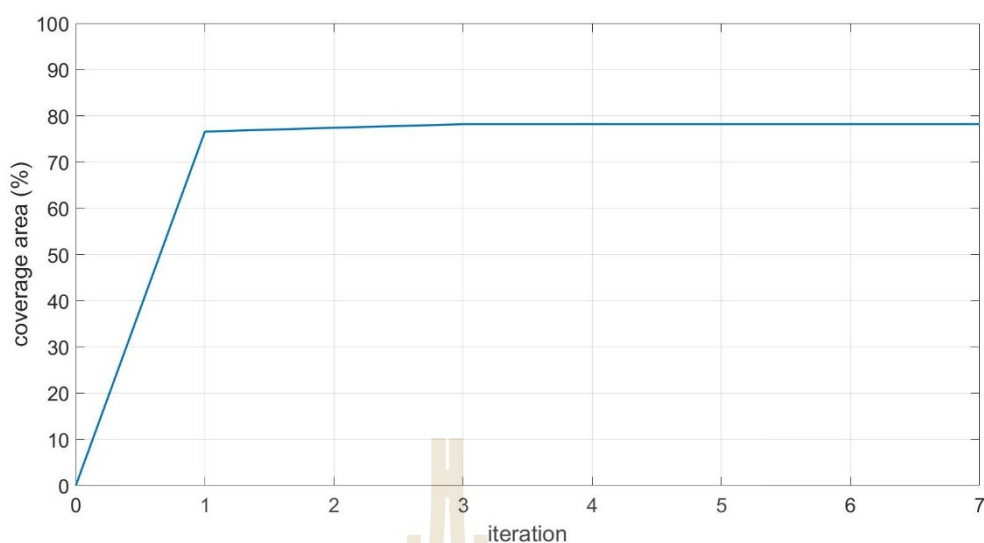
(ก)



(๗)



(ค)



(ง)

#### รูปที่ 4.4 ผลการจำลองแบบโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในสถานการณ์ที่ 4

- (ก) การวนซ้ำของมุมเอียงถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ข) การวนซ้ำของมุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดีถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ค) การวนซ้ำของรัศมีหลอดแอลอีดีแถวลำดับถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- (ง) การวนซ้ำของพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด

จากผลการจำลองแบบโดยการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบ เพื่อให้มีพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุดทั้งสี่สถานการณ์จำลองแบบที่นำเสนอ พารามิเตอร์การออกแบบแต่ละตัวในรูปที่ 4.1-4.4 (ก) (ข) (ค) แสดงให้เห็นถึงการปรับขึ้น-ลงในการวนซ้ำแต่ละรอบ เนื่องจากวิธีเชิงพันธุกรรมพยายามปรับพารามิเตอร์การออกแบบให้เข้ากับตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้มีพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด นอกจากนี้จะพบว่าค่าพื้นที่ครอบคลุมดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.4 (ง) แสดงการปรับค่าพื้นที่ครอบคลุมที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ในการวนซ้ำแต่ละรอบจนพบค่าพื้นที่ครอบคลุมที่สูงที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถใช้ในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบ เพื่อให้มีพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ในการสื่อสารสูงสุดได้



#### 4.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการค้นหาทั้งหมดและวิธีเชิงพันธุกรรม

หลังจากการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้มีพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ในการสื่อสารสูงสุดในแต่ละสถานการณ์จำลองที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความถูกต้องของวิธีเชิงพันธุกรรม โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีเชิงพันธุกรรมกับการค้นหาทั้งหมด ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ตรวจสอบค่าทุกจุดภายในขอบเขตของปริภูมิการค้นหา โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการค้นหาทั้งหมดและวิธีเชิงพันธุกรรมในแต่ละสถานการณ์จำลองแสดงให้เห็นดังตารางที่ 4.2-4.5

**สถานการณ์ที่ 1:** ปริมาตรขนาด 5x5x3 ลูกบาศก์เมตร หลอดแอลอีดีจำนวน 9 ดวง และกำลังงานของหลอดแอลอีดีหนึ่งดวงเท่ากับ 10 วัตต์

**ตารางที่ 4.2** ผลการจำลองแบบของสถานการณ์ที่ 1

พารามิเตอร์	อัลกอริทึม	
	การค้นหาทั้งหมด	วิธีเชิงพันธุกรรม
มุมเอียงของหลอดแอลอีดี (องศา)	35	35
มุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี (องศา)	15	15
รัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับ (เมตร)	0.8	0.8
พื้นที่ครอบคลุม (%)	83.922	83.922
เวลา (นาที)	480	87

**สถานการณ์ที่ 2:** ปริมาตรขนาด 5x5x3 ลูกบาศก์เมตร หลอดแอลอีดีจำนวน 12 ดวง และกำลังงานของหลอดแอลอีดีหนึ่งดวงเท่ากับ 7 วัตต์

**ตารางที่ 4.3** ผลการจำลองแบบของสถานการณ์ที่ 2

พารามิเตอร์	อัลกอริทึม	
	การค้นหาทั้งหมด	วิธีเชิงพันธุกรรม
มุมเอียงของหลอดแอลอีดี (องศา)	32	32
มุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี (องศา)	15	15
รัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับ (เมตร)	1	1
พื้นที่ครอบคลุม (%)	73.622	73.622
เวลา (นาที)	480	87

**สถานการณ์ที่ 3:** ปริมาตรขนาด 4×5×3 ลูกบาศก์เมตร หลอดแอลอีดีจำนวน 8 ดวง และกำลังงานของหลอดแอลอีดีหนึ่งดวงเท่ากับ 7 วัตต์

**ตารางที่ 4.4** ผลการจำลองแบบของสถานการณ์ที่ 3

พารามิเตอร์	อัลกอริทึม	
	การค้นหาทั้งหมด	วิธีเชิงพันธุกรรม
มุมเอียงของหลอดแอลอีดี (องศา)	41	41
มุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี (องศา)	20	20
รัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับ (เมตร)	1	1
พื้นที่ครอบคลุม (%)	78.181	78.181
เวลา (นาทีก)	480	61

**สถานการณ์ที่ 4:** ปริมาตรขนาด 6×6×3 ลูกบาศก์เมตร หลอดแอลอีดีจำนวน 12 ดวง และกำลังงานของหลอดแอลอีดีหนึ่งดวงเท่ากับ 10 วัตต์

**ตารางที่ 4.5** ผลการจำลองแบบของสถานการณ์ที่ 4

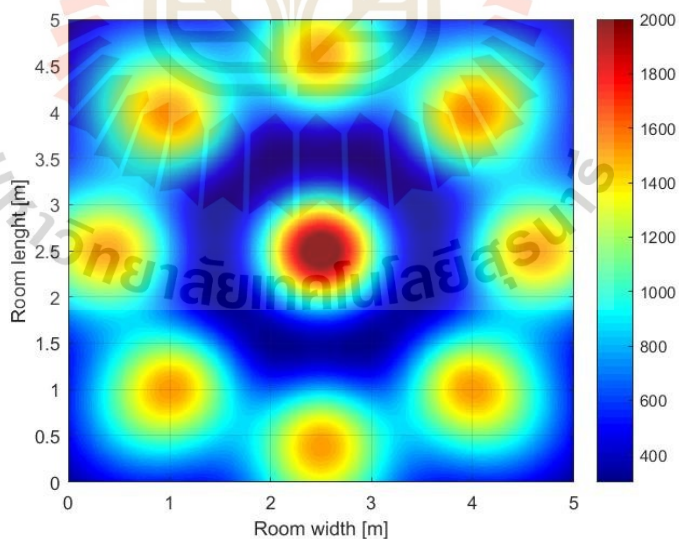
พารามิเตอร์	อัลกอริทึม	
	การค้นหาทั้งหมด	วิธีเชิงพันธุกรรม
มุมเอียงของหลอดแอลอีดี (องศา)	44	44
มุมครึ่งกำลังของหลอดแอลอีดี (องศา)	15	15
รัศมีของหลอดแอลอีดีแถวลำดับ (เมตร)	0.6	0.6
พื้นที่ครอบคลุม (%)	73.677	73.677
เวลา (นาทีก)	480	157

จากตารางที่ 4.2-4.5 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการค้นหาทั้งหมดและวิธีเชิงพันธุกรรมทั้งสี่สถานการณ์จำลองแบบที่น่าเสนอ โดยทั้งสองอัลกอริทึมแสดงค่าพารามิเตอร์การออกแบบ ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ให้ค่าพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุดตรงกัน โดยการค้นหาทั้งหมดใช้เวลาในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีค่าพื้นที่ครอบคลุมสูงสุดนานถึง 480 นาที ในทุกสถานการณ์จำลองแบบ เนื่องจากเป็นอัลกอริทึมที่ตรวจสอบค่าทุกจุดภายในขอบเขตของปริภูมิการค้นหา ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะมีความถูกต้อง

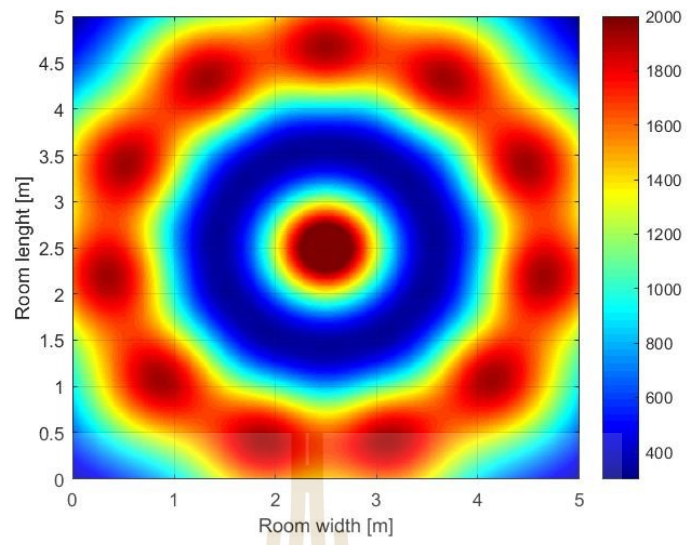
ต้องและแม่นยำมากที่สุด ในขณะที่วิธีเชิงพันธุกรรมสามารถค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีค่าพื้นที่ครอบคลุมสูงสุด โดยใช้เวลาในการค้นหาผลลัพธ์น้อยกว่าการค้นหาทั้งหมด ซึ่งในสถานการณ์ที่ 1 และ 2 วิธีเชิงพันธุกรรมสามารถลดเวลาในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีค่าพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุดลงได้ 393 นาที เช่นเดียวกับในสถานการณ์ที่ 3 และ 4 วิธีเชิงพันธุกรรมสามารถลดเวลาในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีค่าพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารสูงสุดลงได้ 419 นาที และ 323 นาที ตามลำดับ โดยเฉลี่ยวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถลดเวลาในการค้นหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดลงได้ประมาณ 382 นาที ซึ่งใช้เวลาในการค้นหาผลลัพธ์รวดเร็วกว่าการค้นหาทั้งหมดประมาณ 80% ในสถานการณ์จำลองแบบที่นำเสนอ

#### 4.3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางการส่องสว่าง

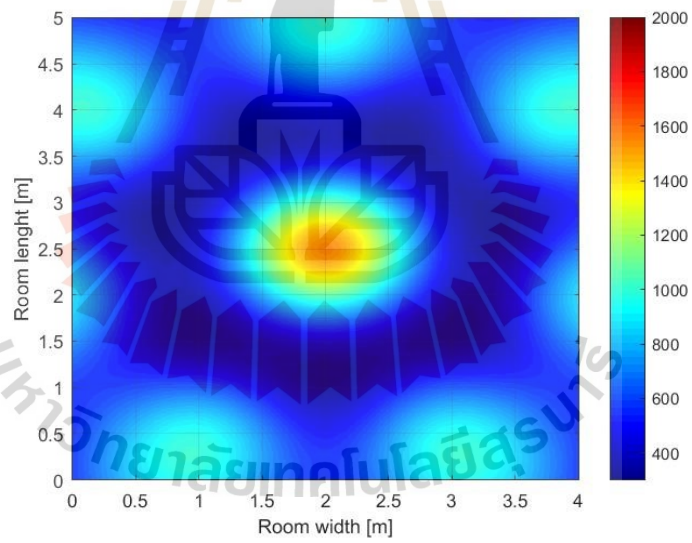
ประสิทธิภาพทางการส่องสว่างในงานวิจัยนี้พิจารณาจากการแพร่กระจายความเข้มการส่องสว่างของทุกจุดในพื้นที่ โดยต้องมีค่าความสว่างมากกว่าหรือเท่ากับ 300 ลักซ์ ขึ้นไปตามมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคารของ CIE ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งวิธีเชิงพันธุกรรมและการค้นหาทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าทุกจุดในพื้นที่ที่มีค่าความสว่างมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ ดังนั้นการส่องสว่างครอบคลุมจึงเท่ากับ 100% ในทุกสถานการณ์จำลองแบบดังแสดงในรูปที่ 4.5



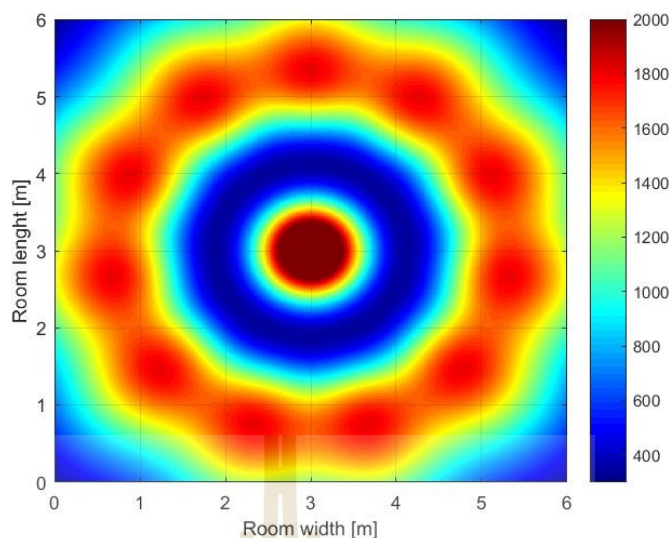
(ก)



(จ)



(ค)



(ง)

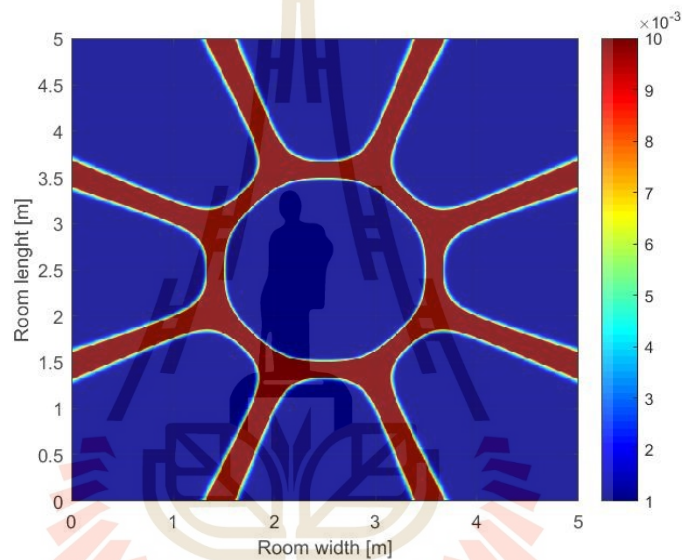
#### รูปที่ 4.5 การแพร่กระจายความเข้มแสงของการส่องสว่าง

- (ก) การแพร่กระจายความเข้มแสงในสถานการณ์ที่ 1
- (ข) การแพร่กระจายความเข้มแสงในสถานการณ์ที่ 2
- (ค) การแพร่กระจายความเข้มแสงในสถานการณ์ที่ 3
- (ง) การแพร่กระจายความเข้มแสงในสถานการณ์ที่ 4

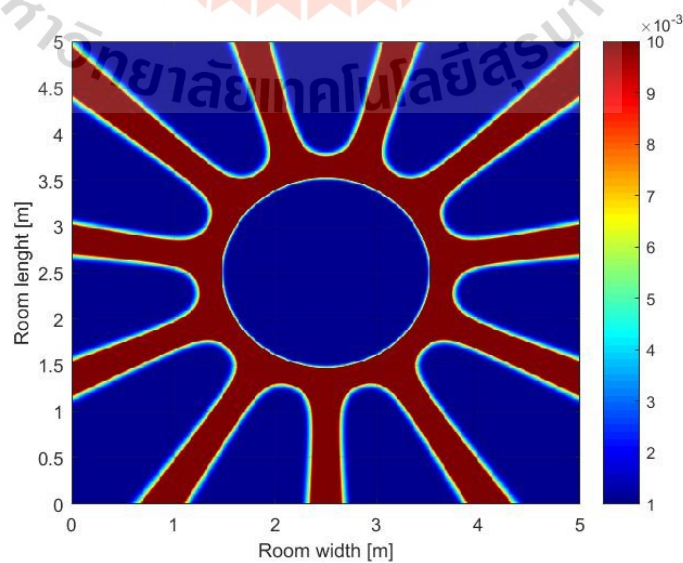
จากรูปที่ 4.5 (ก) แสดงการแพร่กระจายความเข้มแสงในสถานการณ์ที่ 1 ซึ่งมีค่าความสว่างโดยเฉลี่ยประมาณ 838 ลักซ์ รูปที่ 4.5 (ข) แสดงการแพร่กระจายความเข้มแสงในสถานการณ์ที่ 2 ซึ่งมีค่าความสว่างโดยเฉลี่ยประมาณ 1217 ลักซ์ รูปที่ 4.5 (ค) แสดงการแพร่กระจายความเข้มแสงในสถานการณ์ที่ 3 ซึ่งมีค่าความสว่างโดยเฉลี่ยประมาณ 620 ลักซ์ และรูปที่ 4.5 (ง) แสดงการแพร่กระจายความเข้มแสงในสถานการณ์ที่ 4 ซึ่งมีค่าความสว่างโดยเฉลี่ยประมาณ 1197 ลักซ์ โดยทั้งสี่สถานการณ์จำลองแบบมีความสว่างเพียงพอต่อการใช้งานที่เหมาะสมภายในอาคาร ซึ่งมีค่าความสว่างอย่างน้อย 300-2000 ลักซ์ เป็นไปตามค่ามาตรฐานความสว่างภายในอาคาร

#### 4.3.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางการสื่อสาร

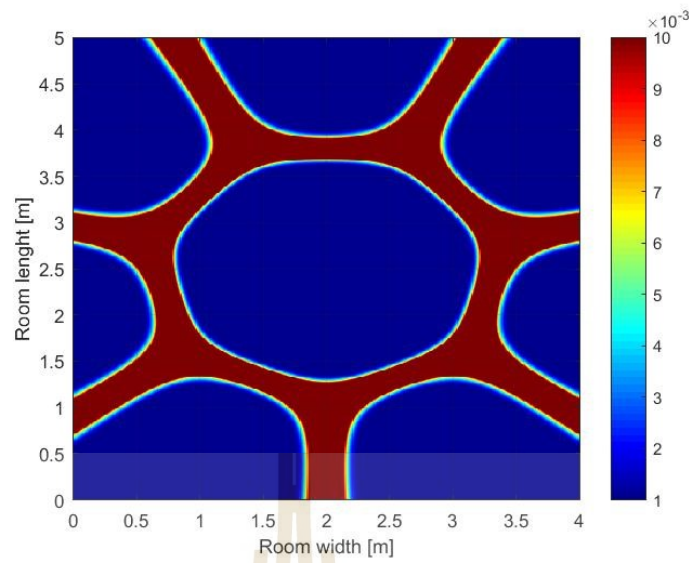
ประสิทธิภาพทางการสื่อสารในงานวิจัยนี้พิจารณาจากค่าพื้นที่ครอบคลุม ซึ่งถูกกำหนดจากพื้นที่ที่สามารถทำการสื่อสารได้ ณ ตำแหน่งบนระนาบภาครับที่มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $10^{-3}$  ตามค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่สามารถยอมรับได้สำหรับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยค่าพื้นที่ครอบคลุมสูงสุดของแต่ละสถานการณ์จำลองแบบที่ได้หลังจากการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบมีค่าเท่ากับ 83.922% 73.622% 78.181% และ 73.677% ในสถานการณ์จำลองแบบที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.6



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

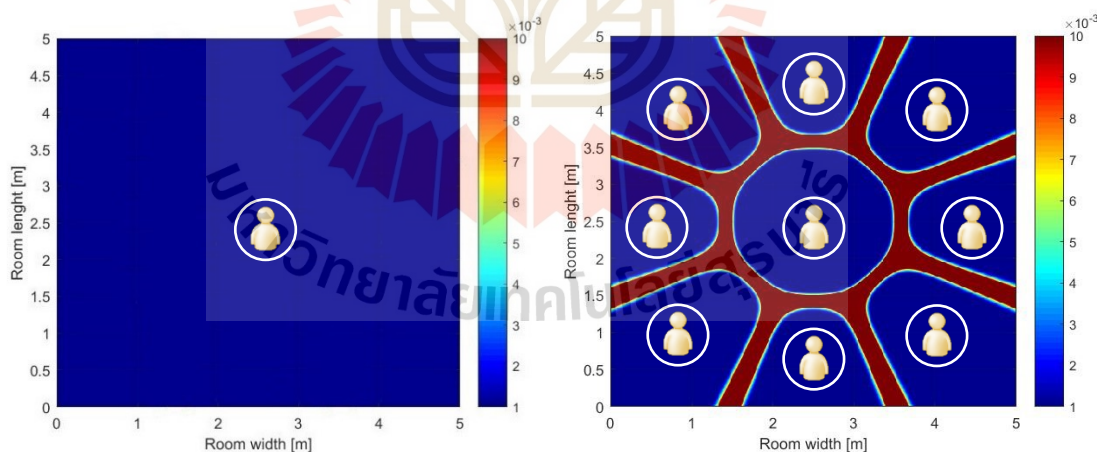
#### รูปที่ 4.6 การแพร่กระจายค่าอัตราความผิดพลาด

- (ก) การแพร่กระจายค่าอัตราความผิดพลาดในสถานการณ์ที่ 1
- (ข) การแพร่กระจายค่าอัตราความผิดพลาดในสถานการณ์ที่ 2
- (ค) การแพร่กระจายค่าอัตราความผิดพลาดในสถานการณ์ที่ 3
- (ง) การแพร่กระจายค่าอัตราความผิดพลาดในสถานการณ์ที่ 4

จากรูปที่ 4.6 (ก) – 4.6 (ง) แสดงการแพร่กระจายค่าอัตราความผิดพลาดบิต ซึ่งแสดงถึงพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารในแต่ละสถานการณ์จำลองแบบ โดยจะสังเกตเห็นเส้นสีแดง คือพื้นที่ที่เกิดการแทรกสอดระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดี จากการออกแบบหลอดแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลมในงานวิจัยนี้ โดยออกแบบให้หลอดแอลอีดีแต่ละดวงส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ส่งผลให้บริเวณที่ลำแสงเกิดการแทรกสอดนั้นไม่สามารถใช้ในการสื่อสารได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดี และเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ในการสื่อสาร ซึ่งจะมีรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

#### 4.3.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคนิคการสลับลำแสงและแบบดั้งเดิม

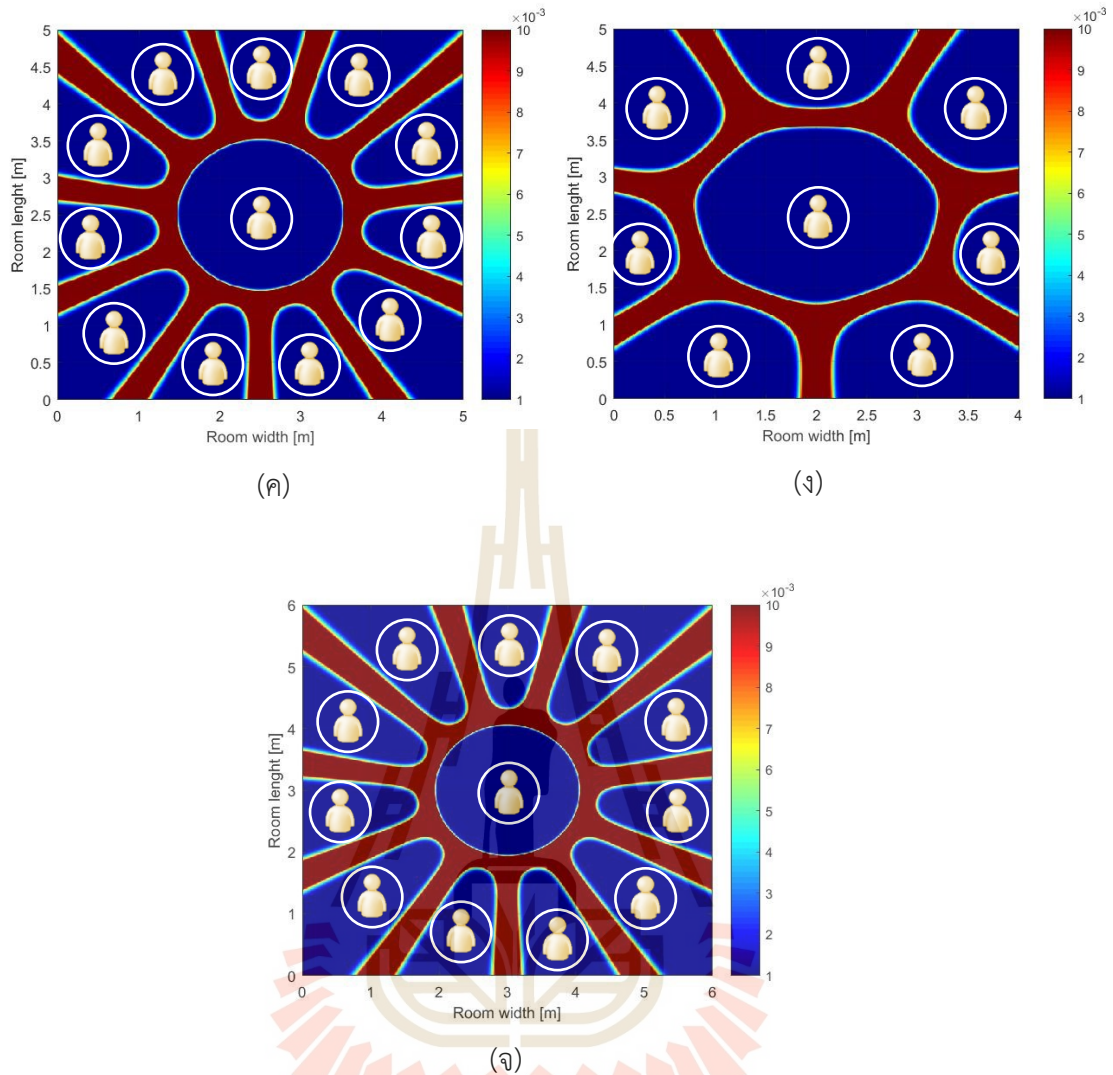
โดยส่วนใหญ่ในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารแบบเดิมสามารถรับส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีทุกดวง ได้เพียงแค่อำนาจข้อมูลต่อหนึ่งผู้ใช้งานภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ส่งผลให้จำนวนผู้ใช้งานต่อหน่วยเวลามีปริมาณน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารให้สามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน โดยประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารระหว่างการใช้งานด้วยเทคนิคการสลับลำแสงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ และแบบดั้งเดิมแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.7



(ก)

(ข)





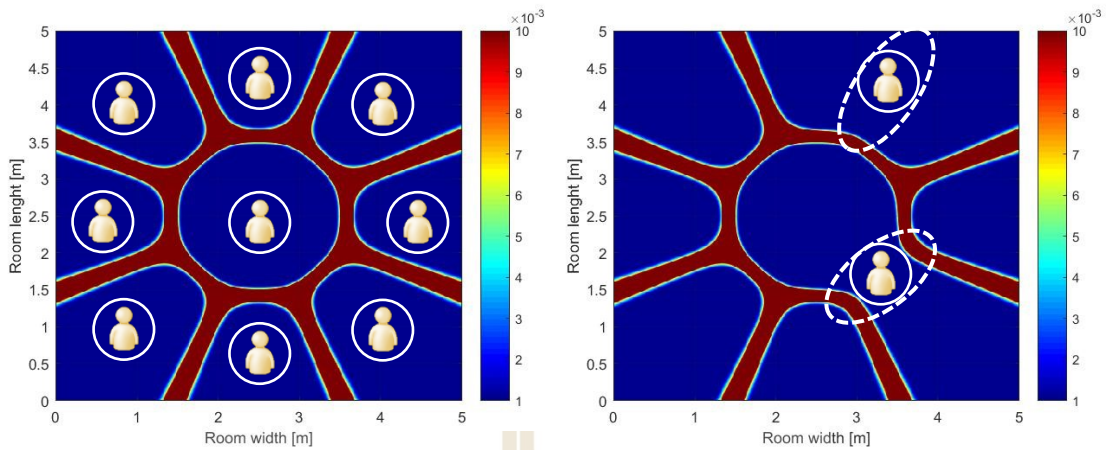
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคนิคการสลับลำแสงและแบบดั้งเดิม

- (ก) การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารแบบดั้งเดิม
- (ข) การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสงในสถานการณ์ที่ 1
- (ค) การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสงในสถานการณ์ที่ 2
- (ง) การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสงในสถานการณ์ที่ 3
- (จ) การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสงในสถานการณ์ที่ 4

จากรูปที่ 4.7 (ก) แสดงการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารแบบดั้งเดิม ซึ่งสามารถทำการสื่อสารผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีที่ส่งข้อมูลชุดเดียวกัน ส่งผลให้มีพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ในการสื่อสารเต็มประสิทธิภาพ กล่าวคือสามารถทำการสื่อสารได้ทุกจุดในพื้นที่ โดยไม่มีการแทรกสอดระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดี แต่จะสามารถรับส่งสัญญาณได้เพียงแค่อันหนึ่งชุดข้อมูลต่อหนึ่งผู้ใช้งานภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น และในรูปที่ 4.7 (ข) – 4.7 (จ) แสดงการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลับลำแสงทั้งสี่สถานการณ์จำลองแบบที่นำเสนอ ซึ่งออกแบบให้หลอดแอลอีดีแต่ละดวงส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สามารถรองรับผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้พร้อมกันสูงสุดถึง 9 คน 12 คน 8 คน และ 12 คน ในสถานการณ์ที่ 1 สถานการณ์ที่ 2 สถานการณ์ที่ 3 และสถานการณ์ที่ 4 ตามลำดับ แต่จะเกิดการแทรกสอดระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดี ทำให้บริเวณนั้นไม่สามารถทำการสื่อสารได้

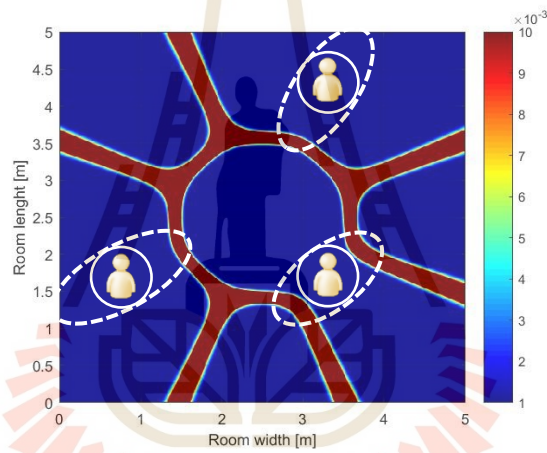
ในงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดี และเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ในการสื่อสารโดยใช้เทคนิคการสลับลำแสง ตัวอย่างเช่น ในสถานการณ์ที่ 1 การใช้เทคนิคการสลับลำแสงสามารถรองรับผู้ใช้งานพร้อมกันได้สูงสุด 9 คน แต่จะเกิดการแทรกสอดระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดีบริเวณพื้นที่ที่มีสีแดงดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) คือตำแหน่งบนระนาบภาครับที่มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $10^{-3}$  หากผู้ใช้งานต้องการสื่อสารในบริเวณที่มีการแทรกสอด สามารถแก้ไขได้โดยการรวมลำแสงของหลอดแอลอีดีจากหลอดแอลอีดีที่อยู่ใกล้กับผู้ใช้งานมากที่สุด เพื่อส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) และ 4.8 (ค) ซึ่งเป็นการรวมลำแสงของหลอดแอลอีดีใน 2 และ 3 ตำแหน่ง ตามลำดับ ส่งผลให้ผู้ใช้งานสามารถทำการสื่อสารได้ทุกตำแหน่งในพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคการรวมลำแสงนี้จะทำให้สูญเสียจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้พร้อมกันลงไปหนึ่งรายต่อการรวมลำแสงของหลอดแอลอีดีในแต่ละครั้ง

การใช้เทคนิคการสลับลำแสงโดยการรวมลำแสงไม่เพียงแต่จะสามารถลดสัญญาณแทรกสอดระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดีได้เท่านั้น แต่ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร โดยมีพื้นที่ครอบคลุมเพิ่มขึ้นจาก 83.922% เป็น 86.496% และ 88.027% ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) 4.8 (ข) และ 4.8 (ค) ตามลำดับ นอกจากนี้เทคนิคการสลับลำแสงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับทุกสถานการณ์ โดยให้ประสิทธิภาพดีสำหรับทุกสถานการณ์จำลองแบบที่นำเสนอดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากรูปที่ 4.9 (ก) แสดงตัวอย่างการรวมลำแสงของหลอดแอลอีดี 3 ตำแหน่งในสถานการณ์ที่ 2 โดยมีค่าพื้นที่ครอบคลุมเพิ่มขึ้นจาก 73.622% เป็น 78.238% รูปที่ 4.9 (ข) แสดงตัวอย่างการรวมลำแสงของหลอดแอลอีดี 2 ตำแหน่งในสถานการณ์ที่ 3 โดยมีค่าพื้นที่ครอบคลุมเพิ่มขึ้นจาก 78.181% เป็น 83.090% และรูปที่ 4.9 (ค) แสดงตัวอย่างการรวมลำแสงของหลอดแอลอีดี 4 ตำแหน่งในสถานการณ์ที่ 4 โดยมีค่าพื้นที่ครอบคลุมเพิ่มขึ้นจาก 73.677% เป็น 80.047%



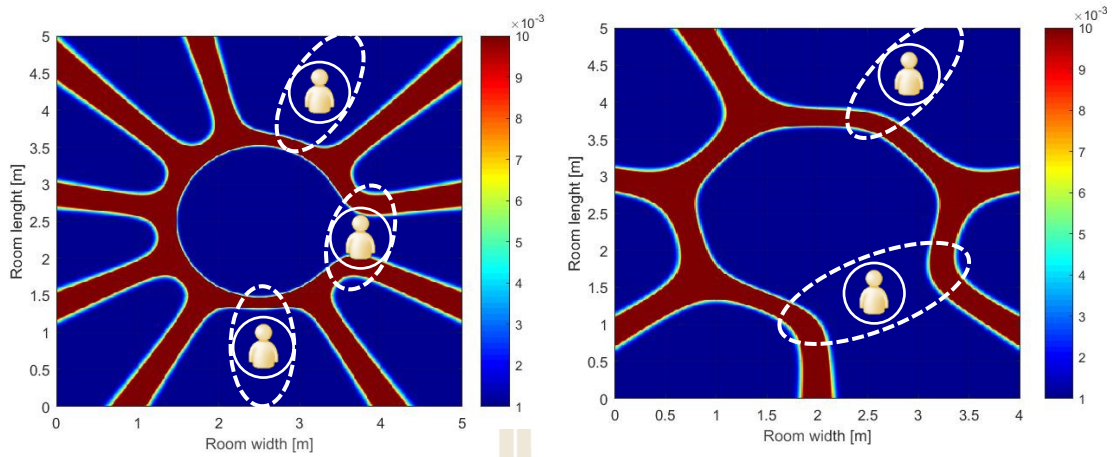
(ก)

(ข)



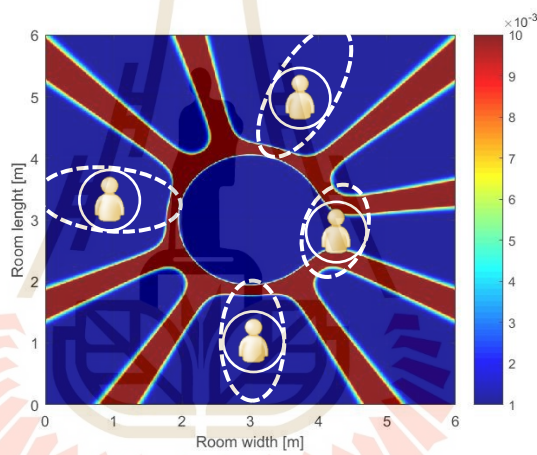
(ค)

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมในสถานการณ์ที่ 1  
 (ก) การใช้เทคนิคการสลับลำแสงในสถานการณ์ที่ 1  
 (ข) การรวมลำแสงของหลอดแอลอีดี 2 ตำแหน่ง  
 (ค) การรวมลำแสงของหลอดแอลอีดี 3 ตำแหน่ง



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมในสถานการณ์ที่นำเสนอ

(ก) การรวมลำแสงของหลอดแอลอีดีในสถานการณ์ที่ 2

(ข) การรวมลำแสงของหลอดแอลอีดีในสถานการณ์ที่ 3

(ค) การรวมลำแสงของหลอดแอลอีดีในสถานการณ์ที่ 4

#### 4.4 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการจำลองแบบของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบหลอดแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลม เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ในการสื่อสารสูงสุดบนพื้นฐานของมาตรฐานค่าความสว่างภายในอาคารผ่านโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบได้ในทุกสถานการณ์จำลองแบบที่นำเสนอ โดยใช้เวลาในการค้นหาผลลัพธ์น้อยกว่าการค้นหาทั้งหมด นอกจากนี้การใช้เทคนิคการสลับลำแสงสามารถลดสัญญาณแทรกสอดระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดีได้ด้วยวิธีการรวมลำแสง ส่งผลให้พื้นที่ครอบคลุมเพิ่มขึ้นจากเดิม และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสาร โดยมีจำนวนผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้พร้อมกันเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นแบบเดิม



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นถือเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ซึ่งส่วนใหญ่ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารมักถูกออกแบบให้มีการส่งสัญญาณผ่านลำแสงของหลอดแอลอีดีทุกดวงได้เพียงแค่อำนาจหนึ่งชุดข้อมูลต่อหนึ่งผู้ใช้งานภายในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ส่งผลให้ปริมาณผู้ใช้งานต่อหน่วยเวลาน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการสลัดลำแสง ผ่านการจำลองแบบด้วยโปรแกรม MATLAB โดยออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลมเป็นตัวส่งสัญญาณในระบบ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์กระจายสัญญาณ ที่ติดตั้งกลางพื้นที่โดยสามารถแพร่กระจายลำแสงไปยังเครื่องรับได้ทุกทิศทาง เพื่อแยกส่งสัญญาณให้กับผู้ใช้งานหลายคนในเวลาเดียวกัน โดยพิจารณาประสิทธิภาพทางการส่องสว่างที่ต้องคำนึงถึงค่าความสว่างให้เพียงพอต่อการใช้งานตามมาตรฐานความสว่างภายในอาคาร และประสิทธิภาพทางการสื่อสารที่ต้องมีพื้นที่ครอบคลุมในการสื่อสารมากที่สุด ซึ่งวิเคราะห์จากพื้นที่ที่สามารถทำการสื่อสารได้ ณ ตำแหน่งบนระนาบภาครับที่มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $10^{-3}$  ตามค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่สามารถยอมรับได้สำหรับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมในการสื่อสารสูงสุด บนพื้นฐานของการส่องสว่างครอบคลุมที่เพียงพอต่อการใช้งานตามวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย โดยในงานวิจัยนี้ได้เสนอการใช้วิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยสถานการณ์จำลองต่าง ๆ ที่เสนอขึ้นจากการกำหนดขนาดของพื้นที่ จำนวนของหลอดแอลอีดี และกำลังงานของหลอดแอลอีดี ให้มีความเหมาะสมกับขนาดพื้นที่มาตรฐานที่นิยมใช้งานทั่วไปภายในอาคาร ผลการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่าวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การออกแบบได้ โดยมีพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารมากที่สุดบนพื้นฐานของความสว่างครอบคลุมตามมาตรฐาน และผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความถูกต้องในการค้นหาผลลัพธ์ของวิธีเชิงพันธุกรรม โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีเชิงพันธุกรรมกับการค้นหาทั้งหมด ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด ผลลัพธ์คือทั้งสองอัลกอริทึมแสดงค่าพารามิเตอร์การออกแบบ ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดตรงกัน โดยวิธีเชิงพันธุกรรมใช้เวลาในการค้นหาผลลัพธ์น้อยกว่าการค้นหาทั้งหมด ซึ่งสามารถลดเวลาในการค้นหาผลลัพธ์ลงได้ประมาณ 382 นาทีที่ทั้งสถานการณ์จำลองแบบที่นำเสนอ นอกจากนี้การใช้เทคนิค

การสลัปลำแสงสามารถลดสัญญาณแทรกสอดระหว่างลำแสงของหลอดแอลอีดีที่เกิดจากการออกแบบหลอดแอลอีดีแถวลำดับแบบวงกลมในงานวิจัยนี้ได้ด้วยวิธีการรวมลำแสง ส่งผลให้พื้นที่ครอบคลุมเพิ่มขึ้นจากเดิม และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารได้โดยมีปริมาณผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้พร้อมกันเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นแบบเดิม

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นต้นแบบการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลัปลำแสงด้วยการจำลองการออกแบบหลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลม เพื่อเพิ่มปริมาณผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นในอนาคตสามารถพัฒนาระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยการประดิษฐ์หลอดแอลอีดีให้มีการจัดเรียงแถวลำดับแบบวงกลมตามที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และติดตั้งหลอดแอลอีดีแถวลำดับในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสื่อสารในสถานการณ์จริงตามผลการวิจัยเพื่อใช้งานระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารต่อไป ผู้วิจัยหวังว่าแนวคิดเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการสลัปลำแสงจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็ประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย

## 5.3 การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นจริงในปัจจุบัน

ในส่วนนี้เป็นการนำเสนอชุดสาธิตการพัฒนาระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร ซึ่งผู้วิจัยได้รวบรวมมาจาก “โครงการพัฒนาความพร้อมระดับประเทศของการสื่อสารด้วยแสงสว่าง: การถ่ายทอดเทคโนโลยี การพัฒนาบุคลากรด้านกิจการโทรคมนาคม การจัดทำร่างมาตรฐานและสื่อ” จากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมเพื่อประโยชน์สาธารณะ โดย รศ. ดร.ปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์ และคณะ เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนานวัตกรรมใหม่ ๆ ด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นในอนาคต ประกอบไปด้วย 1) ชุดสาธิตไฟถนน 2) ชุดสาธิตไฟรถยนต์เปิดไม่กั้น 3) ชุดสาธิตพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะ 4) ชุดสาธิตการส่งผ่านข้อมูลบนคอมพิวเตอร์แบบไร้สายผ่านหลอดแอลอีดี 5) ชุดสาธิตหมวกแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนัง 6) ชุดสาธิตเครื่องให้แสงแอลอีดีแบบพกพาเพื่อรักษาผิว และ 7) ชุดสาธิตหน้ากากแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนัง

### 5.3.1 ชุดสาธิตไฟถนน

ในปัจจุบันไฟถนน หรือไฟส่องทาง มีการใช้งานเพื่อให้แสงสว่างในตอนกลางคืน โดยในการติดตั้งไฟถนนจะเป็นการติดตั้งในลักษณะถาวร คือมีตำแหน่งที่แน่นอน ดังนั้นในการพัฒนาสามารถนำข้อมูลของสถานที่หรือข้อมูลจำเพาะของบริเวณโดยรอบพื้นที่ที่แสงเข้ากับแสงสว่างที่เกิดจากโคมไฟถนนนั้นได้

โครงสร้างของชุดสาธิตไฟถนนแสดงในรูปที่ 5.1 โดยแบ่งออกเป็นวงจรส่งสัญญาณและวงจรรับสัญญาณและการแสดงผล ทางด้านวงจรส่งสัญญาณ เลือกใช้โคมไฟแอลอีดีทั่วไปที่มีลักษณะคล้ายกับโคมไฟส่องทาง จากนั้นจึงนำมาปรับปรุงวงจรขับเคลื่อน เพื่อป้องกันสัญญาณการควบคุมจังหวะการเปิดปิดของหลอดแอลอีดีตามจังหวะข้อมูลข่าวสาร และในส่วนของทางด้านวงจรรับสัญญาณและการแสดงผล เลือกใช้รถยนต์จำลองเปรียบเสมือนกับการขับรถยนต์บนถนน และสามารถรับข้อมูลที่ส่งมาจากโคมไฟถนนได้ โดยติดตั้งวงจรรับสัญญาณและหน้าจอแสดงผลไว้ในรถยนต์จำลอง เพื่อแสดงข้อมูลที่รับได้



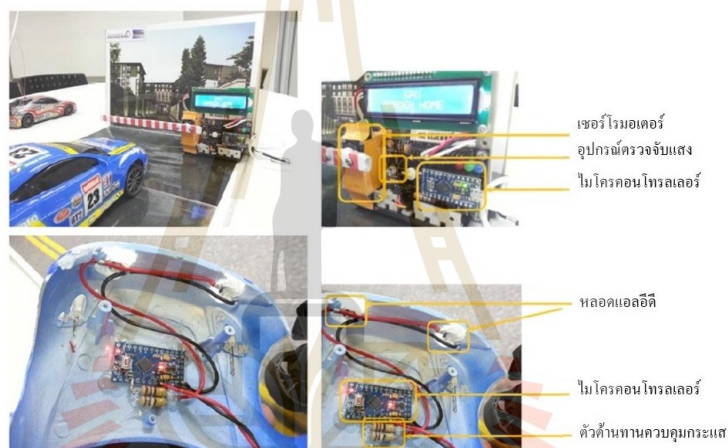
รูปที่ 5.1 ชุดสาธิตไฟถนน

(ที่มา: ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ และคณะ, 2559)



### 5.3.2 ชุดสาธิตไฟรอนต์เปิดไม้กั้น

หลักการการทำงานของชุดสาธิตไฟรอนต์เปิดไม้กั้นคือ ไม้กั้นจะรับสัญญาณจากไฟหน้ารถยนต์ โดยได้นำรถยนต์จำลองขนาดเล็กมาทำการติดตั้งหลอดแอลอีดีที่ด้านหน้ารถคล้ายกับไฟส่องทางหน้ารถยนต์ที่สามารถควบคุมการส่งสัญญาณข้อมูลที่แฝงไว้ผ่านการส่องสว่างโดยเป็นการระบุค่ารหัส และกำหนดค่ารหัสของรถยนต์แต่ละคันที่แตกต่างกัน ในส่วนอุปกรณ์ไม้กั้น จะติดตั้งวงจรการรับสัญญาณ และเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อควบคุมการขับเคลื่อนของไม้กั้น ดังนั้นเมื่อรถยนต์วิ่งเข้าใกล้ไม้กั้น รถยนต์ก็จะส่งสัญญาณค่ารหัสผ่านหลอดแอลอีดีหน้ารถยนต์ เพื่อเปิดไม้กั้น หากค่ารหัสที่ส่งออกไปจากรถยนต์ตรงกับรหัสในฐานข้อมูลของอุปกรณ์ไม้กั้น ไม้กั้นก็จะถูกยกขึ้นเพื่อเปิดทางให้รถยนต์วิ่งผ่านได้ โครงสร้างชุดสาธิตไฟรอนต์เปิดไม้กั้นแสดงในรูปที่ 5.2



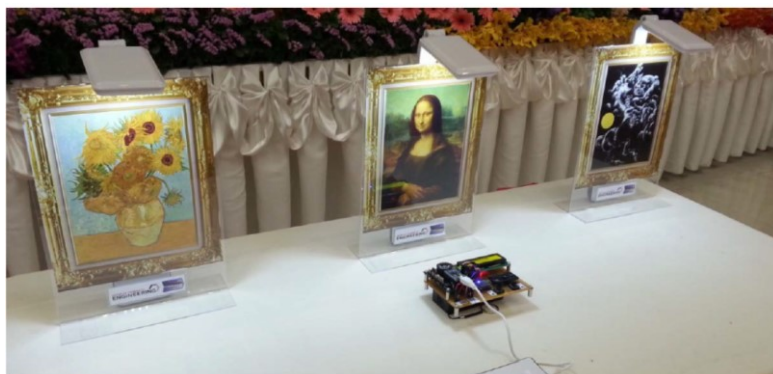
รูปที่ 5.2 ชุดสาธิตไฟรอนต์เปิดไม้กั้น

(ที่มา: ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ และคณะ, 2559)

### 5.3.3 ชุดสาธิตพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะ

โครงสร้างของชุดสาธิตพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะแสดงในรูปที่ 5.3 ประกอบด้วยสามส่วนหลักได้แก่ 1) คอมพิวเตอร์ชั้นงาน ที่แฝงรหัสข้อมูลไว้กับแสงที่มองเห็นได้จากหลอดแอลอีดีจำนวนสามโคม 2) วงจรรับแสงและประมวลสัญญาณ เพื่อถอดรหัสสัญญาณข้อมูลที่ส่งมา และ 3) วงจรเล่นไฟล์เสียงเอ็มพีสาม (MP3) เพื่อใช้เป็นส่วนแสดงผลด้วยเสียงพูดที่ถูกบันทึกไว้

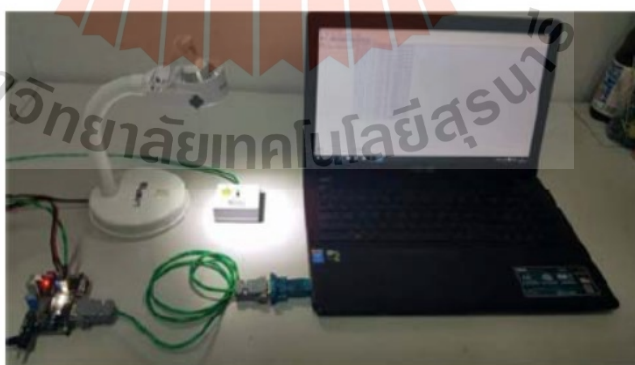
หลักการการทำงานของชุดสาธิตพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะคือ คอมพิวเตอร์ชั้นงานแต่ละโคมจะมีการส่งสัญญาณรหัสที่แตกต่างกัน เมื่อวงจรรับสัญญาณจากโคมแต่ละโคมแล้วก็จะทำการเล่นไฟล์เสียงที่แตกต่างกันออกมา



รูปที่ 5.3 ชุดสาธิตพีพีอีรณท์อัจฉริยะ  
(ที่มา: ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ และคณะ, 2559)

#### 5.3.4 ชุดสาธิตการส่งผ่านข้อมูลบนคอมพิวเตอร์แบบไร้สายผ่านหลอดแอลอีดี

ชุดสาธิตการส่งผ่านข้อมูลบนคอมพิวเตอร์แบบไร้สายผ่านหลอดแอลอีดี ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลผ่านคอมพิวเตอร์ โดยสัญญาณข้อมูลจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณแสง เพื่อส่งข้อมูลผ่านการติด-ดับของหลอดแอลอีดีด้วยความถี่สูงที่ภาคส่งสัญญาณ และรับสัญญาณด้วยโฟโตไดโอดที่ต่ออยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ภาครับสัญญาณ เพื่อแปลงสัญญาณแสงที่รับมาได้กลับมาเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล โครงสร้างชุดสาธิตการส่งผ่านข้อมูลบนคอมพิวเตอร์แบบไร้สายผ่านหลอดแอลอีดีแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ชุดสาธิตการส่งผ่านข้อมูลบนคอมพิวเตอร์แบบไร้สายผ่านหลอดแอลอีดี  
(ที่มา: ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ และคณะ, 2559)

### 5.3.5 ชุดสาธิตหมวกแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนัง

ชุดสาธิตหมวกแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนัง ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อประยุกต์ใช้ประโยชน์จากแสงของแอลอีดีที่มีคุณสมบัติในการบำรุงรักษาหนังศีรษะ สำหรับผู้ที่มีปัญหาเกี่ยวกับสุขภาพหนังศีรษะและเส้นผม เช่น ผมบาง ศีรษะล้าน เป็นต้น โดยชุดสาธิตหมวกแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนังสามารถสร้างขึ้นได้ในราคาที่ถูกลงกว่าที่ขายทั่วไปในท้องตลาดถึง 10 เท่า โครงสร้างชุดสาธิตหมวกแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ชุดสาธิตหมวกแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนัง  
(ที่มา: ปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์ และคณะ, 2559)

### 5.3.6 ชุดสาธิตเครื่องให้แสงแอลอีดีแบบพกพาเพื่อรักษาผิวหนัง

ชุดสาธิตเครื่องให้แสงแอลอีดีแบบพกพาเพื่อรักษาผิวหนัง ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อประยุกต์ใช้ประโยชน์จากแสงสีต่าง ๆ ของแอลอีดี ซึ่งเครื่องให้แสงแอลอีดีแบบพกพาสามารถเปล่งแสงสีต่าง ๆ ได้ โดยแสงแต่ละสีจะมีคุณสมบัติในการรักษาที่แตกต่างกันเช่น แสงสีฟ้า ช่วยลดการอักเสบและป้องกันการติดเชื้อใหม่ แสงสีแดง ช่วยกระตุ้นการสร้างคอลลาเจน และปรับสภาพผิวให้เรียบเนียน เป็นต้น โครงสร้างสาธิตเครื่องให้แสงแอลอีดีแบบพกพาเพื่อรักษาผิวหนังแสดงในรูปที่

5.6



รูปที่ 5.6 ชุดสาธิตเครื่องให้แสงแอลอีดีแบบพกพาเพื่อรักษาผิวหนัง  
(ที่มา: ปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์ และคณะ, 2559)

### 5.3.7 ชุดสาธิตหน้ากากแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนัง

ชุดสาธิตหน้ากากแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนัง ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อประยุกต์ใช้ประโยชน์จากแสงสีต่าง ๆ ของแอลอีดีที่มีคุณสมบัติในการรักษาผิว โดยสามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยรีโมท และสามารถตั้งเวลาในการใช้งาน เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากการรับแสงที่นานเกินไป โครงสร้างชุดสาธิตหน้ากากแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ชุดสาธิตหน้ากากแอลอีดีเพื่อรักษาผิวหนัง  
(ที่มา: ปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์ และคณะ, 2559)

## รายการอ้างอิง

- Pathak, P. H., Feng, X., Hu, P., & Mohapatra, P. (2015). **Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges**. IEEE communications surveys & tutorials, 17(4), 2047-2077.
- Khalighi, M. A., and Uysal, M. (2014). **Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective**. IEEE communications surveys & tutorials, 16(4), 2231-2258.
- Singh, S. C. (2009). **Basics of Light Emitting Diodes, Characterizations and Applications**. Handbook of Light Emitting and Schottky Diode Research.
- Matheus, L. E. M., Vieira, A. B., Vieira, L. F., Vieira, M. A., & Gnawali, O. (2019). **Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(4), 3204-3237.
- Kocharoen, P. (2016). **Visible Light Communication: Importance and Thai Preparations**. Procedia computer science, 86, 51-54.
- Ndjiongue, A. R., Ferreira, H. C., & Ngatched, T. (2000). **Visible Light Communications (VLC) Technology**. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.
- Bell, A. G. (1880). **The photophone**. Science, 1(11), 130-134.
- Tanaka, Y., Komine, T., Haruyama, S., & Nakagawa, M. (2003). **Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights**. IEICE transactions on communications, 86(8), 2440-2454.
- Haas, H., Yin, L., Chen, C., Videv, S., Parol, D., Poves, E., ... & Islim, M. S. (2020). **Introduction to indoor networking concepts and challenges in LiFi**. Journal of Optical Communications and Networking, 12(2), A190-A203.

- Niaz, M. T., Imdad, F., Kim, S., & Kim, H. S. (2016). **Deployment methods of visible light communication lights for energy efficient buildings.** *Optical Engineering*, 55(10), 106113.
- Priyanka, P., Singh, M., Gill, H. S., Kaur, S., & Singh, M. L. (2018, July). **Improvement of Uniformity of Illumination for Circular LED Arrangement in VLC System.** In 2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE) (pp. 2214-2217). IEEE.
- Kim, S. M., & Kim, S. M. (2013, July). **Performance improvement of visible light communications using optical beamforming.** In 2013 Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) (pp. 362-365). IEEE.
- Reményi, J., Várhegyi, P., Domján, L., Koppa, P., & Lőrincz, E. (2003). **Amplitude, phase, and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid-crystal display at  $\sim 400$  nm.** *Applied Optics*, 42(17), 3428-3434.
- Kim, S. M. (2018). **Visible light communication employing optical beamforming: A review.** *Current Optics and Photonics*, 2(4), 308-314.
- Komine, T., and Nakagawa, M. (2004). **Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights.** *IEEE transactions on Consumer Electronics*, 50(1), 100-107.
- Rahaim, M., and Little, T. D. C. (2013, October). **SINR analysis and cell zooming with constant illumination for indoor VLC networks.** In 2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW) (pp. 20-24). IEEE.
- Zeng, L., O'Brien, D., Le-Minh, H., Lee, K., Jung, D., & Oh, Y. (2008, May). **Improvement of data rate by using equalization in an indoor visible light communication system.** In 2008 4th IEEE international Conference on Circuits and Systems for Communications (pp. 678-682). IEEE.
- Putri, N. A. Y., Hambali, A., & Pamukti, B. (2019, July). **VLC system performance evaluation with addition of optical concentrator on photodetector.** In 2019 IEEE International Conference on Signals and Systems (ICSigSys) (pp. 167-172). IEEE.

- The International Commission on Illumination (CIE). (2001). **Lighting of indoor work places (ISO 8995:2002 CIE S 008/E:2001)**. In International Commission on Illumination (CIE) (pp. 1-18).
- Do, T. H., Hwang, J., & Yoo, M. (2013). **Analysis of the effects of LED direction on the performance of visible light communication system**. Photonic network communications, 25(1), 60-72.
- Azizan, L. A., Ab-Rahman, M. S., Hassan, M. R., Bakar, A. A. A., & Nordin, R. (. (2014) **Optimization of signal-to-noise ratio for wireless light-emitting diode communication in modern lighting layouts**. Optical Engineering, (4) 53, .045103
- Kumar, M., Husain, M., Upreti, N., & Gupta, D. (2010). **Genetic Algorithm: Review and Application**. Available at SSRN 3529843.
- Kamalakis, T., Dogkas, L., & Simou, F. (2020, September). **Application of a Genetic Algorithm to Optimize the Performance of a Visible Light Communications System: Key Concepts and Preliminary Results**. In 11th Hellenic Conference on Artificial Intelligence (pp. 129-134).
- Liu, J. H., Li, Q., & Zhang, X. Y. (2014). **Cellular Coverage Optimization for Indoor Visible Light Communication and Illumination Networks**. Journal of Communications, 9(11), 891-898.
- Hang, H. M., & Woods, J. W. (Eds.). (1995). **Handbook of Visual Communications**. Academic Press.
- Yang, X. S. (2020). **Nature-Inspired Optimization Algorithms**. Academic Press.
- Schmitt, L. M. (2001). **Theory of Genetic Algorithms**. Theoretical Computer Science, 259(1-2), 1-61.
- McCall, J. (2005). **Genetic Algorithms for Modelling and Optimisation**. Journal of computational and Applied Mathematics, 184(1), 205-222.
- Feng, J., Ding, L., & Wang, Y. (2013). **Channel simulation of non-imaging optical MIMO communication**. Optics and Photonics Journal, 3(2), 212-216.

Zeng, L., O'Brien, D. C., Le Minh, H., Faulkner, G. E., Lee, K., Jung, D., ... & Won, E. T. (2009). High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 27(9), 1654-1662.

รศ. ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ และคณะ, โครงการพัฒนาความพร้อมระดับประเทศของการสื่อสารด้วยแสงสว่าง: การถ่ายทอดเทคโนโลยี การพัฒนาบุคลากรด้านกิจการโทรคมนาคม การจัดทำร่างมาตรฐาน และสื่อ, กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.), 2559







ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างการศึกษา

L. Pumkaew, M. Uthansakul and P. Uthansakul, “Switched-Beam Optimization for an Indoor Visible Light Communication Using Genetic Algorithm,” CMC-Computers, Materials & Continua, vol. 71, no. 1, pp. 1547–1566, 2022.



## Switched-Beam Optimization for an Indoor Visible Light Communication Using Genetic Algorithm

Ladathunya Pumkaew, Monthippa Uthansakul\* and Peerapong Uthansakul

School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

\*Corresponding Author: Monthippa Uthansakul. Email: mtp@sut.ac.th

Received: 11 August 2021; Accepted: 15 September 2021

**Abstract:** Nowadays, Visible Light Communication (VLC) is an attractive alternative technology for wireless communication because it can use some simple Light Emitting Diodes (LEDs) instead of antennas. Typically, indoor VLC is designed to transmit only one dataset through multiple LED beams at a time. As a result, the number of users per unit of time (throughput) is relatively low. Therefore, this paper proposes the design of an indoor VLC system using switched-beam technique through computer simulation. The LED lamps are designed to be arranged in a circular array and the signal can be transmitted through the beam of each LED lamp with the method of separating the dataset to increase the number of simultaneous users for enhancing the indoor VLC. The coverage area is determined from the area where the communication can be performed at a location on the receiving plane with a Bit Error Rate less than or equal to the specified value based on coverage illuminance according to International Commission on Illumination (CIE) standards. In this paper, Genetic Algorithm is used to find the suitable solution for designing parameters to achieve maximum coverage area. The results show that a Genetic Algorithm can be used to find a suitable solution and reduce the computational time approximately 382 min in proposed scenarios.

**Keywords:** Visible light communication; genetic algorithm; optimization; light emitting diode

### 1 Introduction

Visible Light Communication (VLC) is an interesting alternative technology because the current radio frequency communication system has limitations in data rate, insufficient bandwidth to increase the number of users, and interference among electromagnetic wave sources. So far, VLC technology demonstrates the next level of potential wireless communication in the near future because light can be easily used instead of using radio frequencies [1].

The VLC is one type of communication in which the data is transmitted by the modulation of light waves from the visible light spectrum with the wavelengths in the range of 380 nm–780 nm using LEDs. The reason for using LED to transmit data is because the LED is an electronic



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

device that provides brightness, saves energy, and has a lifespan longer than traditional bulbs. This plays a significant role in smart lighting being able to provide both illuminations and also communication at the same time [2]. Not only VLC has increased capacity and low latency but also has the key property of LEDs that allows the VLC to be modulated at high frequencies enough to achieve higher data rates. It's a great opportunity to enhance the current wireless infrastructure, which can be applied in a wide range of applications such as scientific, industrial, commercial, and communication fields. These applications include indoor positioning, underwater communication and intelligent transportation system [3,4].

The structure of VLC consists of 3 main parts: transmitter, channel, and receiver, as shown in Fig. 1 [5]. On the transmitting side, the data is conveyed to the system and then modulated to the LED, which is the transmitting device to convert the electrical signal into a light signal. The data is transmitted by the flashing of light through the channel. While transmitting, the transmitter and receiver must be in the Line Of Sight (LOS). In fact, there is a loss of signal quality due to the interference caused by other ambient lights during transmission. This can be corrected by an optical bandpass filter to reduce the interference. On the receiving side, the device used to receive signal is a photodiode which detects light signal and converts to electrical signal. Afterward, the signal is demodulated back to be data [6].

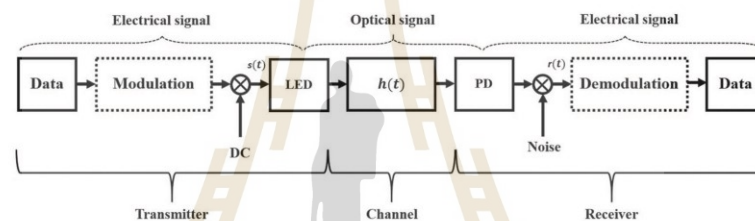


Figure 1: VLC structure

Light has been used for communication from the past to the present. For example, a photophone was invented in the late 19th century by Alexander Graham Bell. The photophone has been considered as the beginning era of optical communication. The work started from sunlight reflection on the glass surface of the transmission sector, in which the light waves vibrate according to the user's voice. After that, light is sent to the lens which is a reflective curved glass installed in the receiver [7]. A novel method of establishing a secure and reliable communication link using optical wireless communication is achieved by separating signal transmission with two optical transmitters [8]. In 2000, LEDs gained a lot of attention in which they can be utilized in VLC with the use of white LED for indoor communication [9]. Moreover, in 2011, the introduction of Light Fidelity (Li-Fi) was introduced as technology similar to Wi-Fi. However, it transmits a signal with light by changing the brightness or amplitude of LEDs. This can transmit only one dataset through the LED beam per user at a time. Li-Fi has been considered the first application of VLC [10].

The VLC can be categorized as indoor VLC, such as communication in the office room, on the plane, or even in the hospital, etc., and outdoor VLC such as Vehicle-to-Vehicle communications (V2V) or Vehicle-to-Infrastructure communication (V2I) [1]. Nowadays, many kinds of

researches have been designed to arrange LED arrays in various forms for performance enhancement, usually arranged in a square and circular shapes. The performance of square and circular arrangements was analyzed, and it was found that circular-array LED arrangement provides better uniformity of illumination in terms of light distribution [11].

The optimal circular-array LED arrangement was presented to improve the uniformity of illumination for the VLC system [12]. The design has 16 white LEDs used in a room size of  $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ , with 4 LEDs in the corner and 1 LED in the middle of the room, surrounded by 11 LEDs arranged in a circular form. In the simulation, the radius of the circular array was changed from 1.5 to 2.3 m in increments of 0.2 m. The results have shown that at a radius of 2.1 m, the VLC system has the highest uniformity of illumination but still transmits only one dataset through the LED beam per user at a time.

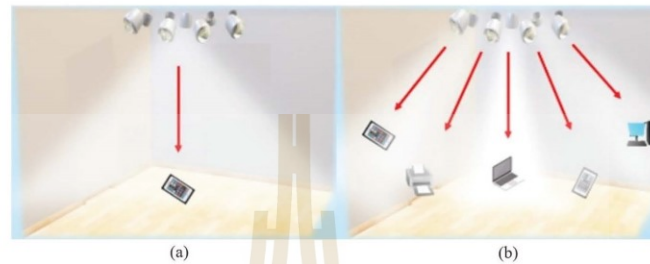
In addition, the optical beamforming technique can be used for enhancing the VLC system. The Spatial Light Modulator (SLM) uses optical beamforming to control the LED beam to be directly focused on the desired target device at the receiver [13]. This prevents energy-wasting in unnecessary directions and can enhance the quality of the received signal. The SLM is an amplitude or phase-modulated device in which liquid crystal molecules are arranged inside [14]. It can be controlled by a computer to adjust the voltage. When the voltage increases, the liquid crystal molecules change, causing the phase to change. As a result, the direction of the beam can be focused on the desired target device at the receiver. In the experiment, the communication signal was generated using a function generator and modulated from input data to LED. Then, the LED light was passed through a beam expander to control the beam size in the experiment and entered into the SLM. The SLM is controlled by a computer for giving the direction of the beam to focus on the desired target device at the receiver. The results have shown that before using optical beamforming, the received signal cannot be normally demodulated because the signal strength is too weak. However, the signal strength as the same as Signal to Noise Ratio (SNR) increases compared to the original ones after using optical beamforming.

The optical beamforming can be applied to multiple access techniques such as Space Division Multiple Access (SDMA) or Time Division Multiple Access (TDMA) to support multiple users in real situations [15]. The SDMA optical beamforming is the division of beams into different areas. It uses the SLM for controlling the LED beam to be focused on the target device. The use of the SDMA optical beamforming technique can support a larger number of users in which multiple users can communicate with each other at the same time. However, the received signal strength decreases with the number of users. Moreover, for the TDMA optical beamforming, the beam is focused on each target device at different times. This technique allows transmission signal at full potential, but the data rate decreases with the number of users.

Apparently, the use of optical beamforming techniques using SLM can significantly enhance communication performance. This can improve the quality of the received signal, but SLM devices are quite expensive, which is a limitation in terms of cost.

From the literatures, most of the traditional indoor VLC system transmit only one dataset through the LED beam per user at a time. As a result, the number of users per unit of time (throughput) is low. Therefore, this paper proposes the design of an indoor VLC system using switched-beam technique through MATLAB programming. The LED lamps are designed to be arranged in a circular array. The signal can be transmitted through the beam of each LED lamp with the method of separating the dataset to increase the number of simultaneous users enhancing the indoor VLC as shown in Fig 2. Fig. 2a shows a traditional indoor VLC system and Fig. 2b

shows the proposed design. The coverage area is determined from the area where communication can be performed at a location on the receiving plane with a Bit Error Rate less than or equal to  $10^{-3}$  based on coverage illuminance that must cover greater than or equal to 300 lux according to International Commission on Illumination (CIE) standards.



**Figure 2:** The proposed design of an indoor VLC system using switched-beams

The most popular method to optimize the uniform illuminance distribution in VLC system is based on specific location orientation of LED or the power allocation [16,17]. In these conventional optimizations, some parameter values are selected for calculation. It can be inferred that optimization will have better performance when all parameter values in the possible data range are selected. In order to find the optimal values in the large search space, intelligent optimization algorithms, such as convex optimization algorithm, evolutionary algorithm and fish swarm algorithm are preferred to reduce the computational process [18–20].

The calculation in this paper is considerably complex because the system has multiobjective optimization adjusting the designing parameters depending on both coverage area and condition of coverage illuminance. Therefore, heuristic optimization technique is applied to reduce complex calculation for finding the optimal path. Two types of optimization techniques are proposed: exhaustive search method and heuristic method. The exhaustive search examines every search point within the search space in order to get accurate optimal results but it takes a long time to calculate. So far, Genetic Algorithm is the most popular heuristic method. It is adopted to find the suitable solution for designing parameters to achieve maximum coverage area as it can effectively solve problems in large and complex data sets. Also, it can be used in VLC optimization problem [21–24]. The performance of Genetic Algorithm is analyzed comparing to the results obtained from an exhaustive search.

The remainder of this paper is as follows. Firstly, the section of materials and methods discusses an array LED design, a proposed algorithm, and the simulation setup. The following section is results and discussion. Finally, the conclusion is given.

## 2 Materials and Methods

### 2.1 System Model

In this subsection, the calculation of the horizontal illuminance, the received optical power of directed light, Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR), Bit Error Rate (BER), and the proposed LED-array design are discussed.

The horizontal illuminance: The illuminance expresses the distribution of an illuminated surface. A horizontal illuminance  $E_{hor}$  is given as [25]:

$$E_{hor} = \frac{I(\vartheta)}{D_d^2} \cdot \cos(\Psi) \quad (1)$$

where  $D_d$  is distance between a transmitter and a receiver,  $\vartheta$  is the angle of irradiance,  $\Psi$  is the angle of incidence, and  $I(\vartheta)$  is the luminous intensity according to the Lambertian radiation properties of LED. This can be calculated as:

$$I(\vartheta) = I(0) \cos^m(\vartheta) \quad (2)$$

where  $I(0)$  is the center luminous intensity of an LED and  $m$  is the order of Lambertian. This can be calculated as:

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\vartheta_{1/2}))} \quad (3)$$

where  $\vartheta_{1/2}$  is the semi-angle at the half power of LED.

The received optical power: In this paper, the only effect of directed light is considered, excluding the reflective light by walls. The received optical power  $P_r$  can be calculated as:

$$P_r = H(0) \cdot P_t \quad (4)$$

where  $P_t$  is the transmitted optical power and  $H(0)$  is the channel DC gain. This is given as [25]:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m(\vartheta) T_s(\Psi) g(\Psi) \cos(\Psi), & 0 \leq \Psi \leq \Psi_c, \\ 0, & \Psi > \Psi_c, \end{cases} \quad (5)$$

where  $A$  is the physical area of photodiode,  $m$  is the order of Lambertian,  $D_d$  is distance between a transmitter and a receiver,  $\vartheta$  is the angle of irradiance,  $\Psi$  is the angle of incidence,  $T_s$  is the gain of optical filter,  $\Psi_c$  is the field of view of the receiver, and  $g(\Psi)$  is the gain of an optical connector. This is given as:

$$g(\Psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \Psi \leq \Psi_c, \\ 0, & \Psi > \Psi_c, \end{cases} \quad (6)$$

where  $n$  is the refractive index.

Signal to Interference Plus Noise Ratio: We design an array of LEDs to transmit different data for increasing the number of simultaneous users who can access the system at the same time. It results in interference among LED beams. The SINR can be calculated as [26,27]:

$$SINR = \frac{(RP_{r,x})^2}{(R\sum_{i \neq x} P_{r,i})^2 + \sigma_{total}^2} \quad (7)$$

where  $R$  is the photodiode responsivity,  $P_r$  is the received optical power, and  $\sigma_{total}^2$  is the total noise variance. This can be calculated as:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{amplifier}^2 \quad (8)$$

where  $\sigma_{shot}^2$  is the shot noise variance and  $\sigma_{amplifier}^2$  is the amplifier noise variance, which are given by:

$$\sigma_{shot}^2 = 2qR(P_r + P_n)B_n \quad (9)$$

$$\sigma_{amplifier}^2 = i_{amplifier}^2 B_a \quad (10)$$

where  $P_n$  is the noise power of ambient light,  $q$  is the electron mass as  $1.602 \times 10^{-19}$  C,  $i$  is the amplifier noise density,  $B_a$  is the amplifier bandwidth and  $B_n$  is the noise-bandwidth. This can be calculated as:

$$B_n = I_2 R_b \quad (11)$$

where  $I_2$  is noise bandwidth factor and  $R_b$  is data rate.

Finally, The Bit Error Rate: BER can be calculated as [27]:

$$BER = Q(\sqrt{SINR}) \quad (12)$$

where  $Q(x)$  is the probability that a standard normal random variable takes a value larger than  $x$

$$\text{The function } Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} dy.$$

The accurate BER performance for wireless optical communication and indoor VLC system requires a BER of  $10^{-3}$  [28]. In this paper, we consider the coverage area by determining from the area where communication can be performed at BER less than or equal to  $10^{-3}$ .

LED-Array design: In the design of the LED installation, it is necessary to consider for the sufficient illumination, which must have the illuminance at least 300–2000 lux according to CIE [29]. Typically, single LED installation is not popular because of insufficient illumination according to the CIE standard. Therefore, multiple LEDs must be installed in an array arrangement. This paper proposes the design of an indoor VLC system using switched-beam technique through MATLAB programing by designing the circular array LED arrangements with white LEDs. One LED in the center of the room is surrounded by remaining LEDs that tilt out from the center. The signal can be transmitted through the beam of each LED lamp with the method of separating the dataset to increase the number of users who can simultaneously access the system for enhancing the indoor VLC.



The center LED: One LED is designed to be placed in the center of the area, as shown in Fig. 3a. The angle of irradiance can be calculated as:

$$\vartheta = \cos^{-1} \left( \frac{h}{D} \right) \quad (13)$$

where  $\vartheta$  is the angle of irradiance,  $h$  is height between source and receiver plane, and  $D$  is distance between LED and user at a receiver plane.

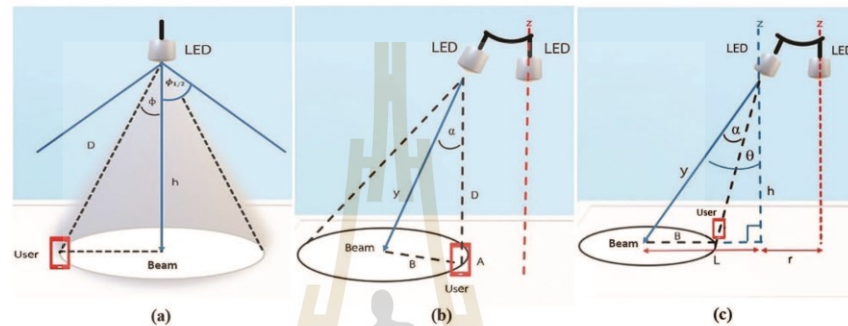


Figure 3: An LED-array design

The surrounding LED: The remaining LEDs are designed to be tilted out from the center LED and arranged in a circular LED array. As a result, the angle of irradiance is changed as shown in Fig. 3b. The new angle of irradiance can be calculated as:

$$\cos \alpha = \left( \frac{D^2 + Y^2 - B^2}{2DY} \right) \quad (14)$$

where  $\alpha$  is the new angle of irradiance,  $D$  is distance between LED and user at a receiver plane,  $Y$  is distance between LED and the beam coordinate, and  $B$  is distance between the user at a receiver plane and the beam coordinate.

The beam coordinate is the coordinate in which the center beam of the LED falls on the receiving plane, as shown in Fig. 3c. This can be calculated as:

$$\text{Beam} = r + L \quad (15)$$

where  $r$  is the radius of circular array LED, and  $L$  is the distance between the beam coordinate and the coordinate on the receiving plane, which is perpendicular to the LED. This can be calculated as:

$$L = \tan \theta \cdot h \quad (16)$$

where  $\theta$  is the inclination angle (z-angle), and  $h$  is height between source and receiver plane.

Fig. 3a shows a design of center LED, Fig. 3b shows a design of surrounding LED I, and Fig. 3c shows a design of surrounding LED II.

After designing the LED array, it is necessary to find the solution of designing parameters to achieve maximum possible communication area, also known as maximum coverage area. This paper adopts Genetic Algorithm to find the suitable solution for designing parameters with various simulation scenarios.

The simulation parameters in MATLAB programming are shown in Tab. 1. The height between source and receiver plane is approximately 2.15 m [12]. The area sizes are the commonly used standard size. A single LED is generally power used at 7 and 10 watts. As a result, the number of LEDs array should be used at 8, 9 and 12 LEDs for the sufficient illumination. Moreover, the designed parameters for the Genetic Algorithm to find the suitable solution are as follows: 1. z-angle is the inclination angle in which the surrounding LED are inclined from the center LED, 2. Semi-angle at half power is the angle of a diffusing lens covering an LED, and 3. Radius of LED array.

Table 1: The simulation parameters

Parameters	Values
The number of LED array	8, 9, 12
Single LED power (Watt)	7, 10
Area size (m <sup>3</sup> )	5 × 5 × 3, 4 × 5 × 3, 6 × 6 × 3
Height between source and receiver plane (m)	2.15
Photodiode area (cm <sup>2</sup> )	1
Refractive index at PD	1.5
Photodiode responsivity (R)	0.55
Field of view (FOV) (degree)	60

## 2.2 Algorithm

This paper adopts a Genetic Algorithm to find the suitable solution for designing parameters mentioned above of each simulation scenario to achieve maximum coverage area. This is determined from the area where communication can be performed at BER less than or equal to  $10^{-3}$  based on coverage illuminance that must cover greater than or equal 300 lux according to CIE standards. Moreover, Genetic Algorithm performance is analyzed by comparing the results with an exhaustive search.

### 2.2.1 Exhaustive Search

The exhaustive search is an algorithm that examines every search point inside the search region. However, a large amount of computation is required. As a result, the algorithm has low efficiency because of a very large search space [30]. Therefore, several fast algorithms have been proposed to save computation and enhance performance.

### 2.2.2 Genetic Algorithm

A Genetic Algorithm (GA) is a method for solving optimization problems based on a natural selection process that mimics biological evolution. GA was developed by John Holland and his

assistant in 1975 [31]. The advantage of this algorithm is the tolerance of errors in finding answers from complex sources which is difficult to be modelled using mathematical equations. For this reason, GA has become one of the most widely used optimization algorithms [32,33].

### 2.2.3 Genetic Algorithm Design

The GA can be divided into five processes as follows: 1. Initiation 2. Fitness Function 3. Selection 4. Crossover and 5. Mutation. Fig. 4 starts from:

- (1) Initiation: The process begins with determining search space for the solution of designed parameters, which consists of
  1. z-angle is the inclination angle in which the surrounding LEDs are inclined from the center LED. It is in the range of 1–70 degrees in the increments of 1 degree.
  2. semi-angle at half power is the angle of a diffusing lens covering an LED. It is in the range of 10–90 degrees in the increments of 5 degrees.
  3. radius of LED array. It is in the range of 0.1–1 meters in the increments of 0.1 meters.

The range of z-angle and radius of LED array are determined to be appropriate for the size of the room. It is considered that the LED beam can cover the entire area of the room. For semi-angle at half power range, the possible value of this angle is described in many scenarios [34–36]. Moreover, this angle can reach up to 90 degrees due to the limitation of LED.

Then, GA performs an individual element randomization which is called a population from the search space. Each individual element (chromosome) contains the solution of designed parameters (genes) as shown in Fig. 5.

2. Fitness Function: This process begins with determining the ability of an individual element to compete with other individual elements. Each individual element (chromosome) is randomized by GA which is substituted in the Fitness Function to find the coverage area based on coverage illuminance according to CIE standards.

3. Selection: This process begins with selecting the fittest individual elements and passing their genes to the next generation. Individual elements with high fitness have more chances to be selected for reproduction. This step selects the individual element with the maximum coverage area to match, and prepare for crossover by determining the heavy weight for an individual element with a large coverage area to increase the chances of finding a better coverage area. Then, two pairs of individual elements (parents) are randomized based on weight for crossover to find the next generation.

4. Crossover: When each pair of parents is matched, a crossover point is randomized within the Genes by determining the crossover point in point 1 or 2. For example, at crossover point 1, two offspring appeared by the exchange of their parent genes becomes the next generation. The population has a fixed size. When the new generations are formed, individual elements with the least fitness are eliminated, providing space for a new generation.

5. Mutation: Some of genes can be subjected to a mutation with a low random probability in certain new offspring. This increases the chances of finding new and better values by randomizing the chance of mutation at every gene. If any gene has a chance of mutation, the values in that range of parameters will be randomized again. Moreover, each new generation is better than the previous generation, as shown in Fig. 6.

The final process of GA brings a new generation back to Fitness Function for calculating the coverage area. Then, it checks if the maximum of duplicated coverage area is greater than or equal to five times. Also, if the accuracy is greater than or equal to 30%, the algorithm will terminate. The result is the suitable solution of designed parameters.

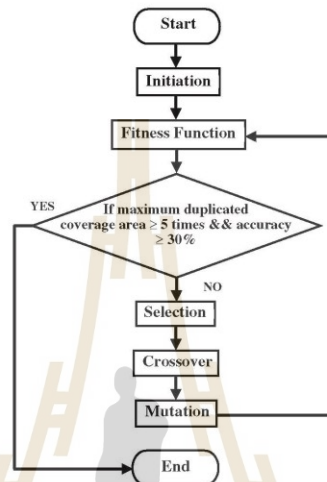


Figure 4: The flow chart of genetic algorithm processes

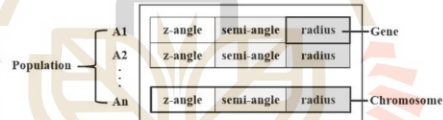


Figure 5: The initiation process of genetic algorithm design

### 2.3 Simulation Setup

The simulation is designed for four scenarios as shown in Tab. 2, where the commonly used standard area sizes, the number and power of the LEDs are different. The results are divided into two cases:

- (1) The results from the adopted Genetic Algorithm which is used to find the solution for designing parameters mentioned above to achieve maximum coverage area. This is determined from the area where communication can be performed with a BER less than or

- equal to  $10^{-3}$  based on coverage illuminance which must cover greater than or equal to 300 lux according to CIE standards.
- (2) Comparison of the results between the Genetic Algorithm and an exhaustive search, which are used to find every search point inside the search space.

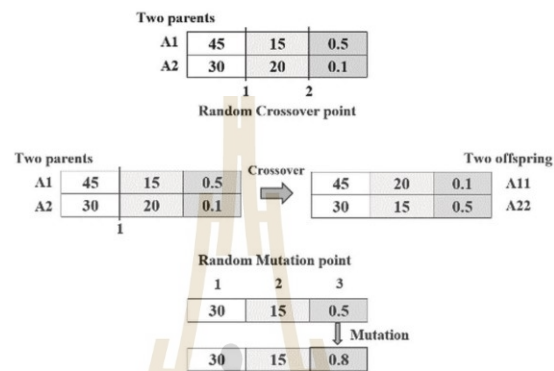


Figure 6: The crossover and mutation process of genetic algorithm design

Table 2: The simulation setup

Scenario	Area size (m <sup>3</sup> )	The number of LEDs	Power per LED (Watt)
1	5 × 5 × 3	9	10
2	5 × 5 × 3	12	7
3	4 × 5 × 3	8	7
4	6 × 6 × 3	12	10

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 Genetic Algorithm Result

In this subsection, we run a number of simulation using the Genetic Algorithm and select the best solution after five-time running for each scenario as follows:

##### 3.1.1 Scenario 1: Area Size of $5 \times 5 \times 3$ m<sup>3</sup>, 9 LEDs and 10 W per LED

Fig. 7 shows the Genetic Algorithm performance after eleven iterations. Fig. 7a shows the iteration of designed parameters. The suitable solutions of designed parameters are z-angle, semi-angle at half power, and radius which are equal to 35 degrees, 15 degrees, and 0.8 m, respectively. Also, Fig. 7b shows the maximum coverage area which is equal to 83.922%.

### 3.1.2 Scenario 2: Area Size of $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ , 12 LEDs and 7 W per LED

Fig. 8 shows the Genetic Algorithm performance after ten iterations. Fig. 8a shows the iteration of designed parameters. The suitable solutions of designed parameters are z-angle, semi-angle at half power, and radius which are equal to 32 degrees, 15 degrees, and 1 m respectively. Also, Fig. 8b shows the maximum coverage area which is equal to 73.622%.

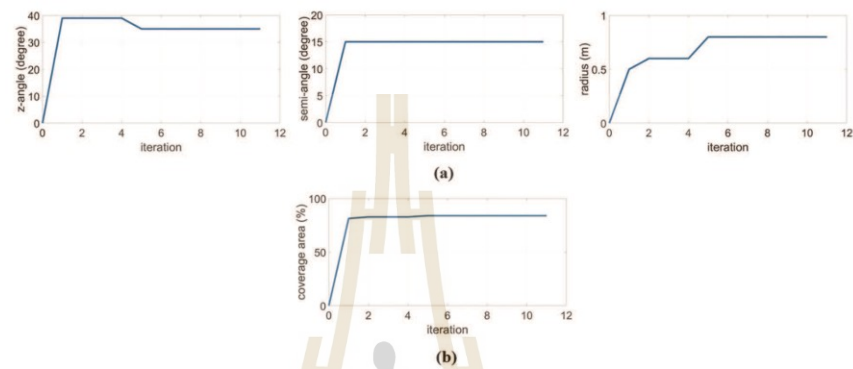


Figure 7: Genetic algorithm performance of scenario 1

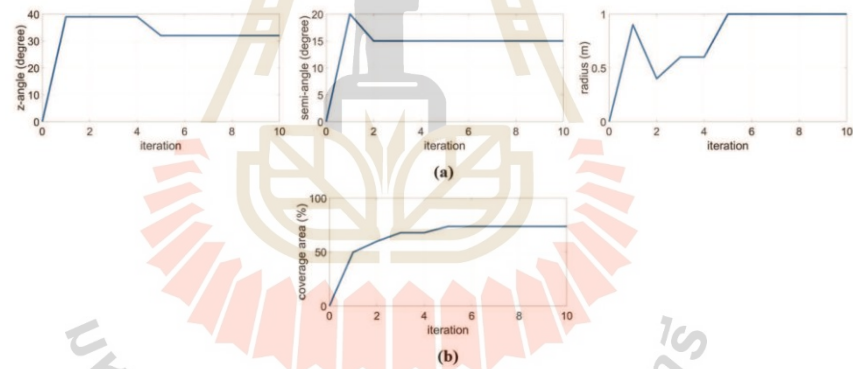


Figure 8: Genetic algorithm performance of scenario 2

### 3.1.3 Scenario 3: Area Size of $4 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ , 8 LEDs and 7 W per LED

Fig. 9 shows the Genetic Algorithm performance after eight iterations. Fig. 9a shows the iteration of designed parameters. The suitable solutions of designed parameters are z-angle,

semi-angle at half power, and radius which are equal to 41 degrees, 20 degrees, and 1 m respectively. Also, Fig. 9b shows the maximum coverage area which is equal to 78.181%.

#### 3.1.4 Scenario 4: Area Size of $6 \times 6 \times 3 \text{ m}^3$ , 12 LEDs and 10 W per LED

Fig. 10 shows the Genetic Algorithm performance after seven iterations. Fig. 10a shows the iteration of designed parameters. The suitable solutions of designed parameters are z-angle, semi-angle at half power, and radius which are equal to 44 degrees, 15 degrees, and 0.6 m respectively. Also, Fig. 10b shows the maximum coverage area which is equal to 73.677%.

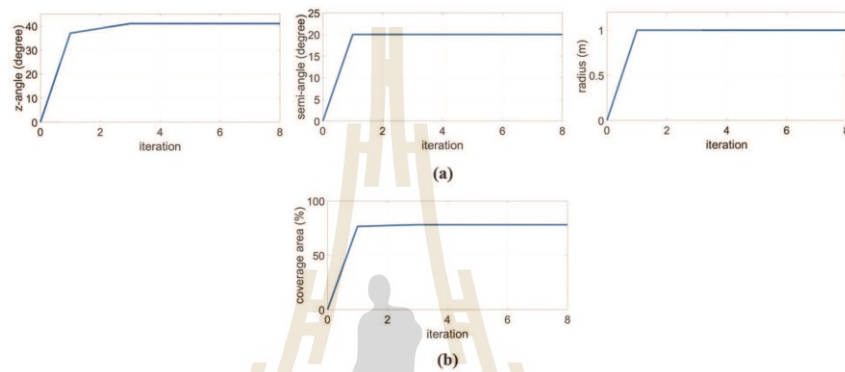


Figure 9: Genetic algorithm performance of scenario 3

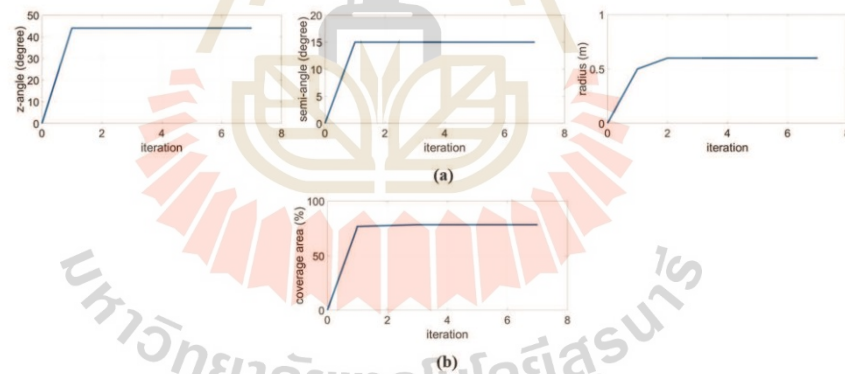


Figure 10: Genetic algorithm performance of scenario 4

From 4 scenarios, for GA cases, each parameter in the figure is adjusted because GA is trying to adapt itself to the suitable solution of designed parameters, which achieves the maximum coverage area. Also, we can see that ever-increasing coverage area is obtained in each iteration until reaching the highest value. So, GA can find a suitable solution of designed parameters to achieve maximum coverage area.

### 3.2 Comparison Between an Exhaustive Search and Genetic Algorithm

Tabs. 3–6 show the comparison between both algorithms, and they produce the same best results. The exhaustive search finds the solution from the search space. It takes up to 480 min to select a suitable solution which achieves the maximum coverage in each scenario, but the Genetic Algorithm finds the suitable solution by reducing the computational time which takes less time than an exhaustive search approximately 382 min in the proposed scenarios.

#### 3.2.1 Scenario 1

**Table 3:** Comparison between an exhaustive search and a Genetic Algorithm in scenario 1

Solution	Algorithm	
	Exhaustive search	Genetic Algorithm
z-angle (°)	35	35
Semi-angle (°)	15	15
Radius (m)	0.8	0.8
Coverage area (%)	83.922	83.922
Time (minute)	480	87

#### 3.2.2 Scenario 2

**Table 4:** Comparison between an exhaustive search and a Genetic Algorithm in scenario 2

Solution	Algorithm	
	Exhaustive search	Genetic Algorithm
z-angle (°)	32	32
Semi-angle (°)	15	15
Radius (m)	1	1
Coverage area (%)	73.622	73.622
Time (minute)	480	87



## 3.2.3 Scenario 3

**Table 5:** Comparison between an exhaustive search and a Genetic Algorithm in scenario 3

Solution	Algorithm	
	Exhaustive search	Genetic Algorithm
z-angle (°)	41	41
Semi-angle (°)	20	20
Radius (m)	1	1
Coverage area (%)	78.181	78.181
Time (minute)	480	61

## 3.2.4 Scenario 4

**Table 6:** Comparison between an exhaustive search and a Genetic Algorithm in scenario 4

Solution	Algorithm	
	Exhaustive search	Genetic Algorithm
z-angle (°)	44	44
Semi-angle (°)	15	15
Radius (m)	0.6	0.6
Coverage area (%)	73.677	73.677
Time (minute)	480	157

Also, both algorithms provide coverage illuminance equal to 100%, which has the distribution of illuminance greater than or equal to 300 lux according to the CIE standards in every scenario, as shown in Fig. 11.

Figs. 11a–11d show the distribution of illuminance for scenarios 1, 2, 3 and 4, respectively.

The coverage area is determined from the area where the communication can be performed on the receiving plane with a BER less than or equal to  $10^{-3}$  as shown in Fig. 12. After using GA to find the suitable solution, the coverage area is equal to 83.922%, 73.622%, 78.181%, and 73.677% in which the system can support up to 9, 12, 8, and 12 simultaneous users, as shown in Figs. 12a–12d respectively. However, the interference among the light of LED beams is found in some areas, which is the position on the receiving plane with a BER greater than  $10^{-3}$ . As a result, users are unable to communicate in this interference area.

Figs. 12a–12d show the distribution of BER for scenarios 1, 2, 3 and 4, respectively.

Therefore, this paper proposes a method to increase the coverage area and reduce interference using the switched-beam technique. For example, Scenario 1 can support up to 9 simultaneous users, as shown in Fig. 13a. The position on the receiving plane with a BER greater than  $10^{-3}$  is the interference area. If users want to communicate in the interference area. This can be solved by incorporating an LED beam from the closest LED beam to send data to users, as shown in Figs. 13b and 13c. Not only the switched-beam technique can provide performance enhancement of communication with an increased coverage area, but they also can effectively communicate in the interference area. However, this result indicates the loss of one user when combining the LED beams at a time.

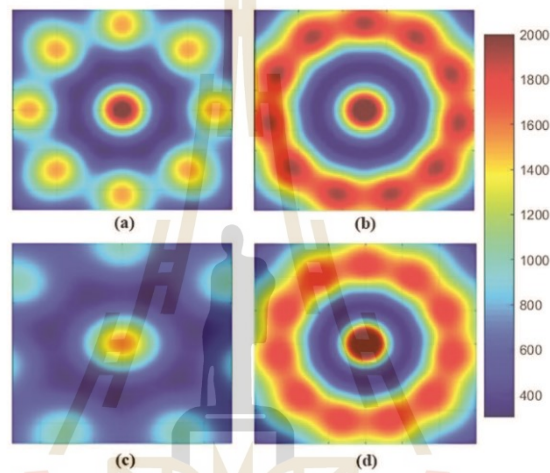


Figure 11: The distribution of illuminance

Fig. 13a shows a regular switched-beam, Fig. 13b shows the incorporating of an LED beam in two positions, and Fig. 13c shows the incorporating of an LED beam in three positions.

The coverage area increases from 83.922% to 86.496% and 88.027%, as shown in Fig. 13a–13c, respectively. This switched-beam technique provides a good performance for all scenarios.

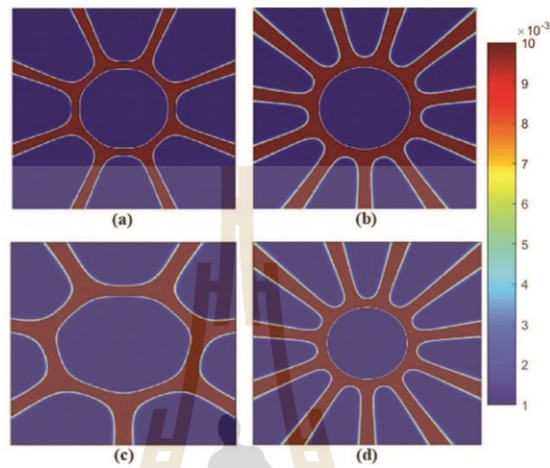
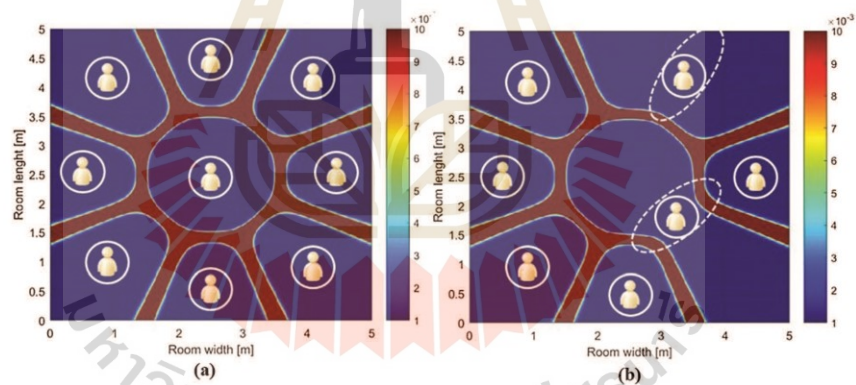


Figure 12: The distribution of bit error rate



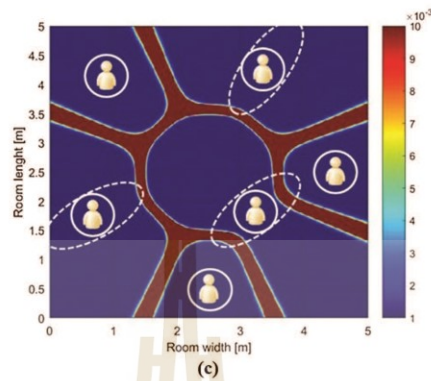


Figure 13: The coverage area in scenario 1

#### 4 Conclusions

This paper has presented the design of an indoor VLC system using the switched-beam technique through MATLAB programming, which has designed the LEDs to be arranged in a circular array. The communication is performed through the beam of each LED. The Genetic Algorithm is adopted to find the suitable solution for designing parameters. From the simulation results, a Genetic Algorithm can be used to find the suitable solution for designing parameters of each simulation scenario with less computational time than an exhaustive search approximately 382 min in proposed scenarios. Also, the maximum coverage area based on coverage illuminance according to the CIE standards can be achieved. Moreover, the switched-beam technique can enhance indoor VLC by increasing the number of simultaneous users and the coverage area.

**Funding Statement:** This work was supported by Suranaree University Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

**Conflicts of Interest:** The authors declare that they have no conflicts of interest to report regarding the present study.

#### References

- [1] P. Kocharoen, "Visible light communication: Importance and Thai preparations," in *Procedia Computer Science*, Chiang Mai, Thailand, pp. 51–54, 2016.
- [2] L. E. M. Matheus, A. B. Vieira, L. F. M. Vieira, M. A. M. Vieira and O. Gnawali, "Visible light communication: Concepts, applications and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3204–3237, 2019.
- [3] A. Jovicic, J. Li and T. Richardson, "Visible light communication: Opportunities, challenges and the path to market," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 26–32, 2013.
- [4] M. Saadi, T. Ahmad, M. K. Saleem and L. Wuttisittikulkij, "Visible light communication—an architectural perspective on the applications and data rate improvement strategies," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 30, no. 2, pp. e3436, 2019.

- [5] A. R. Ndjiongue, H. C. Ferreira and T. M. N. Ngatched, "Visible light communications (VLC) technology," in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Johannesburg, South Africa, pp. 1–15, 2000.
- [6] M. Saadi, L. Wuttisittikulkij, Y. Zhao and P. Sangwongngam, "Visible light communication: Opportunities, challenges and channel models," *International Journal of Electronics & Informatics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, 2013.
- [7] A. G. Bell, "The photophone," *Science*, vol. 1, no. 11, pp. 130–134, 1880.
- [8] M. Saadi, A. Bajpai, Y. Zhao, P. Sangwongngam and L. Wuttisittikulkij, "Design and implementation of secure and reliable communication using optical wireless communication," *Frequenz*, vol. 68, no. 11–12, pp. 501–509, 2014.
- [9] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama and M. Nakagawa, "Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 86, no. 8, pp. 2440–2454, 2003.
- [10] H. Haas, L. Yin, C. Chen, S. Videv, D. Parol *et al.*, "Introduction to indoor networking concepts and challenges in liFi," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 2, pp. A190–A203, 2020.
- [11] M. T. Niaz, F. Imdad, S. Kim and H. S. Kim, "Deployment methods of visible light communication lights for energy efficient buildings," *Optical Engineering*, vol. 55, no. 10, pp. 106113, 2016.
- [12] P. Priyanka, M. Singh, H. S. Gill, S. Kaur and M. L. Singh, "Improvement of uniformity of illumination for circular LED arrangement in VLC system," in *2018 Int. Conf. on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE)*, Bhubaneswar, India, pp. 2214–2217, 2018.
- [13] S. Kim and S. Kim, "Performance improvement of visible light communications using optical beam-forming," in *2013 Fifth Int. Conf. on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Da Nang, Vietnam, pp. 362–365, 2013.
- [14] J. Remenyi, P. Varhegyi, L. Domjan, P. Koppa and E. Lorincz, "Amplitude, phase, and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid-crystal display at  $\sim 400$  nm," *Applied Optics*, vol. 42, no. 17, pp. 3428–3434, 2003.
- [15] S. M. Kim, "Visible light communication employing optical beamforming: A review," *Current Optics and Photonics*, vol. 2, no. 4, pp. 308–314, 2018.
- [16] T. H. Do, J. Hwang and M. Yoo, "Analysis of the effects of LED direction on the performance of visible light communication system," *Photonic Network Communications*, vol. 25, no. 1, pp. 60–72, 2013.
- [17] L. A. Azizan, M. S. Ab-Rahman, M. R. Hassan, A. A. A. Bakar and R. Nordin, "Optimization of signal-to-noise ratio for wireless light-emitting diode communication in modern lighting layouts," *Optical Engineering*, vol. 53, no. 4, pp. 045103, 2014.
- [18] G. P. Varma, "Optimum power allocation for uniform illuminance in indoor visible light communication," *Optics Express*, vol. 26, no. 7, pp. 8679–8689, 2018.
- [19] J. Ding, Z. Huang and Y. Ji, "Evolutionary algorithm based power coverage optimization for visible light communications," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 4, pp. 439–441, 2012.
- [20] W. Jiaan, X. Ancheng, J. Jintao and G. Linyang, "Optimization lighting layout of indoor visible light communication system based on improved artificial fish swarm algorithm," *Journal of Optics*, vol. 22, no. 3, pp. 035701, 2020.
- [21] M. Kumar, M. Husain, N. Upreti and D. Gupta, "Genetic algorithm: Review and application," Available at SSRN 3529843, vol. 2, no. 2, 451–454, pp. 2010.
- [22] Y. Zhou, Y. Li and Y. Zhang, "A negotiated pricing model for innovation services based on the multiobjective genetic algorithm," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 27, no. 1, pp. 191–203, 2021.
- [23] T. Kamalakis, L. Dogkas and F. Simou, "Application of a genetic algorithm to optimize the performance of a visible light communications system: Key concepts and preliminary results," in *11th Hellenic Conf. on Artificial Intelligence*, New York, United States, pp. 129–134, 2020.
- [24] J. H. Liu, Q. Li and X. Y. Zhang, "Cellular coverage optimization for indoor visible light communication and illumination networks," *Journal of Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 891–898, 2014.

- [25] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, 2004.
- [26] M. Rahaim and T. D. C. Little, "SINR analysis and cell zooming with constant illumination for indoor VLC networks," in *2013 2nd Int. Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*, Newcastle, United Kingdom, pp. 20–24, 2013.
- [27] L. Zeng, D. O'Brien, H. Le-Minh, K. Lee, D. Jung *et al.*, "Improvement of data rate by using equalization in an indoor visible light communication system," in *2008 4th IEEE Int. Conf. on Circuits and Systems for Communications*, Shanghai, China, pp. 678–682, 2008.
- [28] N. A. Yatari Putri, A. Hambali and B. Pamukti, "VLC system performance evaluation with addition of optical concentrator on photodetector," in *2019 IEEE Int. Conf. on Signals and Systems (ICSigSys)*, Bandung, Indonesia, pp. 167–172, 2019.
- [29] "The international commission on illumination (CIE), "Lighting of indoor work places (ISO 8995:2002 CIE S 008/E:2001)," in *Int. Commission on Illumination*, Vienna, Austria, pp. 1–18, 2001.
- [30] H. M. Hang and J. W. Woods, "*Handbook of Visual Communications*," San Diego, California: Academic Press, pp. 147–188, 1995.
- [31] X. S. Yang, "*Nature-inspired Optimization Algorithms*," London, United Kingdom: Elsevier, Academic Press, pp. 77–86, 2020.
- [32] L. M. Schmitt, "Theory of genetic algorithms," *Theoretical Computer Science*, vol. 259, no. 1, pp. 1–61, 2001.
- [33] J. McCall, "Genetic algorithms for modelling and optimisation," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 184, no. 1, pp. 205–222, 2005.
- [34] J. Feng, L. Ding and Y. Wang, "Channel simulation of non-imaging optical MIMO communication," *Optics and Photonics Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 212–216, 2013.
- [35] H. Q. Nguyen, J. H. Choi, M. Kang, Z. Ghassemlooy, D. H. Kim *et al.*, "A MATLAB-based simulation program for indoor visible light communication system," in *2010 7th Int. Symp. on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2010)*, Newcastle, United Kingdom, pp. 537–541, 2010.
- [36] L. Zeng, D. O'Brien, H. L. Minh, G. Faulkner, K. Lee *et al.*, "High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 9, pp. 1654–1662, 2009.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวลดาธัญญา พุ่มแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2540 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนอัสสัมชัญนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสุนารีวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสุรธรรมพิทักษ์ จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม และคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

