



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาสมรรถภาพของการส่งกระจายข้อมูลผ่านทางแสงสว่างของหลอดแอลอีดี

A Performance Study of Data Broadcasting over Light Emitting Diode Illumination

นามผู้วิจัย นายสุกโชค วีระชวณะศักดิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรระ จงบุรี, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรระ จงบุรี, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสมรรถภาพของการส่งกระจายข้อมูล
ผ่านทางแสงสว่างของหลอดแอลอีดี

A Performance Study of Data Broadcasting
over Light Emitting Diode Illumination

โดย

นายสุภโชค วีระชนะศักดิ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุภโชค วีระชนะศักดิ์ 2557: การศึกษาสมรรถภาพของการส่งกระจายข้อมูลผ่านทาง การส่องสว่างของหลอดแอลอีดี ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชร จงบุรี, Ph.D. 79 หน้า

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวัดสมรรถนะของการใช้หลอดไฟแอลอีดีสำหรับการทำงาน ร่วมกันระหว่างการส่องสว่างและการสื่อสารข้อมูลในพื้นที่ห้องทำงาน การประเมินผลทำได้โดย ใช้ค่าความส่องสว่างและค่าความล่าช้าในการแพร่กระจายเป็นดัชนีในการชี้วัดสำหรับการส่องสว่าง และการสื่อสารตามลำดับ ขอบเขตของงานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบสมรรถภาพการใช้ แหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด, 2 ชุด, 4 ชุด, 8 ชุด และ 9 ชุด แหล่งกำเนิดแสงติดตั้งบริเวณเพดานและ เครื่องรับแสงติดตั้งบนโต๊ะทำงานสูง 0.85 เมตร การคำนวณการสะท้อนจะคำนึงถึงการสะท้อน ของผนังเท่านั้น ผลจากการจำลองพบว่าแสงจากการสะท้อนและจากแหล่งกำเนิดแสงแบบหลาย แหล่งกำเนิด จะทำให้สมรรถภาพในการส่องสว่างเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้สมรรถภาพในการสื่อสาร ข้อมูลลดลง การจำลองระบบแบบแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด เป็นรูปแบบที่มีสมรรถภาพดีที่สุด เนื่องจากความส่องสว่างและความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ กำหนดไว้ โดยมีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจายน้อยที่สุด

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Suphachoke Weerachawanasak 2014: A Performance Study of Data Broadcasting over Light Emitting Diode Illumination. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Wachira Chongburee, Ph.D. 79 pages.

This research proposes a method to evaluate the performance of light emitting diode for both illumination and data communication in an office room. The evaluation adopts the uniformity and delay spread as the indicator for illumination performance and data broadcasting performance respectively. The research scope is to compare the performances of using a single light source, 2-light transmitter, 4-light transmitter, 8-light transmitter and 9-light transmitter. The sources are mounted on the ceiling and the optical receiver is placed on a desk with 0.85 meters of height. The reflection calculation takes into account the reflection of wall only. The results show that light from reflection and multiple light sources yield better illuminance performance but poor communication performance. The 4-light transmitter is found to be the best performance because it provides the illuminance and uniformity that meet standard meanwhile maintains the least root mean square delay spread.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วชิระ จงบุรี อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย แนะนำ ช่วยเหลือ ตลอดช่วง
ระยะเวลาการศึกษา ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาท
ความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ในอนาคตต่อไป ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ผู้ประสานงาน พี่ๆ และเพื่อนๆ ในโครงการ
ความร่วมมือทางวิชาการระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ได้
ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

คุณค่าและประโยชน์อันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และ
ครอบครัวที่เป็นกำลังใจ คอยอบรมสั่งสอน ให้ความรัก ความหวังใจ และให้การสนับสนุนผู้วิจัยใน
ทุกๆ ด้านเป็นอย่างยิ่ง

สุภโชค วีระชวานะศักดิ์
พฤศจิกายน 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	30
อุปกรณ์	30
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	43
ผล	43
วิจารณ์	71
สรุปและข้อเสนอแนะ	74
สรุป	74
ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	77
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 หน่วยวัดแสง	6
2 เปรียบเทียบระหว่างแอลอีดีกับเลเซอร์ไดโอด	7
3 ช่วงความยาวคลื่นสำหรับวัสดุของโฟโตนิกที่แตกต่างกัน	12
4 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้	38
5 ความส่องสว่างในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ($\rho=0$ และ $\rho=0.8$)	49
6 ความล่าช้าในการแพร่กระจายในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ($\rho=0$ และ $\rho=0.8$)	59
7 ความส่องสว่างและความล่าช้าในการแพร่กระจาย โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 จุดในตำแหน่งที่ต่างกัน ($\rho=0.8$)	64
8 ความส่องสว่างและความล่าช้าในการแพร่กระจาย โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 จุดในตำแหน่งที่ต่างกัน ($\rho=0.5$)	67
9 ความส่องสว่างและความล่าช้าในการแพร่กระจาย โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 จุด ที่ตำแหน่ง I ($R = 3.18$ m) ซึ่งมีความกว้างลำแสงที่ต่างกัน โดยใช้โคมบีบบังคับลำแสง ($\rho=0.8$)	68
10 ความส่องสว่างและความล่าช้าในการแพร่กระจาย โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 จุด ที่ตำแหน่ง I ($R = 3.18$ m) ซึ่งมีความกว้างลำแสงที่ต่างกัน โดยปรับมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ($\rho=0.8$)	70

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ความยาวคลื่นของแสงที่สามารถมองเห็นได้ในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2	การเชื่อมโยงแบบระดับสายตา	14
3	การเชื่อมโยงแบบไม่อยู่ในระดับสายตา	14
4	การเชื่อมโยงแบบแพร่กระจาย	15
5	การเชื่อมโยงแบบการติดตาม	15
6	การกำหนดจำนวนของเครื่องรับสัญญาณ	16
7	การสะท้อนแสงแบบกระจกเงา (Specular)	16
8	การสะท้อนแสงแบบแพร่กระจาย (Spread)	17
9	การสะท้อนแสงแบบกระจัดกระจาย (Diffuse)	17
10	กฎโคไซน์ของแลมเบิร์ต	18
11	การแผ่รังสีและการสะท้อนแบบแลมเบิร์ตเทียบ	18
12	การกำหนดขนาดพื้นที่ผิวย่อย dA	19
13	มุมต้นของยอดกรวย (Apex angle)	20
14	รูปแบบการแพร่กระจายแบบในระดับสายตาและแบบการสะท้อนของแสง	22
15	การแพร่กระจายความส่องสว่าง	23
16	แหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน	31
17	แหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน	32
18	แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน	32
19	แหล่งกำเนิดแสง 8 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน	33
20	แหล่งกำเนิดแสง 9 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน	33
21	รูปแบบการแพร่กระจายแบบในระดับสายตาและแบบการสะท้อนของแสง	34
22	แผนผังลำดับงานการหารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด	40
23	แผนผังลำดับงานการหาความกว้างลำแสงของเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด	42
24	ผลการจำลองห้องทำงานที่มีแหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน	43
25	ผลการจำลองห้องทำงานที่มีแหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน	44
26	ผลการจำลองห้องทำงานที่มีแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน	44
27	ผลการจำลองห้องทำงานที่มีแหล่งกำเนิดแสง 8 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน	45

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
28 ผลการจำลองห้องทำงานที่มีแหล่งกำเนิดแสง 9 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน	45
29 แหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด; (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 409.30 lx ค่าสูงสุด 1544.40 lx; (b) การแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง ค่าต่ำสุด 0.52 mW ค่าสูงสุด 5.82 mW.	46
30 แหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด; (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 433.80 lx ค่าสูงสุด 1095.90 lx; (b) การแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง ค่าต่ำสุด 0.61 mW ค่าสูงสุด 3.68 mW.	47
31 แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด; (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 513.08 lx ค่าสูงสุด 867.80 lx; (b) การแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง ค่าต่ำสุด 0.80 mW ค่าสูงสุด 2.50 mW.	47
32 แหล่งกำเนิดแสง 8 ชุด; (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 473.42 lx ค่าสูงสุด 921.06 lx; (b) การแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง ค่าต่ำสุด 0.70 mW ค่าสูงสุด 2.92 mW.	48
33 แหล่งกำเนิดแสง 9 ชุด; (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 466.29 lx ค่าสูงสุด 989.96 lx; (b) การแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง ค่าต่ำสุด 0.68 mW ค่าสูงสุด 3.24 mW.	48
34 ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ($\rho=0$ และ $\rho=0.8$)	50
35 จุดสังเกตติดตั้งเครื่องรับแสงบน โต๊ะทำงาน A (0, 0), B (1, 1) และ C (2, 2)	50
36 (a) – (f) เวลาในการเดินทางของแสงแต่ละเส้นทางในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ แตกต่างกัน ที่ตำแหน่งเครื่องรับแสง A (0,0) และ $\rho=0.8$	51
37 (a) – (f) เวลาในการเดินทางของแสงแต่ละเส้นทางในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ แตกต่างกัน ที่ตำแหน่งเครื่องรับแสง B (1,1) และ $\rho=0.8$	52
38 (a) – (f) เวลาในการเดินทางของแสงแต่ละเส้นทางในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ แตกต่างกัน ที่ตำแหน่งเครื่องรับแสง C (2,2) และ $\rho=0.8$	53
39 (a) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง; (b) - (c) ผลความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด	54

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
40 (a) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง; (b) - (c) ผลความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด	55
41 (a) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง; (b) - (c) ผลความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด	56
42 (a) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง; (b) - (c) ผลความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 8 ชุด	57
43 (a) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง; (b) - (c) ผลความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 9 ชุด	58
44 อัตราการส่งข้อมูลสูงสุดในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ($\rho=0$ และ $\rho=0.8$)	60
45 ปรับตำแหน่งจุดติดตั้ง รัศมี R วัดจากจุดศูนย์กลางห้อง (0,0) ในแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด	61
46 เมื่อ $R = 0.35$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 412.30 lx ค่าสูงสุด 1484.70 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0.06 ns ค่าสูงสุด 0.98 ns	61
47 เมื่อ $R = 0.71$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 422.20 lx ค่าสูงสุด 1330.3 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0.06 ns ค่าสูงสุด 1.46 ns	61
48 เมื่อ $R = 1.06$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 440.80 lx ค่าสูงสุด 1135.90 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0.07 ns ค่าสูงสุด 1.75 ns	62
49 เมื่อ $R = 1.41$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 470.80 lx ค่าสูงสุด 949.65 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.92 ns	62
50 เมื่อ $R = 1.77$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 513.08 lx ค่าสูงสุด 867.80 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.83 ns	62
51 เมื่อ $R = 2.12$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 564.04 lx ค่าสูงสุด 870.80 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.68 ns	63
52 เมื่อ $R = 2.48$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 564.79 lx ค่าสูงสุด 890.05 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.64 ns	63
53 เมื่อ $R = 2.83$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 502.26 lx ค่าสูงสุด 870.68 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.65 ns	63

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
54	เมื่อ $R = 3.18$ m และ $\rho = 0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 444.90 lx ค่าสูงสุด 765.16 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.79 ns	64
55	ความส่องสว่างที่ต่ำที่สุด โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($\rho = 0.8$) ติดตั้งที่พิกัดต่างกัน	65
56	ความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายของแสง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($\rho = 0.8$) ติดตั้งที่พิกัดต่างกัน	65
57	ความล่าช้าในการแพร่กระจายของแสง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($\rho = 0.8$) ติดตั้งที่ พิกัดต่างกันและมีค่าความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายของแสงมากกว่า 0.6	66

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

กฟภ.	=	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
พ.ศ.	=	พุทธศักราช
APD	=	Avalanche photodiode detector
EN	=	the European lighting norm
FOV	=	Field of view
GaAs	=	Gallium arsenide
IR	=	Infrared
ISI	=	Intersymbol interference
ISO	=	International Organization for Standardization
LED	=	Light emitting diode
LOS	=	Line of sight
lu	=	lumen
lx	=	lux
MATLAB	=	Matrix Laboratory
NLOS	=	Nonline of sight
OOK	=	On and off keying
OSNR	=	Optical signal to noise ratio
OWC	=	Optical wireless communication
PD	=	Photodiode
PEA	=	Provincial Electricity Authority
RF	=	Radio frequency
RGB	=	Red, green and blue
RMS	=	Root mean square
Rx	=	Receiver
SNR	=	Signal to noise ratio
Tx	=	Transmitter
UV	=	Ultraviolet
VL	=	Visible light
VLC	=	Visible light communication

การศึกษาสมรรถภาพของการส่งกระจายข้อมูล
ผ่านทางแสงสว่างของหลอดแอลอีดี

A Performance Study of Data Broadcasting
over Light Emitting Diode Illumination

คำนำ

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ให้บริการพลังงานไฟฟ้าทั่วประเทศ ยกเว้นในเขตกรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ และนนทบุรี สืบเนื่องจากการประหยัดพลังงานเป็นหนึ่งในหลักสำคัญของนโยบายด้านพลังงาน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจึงจัดทำโครงการ “PEA Road to LED” มุ่งสู่ความเป็นผู้นำการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพด้วยเทคโนโลยีแอลอีดีในทุกภาคส่วนทั้งภาครัฐ ภาคสาธารณะ ภาคอุตสาหกรรม ผ่านโครงการบริหารจัดการเพื่อการประหยัดพลังงานต่างๆ โดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้นำร่องการเปลี่ยนหลอดไฟภายในอาคารสำนักงานใหญ่ มาเป็นหลอดประหยัดพลังงานแอลอีดีเสร็จเรียบร้อยแล้ว การดำเนินงานดังกล่าว เป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาสำนักงานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้สู่การเป็น “PEA Green Office” อย่างไรก็ตาม การประกาศ “PEA Road to LED” ถือได้ว่าเป็นการสร้างเชื่อมั่นให้แก่ประชาชน ผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งภาครัฐและเอกชน ผู้ประกอบการภาคอุตสาหกรรมได้เดินร่วมทางไปกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างยั่งยืนด้วยเทคโนโลยีแอลอีดีเพื่อช่วยลดปัญหาวิกฤตพลังงานในอนาคตและเกิดประโยชน์สูงสุด

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการเจริญเติบโตของการทำงานวิจัยทางด้านการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ และแนวความคิดการใช้หลอดไฟแอลอีดีสำหรับการทำงานร่วมกันระหว่างแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูล ทำให้เป็นการใช้งานที่น่าสนใจ นั่นคือเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (Visible Light Communication, VLC) หลอดแอลอีดีเป็นปัจจัยหลักที่ขับเคลื่อนสำหรับเทคโนโลยีนี้

ความนิยมที่เพิ่มขึ้นของหลอดแอลอีดีคือการที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าและให้ความสว่างสูงกว่า ใช้พลังงานต่ำและไม่มีอันตรายต่อสุขภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นๆ เช่น หลอดไส้ หลอดฟลูออเรสเซนต์ ถึงแม้ว่าหลอดแอลอีดียังคงมีราคาแพงกว่ามากเมื่อเทียบ

กับหลอดไฟหรือหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้น แต่บุคคลทั่วไปก็ตั้งเป้าและมีเจตนาที่จะเปลี่ยนทดแทน ซึ่งเป็นที่คาดการณ์ว่าราคาจะลดลงอย่างมากด้วยเวลาและการยอมรับในวงกว้าง

เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ไม่ได้ถูกจำกัดเพียงแค่เครือข่ายภายในบ้านเท่านั้น ยังสามารถสื่อสารด้วยความเร็วสูงผ่านโครงสร้างพื้นฐานของแสงในสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ เช่น การสื่อสารในที่ทำงาน การติดต่อสื่อสารระหว่างรถยนต์ด้วยกัน การสื่อสารด้วยความเร็วสูงในห้องโดยสารบนเครื่องบิน การสื่อสารในรถไฟ การบริหารจัดการและการสื่อสารข้อความสั้นๆกับสัญญาณไฟจราจร

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้มีการใช้งานการสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สายโดยใช้คลื่นวิทยุเป็นช่องทางในการติดต่อสื่อสารและใช้อากาศเป็นตัวกลางในการรับส่งข้อมูลระหว่างกัน ทำให้ไม่ต้องเดินสายสัญญาณและติดตั้งใช้งานได้สะดวกขึ้น ซึ่งระยะทางของสัญญาณมีผลกระทบจากสิ่งรอบข้างหลายๆ อย่าง เช่น โทรศัพท์มือถือ ความหนาของกำแพง เครื่องใช้ไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ รวมถึงมีผลเสียกับร่างกายมนุษย์ด้วยเช่นกัน สิ่งเหล่านี้มีผลกระทบต่อการใช้งานเครือข่ายไร้สายทั้งสิ้น โดยเฉพาะในสถานีไฟฟ้า การใช้งานการสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สายโดยใช้คลื่นวิทยุจะถูกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนอย่างมาก เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการ จะต้องมีการเลือกเทคโนโลยีและออกแบบระบบสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สายที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ในงานวิจัยนี้จึงได้แนวความคิดการใช้หลอดไฟแอลอีดีสำหรับการทำงานร่วมกันระหว่างแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูล โดยนำเทคโนโลยีแอลอีดี มาทำการศึกษาวิเคราะห์สมรรถนะความส่องสว่างของหลอดแอลอีดีที่ใช้ภายในอาคาร โดยการส่งข้อมูลแบบกระจายสัญญาณผ่านแสงจากหลอดแอลอีดีสำหรับการสื่อสารข้อมูลด้วยแสงที่มองเห็นได้แบบไร้สาย โดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (VLC) ในการรับส่งข้อมูล เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกเทคโนโลยีสื่อสารให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ เชื้อถือได้ คุ่มค่ากับการลงทุน มีประสิทธิภาพมากที่สุดและเหมาะสมกับความต้องการใช้งาน

วัตถุประสงค์

เพื่อวัดสมรรถนะของการใช้แอลอีดีในเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (VLC) ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด และสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมห้องทำงาน

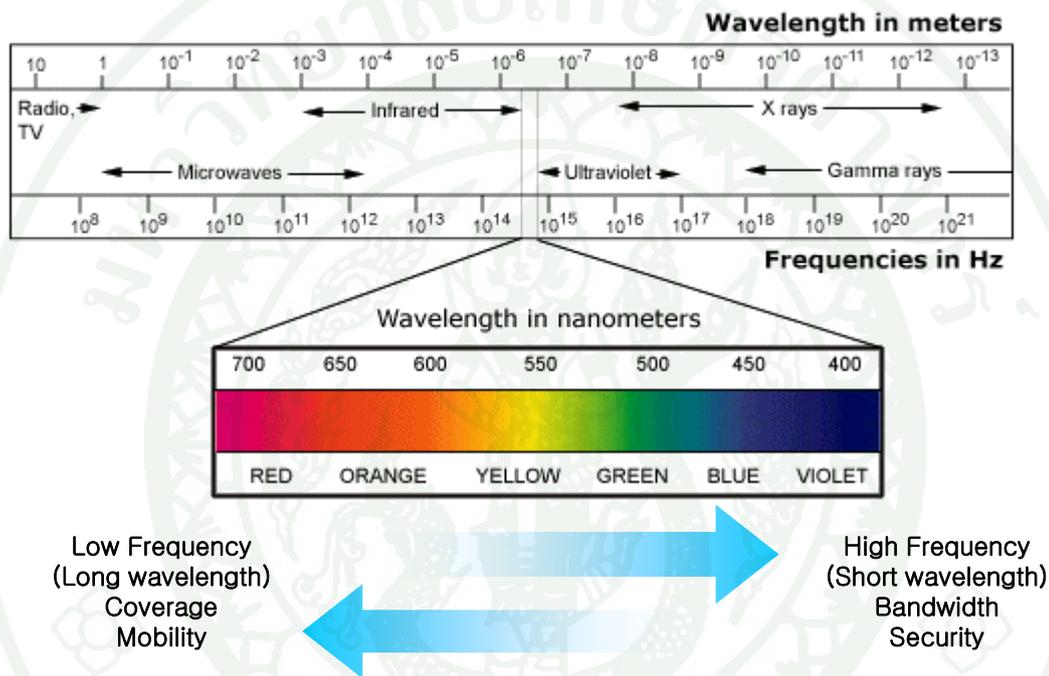
โดยมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ศึกษาวิธีการคำนวณการแพร่กระจายและการลดทอนสัญญาณ ทางการส่องสว่างและการสื่อสารข้อมูล สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (VLC)
2. วิเคราะห์สมรรถภาพและประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (VLC) สำหรับการใช้งานการสื่อสารผ่านเทคโนโลยีแอลอีดี โดยการส่งข้อมูลแบบกระจายสัญญาณ
3. เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบระบบสื่อสารสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (VLC) จากพื้นที่ห้องทำงาน เพื่อเป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายไร้สาย

การตรวจเอกสาร

1. แสงที่ตามองเห็น

แสงหรือคลื่นที่ตามองเห็นเป็นช่วงหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถมองเห็นได้ด้วยดวงตาของมนุษย์ ความยาวคลื่นช่วงนี้อยู่ประมาณระหว่าง 380-780 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ความยาวคลื่นของแสงที่สามารถมองเห็นได้ในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (SEEC, 2007)

ที่มา: SERC (2007)

แสง (light) คือ คลื่นชนิดหนึ่งที่มีการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นที่สายตาของมนุษย์มองเห็น และความยาวคลื่นที่ต่างกันจะทำให้มองเห็นสีต่างกัน หรือในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่รังสีอินฟราเรดถึงรังสีอัลตราไวโอเล็ตนั่นเอง โดยแสงมีคุณสมบัติพื้นฐาน คือ ความเข้ม (ความสว่างหรือแอมพลิจูด ซึ่งปรากฏแก่สายตาตามนุษย์ในรูปความสว่างของแสง), ความถี่ (หรือความยาวคลื่น ซึ่งปรากฏแก่สายตาตามนุษย์ในรูปสีของแสง) และโพลาไรเซชัน (มุมการสั่นของคลื่น ซึ่งโดยปกติมนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้)

แสงจะแสดงคุณสมบัติทั้งของคลื่นและของอนุภาคในเวลาเดียวกัน อธิบายได้ดังนี้

แสงเป็นคลื่น : แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ระนาบการสั่นของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้า และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น และแสงก็มีการเลี้ยวเบนด้วย ซึ่งการเลี้ยวเบนก็แสดงถึงคุณสมบัติของคลื่น

แสงเป็นอนุภาค : แสงเป็นก้อนพลังงานมีค่าพลังงาน $E = hf$ โดยที่ h คือค่าคงตัวของพลังค์ และ f คือความถี่ของแสง เรียกอนุภาคแสงว่า โฟตอน

การมองเห็นของมนุษย์นั้นเป็นผลมาจากภาวะอนุภาคของแสงโดยเฉพาะ เกิดจากการที่ก้อนพลังงาน (อนุภาคโฟตอน) แสง ไปกระตุ้น เซลล์รูปแท่งในจอตา (rod cell) และ เซลล์รูปกรวยในจอตา (cone cell) ที่จอตา (retina) ให้ทำการสร้างสัญญาณไฟฟ้าบนเส้นประสาท และส่งผ่านเส้นประสาทตาไปยังสมอง ทำให้เกิดการรับรู้มองเห็นนั่นเอง

หน่วยที่ใช้ในการวัดความสว่างของแสง

แสงสว่างเป็นพลังงานอย่างหนึ่งที่สามารถวัดปริมาณได้เหมือนพลังงานอื่นๆ แต่มีชื่อที่เรียกแตกต่างกันออกไป การวัดปริมาณแสงสว่างอาจจะออกมาในรูปความเข้มของการส่องสว่าง, ปริมาณเส้นแรงของแสงสว่าง หรืออยู่ในรูปปริมาณของแสงสว่างต่อหน่วยพื้นที่ แสดงดังตารางที่ 1

ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous flux) หมายถึง ปริมาณแสงที่ส่องบนพื้นที่หนึ่งตารางเมตร (บนผิวทรงกลมที่มีรัศมีหนึ่งเมตร) หน่วยเป็น ลูเมน (lumen)

ความเข้มส่องสว่าง (Luminous intensity) หมายถึง ความเข้มแสงตามทิศทางที่กำหนดไว้ หน่วยเป็น แคนเดลา (candela)

ความส่องสว่าง (Illuminance) หมายถึง ความส่องสว่างที่กระทบลงบนวัตถุ หรือปริมาณแสงตกกระทบต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็น ลักซ์ (lux) หรือ ลูเมนต่อตารางเมตร (lumen/square meter)

ความเข้มของความสว่าง (Luminance) หมายถึง ความส่องสว่างที่สะท้อนออกจากวัตถุ หรือปริมาณแสงตกสะท้อนออกจากวัตถุต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็น แคนเดลาต่อตารางเมตร (candela/square meter)

ตารางที่ 1 หน่วยวัดแสง

ปริมาณ	หน่วย SI	ตัวย่อ
พลังงานของการส่องสว่าง	จูล (joule)	J
ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous flux)	ลูเมน (lumen) หรือ แคนเดลา • สเตอเรเดียน (candela • steradian)	lm
ความเข้มส่องสว่าง (Luminous intensity)	แคนเดลา (candela)	cd
ความเข้มของความสว่าง (Luminance)	แคนเดลา/ตารางเมตร (candela/square meter)	cd/m ²
ความส่องสว่าง (Illuminance)	ลักซ์ (lux) หรือ ลูเมน/ตารางเมตร	lx
ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous efficacy)	ลูเมน ต่อ วัตต์ (lumens per watt)	lm/W

2. แหล่งกำเนิดแสง (Optical Source)

ในระบบสื่อสาร แหล่งกำเนิดแสง (Optical Source) ที่นิยมนำมาใช้งานคือแอลอีดี (Light Emitting Diodes, LED) และเลเซอร์ไดโอด (Laser Diodes, LD) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบสารกึ่งตัวนำที่ถูกมาเชื่อมต่อกันอย่างน้อย 2 ชนิด และมีพลังงานระยะห่างแถบ (band-gap energy) ต่างกัน อุปกรณ์เหล่านี้มีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้งานเนื่องจากให้กำลังแสงเอาต์พุตที่สูงเพียงพอ กำลังแสงที่ได้รับสามารถที่จะนำไปมอดูเลตกับข้อมูลได้โดยตรง โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าไบแอสให้กับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งมีประสิทธิภาพสูง ข้อแตกต่างระหว่างแอลอีดีและเลเซอร์ไดโอดคือ สัญญาณแสงที่ได้รับจากเลเซอร์ไดโอดเป็นแสงสีเดียวและลำแสงเอาต์พุตเป็นแบบมีทิศทาง ดังตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของแอลอีดีและเลเซอร์ไดโอด

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบระหว่างแอลอีดีกับเลเซอร์ไดโอด

Characteristics	LED	LD
Optical output power	Low power	High power
Optical spectral width	25-100 nm	0.01-5 nm
Modulation bandwidth	Tens of kHz to hundreds of MHz	Tens of kHz to tens of GHz
E/O conversion efficiency	10-20 %	30-70 %
Eye safety	Considered eye safe	Must be rendered eye safe
Directionality	Beam is broader and spreading	Beam is directional and is highly collimated
Reliability	High	Moderate
Coherent	Noncoherent	Coherent
Temperature dependence	Little temperature dependence	Very temperature dependent
Drive and control circuitry	Simple to use and control	Threshold and temperature compensation circuitry
Cost	Low	Moderate to high
Harmonic distortions	High	Less
Receiving filter	Wide (increase noise floor)	Narrow (lower noise floor)

ที่มา: Optical Wireless Communications (2013)

แอลอีดี

ในระบบสื่อสารด้วยแสง ถ้าเราต้องการส่งข้อมูลที่อัตราประมาณ 100 ถึง 200 Mbps และต้องการส่งแสงที่มีกำลังแสงหลายสิบมิลลิวัตต์ เรานิยมใช้แหล่งกำเนิดจำพวกแอลอีดี เพราะแอลอีดีต้องการวงจรขับเคลื่อนไฟฟ้าที่ซับซ้อนน้อยกว่าเลเซอร์ไดโอด เนื่องจากไม่ต้องใช้วงจรรักษาเสถียรภาพทางอุณหภูมิและค่าใช้จ่ายในการสร้างถูกกว่าเลเซอร์ไดโอด

โครงสร้างของแอลอีดี

การใช้แอลอีดีในการส่งสัญญาณแสงที่คี่นั้น แอลอีดีต้องปล่อยแสงที่มีค่าความสว่าง สูง มีเวลาตอบสนองการปล่อยแสงเร็ว และมีค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในที่สูง

ความสว่าง คือ กำลังแสงที่ถูกปล่อยผ่านมุมตัน 1 หน่วยต่อพื้นที่ 1 หน่วยของพื้นที่ผิวการปล่อยแสง (วัตต์) ค่าความสว่างที่สูงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะขับปลั๊กกำลังแสงที่มีค่าสูงพอสำหรับใช้ในการสื่อสาร

เวลาตอบสนองของการปล่อยแสง เป็นเวลาประวิง (time delay) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปจนถึงการปล่อยแสงออกมา ซึ่งค่าเวลาประวิงนี้เป็นปัจจัยที่จำกัดแบนด์วิดท์ที่แหล่งกำเนิดแสงสามารถที่จะถูกมอดูเลตได้โดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้า

ในการลดแสงสว่างอย่างแม่นยำนั้น หลอดไฟแบบแอลอีดีจะมีความสามารถในการควบคุมระดับแสงสว่าง เป็นเพราะเวลาในการตอบสนองของหลอดไฟแอลอีดีในการเปิดปิดสวิตช์มีการทำงานที่สั้นมาก (ประมาณสิบนานาโนวินาที) ซึ่งเป็นการมอดูเลตที่ความถี่ค่อนข้างสูง มันจึงเป็นไปได้ที่จะเปิดปิดหลอดไฟ แอลอีดีโดยที่ดวงตาของมนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ ดังนั้นแสงที่ปล่อยออกมาจากหลอดไฟแอลอีดีจะอยู่ในรูปแบบของความถี่สูงและข้อมูลพัลส์ที่มีพลังงานเฉลี่ยต่ำ โดยค่าเฉลี่ยการส่องสว่างที่ได้จากแอลอีดีเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นสัดส่วนกับความกว้างของแสงที่ลดความสว่างลง ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานและความปลอดภัย เครื่องส่งสัญญาณหรือแหล่งกำเนิดแสงสามารถใช้หลอดไฟแอลอีดีหรือเลเซอร์เซมิคอนดักเตอร์ได้ ซึ่งหลอดไฟ แอลอีดีเป็นที่นิยมมากกว่าสำหรับการใช้งานเพื่อแสงสว่างและการสื่อสารพร้อมกัน หลอดไฟแอลอีดีที่แสงสามารถมองเห็นได้มีด้วยกันอยู่ 2 ชนิด คือ แบบแสงสีเดียว (เช่น สีแดง สีเขียว หรือ สีน้ำเงิน) และ แบบแสงสีขาว ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างแอลอีดีแบบแสงสีขาวมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การสร้างโดยการรวมสีแดง (~625 nm), สีเขียว (~525 nm), สีน้ำเงิน (~470 nm) (RGB) ในสัดส่วนที่ถูกต้อง

โครงสร้างของแอลอีดียังคงต้องถูกศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อที่จะทำให้แอลอีดีสามารถกักกันพาหุประจุและแสงได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะเป็น โครงสร้างรอยต่อเนื้อเดียวหรือรอยต่อต่างชนิดกันก็ได้ ทั้งนี้รอยต่อต่างชนิดกันได้ถูกจำแนกออกได้ 2 ชนิดคือ แบบเดียวกับแบบคู่ ซึ่งโครงสร้างที่ได้รับความนิยมในการสร้างแหล่งกำเนิดแสงคือ โครงสร้างรอยต่อที่มีสารต่างชนิดกันแบบคู่

3. เครื่องตรวจจับแสง (Optical detector)

โฟโตดีเทกเตอร์ (Photodetector) เป็นอุปกรณ์ตัวแรกของเครื่องรับแสงที่ปลายทางของการเชื่อมโยงการสื่อสาร ซึ่งทำหน้าที่ในการตรวจจับแสงที่ตกกระทบและแปลงค่ากำลังแสงที่ตรวจจับได้ไปเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่สัมพันธ์กัน เนื่องจากโดยทั่วไปสัญญาณแสงที่รับได้ที่เครื่องรับแสงมักจะมีค่ากำลังแสงที่ต่ำและเพี้ยน ดังนั้น โฟโตดีเทกเตอร์ที่นำมาใช้งานจะต้องมีประสิทธิภาพสูง กล่าวคือมีค่าความไว (Sensitivity) สูงต่อย่านความยาวคลื่นแสงที่รับได้ มีการสร้างสัญญาณรบกวนให้แก่เครื่องรับแสงน้อยที่สุด มีค่าการตอบสนองที่เร็วและมีแบนด์วิดท์ที่มากเพียงพอต่อการรองรับอัตราส่งข้อมูลที่ส่งมา นอกจากนี้โฟโตดีเทกเตอร์ที่ดีไม่ควรมีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง มีขนาดที่เหมาะสม มีราคาที่ไม่แพงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์อื่นๆ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

โฟโตดีเทกเตอร์ มีมากมายหลายชนิด เช่น โฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier) ไพโรอิเล็กทริกดีเทกเตอร์ (pyroelectric detector) และโฟโตคอนดักเตอร์แบบสารกึ่งตัวนำ (semiconductor-based photoconductor) ซึ่งโฟโตดีเทกเตอร์แต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน รวมถึงไม่สามารถรองรับความต้องการในทางอุดมคติที่กล่าวมาข้างต้นได้ทั้งหมด

3.1 โฟโตมัลติพลายเออร์

โฟโตมัลติพลายเออร์ประกอบไปด้วยโฟโตแคโทด 1 ตัว กับวงจรทวีคูณอิเล็กตรอน 1 วงจรที่วางอยู่ในหลอดสุญญากาศ ซึ่งให้อัตราขยายที่สูงมากและสัญญาณรบกวนต่ำมาก แต่มีขนาดใหญ่และต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูง ทำให้ไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ในการสื่อสาร

3.2 ไพโรอิเล็กทริกดีเทกเตอร์

ไพโรอิเล็กทริกดีเทกเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการแปลงพลังงานของโฟตอนไปเป็นความร้อนการดูดกลืนโฟตอนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในวัสดุที่ใช้ทำโฟโตไดโอด และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้น โดยจะถูกวัดค่าอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุ (capacitance) การตอบสนองของโฟโตไดโอดชนิดนี้มีค่าค่อนข้างคงที่ (flat) ในแถบสเปกตรัมที่กว้าง แต่หลังจากที่ถูกกระตุ้นให้ทำงานแล้ว อัตราการตอบสนองจะถูกจำกัดด้วย

อัตราการให้ความเย็นแก่โฟโตไดโอด ซึ่งจะถูกนำไปใช้งานหลักในการตรวจจับพัลส์ของเลเซอร์ที่มีความเร็วสูง

3.3 โฟโตคอนดักเตอร์แบบสารกึ่งตัวนำ

โฟโตคอนดักเตอร์แบบสารกึ่งตัวนำจำแนกออกเป็น 2 ชนิดหลัก คือ โฟโตไดโอด และโฟโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งโฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงที่นิยมนำมาใช้งานกันมากในการสื่อสาร เนื่องจากมีขนาดเล็ก มีความไวสูงและให้เวลาตอบสนองที่เร็ว โครงสร้างและหลักการทำงานของโฟโตไดโอด 2 ชนิด ได้แก่ ไดโอดแบบพิน (pin photodiode หรือ pin-PD) และ ไดโอดแบบอะวาลานซ์ (avalanche photodiode หรือ APD)

3.1.1 ไดโอดแบบพิน

ไดโอดแบบพินเป็นอุปกรณ์ที่นิยมนำมาใช้งานกันมากที่สุดและมีโครงสร้างซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของสารชนิดพีและเอ็น ซึ่งถูกแยกจากกันด้วยสารกึ่งตัวนำแบบอินทริซิก (intrinsic) ที่ถูกโด๊ปด้วยสารชนิดพีที่น้อยมาก ในสภาวะการทำงานปกติ จะมีการป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับที่มากพอไปบนไดโอดแบบพิน เพื่อที่ว่าบริเวณสารอินทริซิกจะปลอดพาห์ประจุอย่างเต็มที่ กล่าวคือ ความเข้มข้นพาห์ประจุ (charge carrier) ของสารชนิดพีและเอ็นในบริเวณสารอินทริซิกมีปริมาณที่น้อยมาก จนตัดทิ้งได้เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของสารเจือปน ทั้งนี้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลบนโฟโตดีเทกเตอร์ ถึงแม้ว่าไม่มีแสงตกกระทบถูกเรียกว่า กระแสมืด (dark current) เมื่อแสงที่ตกกระทบมีพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานระยะห่างแถบ (band-gap energy) ของสารกึ่งตัวนำแล้ว อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนและถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบนำ ทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนโฮลอิสระหรือพาห์ประจุ โดยทั่วไปโฟโตไดโอดถูกออกแบบมาเพื่อที่ว่าพาห์ประจุส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะถูกดูดกลืนเอาไว้ในบริเวณปลอดพาห์ (บริเวณอินทริซิก) ค่าสนามไฟฟ้าความเข้มสูงที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาห์นี้เป็นสาเหตุที่ทำให้พาห์ประจุแยกออกจากกันและถูกเก็บไว้ที่รอยต่อที่ถูกไบแอสย้อนกลับ จึงทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรด้านนอกสูงขึ้นจากการไหลของอิเล็กตรอน 1 ตัวสำหรับทุกๆคู่พาห์ประจุที่ถูกสร้างขึ้นมา เราจะเรียกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นชนิดนี้ว่า กระแสโฟโต (photocurrent)

พารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ค่าที่ใช้บอกประสิทธิภาพของโฟโตไดโอด ดังนี้

3.1.1.1 ความไวในการรับแสง (sensitivity) ถูกแสดงในเทอมของกำลังแสงที่ต่ำที่สุดที่สามารถตรวจจับได้ ถ้าโฟโตไดโอดชนิดใดสามารถรับกำลังแสงค่าต่ำๆ ได้แสดงว่าโฟโตไดโอดชนิดนั้นมีความไวในการรับแสงสูง มีคุณภาพที่ดีและมีราคาแพง

3.1.1.2 ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency) เป็นจำนวนของคู่อิเล็กตรอนโฮลที่ถูกสร้างขึ้นต่อจำนวนโฟตอนพลังงานที่ตกกระทบ การที่จะทำให้ประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าสูงขึ้นนั้น บริเวณปอดพาห์ต้องมีความกว้างเพียงพอที่จะทำให้แสงที่ตกกระทบถูกดูดกลืนได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ยิ่งบริเวณปอดพาห์มีความกว้างมากขึ้นเท่าไร พาห์ประจุที่ถูกสร้างขึ้นก็ใช้เวลาเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อที่ถูกไบแอสย้อนกลับนานขึ้นเท่านั้น ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของพาห์ประจุก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการตัดสินความเร็วหรือเวลาที่ใช้ในการตอบสนองของโฟโตไดโอด

3.1.1.3 เวลาในการตอบสนอง (response time) เป็นค่าตอบสนองสัญญาณเทียบกับเวลาหรือความไวในการตอบสนองของสัญญาณ หน่วยวัดที่ใช้แสดงเวลาในการตอบสนองคือวินาที

3.1.1.4 เรสปอนซิวิตี (responsivity) เป็นค่าที่ใช้บอกปริมาณกระแสโฟโตที่ไซโฟโตไดโอดสามารถสร้างขึ้นได้ต่อกำลังแสง 1 หน่วย เมื่อแสงมาตกกระทบโฟโตไดโอด มีหน่วยเป็น A/W ซึ่งเรสปอนซิวิตีเป็นพารามิเตอร์เฉพาะของแต่ละวัสดุที่ใช้ทำโฟโตไดโอดและมีค่าขึ้นกับความยาวคลื่น ซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพควอนตัม

3.1.2 โดไดโอดแบบอะวอลานซ์

โดไดโอดแบบอะวอลานซ์ (Avalanche photodiode หรือ APD) เป็นโฟโตไดโอดที่มีการทวีคูณกระแสโฟโตปฐมภูมิก่อนที่จะส่งเข้าไปยังวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้า (amplifier) ต่อไป ทำให้ความไวของโฟโตไดโอดสูงขึ้น เนื่องจากกระแสโฟโตถูกทวีคูณก่อนที่จะถูกแทรกสอดจากสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (thermal noise) ของวงจรต่างๆ ในเครื่องรับแสง ในการทวีคูณพาห์ประจุ (carrier multiplication) นั้น พาห์ประจุที่ถูกสร้างขึ้นต้องเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีค่าความเข้มข้นไฟฟ้าสูงมาก ซึ่งในบริเวณดังกล่าวพาห์ประจุอิเล็กตรอนหรือโฮลที่ถูกสร้างขึ้นใหม่จะถูกเร่ง

ความเร็วด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูง จึงทำให้ได้รับพลังงานเพียงพอและชนกับอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์จนทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน การทวีคูณพาหุประจุในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า impact ionization ซึ่งจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนแบบ impact ionization ต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์อะวาลานซ์ (avalanche effect) ถ้าระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าพังทลาย (breakdown voltage) ของโฟโตไดโอด พาหุประจุจะเกิดขึ้นในปริมาณที่จำกัด แต่ถ้าระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าพังทลาย จำนวนพาหุประจุจะเกิดขึ้นแบบไม่จำกัด

เนื่องจากกระบวนการทวีคูณใน ไดโอดแบบอะวาลานซ์ เป็นคุณลักษณะแบบสถิติ จึงทำให้ไดโอดแบบอะวาลานซ์มีค่าตัวประกอบสัญญาณรบกวนที่มากกว่าไดโอดแบบพิน ตัวประกอบสัญญาณรบกวนมากเกินไปค่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราการแตกตัวเป็นไอออนของอิเล็กตรอนและโฮลและการทวีคูณพาหุประจุ นอกจากนี้อัตราการแตกตัวเป็นไอออนยังมีค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ดังนั้น อัตราขยายอะวาลานซ์อาจจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงอย่างมากตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้

การเลือกใช้งานโฟโตไดโอดต้องพิจารณาเวลาตอบสนองที่โฟโตไดโอดสามารถทำงานได้ โฟโตไดโอดต้องสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของแสงที่ตกกระทบได้โดยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัสดุที่ใช้ทำโฟโตไดโอดที่ค่าความยาวคลื่นที่ใช้งาน (ตารางที่ 3) ความกว้างของบริเวณปลอดพาหุ รวมถึงค่าความจุและค่าความต้านทานค่าต่างๆของโฟโตไดโอดและวงจรเครื่องรับแสง

ตารางที่ 3 ช่วงความยาวคลื่นสำหรับวัสดุของโฟโตดีเทกเตอร์ที่แตกต่างกัน

Material	Energy Gap (ev)	Cut-Off Wavelength (nm)	Wavelength Band (nm)
Silicon	1.17	1060	400-1060
Germanium	0.775	1600	600-1600
GaAs	1.424	870	650-870
InGaAs	0.73	1700	900-1700
InGaAsP	0,75-1.35	1650-920	800-1650

ที่มา: Optical Wireless Communications (2013)

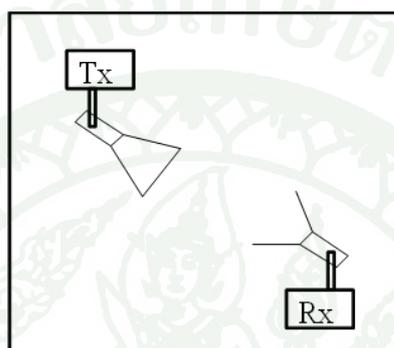
เครื่องรับแสง ประกอบไปด้วยโฟโตดีเทกเตอร์ วงจรขยายสัญญาณไฟฟ้า และวงจรประมวลผลสัญญาณแสง หน้าที่ของเครื่องรับแสงคือการเปลี่ยนสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วทำการขยายสัญญาณไฟฟ้างดกล่าวให้มีระดับแรงดันที่เหมาะสม ก่อนที่จะถูกส่งไปประมวลผลด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ถัดไปจากวงจขยายได้

สัญญาณรบกวน (noise) และความเพี้ยนของสัญญาณ (distortion) เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดความผิดพลาดในการแปลความหมายของสัญญาณแสงที่ได้รับ โดยทั่วไปกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นจากโฟโตดีเทกเตอร์มักจะมีค่าต่ำและได้รับผลกระทบโดยตรงจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นแบบเรณคอมจากกระบวนการตรวจจับสัญญาณแสง อีกทั้งเมื่อกระแสโฟโตจากเอาต์พุตของโฟโตดีเทกเตอร์ต้องถูกขยายแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นด้วยวงจขยาย กระแสโฟโตก็อาจจะได้รับสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นจากวงจขยายอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้น การพิจารณาสัญญาณรบกวนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบเครื่องรับแสง เนื่องจากสัญญาณรบกวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นเป็นตัวกำหนดขีดจำกัดล่างสุดสำหรับสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถประมวลผลได้

4. การกำหนดค่าการเชื่อมโยงของแสง (Link Configuration)

การเชื่อมโยงแสงระหว่างเครื่องรับสัญญาณและเครื่องส่งสัญญาณ โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ และการกำหนดจำนวนของเครื่องรับสัญญาณ แสดงดังภาพที่ 6 ดังนี้

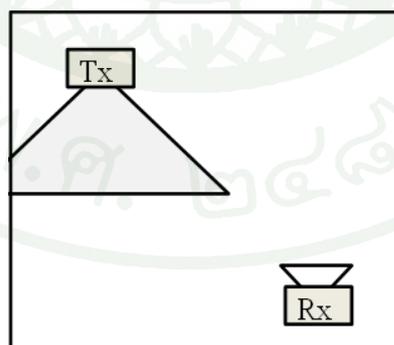
4.1 ระดับสายตา (Directed Line-Of-Sight) แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การเชื่อมโยงแบบระดับสายตา

ที่มา: Optical Wireless Communications (2013)

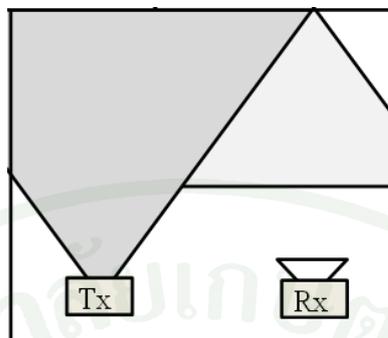
4.2 ไม่อยู่ในระดับสายตา (Nondirected Line-Of-Sight) แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การเชื่อมโยงแบบไม่อยู่ในระดับสายตา

ที่มา: Optical Wireless Communications (2013)

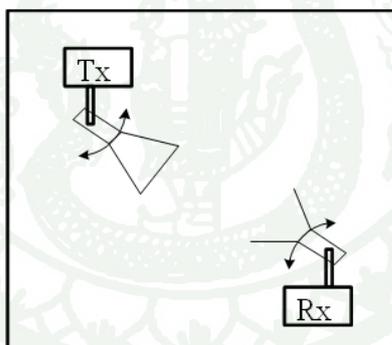
4.3 การแพร่กระจาย (Diffuse) แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเชื่อมโยงแบบแพร่กระจาย

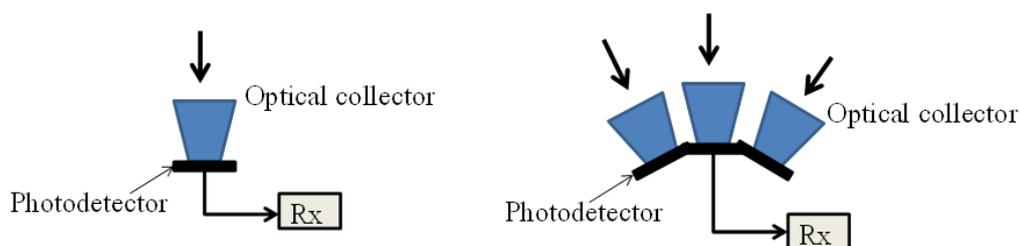
ที่มา: Optical Wireless Communications (2013)

4.4 การติดตาม (Tracked) แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเชื่อมโยงแบบการติดตาม

ที่มา: Optical Wireless Communications (2013)

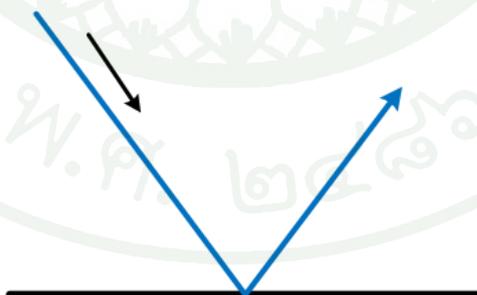


ภาพที่ 6 การกำหนดจำนวนของเครื่องรับสัญญาณ

ที่มา: Optical Wireless Communications (2013)

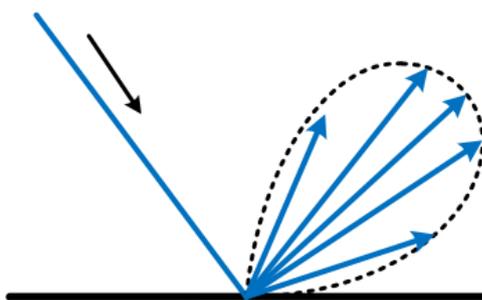
5. พื้นฐานความรู้เกี่ยวกับการแผ่รังสีและการสะท้อนของแสง

โดยทั่วไปการสะท้อนแสงแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ แบบกระจกเงา (specular) แสดงดังภาพที่ 8 แบบแพร่กระจาย (spread) แสดงดังภาพที่ 9 แบบกระจัดกระจาย (diffuse) แสดงดังภาพที่ 10 การสะท้อนแบบกระจกเงาเป็นการสะท้อนเหมือนการสะท้อนกระจกเงาหรือพื้นผิวที่ขัดมันเงา จะเกิดการสะท้อนขึ้นในมุมเดียวคือมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน การสะท้อนแบบแพร่กระจายเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวไม่เรียบ ขรุขระ ไม่สม่ำเสมอจะเกิดการสะท้อนของแสงที่มากกว่าหนึ่งมุม แต่มุมที่สะท้อนเกิดขึ้นมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับมุมที่แสงตกกระทบ การสะท้อนแบบกระจัดกระจายหรือเรียกว่าการกระเจิงแบบแลมเบิร์ตเทียน (Lambertian scattering) เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวด้านเกิดการสะท้อนแสงในหลายมุมที่แตกต่างกัน



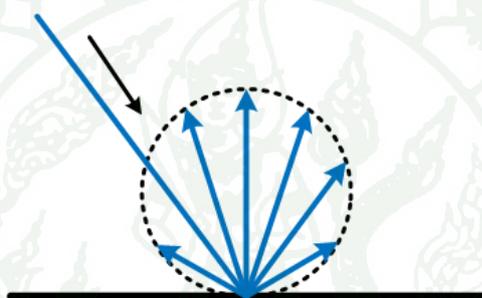
ภาพที่ 7 การสะท้อนแสงแบบกระจกเงา (Specular)

ที่มา: Illumination Fundamentals (1990)



ภาพที่ 8 การสะท้อนแสงแบบแพร่กระจาย (Spread)

ที่มา: Illumination Fundamentals (1990)



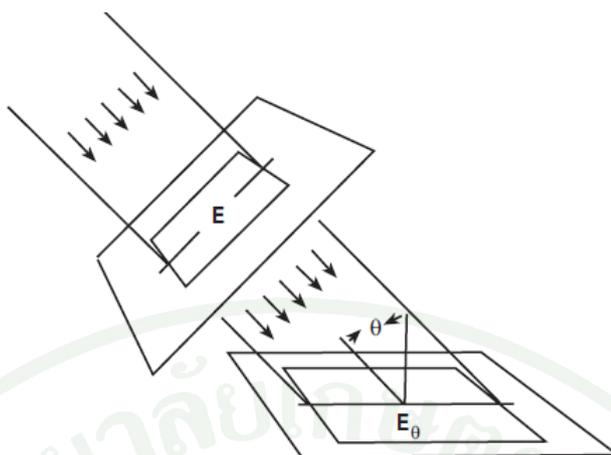
ภาพที่ 9 การสะท้อนแสงแบบกระจัดกระจาย (Diffuse)

ที่มา: Illumination Fundamentals (1990)

กฎโคไซน์ของแลมเบิร์ต (Lambert's cosine law)

กฎโคไซน์กล่าวว่า ความสว่างบนพื้นผิวใดๆจะแปรผันโดยตรงกับค่าโคไซน์ของมุมของแสงตกกระทบบ มุมตกกระทบบ θ คือมุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวและทิศทางของแสงตกกระทบบ แสดงดังภาพที่ 10

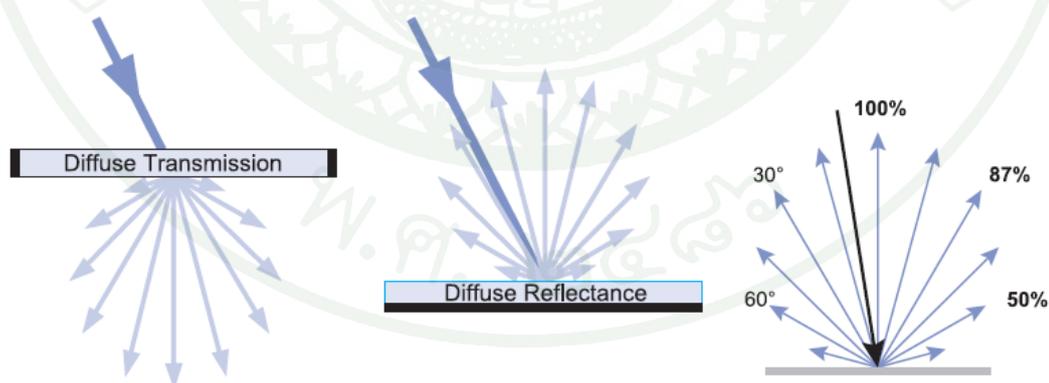
$$E_{\theta} = E \cos \theta$$



ภาพที่ 10 กฎโคไซน์ของแลมเบิร์ต

ที่มา: Illumination Fundamentals (1990)

การแผ่รังสีในทุกทิศทางหรือการสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเทียน ปริมาณของการแผ่รังสีหรือการสะท้อนของแสงที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ ความแตกต่างของดัชนีหักเหระหว่างวัสดุสองชนิด และขนาดและรูปร่างของอนุภาคในวัสดุเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของแสง ตัวอย่างเช่น โมเลกุลในอากาศจะเป็นขนาดที่เหมาะสมในการกระจายแสงด้วยความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ทำให้เราเห็นท้องฟ้าเป็นสีฟ้า



ภาพที่ 11 การแผ่รังสีและการสะท้อนแบบแลมเบิร์ตเทียน

ที่มา: Illumination Fundamentals (1990)

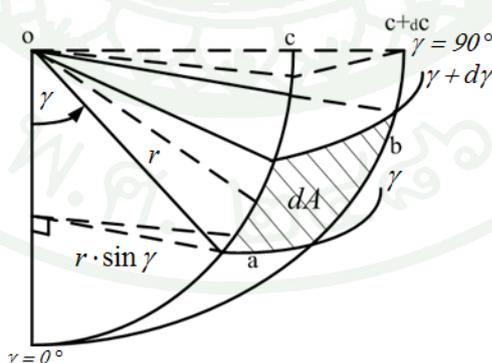
6. แบบจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (VLC System Model)

ตั้งแต่หลอดไฟแอลอีดีถูกใช้สำหรับแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูล มันเป็นสิ่งจำเป็นในการกำหนดความเข้มของแสงและกำลังของแสงที่ส่ง ความเข้มของแสงถูกนำมาใช้สำหรับการแสดงแสงสว่างของไฟแอลอีดี กำลังของแสงที่ส่งมาแสดงให้เห็นถึงพลังงานทั้งหมดที่แผ่รังสีจากแอลอีดี ความเข้มส่องสว่าง I คือ อัตราส่วนของฟลักซ์ส่องสว่างเชิงอนุพันธ์ ($d\Phi$) ต่อมุมตันเชิงอนุพันธ์ ($d\omega$) มีหน่วยวัดเป็นแคนเดลา (แฉ่มซ้อย, ซ., 2544) ดังสมการที่ 1

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (1)$$

ความเข้มส่องสว่างเทียบได้กับความดันในระบบไฮดรอลิกหรือแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า เป็นคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงเท่านั้น ไม่ขึ้นกับความรู้สึกรวมของการมองเห็น

ทรงกลมจินตภาพที่มีรัศมี r และพื้นที่ย่อย dA บนผิวของทรงกลม พื้นที่ย่อย dA นี้ถูกกำหนดด้วยรอยตัดของระนาบที่มีแกนหมุน และรอยตัดของกรวยที่มีแกนอยู่ในแนวนอนที่ตัดกับผิวของทรงกลมจินตภาพ มุมตันของช่องว่างภายในยอดปริมาตรที่มีพื้นที่ย่อย dA ของทรงกลมจินตภาพเป็นฐาน และมีจุดยอดอยู่ที่จุดศูนย์กลาง O ของทรงกลม ดังภาพที่ 12 และถูกกำหนดดังสมการที่ 2



ภาพที่ 12 การกำหนดขนาดพื้นที่ผิวย่อย dA

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} \quad (2)$$

$$dA = ab \quad (3)$$

$$a = r \sin \gamma dC \quad (4)$$

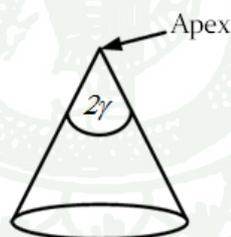
$$b = r d\gamma \quad (5)$$

$$d\omega = \frac{r^2 \sin \gamma d\gamma dC}{r^2} \quad (6)$$

$$d\omega = \sin \gamma d\gamma dC \quad (7)$$

$$\omega = \int_{C=C_1}^{C_2} \int_{\gamma=\gamma_1}^{\gamma_2} \sin \gamma d\gamma dC \quad (8)$$

$$\omega = \frac{\pi}{180} (C_2 - C_1)(\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2) \quad (9)$$



ภาพที่ 13 มุมต้นของยอดกรวย (Apex angle)

มุมต้นของยอดกรวย (ω_c) ดังภาพที่ 13 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 โดยใช้ $C_2=360^\circ$, $C_1=0^\circ$, $\gamma_2 = \gamma$, $\gamma_1 = 0^\circ$ จะได้

$$\omega_c = \frac{\pi}{180} (360 - 0)(\cos 0 - \cos \gamma) \quad (10)$$

$$\omega_c = 2\pi(1 - \cos \gamma) \quad (11)$$

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (12)$$

$$I = \frac{d\Phi}{2\pi(1 - \cos(\gamma))} \quad (13)$$

$$d\Phi = P_t \cdot \varepsilon \quad (14)$$

เมื่อ ε คือ ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (lm/W)

P_t คือ ค่ากำลังไฟฟ้าแสงของแหล่งกำเนิดแสง (W)

$$I = \frac{P_t \cdot \varepsilon}{2\pi(1 - \cos(\gamma))} \quad (15)$$

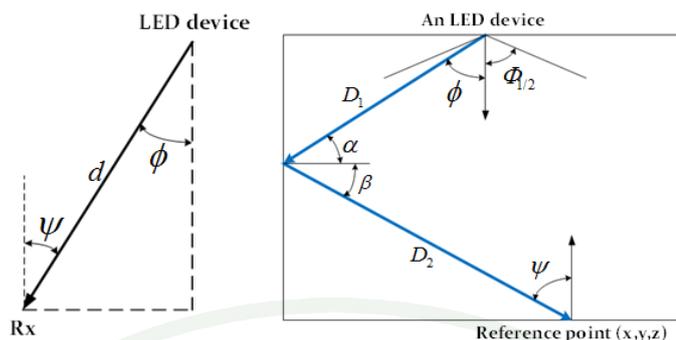
ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้เป็นการใช้งานสำหรับการทำงานร่วมกันระหว่างแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูล ดังนั้นในด้านแสงสว่างจึงต้องมีการคำนวณการแพร่กระจายความส่องสว่าง เพื่อหาการแพร่กระจายความส่องสว่างที่เหมาะสมในสภาวะห้องทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงการนำข้อมูลจำเพาะที่ได้จากผู้ผลิตแอลอีดีเป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณหาความส่องสว่างและกำลังไฟฟ้าของแสง นั่นคือ ค่ากำลังไฟฟ้า (transmitted optical power) และค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy) ซึ่งสามารถคำนวณศูนย์กลางความเข้มส่องสว่าง $I(0)$ (center luminous intensity) ได้ดังสมการที่ 16

$$I(0) = \frac{P_t \cdot \varepsilon}{(2\pi(1 - \cos(\Phi_{1/2})))} \quad (16)$$

เมื่อ P_t คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดแสง (transmitted optical power)

ε คือ ค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy)

$\Phi_{1/2}$ คือ มุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง (semi-angle at half power) ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 รูปแบบการแพร่กระจายแบบในระดับสายตาและแบบการสะท้อนของแสง

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดว่ารูปแบบการฉายรังสีของหลอดแอลอีดีเป็นแบบแลมเบิร์ตเทียน (Lambertian radiation) ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานที่ใช้คำนวณในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ สามารถคำนวณความเข้มส่องสว่างในมุมของการฉายรังสี $I(\phi)$ ดังสมการที่ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานที่ใช้คำนวณในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (Ghassemlooy, Z., 2013)

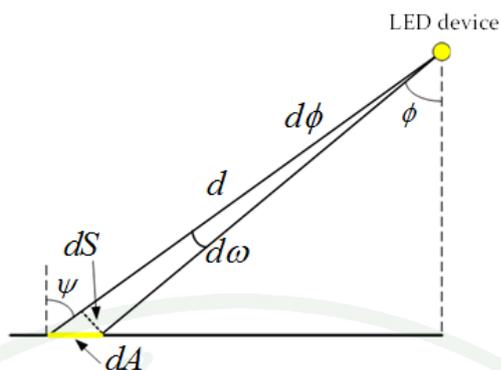
$$I(\phi) = I(0) \cos^m(\phi) \quad (17)$$

เมื่อ ϕ คือ มุมการฉายรังสี (angle of irradiance) ดังภาพที่
 m คือ ลำดับการฉายรังสีแบบแลมเบิร์ตเทียน ดังสมการที่

$$m = \ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2}) \quad (18)$$

6.1 ความส่องสว่าง (Illuminance)

มาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2549 กำหนดไว้ว่า ในสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ ต้องมีค่าความส่องสว่างอย่างน้อย 400 lx ซึ่งสอดคล้องกับ “Lighting of indoor workplaces”, EN 12464-1 (June 2011) ได้กำหนดไว้ว่าต้องมีค่าความส่องสว่างระหว่าง 200 lx ถึง 750 lx การคำนวณความส่องสว่าง E ในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ จากภาพที่ 15 สามารถคำนวณได้ดังนี้



ภาพที่ 15 การแพร่กระจายความส่องสว่าง

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (19)$$

$$E = \frac{d\Phi}{d\omega} \times \frac{d\omega}{dA} \quad (20)$$

$$E = \frac{d\Phi}{d\omega} \times \frac{d\omega}{dS} \times \frac{dS}{dA} \quad (21)$$

$$E = I \left(\frac{dS}{d^2} \right) \left(\frac{dA \cos(\psi)}{dA} \right) \quad (22)$$

$$E = \frac{I}{d^2} \cos(\psi) \quad (23)$$

6.1.1 กรณีระดับสายตา (line of sight, LOS)

$$E_{hor} = I(\phi) \cos(\psi) / d^2 \quad (24)$$

- เมื่อ E_{hor} คือ ความส่องสว่างที่ปราศจากการสะท้อน
 ψ คือ มุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติที่เครื่องรับแสง
 d คือ ระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดแสงถึงเครื่องรับแสง

$$E_{hor} = I(0) \cos^m(\phi) \cos(\psi) / d^2 \quad (25)$$

6.1.2 กรณีการสะท้อนผนัง

$$E_{ref1} = \frac{I(0)}{D_1^2} dA_{wall} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \quad (26)$$

- เมื่อ E_{ref1} คือ ความส่องสว่างจากการสะท้อนครั้งแรก (ระหว่างเครื่องกำเนิดแสงกับผนัง)
 dA_{wall} คือ พื้นที่ย่อยของผนัง
 D_1 คือ ระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดแสงถึงพื้นที่ย่อยของผนัง
 α คือ มุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติที่พื้นที่ย่อยของผนัง

$$E_{ref2} = \frac{E_{ref1} \rho \cos(\beta) \cos(\psi)}{D_2^2} \quad (27)$$

- เมื่อ E_{ref2} คือ ความส่องสว่างจากการสะท้อนครั้งที่สอง (ระหว่างผนังห้องกับเครื่องรับแสง)
 ρ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน
 D_2 คือ ระยะทางระหว่างพื้นที่ย่อยของผนังถึงเครื่องรับแสง
 β คือ มุมที่รังสีสะท้อนทำกับเส้นปกติที่พื้นที่ย่อยของผนัง

$$E_{ref} = E_{ref1} \cdot E_{ref2} \quad (28)$$

$$E_{ref} = \frac{I(0)}{D_1^2 D_2^2} \rho dA_{wall} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) \cos(\psi) \quad (29)$$

$$E_{total} = E_{hor} + E_{ref} \quad (30)$$

- เมื่อ E_{ref} คือ ความส่องสว่างรวมจากการสะท้อน
 E_{total} คือ ความส่องสว่างรวมทั้งหมด

6.2 กำลังไฟฟ้าของแสง (optical power)

กำลังไฟฟ้าของแสง คือ การวัดระดับกำลังไฟฟ้าของแสง ในหน่วยวัตต์ (W) หรือ เดซิเบล (dB) ในการคำนวณการสูญเสียตามระยะทาง (path loss) ของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ คือ การอินทิเกรต $h(t)$ (Arnon, S., 2012) ดังสมการที่ 31

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (31)$$

6.2.1 ช่องสัญญาณที่ปราศจากการสะท้อน $H(0)$ แสดงดังสมการที่ 32

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (32)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่รับแสงของเครื่องรับสัญญาณ
 $T_s(\psi)$ คือ การขยายของแผ่นกรองแสง
 Ψ_c คือ ระดับในการมองเห็น (FOV) ของเครื่องรับแสง

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (33)$$

เมื่อ n คือ ดัชนีหักเห
โดยที่ $\Psi_c \leq \pi/2$

เครื่องรับสัญญาณได้รับกำลังไฟฟ้าของแสงที่ปราศจากการสะท้อน P_r

$$P_r = P_t \cdot H(0) \quad (34)$$

6.2.2 ช่องสัญญาณพร้อมด้วยการสะท้อน H_{ref} แสดงดังสมการที่ 35

$$H_{ref}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho d A_{wall} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (35)$$

เครื่องรับสัญญาณได้รับกำลังไฟฟ้าของแสงพร้อมรวมการสะท้อนของผนัง P_{r_total} ดังสมการที่ 36

$$P_{r_total} = \sum^{N_{LEDs}} \{P_t H(0) + P_t H_{ref}(0)\} \quad (36)$$

6.3 ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่าง (Uniformity)

การออกแบบแสงสว่างในพื้นที่ใดๆนั้น เมื่อได้ความสว่างที่ต้องการแล้ว ปัจจัยแรก ที่ควรคำนึงถึงก็คือความสม่ำเสมอของความสว่างทั่วทั้งบริเวณ การออกแบบแสงสว่างจะไม่ สมบูรณ์ ถ้าขาดการพิจารณาในเรื่องของความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างบนพื้นที่คำนวณ โดยค่าความสม่ำเสมอสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนของค่าความส่องสว่างต่ำที่สุดต่อค่าความ ส่องสว่างเฉลี่ย ตามที่กำหนดโดย EN 12464-1 (June 2011) "Lighting of indoor workplaces" (Zumtobel, 2013) ดังสมการที่ 37

$$U_o = E_{min} / \bar{E} \quad (37)$$

โดยที่ U_o คือ ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่าง

E_{min} คือ ความส่องสว่างต่ำสุด

\bar{E} คือ ความส่องสว่างเฉลี่ย

ในสภาพแวดล้อมห้องทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ ตามมาตรฐาน EN 12464-1 ได้ กำหนดค่าความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างที่ 0.6 นั่นคือต้องมีค่าความสม่ำเสมอของระดับ ความส่องสว่างไม่ต่ำกว่า 0.6 นั่นเอง

6.4 การคำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจาย

ความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดปริมาณเวลาของการกระจายสัญญาณ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของสัญญาณที่มาจากเส้นทางที่แตกต่างกันมาถึงที่เครื่องรับสัญญาณในเวลาที่แตกต่างกัน โดยเครื่องส่งและรับสัญญาณเป็นเครื่องเดียวกัน ซึ่งทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณ

$$D_{RMS} = \sqrt{\mu^2 - (\mu)^2} \quad (38)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i} + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j}}{P_{r_total}} \quad (39)$$

$$\mu^2 = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i}^2 + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j}^2}{P_{r_total}} \quad (40)$$

D_{RMS} เป็นเกณฑ์วัดประสิทธิภาพการทำงานที่สำคัญสำหรับขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูล R_b สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 41

$$R_b \leq 1 / (10 \times D_{RMS}) \quad (41)$$

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้

Komine and Nakagawa (2004) ได้ทำงานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ชั้นพื้นฐานสำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้โดยใช้แอลอีดี กล่าวถึงพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและการสะท้อน สำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ในอาคาร โดยใช้แอลอีดี จำลองห้องขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 5 เมตร สูง 3 เมตร ประกอบด้วยโต๊ะทำงานที่มีความสูง 0.85 เมตร และแอลอีดีสูงจากพื้น 2.5 เมตร ใช้แหล่งกำเนิดแสงจำนวน 4 ชุด ทางด้านความส่องสว่างทางได้กล่าวถึงเพียงแค่การแพร่กระจายของความส่องสว่างที่ได้ค่าต่ำสุด 313.50 lx ค่าสูงสุด 1211.5 lx ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ISO ที่กำหนดไว้ 300 ถึง 1500 lx แต่ไม่ได้มีการศึกษาถึงความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่าง ส่วนทางด้านการศึกษาข้อมูลได้ทำการแสดงประสิทธิภาพที่ถูกลดทอนโดยสัญญาณรบกวนและการสะท้อนในรูปแบบอัตราการส่งข้อมูลและระดับในการมองเห็น (FOV) ของเครื่องรับแสง เป้าหมายคืออัตราการส่งข้อมูล 200 Mbps ซึ่งต้องใช้ FOV ระหว่าง 40 ถึง 50 องศา ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงความส่องสว่างแต่อย่างใด

Jiayuan *et al.* (2011) ได้ทำงานวิจัยเรื่องระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ในอาคาร โดยใช้แอลอีดีแสงสีขาว นำเสนอการใช้งานร่วมกันระหว่างแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูล โดยการจำลองความส่องสว่างให้เพียงพอตามข้อกำหนดมาตรฐานความส่องสว่างในอาคาร แสดงอัตราการส่งข้อมูลที่สูงถึง 500 Mbps ที่มีอัตราข้อผิดพลาด (BER) 10^{-9} แต่ไม่ได้กล่าวถึงความล่าช้าในการรับสัญญาณที่มาจากหลายทิศทาง (multi-path) และได้แสดงการแพร่กระจายความส่องสว่างที่ได้ค่าระหว่าง 500 lx ถึง 1000 lx ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ISO ที่กำหนดไว้ 300 ถึง 1500 lx โดยไม่ได้คำนึงถึงความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างแต่อย่างใด

Do *et al.* (2012) ได้ทำงานวิจัยเรื่องการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ช่องสัญญาณไร้สายโดยรูปแบบของมุมการติดตั้งแอลอีดีในการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ ได้เสนอรูปแบบในการติดตั้งแอลอีดีและวิเคราะห์ผลกระทบในการติดตั้ง เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพในการใช้ช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ โดยวัดประสิทธิภาพจากค่าความส่องสว่างและอัตราส่วนของสัญญาณระหว่างสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ซึ่งพิจารณาเฉพาะรูปแบบระดับสายตา (LOS) เท่านั้น

Biagi *et al.* (2013) ได้ทำงานวิจัยเรื่องการปรับเปลี่ยนเครื่องรับสัญญาณสำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ในอาคาร นำเสนอการปรับเปลี่ยนเครื่องรับสัญญาณโดยคำนึงถึงสภาวะ

ของช่องสัญญาณและอัตราความผิดพลาด ซึ่งพิจารณาเฉพาะรูปแบบระดับสายตา (LOS) เท่านั้น เมื่อความล่าช้าในการแพร่กระจายสัญญาณเพิ่มขึ้นจะทำการปรับเปลี่ยนที่เครื่องรับสัญญาณ โดยผลลัพธ์ที่ได้คืออัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นและอัตราความผิดพลาดต่ำ

Nguyen *et al.* (2010) ได้ทำงานวิจัยเรื่องโปรแกรมจำลอง MATLAB สำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ภายในอาคาร แสดงการจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ภายในอาคาร โดยโปรแกรม MATLAB และ Simulink โดยโปรแกรมจะแสดงการสะท้อนแสงของผนัง การแพร่กระจายความส่องสว่าง การแพร่กระจายความล่าช้าของสัญญาณ และใช้วิธีการมอดูเลชันแบบ NRZ-OOK (Non return to zero – On off keying) ใช้แหล่งกำเนิดแสงจำนวน 1 ชุด และ 4 ชุด โดยไม่ได้คำนึงถึงความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างแต่อย่างใด

Ding and Ji (2012) ได้ทำงานวิจัยเรื่องวิวัฒนาการอัลกอริทึมพื้นฐานที่เหมาะสมของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้โดยใช้แอลอีดีแสงสีขาว นำเสนอผลการจำลองสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและการแพร่กระจายความส่องสว่าง แสดงการเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับในการมองเห็นของเครื่องรับแสงกับประสิทธิภาพของระบบ และแสดงผลกระทบความล่าช้าในการแพร่กระจายสัญญาณ

Ding *et al.* (2007) ได้ทำงานวิจัยเรื่องแบบแผนการจัดวางแสงที่เหมาะสมสำหรับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ เสนอออกแบบการจัดวางแสงที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงอัตราความผิดพลาดของข้อมูล และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบแสงกับกำลังไฟฟ้าของแสงเท่านั้น

Jinguo *et al.* (2012) ได้ทำงานวิจัยเรื่องการกำหนดค่าเครือข่ายการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ภายในอาคาร ทำการทดสอบทางกายภาพซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับมุมและความกว้างลำแสงของแอลอีดีได้อย่างมีประสิทธิภาพจะส่งผลให้สัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ จะมุ่งเน้นสมรรถภาพและประสิทธิภาพทางการสื่อสาร ซึ่งได้ละเลยความสำคัญทางด้านความส่องสว่างไป ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์สมรรถภาพและประสิทธิภาพการใช้หลอดไฟแอลอีดีสำหรับการทำงานร่วมกันระหว่างการส่องสว่างและการสื่อสารข้อมูล เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับสถานะแวดล้อมห้องทำงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 7
3. โปรแกรม Microsoft Office 2010 (Words, Excel และ Power Point)
4. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ข้อมูลเชิงวิศวกรรม คณิตศาสตร์ MATLAB

วิธีการ

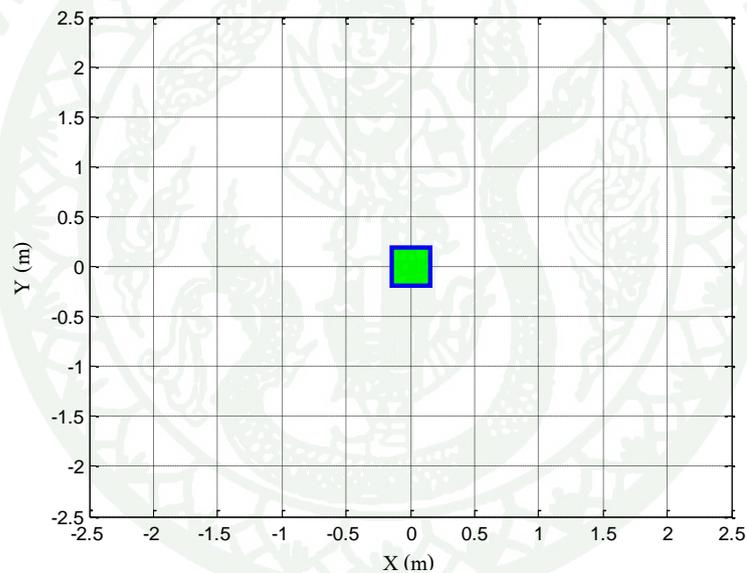
งานวิจัยนี้นำเสนอการวัดวิเคราะห์สมรรถภาพและประสิทธิภาพ พร้อมเสนอแนวทางการออกแบบเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (VLC) สำหรับการทำงานร่วมกันระหว่างแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูล เพื่อเป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายสื่อสารไร้สาย โดยการจำลองตำแหน่งการติดตั้งรับส่งสัญญาณไร้สายด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้จากพื้นที่ห้องทำงาน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณจะอ้างอิงจากข้อมูลจำเพาะของแหล่งกำเนิดแสง นั่นคือ ค่ากำลังไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การสร้างระบบพื้นที่จำลองและการเลือกตัวอย่างจุดรับสัญญาณ

1.1 การสร้างระบบพื้นที่จำลอง

ออกแบบจำลองพื้นที่ห้องทำงานเพื่อใช้ในการจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ โดยใช้พื้นที่จำลองขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 5 เมตร สูง 3 เมตร ประกอบด้วยโต๊ะทำงานที่มีความสูง 0.85 เมตร โดยกำหนดจุดติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงบริเวณเพดานและตัวรับสัญญาณแสงบริเวณบนโต๊ะทำงาน แบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ ดังนี้

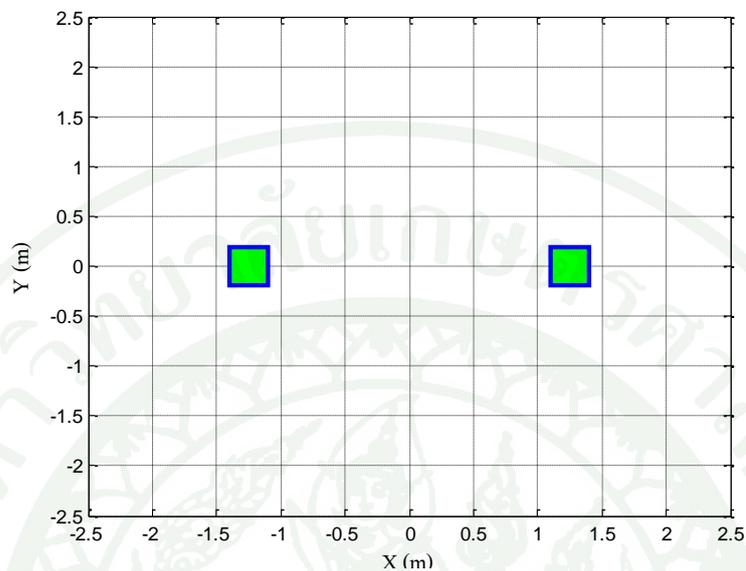
1.1.1 แหล่งกำเนิดแสง 1 จุด ติดตั้งบริเวณเพดานที่ตำแหน่ง (0,0) ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แหล่งกำเนิดแสง 1 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน

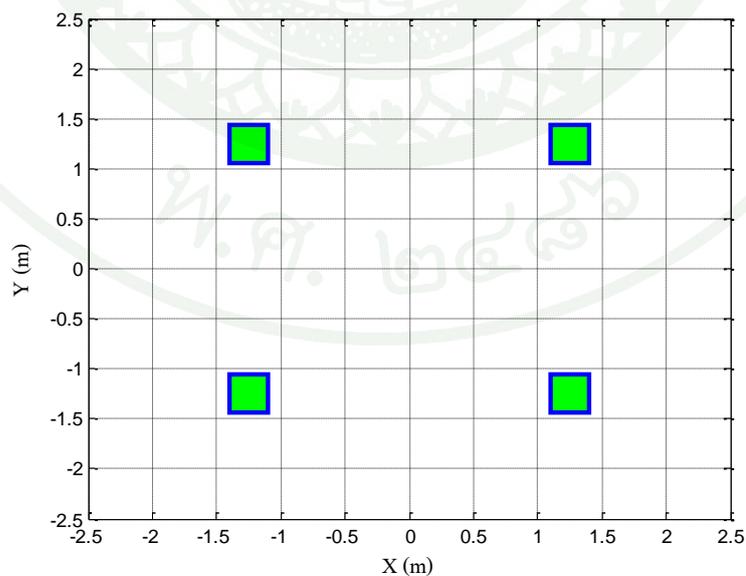
1.1.2 แหล่งกำเนิดแสง 2 จุด ติดตั้งบริเวณเพดานที่ตำแหน่ง $(-1.25,0)$ และ $(1.25,0)$ ดัง

ภาพที่ 17



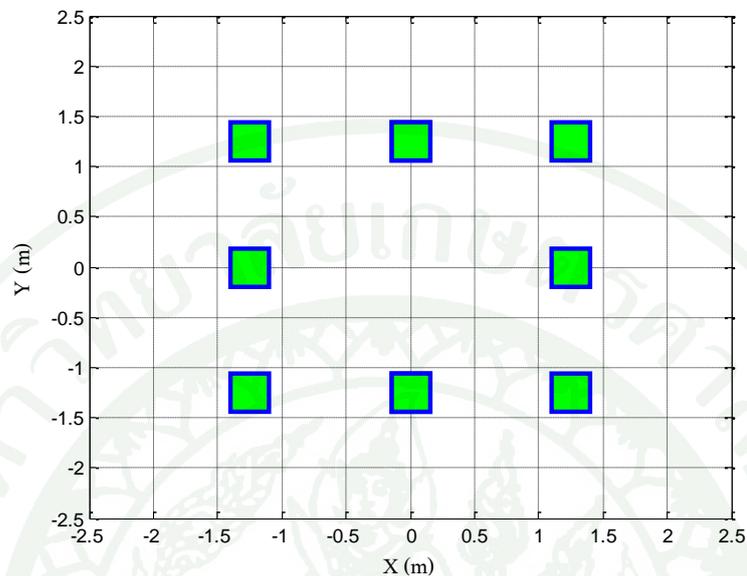
ภาพที่ 17 แหล่งกำเนิดแสง 2 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน

1.1.3 แหล่งกำเนิดแสง 4 จุด ติดตั้งบริเวณเพดานที่ตำแหน่ง $(-1.25,-1.25)$, $(-1.25,1.25)$, $(1.25,-1.25)$ และ $(1.25,1.25)$ ดังภาพที่ 18



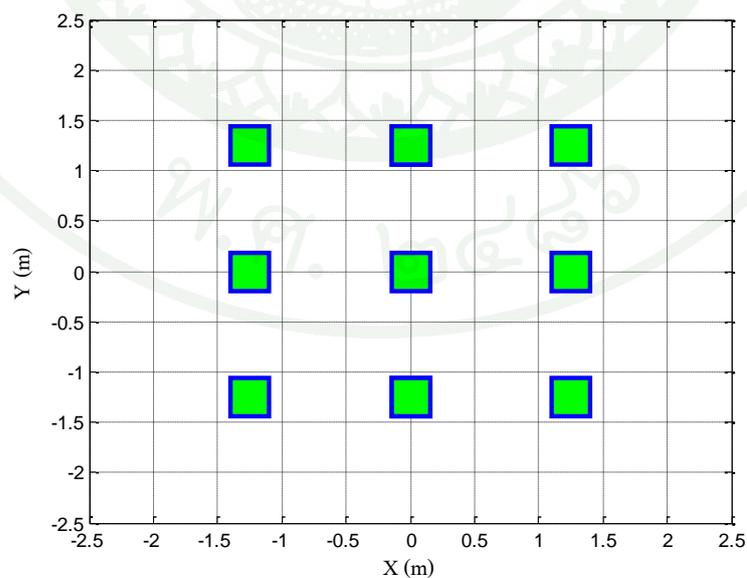
ภาพที่ 18 แหล่งกำเนิดแสง 4 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน

1.1.4 แหล่งกำเนิดแสง 8 จุด ติดตั้งบริเวณเพดานที่ตำแหน่ง $(-1.25, -1.25)$, $(0, -1.25)$, $(1.25, -1.25)$, $(1.25, 0)$, $(1.25, 1.25)$, $(0, 1.25)$, $(-1.25, 1.25)$ และ $(-1.25, 0)$ ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แหล่งกำเนิดแสง 8 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน

1.1.5 แหล่งกำเนิดแสง 9 จุด ติดตั้งบริเวณเพดานที่ตำแหน่ง $(0, 0)$, $(-1.25, -1.25)$, $(0, -1.25)$, $(1.25, -1.25)$, $(1.25, 0)$, $(1.25, 1.25)$, $(0, 1.25)$, $(-1.25, 1.25)$ และ $(-1.25, 0)$ ดังภาพที่ 20



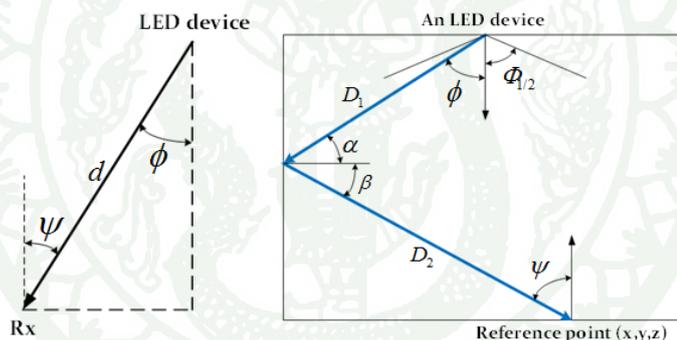
ภาพที่ 20 แหล่งกำเนิดแสง 9 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน

2. การคำนวณความส่องสว่าง (Illuminance) และกำลังไฟฟ้าของแสง (Optical power)

ในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงการนำข้อมูลจำเพาะที่ได้จากผู้ผลิตแอลอีดีเป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณหาความส่องสว่างและกำลังไฟฟ้าของแสง นั่นคือ ค่ากำลังไฟฟ้า (transmitted optical power) และค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy) ทำการคำนวณศูนย์กลางความเข้มส่องสว่าง $I(0)$ (center luminous intensity) ดังสมการที่ 42

$$I(0) = \frac{P_t \cdot \epsilon}{(2\pi(1 - \cos(\Phi_{1/2})))} \tag{42}$$

- เมื่อ P_t คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดแสง (transmitted optical power)
- ϵ คือ ค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy)
- $\Phi_{1/2}$ คือ มุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง (semi-angle at half power) ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 รูปแบบการแพร่กระจายแบบในระดับสายตาและแบบการสะท้อนของแสง

กำหนดว่ารูปแบบการฉายรังสีของหลอดแอลอีดีเป็นแบบแลมเบิร์ตเทียน (Lambertian radiation) ทำการคำนวณความเข้มส่องสว่างในมุมของการฉายรังสี $I(\phi)$ ดังสมการที่ 43

$$I(\phi) = I(0) \cos^m(\phi) \tag{43}$$

- เมื่อ ϕ คือ มุมการฉายรังสี (angle of irradiance) ดังภาพที่ 21
- m คือ ลำดับการฉายรังสีแบบแลมเบิร์ตเทียน ดังสมการที่ 44

$$m = \ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2}) \quad (44)$$

3.1 การคำนวณความส่องสว่าง (Illuminance)

คำนวณความส่องสว่าง E ในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ แบ่งออกเป็นกรณีระดับสายตาและกรณีการสะท้อนผนัง ดังนี้

3.1.1 กรณีระดับสายตา (line of sight, LOS)

$$E_{hor} = I(0) \cos^m(\phi) \cos(\psi) / d^2 \quad (45)$$

เมื่อ E_{hor} คือ ความส่องสว่างที่ปราศจากการสะท้อน
 ψ คือ มุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติที่เครื่องรับแสง
 d คือ ระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดแสงถึงเครื่องรับแสง

3.1.2 กรณีการสะท้อนผนัง

$$E_{ref} = \frac{I(0)}{D_1^2 D_2^2} \rho dA_{wall} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) \cos(\psi) \quad (46)$$

เมื่อ E_{ref} คือ ความส่องสว่างรวมจากการสะท้อน
 dA_{wall} คือ พื้นที่ย่อยของผนัง
 ρ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน
 α คือ มุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติที่พื้นที่ย่อยของผนัง
 β คือ มุมที่รังสีสะท้อนทำกับเส้นปกติที่พื้นที่ย่อยของผนัง
 D_1 คือ ระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดแสงถึงพื้นที่ย่อยของผนัง
 D_2 คือ ระยะทางระหว่างพื้นที่ย่อยของผนังถึงเครื่องรับแสง

$$E_{total} = E_{hor} + E_{ref} \quad (47)$$

เมื่อ E_{total} คือ ความส่องสว่างรวมทั้งหมด

3.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าของแสง (optical power)

การคำนวณการสูญเสียตามระยะทาง (path loss) ของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ แบ่งออกเป็นกรณีระดับสายตาและกรณีการสะท้อนผนัง ดังนี้

3.2.1 ช่องสัญญาณที่ปราศจากการสะท้อน $H(0)$ คำนวณดังสมการที่ 48

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (48)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่รับแสงของเครื่องรับสัญญาณ

$T_s(\psi)$ คือ การขยายของแผ่นกรองแสง

Ψ_c คือ ระดับในการมองเห็น (FOV) ของเครื่องรับแสง

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (49)$$

เมื่อ n คือ ดัชนีหักเหของแสง

โดยที่ $\Psi_c \leq \pi/2$

เครื่องรับสัญญาณได้รับกำลังไฟฟ้าของแสงที่ปราศจากการสะท้อน P_r ดังสมการที่ 50

$$P_r = P_t \cdot H(0) \quad (50)$$

3.2.2 ช่องสัญญาณในการคำนวณการสะท้อน H_{ref} คำนวณดังสมการที่ 51

$$H_{ref}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho d A_{wall} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (51)$$

เครื่องรับสัญญาณได้รับกำลังไฟฟ้าของแสงพร้อมรวมการสะท้อนของผนัง P_{r_total}
คำนวณดังสมการที่ 52

$$P_{r_total} = \sum^{N_{LEDs}} \{P_t H(0) + P_t H_{ref}(0)\} \quad (52)$$

3.3 การคำนวณความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่าง (Uniformity)

ค่าความสม่ำเสมอคำนวณจากอัตราส่วนของค่าความส่องสว่างต่ำที่สุดต่อค่าความส่องสว่างเฉลี่ย ดังสมการที่ 53

$$U_o = E_{min} / \bar{E} \quad (53)$$

โดยที่ U_o คือ ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่าง

E_{min} คือ ความส่องสว่างต่ำสุด

\bar{E} คือ ความส่องสว่างเฉลี่ย

3. การคำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจาย

คำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจาย ดังสมการที่ 54

$$D_{RMS} = \sqrt{\mu^2 - (\mu)^2} \quad (54)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i} + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j}}{P_{r_total}} \quad (55)$$

$$\mu^2 = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i}^2 + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j}^2}{P_{r_total}} \quad (56)$$

D_{RMS} เป็นเกณฑ์วัดประสิทธิภาพการทำงานที่สำคัญสำหรับขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูล R_b สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 57

$$R_b \leq 1 / (10 \times D_{RMS}) \quad (57)$$

4. การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดพารามิเตอร์สำหรับการจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้

พารามิเตอร์	ปริมาณ
กำลังไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดแสง, P_t	20 [mW]
มุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง, $\Phi_{1/2}$	70 [deg.]
ระดับในการมองเห็น (FOV) ของเครื่องรับแสง, Ψ_c	60 [deg.]
ประสิทธิภาพการส่องสว่าง, ϵ	75 [lm/W]
พื้นที่รับแสงของเครื่องรับแสง, A	1 [cm ²]
สัมประสิทธิ์การสะท้อน, ρ	0.8
ดัชนีหักเห, n	1.5
การขยายของแผ่นกรองแสง, $T_s(\psi)$	1

5. การหารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

การหารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพที่ 24 มีวิธีดำเนินการดังนี้

5.1 คำนวณและพิจารณาการแพร่กระจายความส่องสว่างในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด โดยการปรับจำนวนหลอดแอลอีดี ให้มีการแพร่กระจายความส่องสว่างทุกพื้นที่ของห้องไม่น้อยกว่า 400 lx ตามมาตรฐานความปลอดภัยในสภาพแวดล้อมการทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ของประเทศไทย

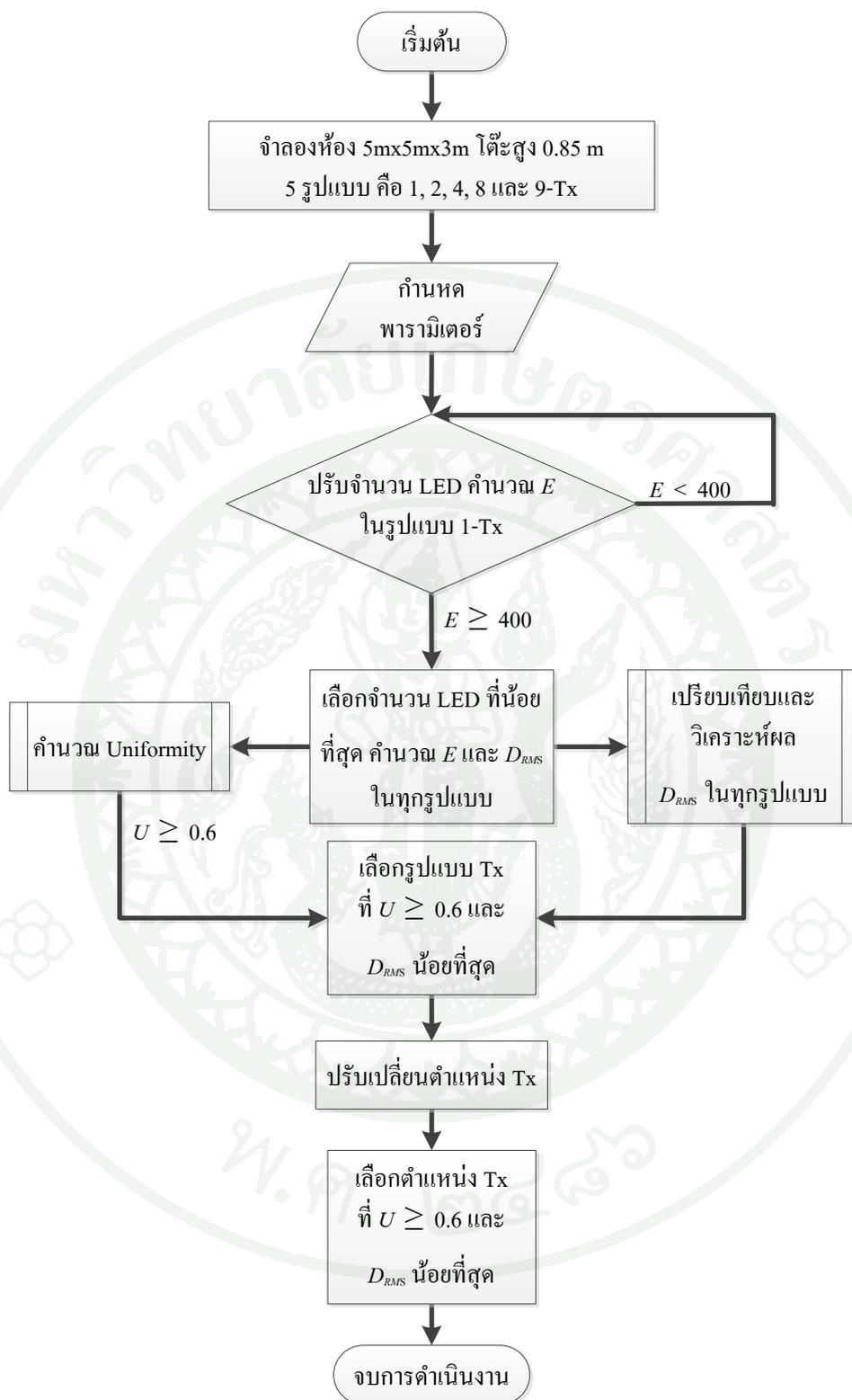
5.2 นำจำนวนหลอดแอลอีดีที่ได้จากรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด ดำเนินการแบ่งออกเป็น 2 ชุด, 4 ชุด, 8 ชุด และ 9 ชุด เพื่อใช้กับเครื่องส่งสัญญาณรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด, 4 ชุด, 8 ชุด และ 9 ชุด ตามลำดับ ตามแบบจำลองพื้นที่ห้องทำงานที่ได้ถูกสร้างไว้

5.3 คำนวณและพิจารณาความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายความส่องสว่างทั้ง 5 รูปแบบ แหล่งกำเนิดแสง ว่ารูปแบบใดมีความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างในการแพร่กระจายความส่องสว่างในสถานะห้องทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ได้ตามมาตรฐาน EN 12464-1 คือ ไม่น้อยกว่า 0.6

5.4 คำนวณและพิจารณาความล่าช้าในการแพร่กระจาย ทั้ง 5 รูปแบบแหล่งกำเนิดแสง พร้อมทั้งคำนวณอัตราบิดสูงสุดจากความล่าช้าในการแพร่กระจาย

5.5 เลือกรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่มีความล่าช้าในการแพร่กระจายน้อยที่สุด โดยที่ความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายความส่องสว่างได้ตามมาตรฐาน เพื่อหารูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน

5.6 นำรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน ทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งจุดติดตั้ง คำนวณความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายความส่องสว่างและความล่าช้าในการแพร่กระจาย เพื่อพิจารณาหาตำแหน่งการติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดในการทำงานร่วมกันระหว่างแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูลในสถานะห้องทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์



ภาพที่ 22 แผนผังลำดับงานการหารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

6. การหาความกว้างลำแสง (Beam width) ของเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

การหาการหาความกว้างลำแสงของเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพที่ 25 มีวิธีดำเนินการดังนี้

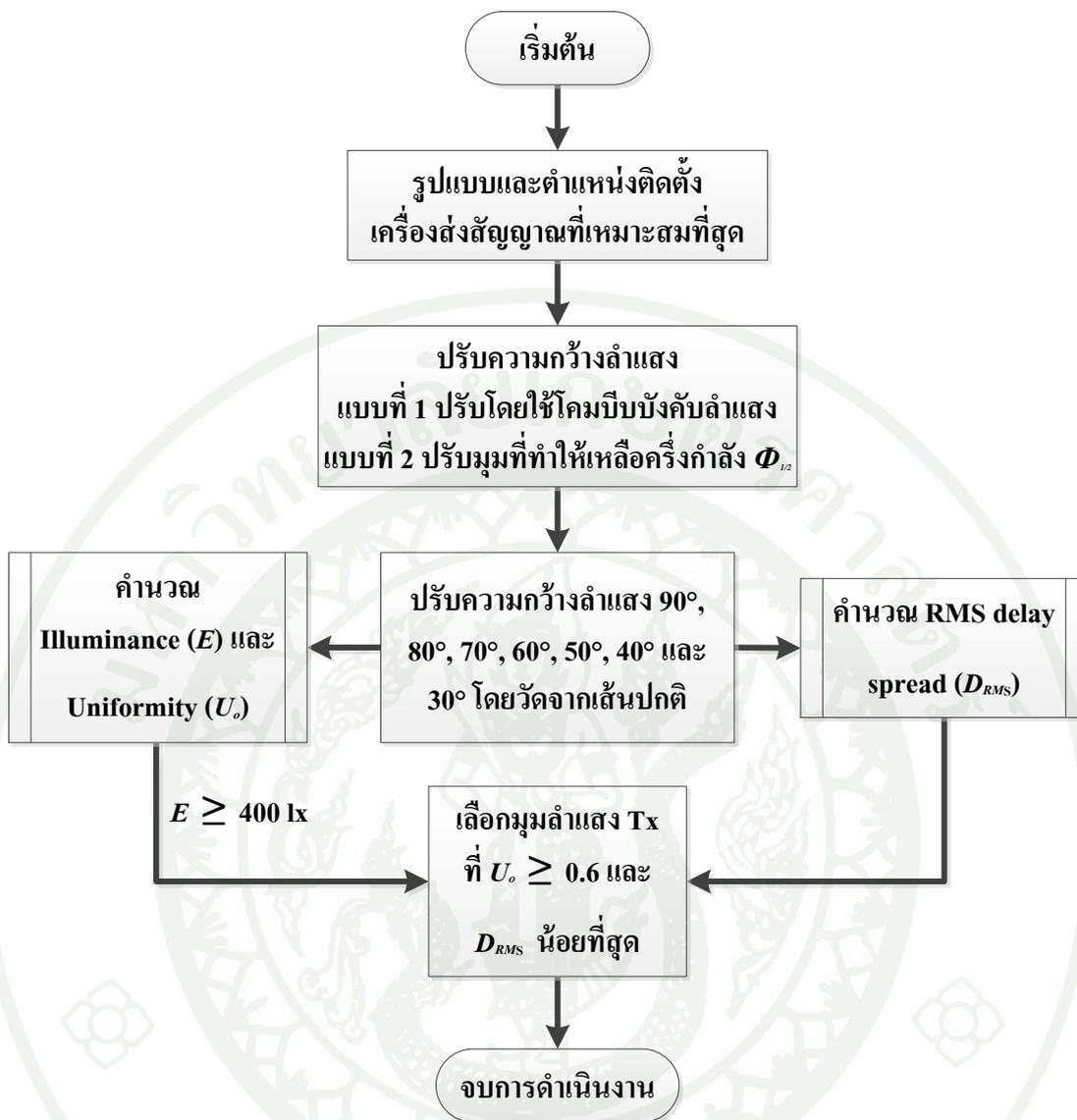
6.1 นำรูปแบบและตำแหน่งการติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่ความล่าช้าในการแพร่กระจายน้อยที่สุด โดยที่ความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายความส่องสว่างได้ตามมาตรฐาน จากข้อ 5 การหารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ปรับโดยใช้โคมบิบบังคับลำแสงและปรับมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ทำการปรับเปลี่ยนความกว้างมุมของเครื่องส่งสัญญาณ คือ 90, 80, 70, 60, 50, 40 และ 30 องศา โดยวัดจากเส้นปกติ

6.2 กำหนดการและพิจารณาแพร่กระจายความส่องสว่างว่ารูปแบบไหนมีการแพร่กระจายที่ดีที่สุด โดยทุกพื้นที่ของห้องต้องได้ค่าความส่องสว่างอย่างน้อย 400 lx ตามมาตรฐานความปลอดภัยในสภาพแวดล้อมการทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ของประเทศไทย

6.3 กำหนดและพิจารณาความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายความส่องสว่างจากรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากข้อ 6.2 ว่ารูปแบบใดมีความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายความส่องสว่างได้ตามมาตรฐาน

6.4 กำหนดหาความล่าช้าในการแพร่กระจายและคำนวณอัตราบิดสูงสุด

6.5 เปรียบเทียบความล่าช้าในการแพร่กระจายเพื่อหารูปแบบความกว้างลำแสงของเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดที่ในการทำงานร่วมกันระหว่างแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูลในสภาวะห้องทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์



ภาพที่ 23 แผนผังลำดับงานการหาความกว้างลำแสงของเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

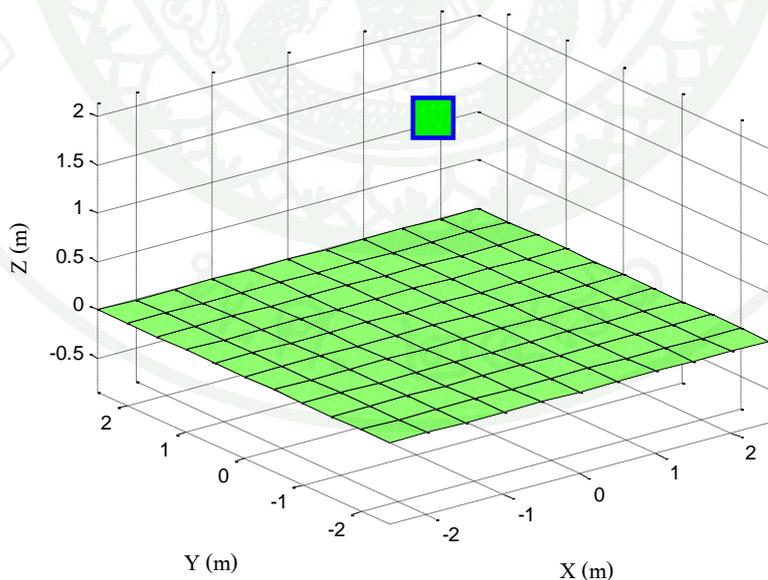
ผลและวิจารณ์

ผล

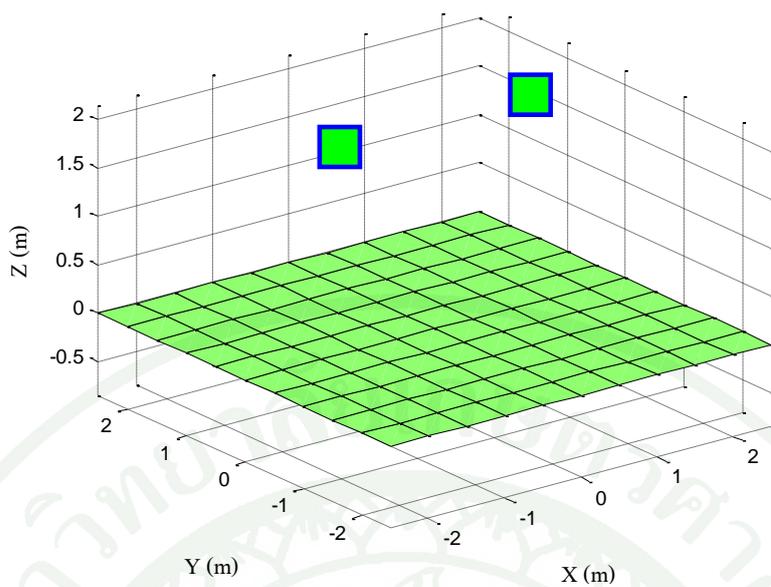
ผลการทดลอง แบ่งเป็น 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ผลทดลองการออกแบบจำลองพื้นที่ห้องทำงาน ส่วนที่ 2 การหารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด ส่วนที่ 3 ผลกระทบจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่อการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ และส่วนที่ 4 การหาความกว้างลำแสงของเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

1. ผลทดลองการออกแบบจำลองพื้นที่ห้องทำงาน

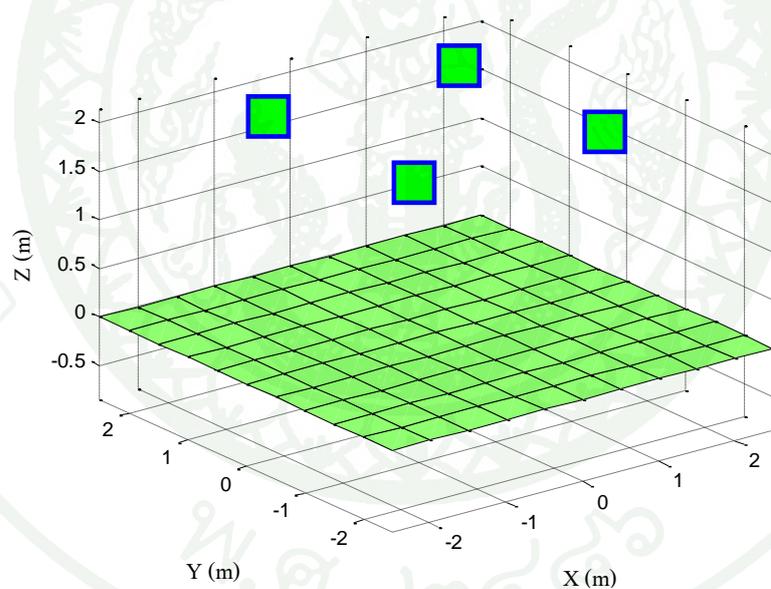
ในการออกแบบจำลองพื้นที่ห้องทำงานเพื่อใช้ในการจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ ได้จำลองการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงเป็น 5 รูปแบบ คือ แหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด, 2 ชุด, 4 ชุด, 8 ชุด และ 9 ชุด ดังแสดงดังภาพที่ 24, 25, 26, 27 และ 28 ตามลำดับ โดยใช้พื้นที่ห้องจำลองขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 5 เมตร สูง 3 เมตร ประกอบด้วยโต๊ะทำงานที่มีความสูง 0.85 เมตร กำหนดจุดติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงบริเวณเพดานและตัวรับสัญญาณแสงบริเวณบนโต๊ะทำงาน



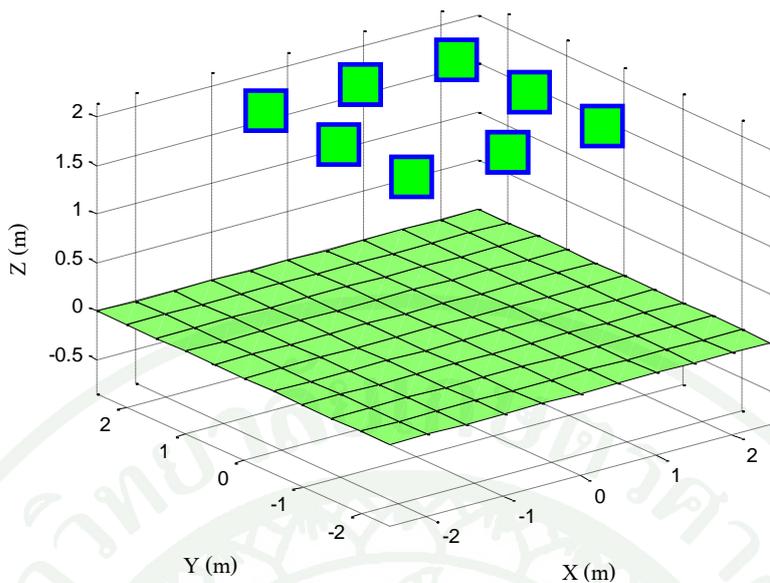
ภาพที่ 24 ผลการจำลองห้องทำงานที่มีแหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด ติดตั้งบริเวณเพดาน



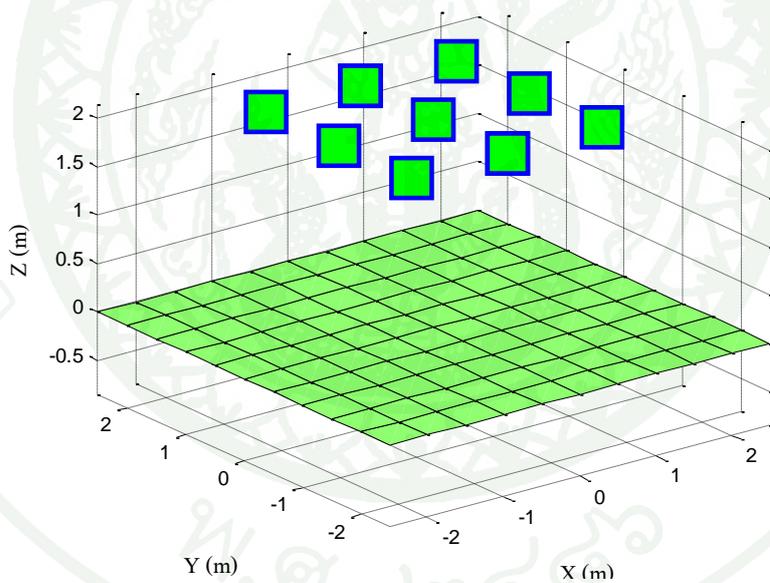
ภาพที่ 25 ผลการจำลองห้องทำงานที่มีแหล่งกำเนิดแสง 2 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน



ภาพที่ 26 ผลการจำลองห้องทำงานที่มีแหล่งกำเนิดแสง 4 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน



ภาพที่ 27 ผลการจำลองห้องทำงานที่มีแหล่งกำเนิดแสง 8 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน



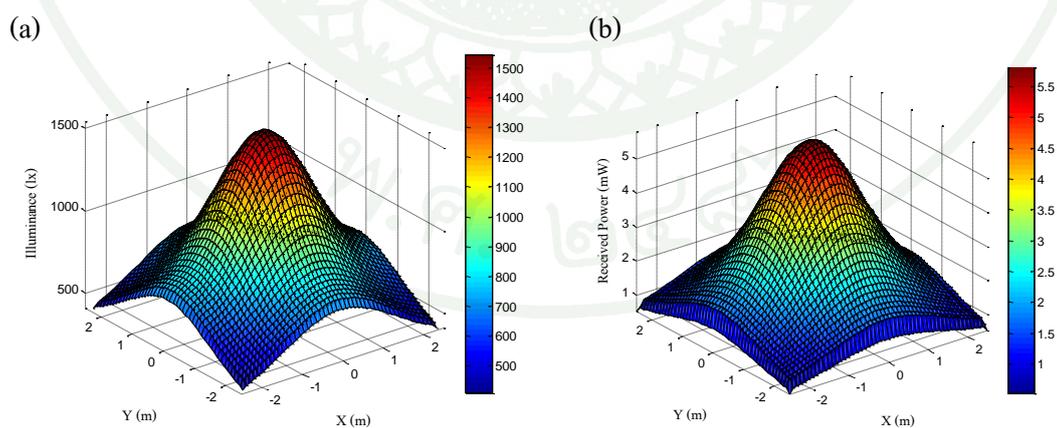
ภาพที่ 28 ผลการจำลองห้องทำงานที่มีแหล่งกำเนิดแสง 9 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน

2. ผลการคำนวณการหารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

ในการทดลองนี้ ได้ทำการทดลองตรวจสอบการแพร่กระจายความส่องสว่างโดยปราศจากการสะท้อนและพร้อมด้วยการสะท้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณการสะท้อนแสงของผนังเพดาน ซึ่งปัจจัยอื่นๆในการสะท้อนนั้นเป็นเรื่องเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการสะท้อนของผนังห้องทำงาน โดยมีเป้าหมายในการหารูปแบบการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสง เพื่อรองรับการทำงานให้เป็นไปตามกำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2549 กำหนดไว้ว่า ค่าความส่องสว่างอย่างน้อย 400 lx ในสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับ “Lighting of indoor workplaces”, EN 12464-1 (June 2011) ได้กำหนดไว้ว่าต้องมีค่าความส่องสว่างระหว่าง 200 lx ถึง 750 lx

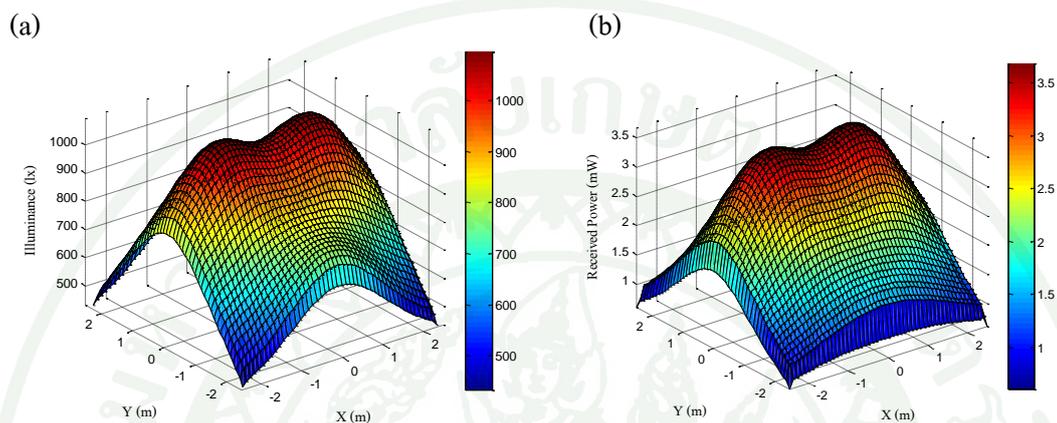
2.1 ผลการคำนวณความส่องสว่างและกำลังไฟฟ้าของแสงที่เครื่องรับแสง

จากการทดลอง เมื่อเพิ่มจำนวนหลอดแอลอีดีเป็น 16,900 หลอด ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด พบว่า การแพร่กระจายความส่องสว่างต่ำสุด 409.30 lx แสดงดังภาพที่ 31 ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัยในสภาพแวดล้อมการทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ของประเทศไทย นั่นคือ ทุกพื้นที่ของห้องมีความส่องสว่างไม่น้อยกว่า 400 lx

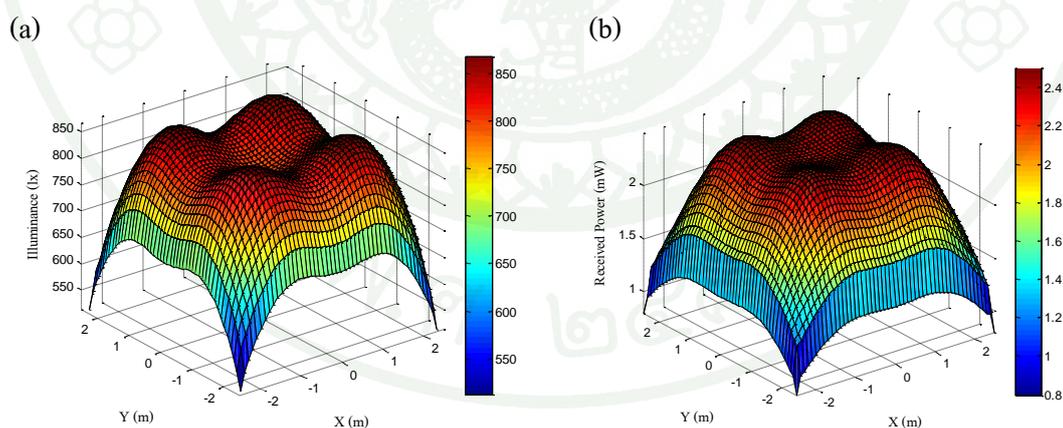


ภาพที่ 29 แหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด; (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 409.30 lx ค่าสูงสุด 1544.40 lx; (b) การแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง ค่าต่ำสุด 0.52 mW ค่าสูงสุด 5.82 mW.

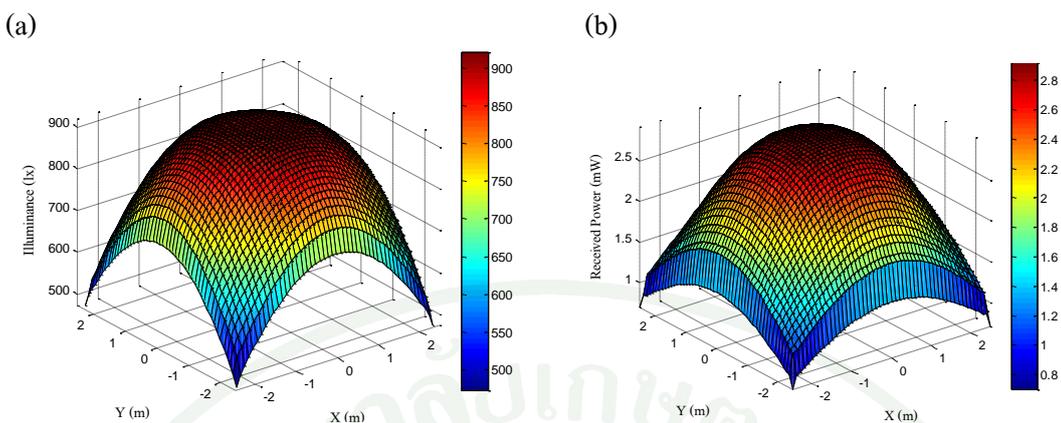
นำจำนวนหลอดแอลอีดีที่ได้จากรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด คือ 16,900 หลอด
ดำเนินการแบ่งออกเท่ากันเป็น 2 ชุด, 4 ชุด, 8 ชุด และ 9 ชุด เพื่อใช้กับเครื่องส่งสัญญาณรูปแบบ
แหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด , 4 ชุด, 8 ชุด และ 9 ชุด ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 32, 33, 34 และ 35
ตามลำดับ



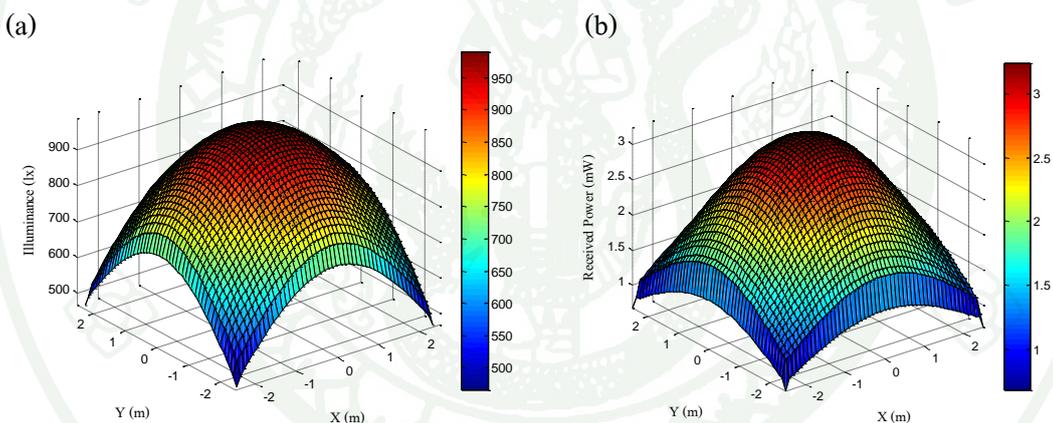
ภาพที่ 30 แหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด; (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 433.80 lx ค่าสูงสุด 1095.90 lx; (b) การแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง ค่าต่ำสุด 0.61 mW ค่าสูงสุด 3.68 mW.



ภาพที่ 31 แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด; (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 513.08 lx ค่าสูงสุด 867.80 lx; (b) การแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง ค่าต่ำสุด 0.80 mW ค่าสูงสุด 2.50 mW.



ภาพที่ 32 แหล่งกำเนิดแสง 8 จุด; (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 473.42 lx ค่าสูงสุด 921.06 lx; (b) การแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง ค่าต่ำสุด 0.70 mW ค่าสูงสุด 2.92 mW.



ภาพที่ 33 แหล่งกำเนิดแสง 9 จุด; (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 466.29 lx ค่าสูงสุด 989.96 lx; (b) การแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง ค่าต่ำสุด 0.68 mW ค่าสูงสุด 3.24 mW.

ผลการคำนวณการแพร่กระจายความส่องสว่างพบว่ามีค่าความส่องสว่างไม่น้อยกว่า 400 lx ในทุกรูปแบบเครื่องกำเนิดแสง เมื่อนำค่าความส่องสว่างที่ต่ำที่สุดของแต่ละรูปแบบมาเปรียบเทียบพบว่า แหล่งกำเนิดแสงแบบ 4 จุด ได้ค่าความส่องสว่างที่สูงที่สุด ให้ค่าความส่องสว่างในค่าที่ต่ำสุดคือ 513.08 lx

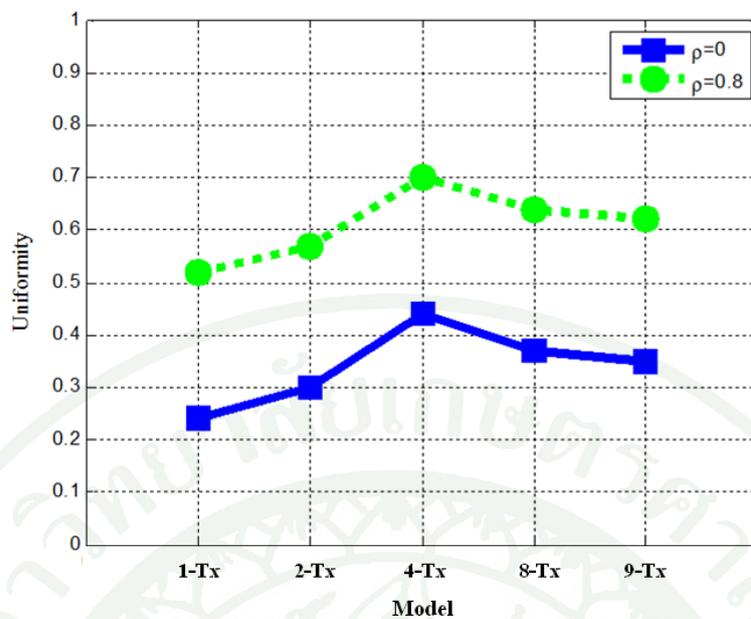
ผลการแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสงที่ได้แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าของแสงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความส่องสว่างมากขึ้น จึงพบว่าการแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสงมีรูปแบบการแพร่กระจายที่เหมือนกับความส่องสว่าง แต่เนื่องจากกำลังไฟฟ้าของแสงที่ภาครับ ได้มีปัจจัยของเครื่องรับแสงมาเกี่ยวข้อง นั่นคือ ระดับในการมองเห็น (FOV) ของเครื่องรับแสง ซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่รับได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความส่องสว่างจึงมีอัตราส่วนที่ต่างกันเล็กน้อย ไม่เหมือนกันทั้งหมด

การออกแบบแสงสว่างในพื้นที่ใดๆนั้น เมื่อได้ความสว่างตามที่ต้องการแล้ว ปัจจัยแรกที่ต้องคำนึงถึงก็คือความสม่ำเสมอของความสว่างทั่วทั้งบริเวณ ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างเป็นเกณฑ์วัดประสิทธิภาพการทำงานที่สำคัญของแสงสว่าง ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนของค่าความส่องสว่างต่ำที่สุดต่อค่าความส่องสว่างเฉลี่ย ตามที่กำหนดโดย EN 12464-1 (June 2011) “Lighting of indoor workplaces” คำนวณได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความส่องสว่างในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ($\rho=0$ และ $\rho=0.8$)

Model	$\rho=0$				$\rho=0.8$			
	Min. (lx)	Max. (lx)	Avg. (lx)	U_o	Min. (lx)	Max. (lx)	Avg. (lx)	U_o
1-Tx	121.89	1326.50	508.14	0.24	409.30	1544.40	781.73	0.52
2-Tx	139.91	819.82	459.79	0.30	433.80	1095.90	759.57	0.57
4-Tx	183.59	530.47	416.40	0.44	513.08	867.80	730.78	0.70
8-Tx	161.75	648.64	437.95	0.37	473.42	921.06	745.18	0.64
9-Tx	157.32	723.65	445.72	0.35	466.29	989.96	749.24	0.62

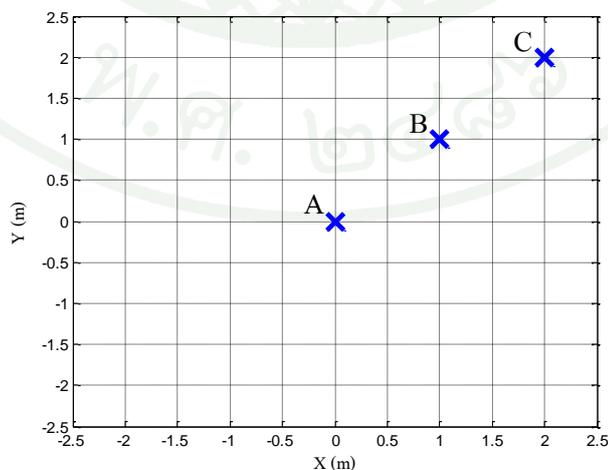
ผลการคำนวณและพิจารณาความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายความส่องสว่างทั้ง 5 รูปแบบแหล่งกำเนิดแสง พบว่ารูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด, 8 ชุด และ 9 ชุด มีความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างตามมาตรฐานความส่องสว่างในสภาวะห้องทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ EN 12464-1 คือ ไม่น้อยกว่า 0.6 ดังตารางที่ 5 และ ภาพที่ 34 ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงแบบ 4 ชุด ให้ค่าความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างสูงที่สุด



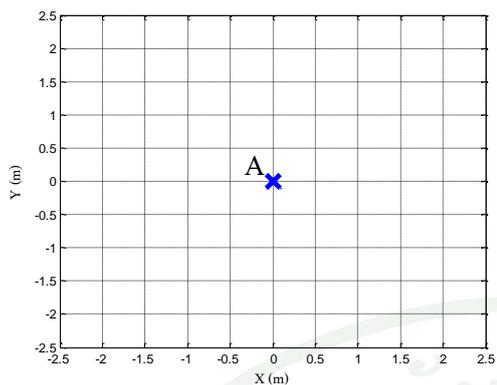
ภาพที่ 34 ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ($\rho=0$ และ $\rho=0.8$)

2.2 ผลการคำนวณเวลาในการเดินทางของแสง

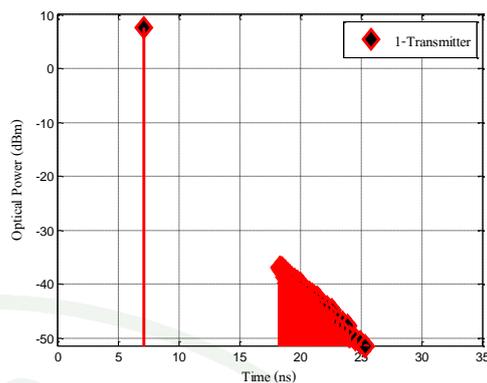
การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเดินทางของแสงแต่ละเส้นทางกับกำลังไฟฟ้าของแสง โดยกำหนดจุดเครื่องรับแสงคือ จุด A (0, 0, 0.85), จุด B (1, 1, 0.85) และ จุด C (2, 2, 0.85) ดังแสดงในภาพที่ 35



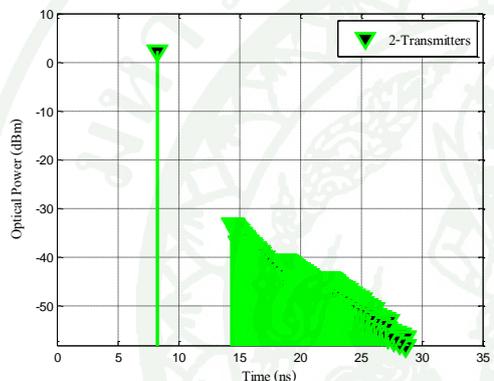
ภาพที่ 35 จุดสังเกตติดตั้งเครื่องรับแสงบนโต๊ะทำงาน A (0, 0), B (1, 1) และ C (2, 2)



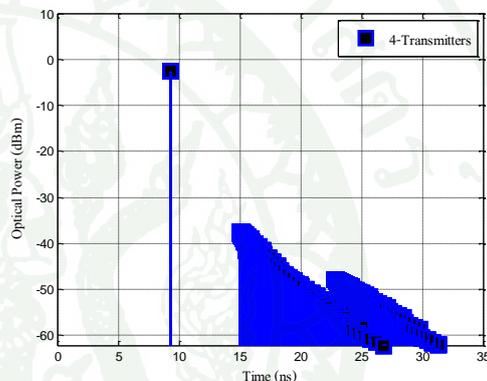
(a) จุดสังเกตตำแหน่ง A (0,0)



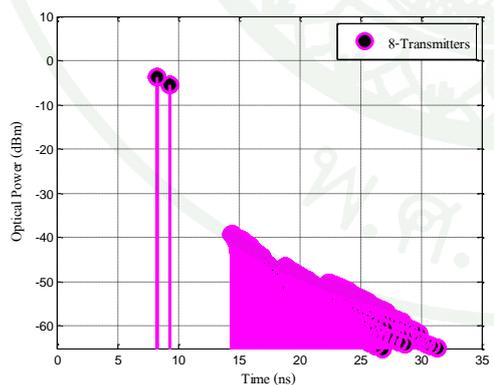
(b) แหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด ($D_{RMS} = 0.07$ ns)



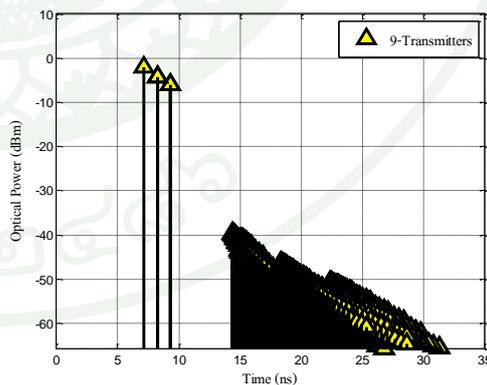
(c) แหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด ($D_{RMS} = 0.28$ ns)



(d) แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($D_{RMS} = 0.23$ ns)

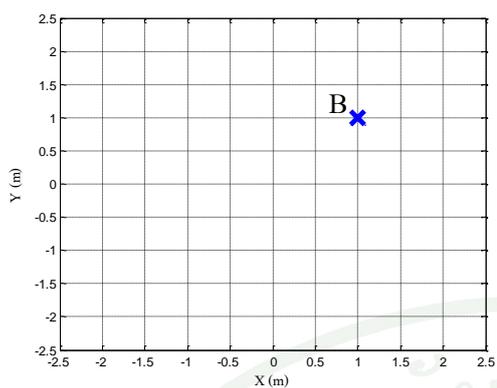


(e) แหล่งกำเนิดแสง 8 ชุด ($D_{RMS} = 0.64$ ns)

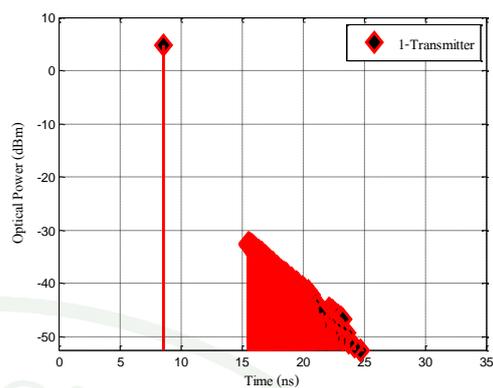
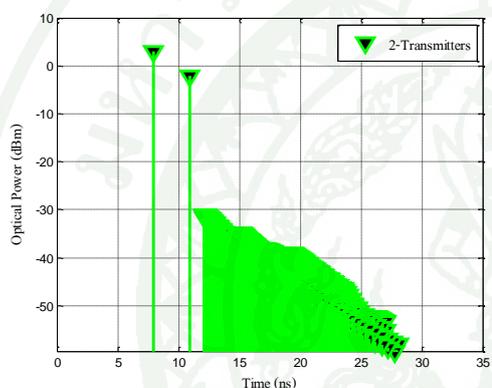
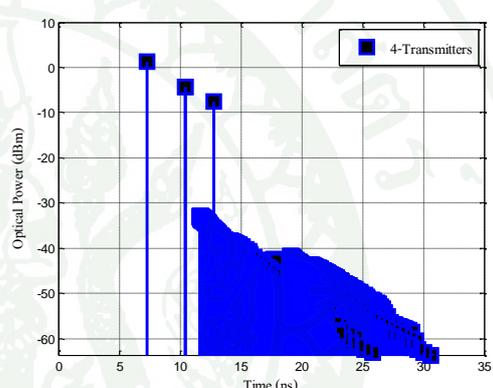
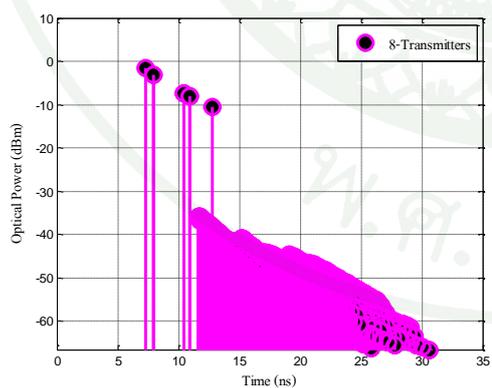
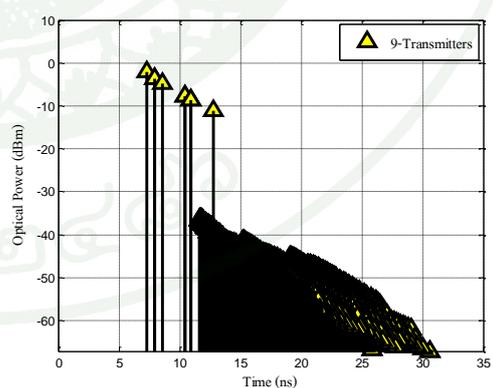


(f) แหล่งกำเนิดแสง 9 ชุด ($D_{RMS} = 0.87$ ns)

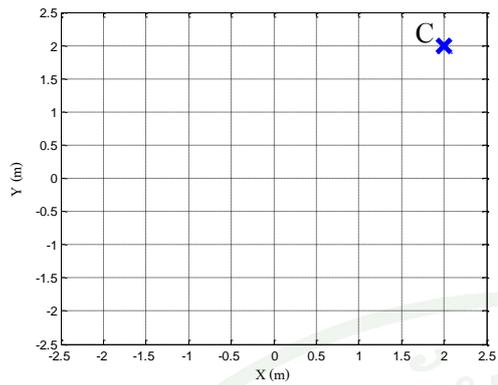
ภาพที่ 36 (a) – (f) เวลาในการเดินทางของแสงแต่ละเส้นทางในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน ที่ตำแหน่งเครื่องรับแสง A (0,0) และ $\rho=0.8$



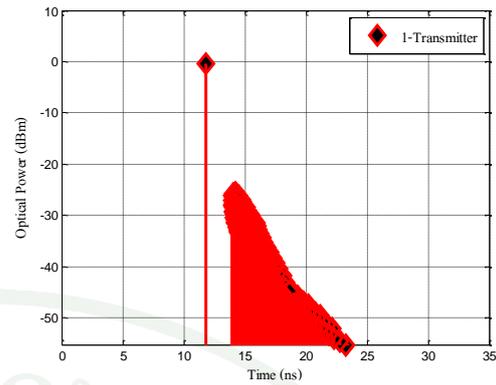
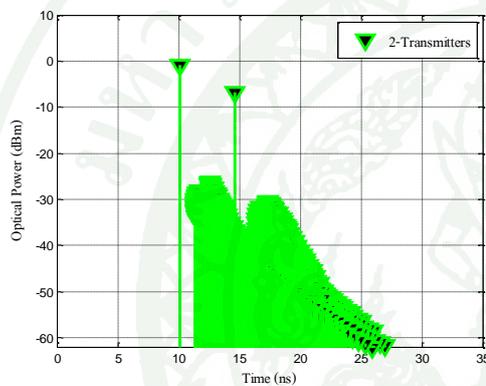
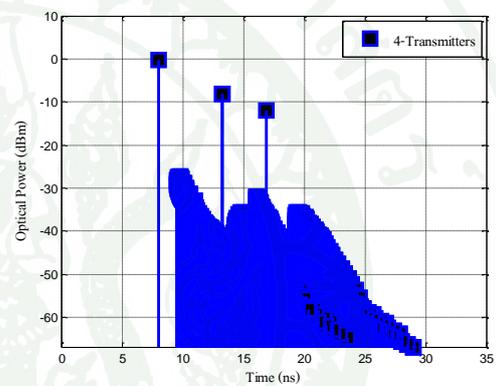
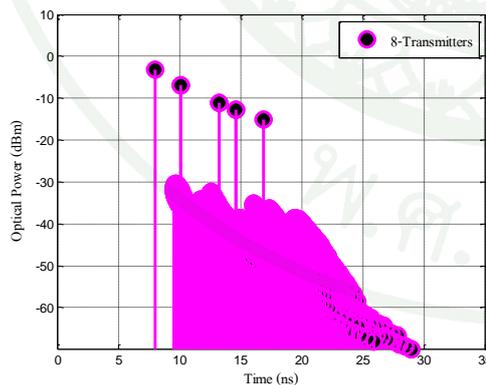
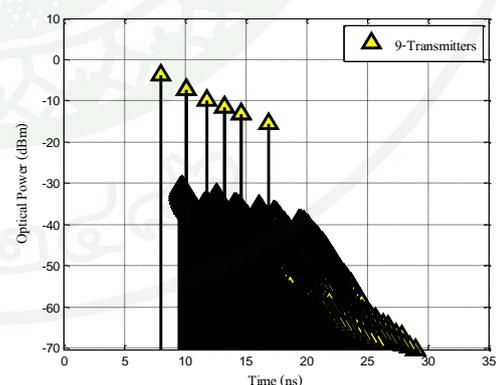
(a) จุดสังเกตตำแหน่ง B (1,1)

(b) แหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด ($D_{RMS} = 0.18$ ns)(c) แหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด ($D_{RMS} = 0.85$ ns)(d) แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($D_{RMS} = 1.52$ ns)(e) แหล่งกำเนิดแสง 8 ชุด ($D_{RMS} = 1.20$ ns)(f) แหล่งกำเนิดแสง 9 ชุด ($D_{RMS} = 1.19$ ns)

ภาพที่ 37 (a) – (f) เวลาในการเดินทางของแสงแต่ละเส้นทางในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน ที่ตำแหน่งเครื่องรับแสง B (1,1) และ $\rho=0.8$



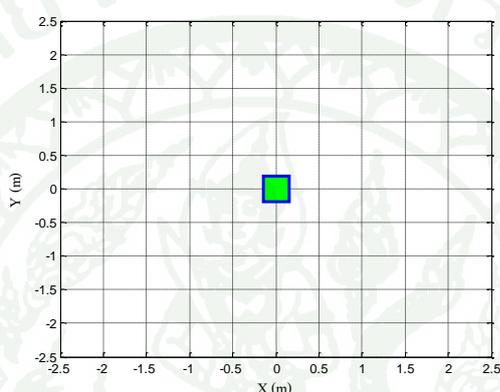
(a) จุดสังเกตตำแหน่ง C (2,2)

(b) แหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด ($D_{RMS} = 0.41$ ns)(c) แหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด ($D_{RMS} = 0.42$ ns)(d) แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($D_{RMS} = 1.63$ ns)(e) แหล่งกำเนิดแสง 8 ชุด ($D_{RMS} = 1.66$ ns)(f) แหล่งกำเนิดแสง 9 ชุด ($D_{RMS} = 1.71$ ns)

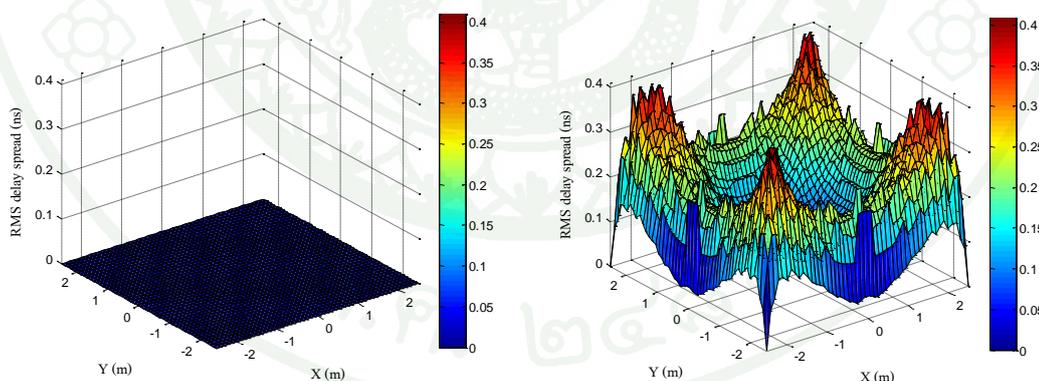
ภาพที่ 38 (a) – (f) เวลาในการเดินทางของแสงแต่ละเส้นทางในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน ที่ตำแหน่งเครื่องรับแสง C (2,2) และ $\rho=0.8$

2.3 ผลการคำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจาย

ความล่าช้าในการแพร่กระจายของแสงเป็นเกณฑ์วัดประสิทธิภาพการทำงานที่สำคัญของการสื่อสารข้อมูล ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของสัญญาณที่มาจากเส้นทางที่แตกต่างกันมาถึงที่เครื่องรับสัญญาณในเวลาที่แตกต่างกัน โดยเครื่องรับสัญญาณเป็นเครื่องเดียวกัน ผลการทดลองความล่าช้าในการแพร่กระจายของแสงได้แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ แบบที่ปราศจากการสะท้อน ($\rho=0$) และแบบที่พร้อมด้วยการสะท้อน ($\rho=0.8$) ดังนี้



(a) แหล่งกำเนิดแสง 1 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน

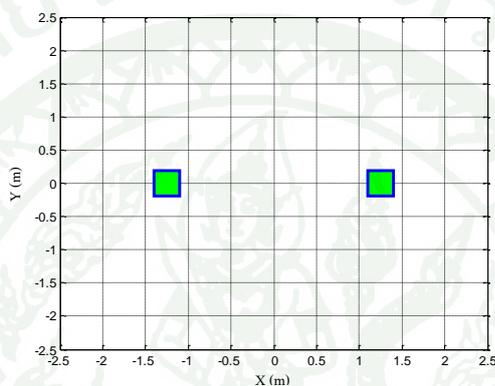


(b) ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.78×10^{-15} ns ($\rho=0$)

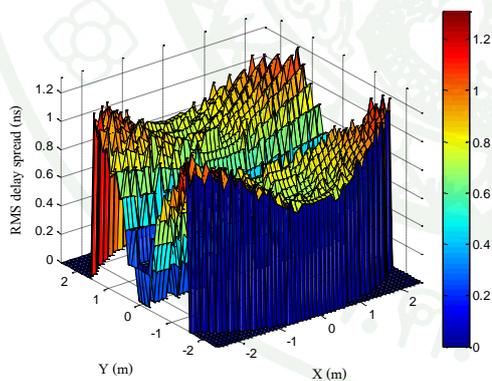
(c) ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 0.41 ns ($\rho=0.8$)

ภาพที่ 39 (a) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง; (b) - (c) ผลความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 1 จุด

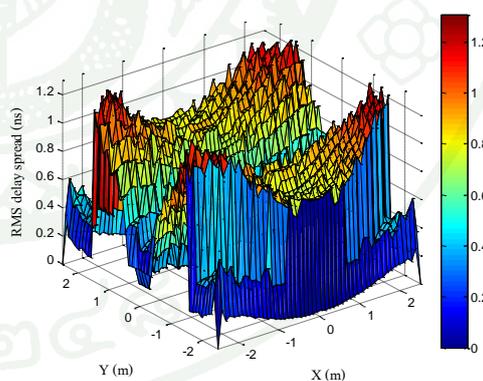
รูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 1 จุด ความล่าช้าในการแพร่กระจายโดยปราศจากการสะท้อนมีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจายที่น้อยมากหรือเทียบเท่าศูนย์ แต่เมื่อคำนวณพร้อมด้วยการสะท้อนแสงของผนัง พบว่า เกิดความล่าช้าในการแพร่กระจายมีค่าต่ำสุด 0 ns และสูงสุด 0.41ns นั่นคือ มีพื้นที่บางส่วนที่แสงสะท้อนไม่ถึง จึงไม่เกิดความล่าช้าในการแพร่กระจาย และความล่าช้าในการแพร่กระจายในรูปแบบนี้เกิดจากการสะท้อนแสงเท่านั้น ดังนั้นสามารถคำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจายเฉลี่ยเกิดขึ้นในรูปแบบปราศจากการสะท้อนคิดเป็น 0 % และรูปแบบพร้อมด้วยการสะท้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น 100 % ของความล่าช้าในการแพร่กระจายทั้งหมดที่เกิดขึ้น



(a) แหล่งกำเนิดแสง 2 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน



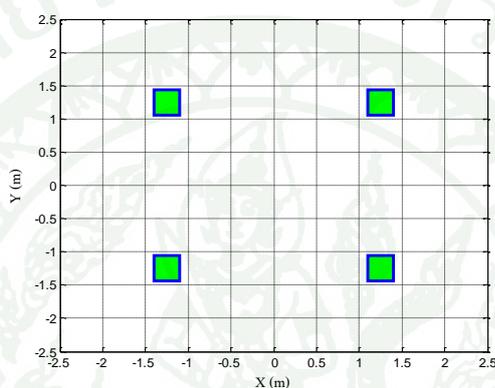
(b) ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.19 ns ($\rho=0$)



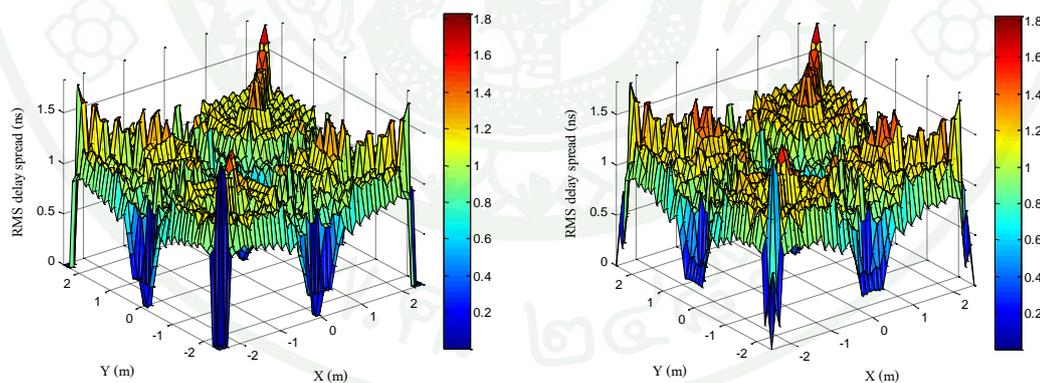
(c) ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.31 ns ($\rho=0.8$)

ภาพที่ 40 (a) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง; (b) - (c) ผลความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 2 จุด

รูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 2 จุด ความล่าช้าในการแพร่กระจายโดยปราศจากการสะท้อนมีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจาย ต่ำสุด 0 ns และสูงสุด 1.19 ns แสดงว่าแสงที่มีแหล่งกำเนิดต่างกันเกิดแทรกสอดและรบกวนกันจึงให้เกิดความล่าช้าในการแพร่กระจาย ส่วนการคำนวณพร้อมด้วยการสะท้อน มีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจาย ต่ำสุด 0 ns และสูงสุด 1.31 ns พบว่ามีความล่าช้าในการแพร่กระจายเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถคำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจายเกิดขึ้น โดยเฉลี่ยในรูปแบบปราศจากการสะท้อนคิดเป็น 87.32 % และรูปแบบพร้อมด้วยการสะท้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น 12.68 % ของค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการแพร่กระจายทั้งหมดที่เกิดขึ้น



(a) แหล่งกำเนิดแสง 4 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน

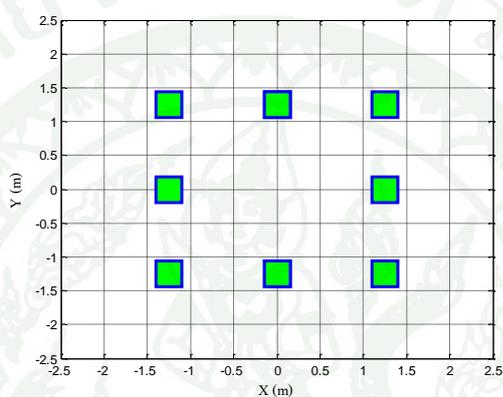


(b) ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.79 ns ($\rho=0$)

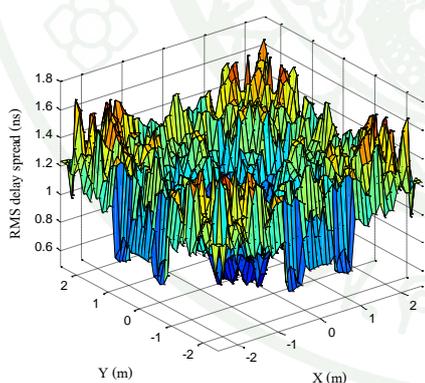
(c) ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.83 ns ($\rho=0.8$)

ภาพที่ 41 (a) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง; (b) - (c) ผลความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 4 จุด

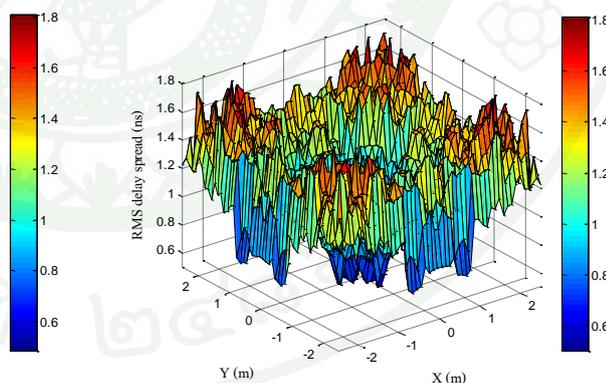
รูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 4 จุด ความล่าช้าในการแพร่กระจายโดยปราศจากการสะท้อนมีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจาย ต่ำสุด 0 ns และสูงสุด 1.79 ns แสดงว่าแสงที่มีแหล่งกำเนิดต่างกันเกิดแทรกสอดและรบกวนกันจึงให้เกิดความล่าช้าในการแพร่กระจาย ส่วนการคำนวณพร้อมด้วยการสะท้อน มีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจาย ต่ำสุด 0 ns และสูงสุด 1.83 ns พบว่ามีความล่าช้าในการแพร่กระจายเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถคำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจายเกิดขึ้น โดยเฉลี่ยในรูปแบบปราศจากการสะท้อนคิดเป็น 92.66 % และรูปแบบพร้อมด้วยการสะท้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น 7.34 % ของค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการแพร่กระจายทั้งหมดที่เกิดขึ้น



(a) แหล่งกำเนิดแสง 8 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน



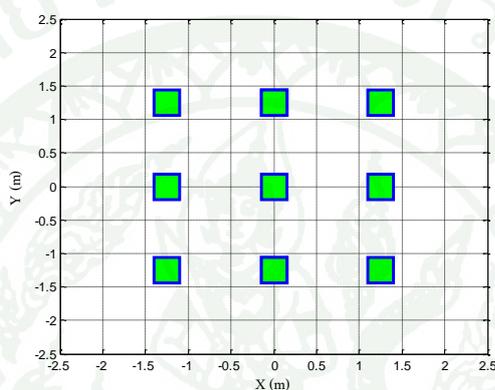
(b) ค่าต่ำสุด 0.49 ns ค่าสูงสุด 1.68 ns ($\rho=0$)



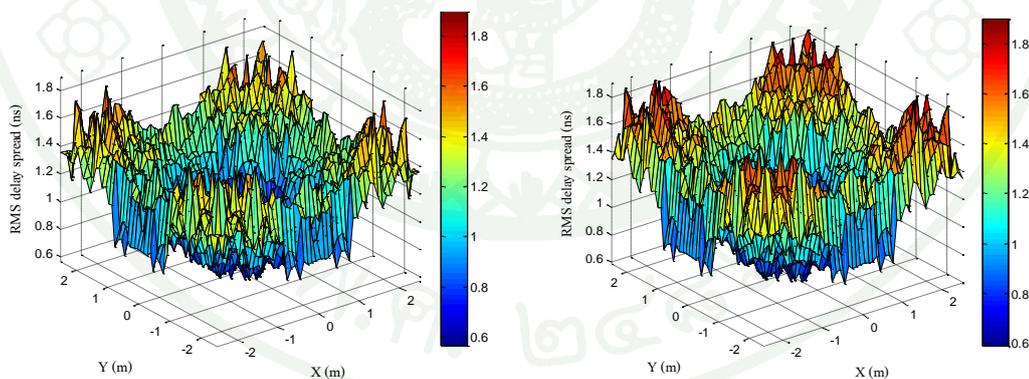
(c) ค่าต่ำสุด 0.50 ns ค่าสูงสุด 1.81 ns ($\rho=0.8$)

ภาพที่ 42 (a) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง; (b) - (c) ผลความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 8 จุด

รูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 8 จุด ความล่าช้าในการแพร่กระจายโดยปราศจากการสะท้อนมีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจาย ต่ำสุด 0.49 ns และสูงสุด 1.68 ns แสดงว่าแสงที่มีแหล่งกำเนิดต่างกันเกิดแทรกสอดและรบกวนกันจึงให้เกิดความล่าช้าในการแพร่กระจาย ส่วนการคำนวณพร้อมด้วยการสะท้อน มีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจาย ต่ำสุด 0.50 ns และสูงสุด 1.81 ns พบว่ามีความล่าช้าในการแพร่กระจายเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถคำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจายเกิดขึ้นโดยเฉลี่ยในรูปแบบปราศจากการสะท้อนคิดเป็น 91.94 % และรูปแบบพร้อมด้วยการสะท้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น 8.06 % ของค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการแพร่กระจายทั้งหมดที่เกิดขึ้น



(a) แหล่งกำเนิดแสง 9 จุด ติดตั้งบริเวณเพดาน



(b) ค่าต่ำสุด 0.57 ns ค่าสูงสุด 1.76 ns ($\rho=0$)

(c) ค่าต่ำสุด 0.59 ns ค่าสูงสุด 1.90 ns ($\rho=0.8$)

ภาพที่ 43 (a) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง; (b) - (c) ผลความล่าช้าในการแพร่กระจาย D_{RMS} ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 9 จุด

รูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 9 ชุด ความล่าช้าในการแพร่กระจายโดยปราศจากการสะท้อนมีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจาย ต่ำสุด 0.57 ns และสูงสุด 1.76 ns แสดงว่าแสงที่มีแหล่งกำเนิดต่างกันเกิดแทรกสอดและรบกวนกันจึงให้เกิดความล่าช้าในการแพร่กระจาย ส่วนการคำนวณพร้อมด้วยการสะท้อน มีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจาย ต่ำสุด 0.59 ns และสูงสุด 1.90 ns พบว่ามีความล่าช้าในการแพร่กระจายเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถคำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจายเกิดขึ้นโดยเฉลี่ยในรูปแบบปราศจากการสะท้อนคิดเป็น 92.06 % และรูปแบบพร้อมด้วยการสะท้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น 7.94 % ของค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการแพร่กระจายทั้งหมดที่เกิดขึ้น

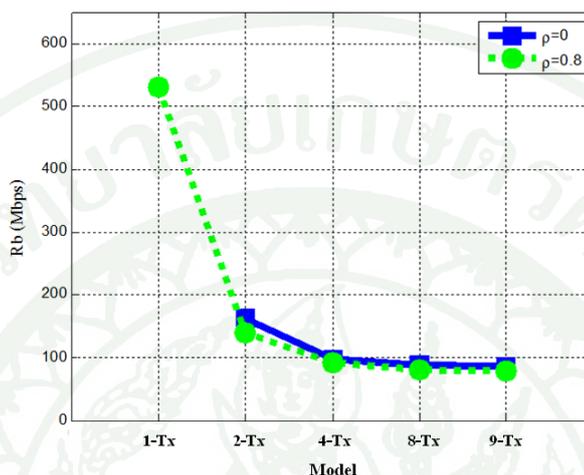
ผลการคำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจาย ทั้ง 5 รูปแบบแหล่งกำเนิดแสง พร้อมทั้งคำนวณอัตราบิตสูงสุดจากความล่าช้าในการแพร่กระจาย แสดงดังตารางที่ 6 พบว่า ความล่าช้าในการแพร่กระจายมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มจำนวนชุดของแหล่งกำเนิดแสง นั่นคือความล่าช้าในการแพร่กระจายเกิดจากการแทรกสอดและรบกวนจากแสงหลายเส้นทางโดยเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกันและการสะท้อนของแสงเป็นสำคัญ

ตารางที่ 6 ความล่าช้าในการแพร่กระจายในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ($\rho=0$ และ $\rho=0.8$)

Model	$\rho=0$				$\rho=0.8$			
	Min. (ns)	Max. (ns)	Avg. (ns)	R_b (Mbps)	Min. (ns)	Max. (ns)	Avg. (ns)	R_b (Mbps)
1-Tx	0.00	0.00	0.00	α	0.00	0.41	0.19	530.79
2-Tx	0.00	1.20	0.62	162.34	0.00	1.31	0.71	140.51
4-Tx	0.00	1.79	1.01	98.62	0.00	1.83	1.09	91.42
8-Tx	0.49	1.68	1.14	88.06	0.50	1.81	1.24	80.95
9-Tx	0.57	1.76	1.16	86.21	0.59	1.90	1.26	79.37

ผลการคำนวณความล่าช้าในการแพร่กระจาย รูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด ให้ค่าที่ต่ำที่สุด และมีค่าเพิ่มขึ้นในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด, 4 ชุด, 8 ชุด และ 9 ชุด ตามลำดับ ในทางด้านการสื่อสารข้อมูลถือได้ว่ารูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด มีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่เนื่องจากการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ ต้องคำนึงการทำงานร่วมกันระหว่างแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูล ซึ่งรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด และ 2 ชุด ไม่ผ่านเกณฑ์ความสม่ำเสมอของระดับความ

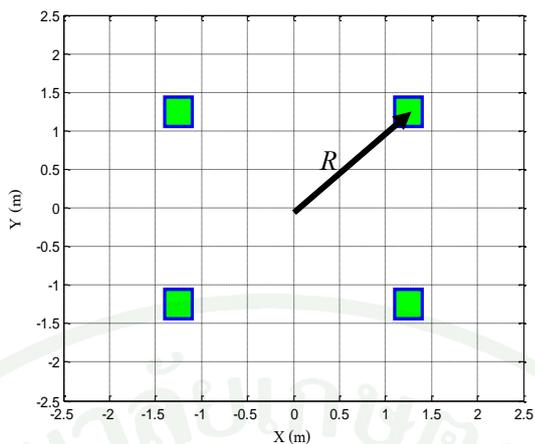
ส่องสว่าง ในงานวิจัยนี้จึงพบว่ารูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด เป็นรูปแบบที่ดีที่สุดสำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ สามารถคำนวณขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 91.42 Mbps ผลการคำนวณอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดเฉลี่ยในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด, 4 ชุด, 8 ชุด และ 9 ชุด แสดงดังภาพที่ 44 แต่แหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด ($\rho=0$) จะได้ค่า $D_{RMS}=0$ ดังนั้น $R_b = \infty$



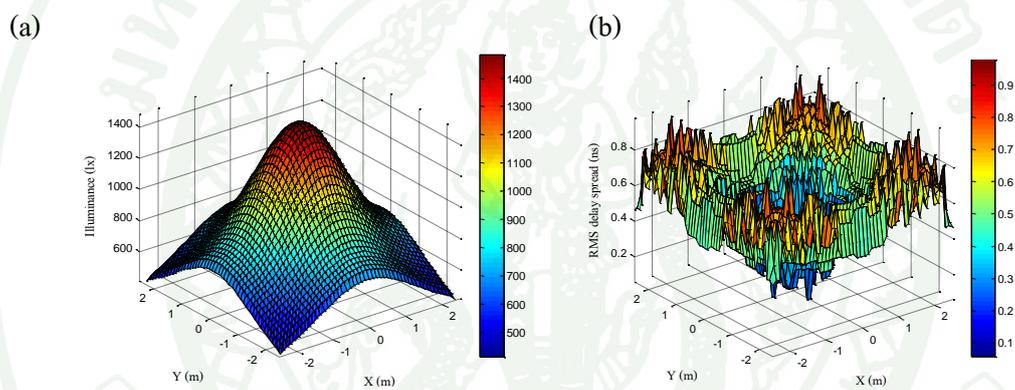
ภาพที่ 44 อัตราการส่งข้อมูลสูงสุดในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ($\rho=0$ และ $\rho=0.8$)

2.4 ผลจากการปรับเปลี่ยนตำแหน่งจุดติดตั้ง

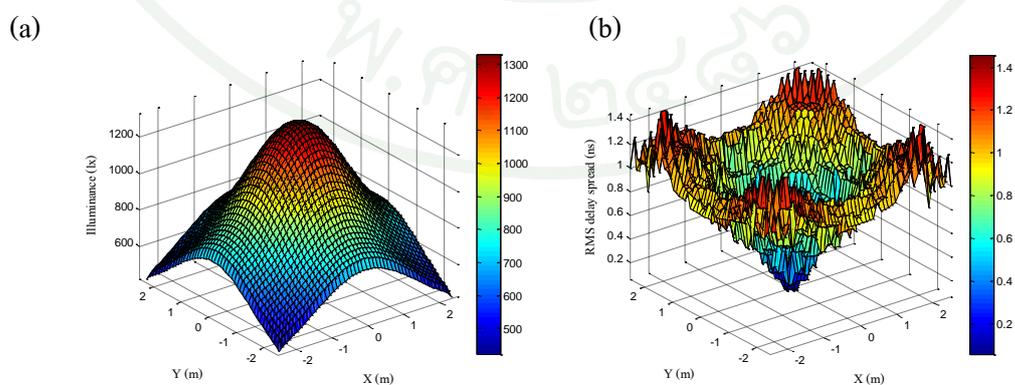
นำรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงที่มีความล่าช้าในการแพร่กระจายน้อยที่สุด โดยที่ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างได้ตามมาตรฐาน นั่นคือ รูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งจุดติดตั้ง คำนวณการแพร่กระจายความส่องสว่างและความล่าช้าในการแพร่กระจาย เพื่อหารูปแบบการติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดในการทำงานร่วมกันระหว่างแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูล โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งจุดติดตั้งจำนวน 9 รูปแบบ คือ พิกัด A ($\pm 0.25, \pm 0.25$), B ($\pm 0.5, \pm 0.5$), C ($\pm 0.75, \pm 0.75$), D ($\pm 1, \pm 1$), E ($\pm 1.25, \pm 1.25$), F ($\pm 1.5, \pm 1.5$), G ($\pm 1.75, \pm 1.75$), H ($\pm 2, \pm 2$) และ I ($\pm 2.25, \pm 2.25$) หรือรัศมี (R) แสดงดังภาพที่ 45 ซึ่งวัดจากจุดศูนย์กลางห้อง (0,0) คือ A (R = 0.35 m), B (R = 0.71 m), C (R = 1.06 m), D (R = 1.41 m), E (R = 1.77 m), F (R = 2.12 m), G (R = 2.48 m), H (R = 2.83 m) และ I (R = 3.18 m)



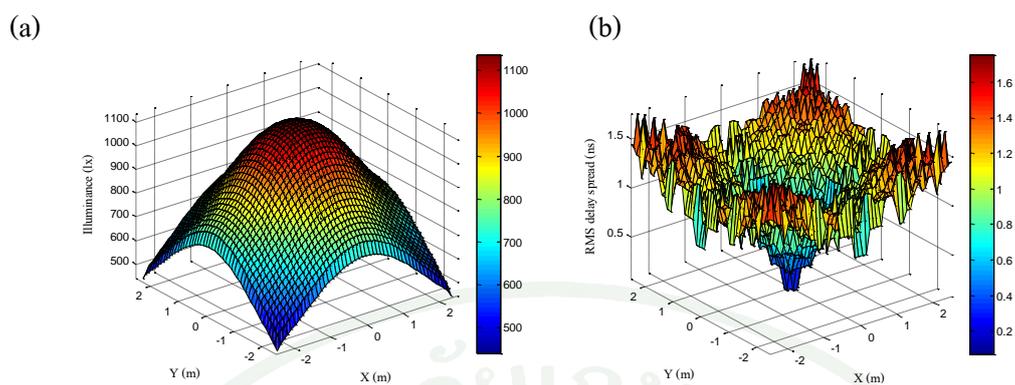
ภาพที่ 45 ปรับตำแหน่งจุดติดตั้ง รัศมี R วัดจากจุดศูนย์กลางห้อง (0,0) ในแหล่งกำเนิดแสง 4 จุด



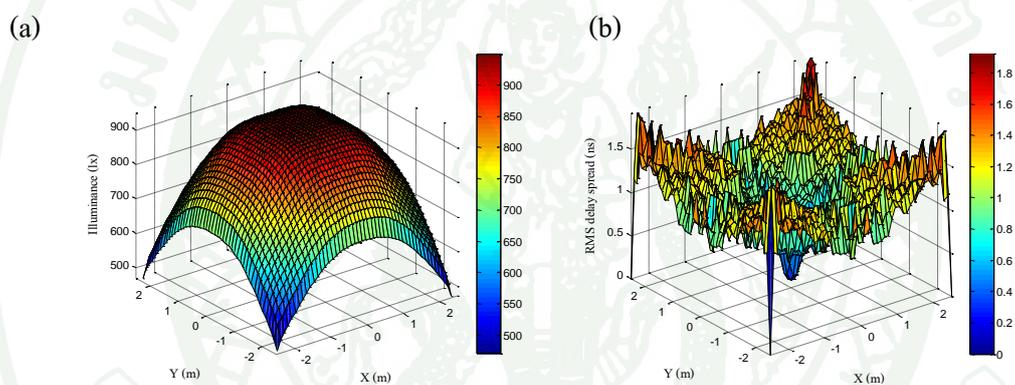
ภาพที่ 46 เมื่อ $R = 0.35$ m และ $\rho = 0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 412.30 lx ค่าสูงสุด 1484.70 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0.06 ns ค่าสูงสุด 0.98 ns



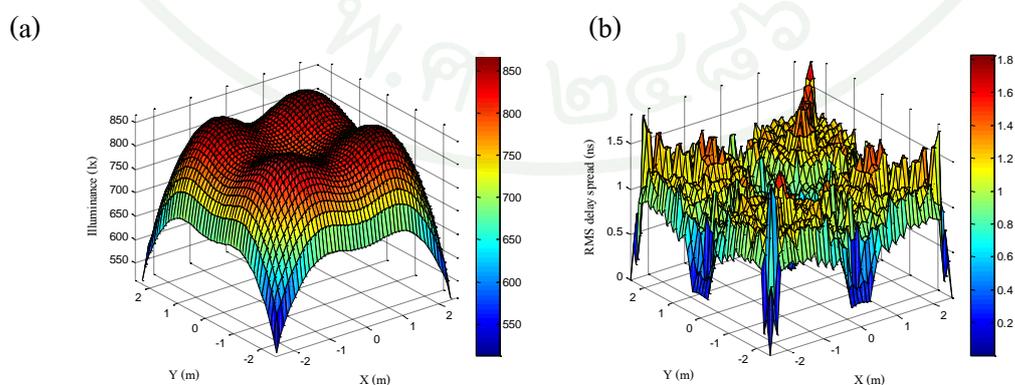
ภาพที่ 47 เมื่อ $R = 0.71$ m และ $\rho = 0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 422.20 lx ค่าสูงสุด 1330.3 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0.06 ns ค่าสูงสุด 1.46 ns



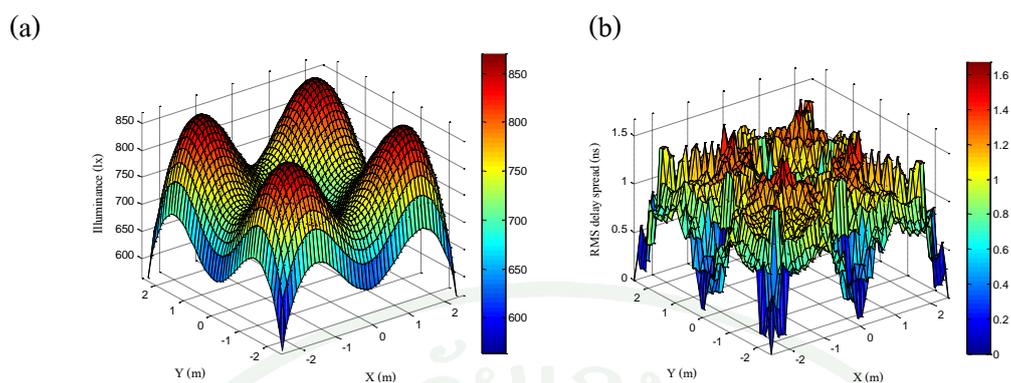
ภาพที่ 48 เมื่อ $R = 1.06$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 440.80 lx ค่าสูงสุด 1135.90 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0.07 ns ค่าสูงสุด 1.75 ns



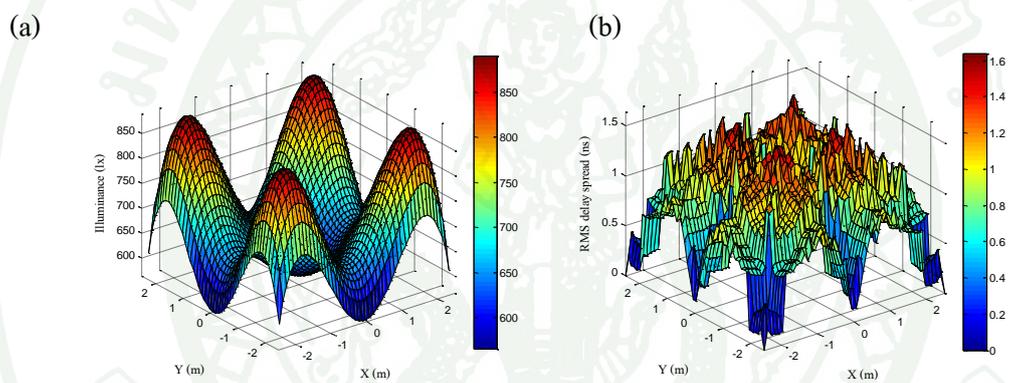
ภาพที่ 49 เมื่อ $R = 1.41$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 470.80 lx ค่าสูงสุด 949.65 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.92 ns



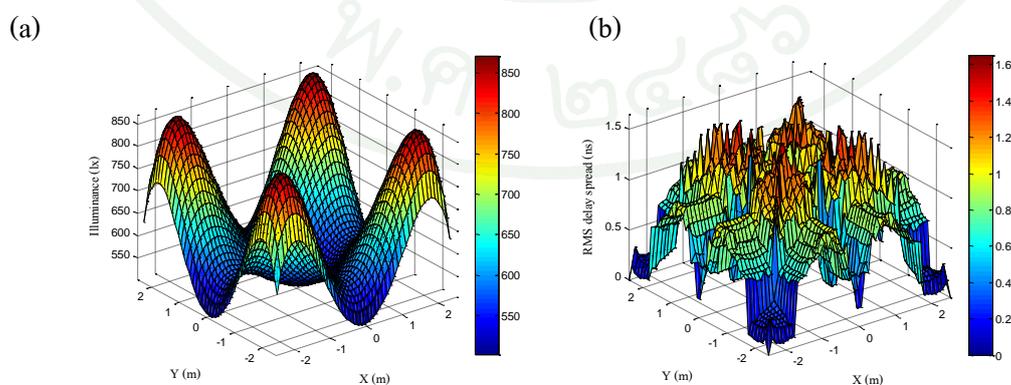
ภาพที่ 50 เมื่อ $R = 1.77$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 513.08 lx ค่าสูงสุด 867.80 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.83 ns



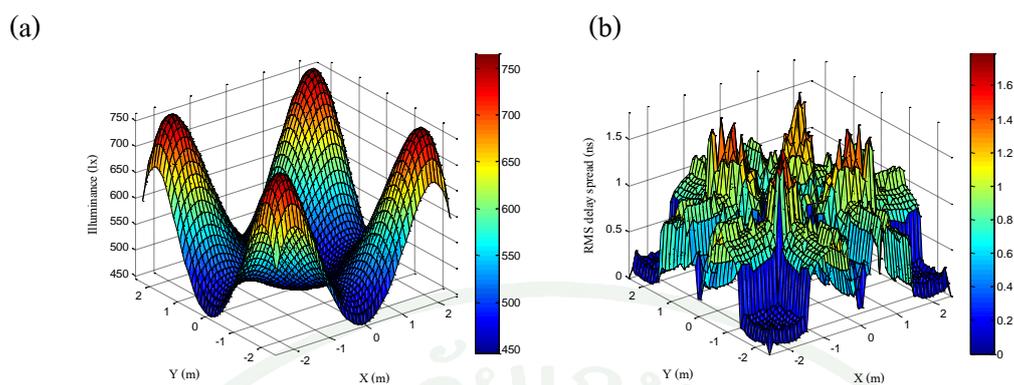
ภาพที่ 51 เมื่อ $R = 2.12$ m และ $\rho = 0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 564.04 lx ค่าสูงสุด 870.80 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.68 ns



ภาพที่ 52 เมื่อ $R = 2.48$ m และ $\rho = 0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 564.79 lx ค่าสูงสุด 890.05 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.64 ns



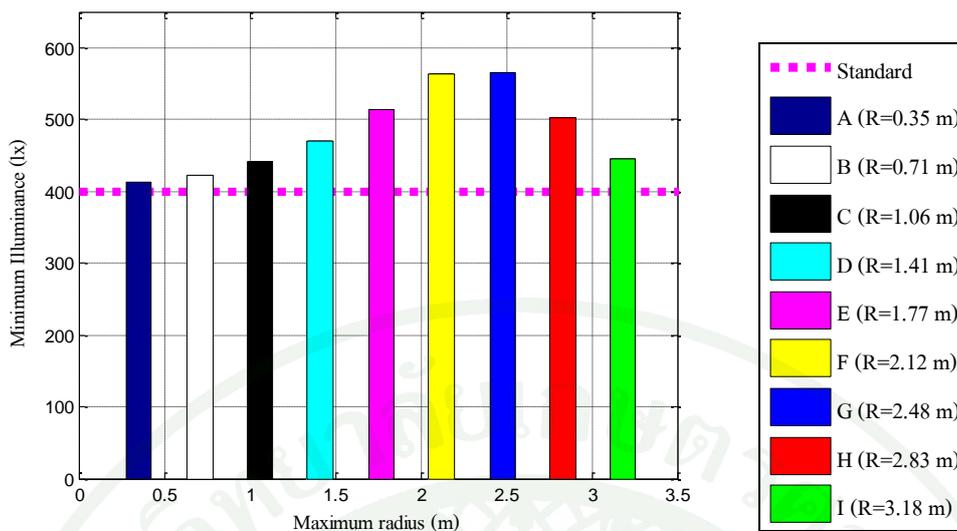
ภาพที่ 53 เมื่อ $R = 2.83$ m และ $\rho = 0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 502.26 lx ค่าสูงสุด 870.68 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.65 ns



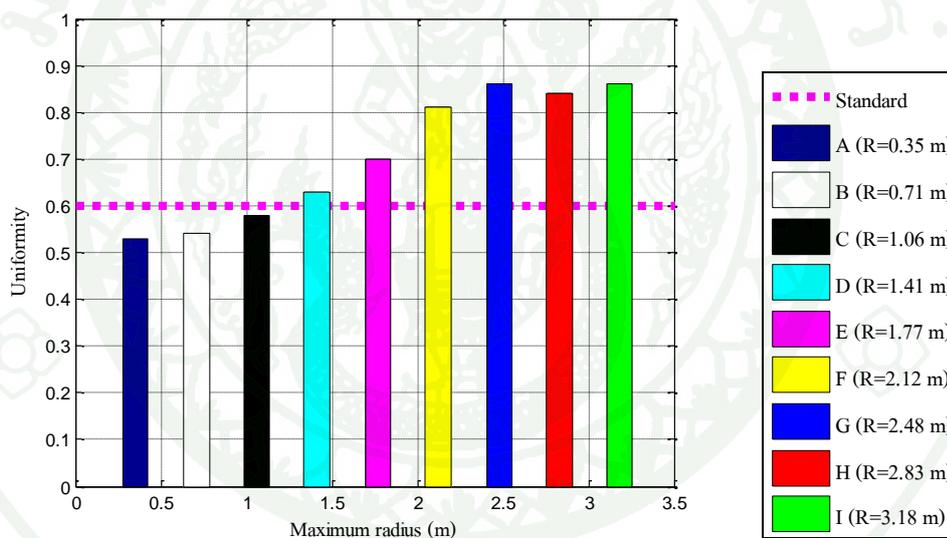
ภาพที่ 54 เมื่อ $R = 3.18$ m และ $\rho=0.8$ (a) การแพร่กระจายความส่องสว่าง ค่าต่ำสุด 444.90 lx ค่าสูงสุด 765.16 lx; (b) D_{RMS} ค่าต่ำสุด 0 ns ค่าสูงสุด 1.79 ns

ตารางที่ 7 ความส่องสว่างและความล่าช้าในการแพร่กระจาย โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุดในตำแหน่งที่ต่างกัน ($\rho=0.8$)

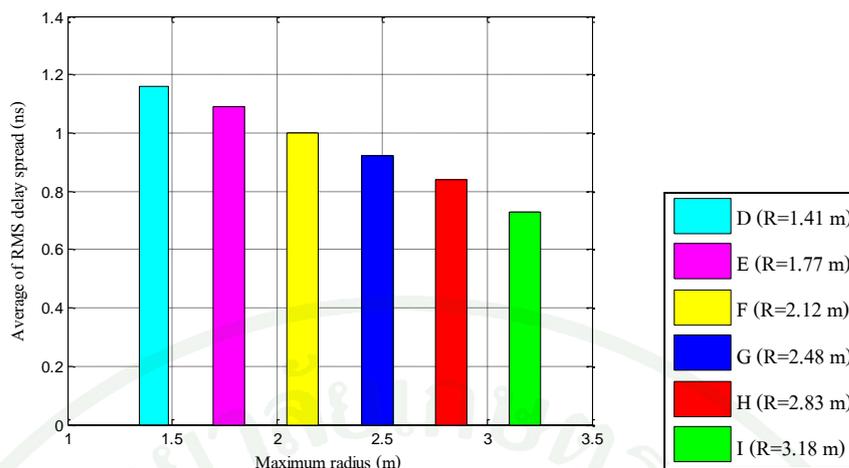
Position	R (m)	Illuminance (lx)			U_o	D_{RMS} (ns)			R_b (Mbps)
		Min.	Max.	Avg.		Min.	Max.	Avg.	
A	0.35	412.30	1484.70	780.13	0.53	0.06	0.98	0.57	175.44
B	0.71	422.20	1330.30	775.11	0.54	0.06	1.46	0.93	107.53
C	1.06	440.80	1135.90	766.05	0.58	0.07	1.75	1.13	88.50
D	1.41	470.80	949.65	751.83	0.63	0.00	1.92	1.16	86.21
E	1.77	513.08	867.80	730.78	0.70	0.00	1.83	1.09	91.74
F	2.12	564.04	870.80	700.57	0.81	0.00	1.68	1.00	100.00
G	2.48	564.79	890.05	658.20	0.86	0.00	1.64	0.92	108.70
H	2.83	502.26	870.68	600.01	0.84	0.00	1.65	0.84	119.05
I	3.18	444.90	765.16	519.82	0.86	0.00	1.79	0.73	136.99



ภาพที่ 55 ความส่องสว่างที่ต่ำที่สุด โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($\rho=0.8$) ติดตั้งที่พิกัดต่างกัน



ภาพที่ 56 ความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายของแสง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($\rho=0.8$) ติดตั้งที่พิกัดต่างกัน



ภาพที่ 57 ความล่าช้าในการแพร่กระจายของแสง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($\rho=0.8$) ติดตั้งที่พิกัดต่างกันและมีค่าความสม่ำเสมอในการแพร่กระจายของแสงมากกว่า 0.6

ผลการคำนวณการแพร่กระจายความส่องสว่าง ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่าง ความล่าช้าในการแพร่กระจายและขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูล ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ที่ตำแหน่งจุดติดตั้งที่ต่างกัน ดังตารางที่ 7 พบว่า ทุกตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดแสงมีความส่องสว่างไม่น้อยกว่า 400 lx ดังภาพที่ 55 แต่ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างมีตำแหน่งที่ผ่านเกณฑ์จำนวน 6 ตำแหน่ง ได้แก่ D, E, F, G, H และ I ดังภาพที่ 56 ซึ่งใช้สำหรับการพิจารณาความล่าช้าในการแพร่กระจาย พบว่า ตำแหน่ง I มีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจายเฉลี่ยต่ำที่สุด ดังภาพที่ 57 ซึ่งให้ค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยสูงที่สุด คือ 136.99 Mbps

3. ผลการทดลองผลกระทบจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่อการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้

โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การสะท้อนของผนังห้องมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.8 จากการคำนวณการหารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดนั้น ได้ใช้สัมประสิทธิ์การสะท้อน 0.8 จึงได้ทดลองเปลี่ยนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็น 0.5 ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุดที่ตำแหน่งจุดติดตั้งที่ต่างกัน

ตารางที่ 8 ความส่องสว่างและความล่าช้าในการแพร่กระจาย โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุดในตำแหน่งที่ต่างกัน ($\rho=0.5$)

Position	R (m)	Illuminance (lx)			U_o	D_{RMS} (ns)			R_b (Mbps)
		Min.	Max.	Avg.		Min.	Max.	Avg.	
A	0.35	309.50	1400.90	670.33	0.46	0.04	0.86	0.53	188.68
B	0.71	318.00	1243.40	662.81	0.48	0.04	1.39	0.90	111.11
C	1.06	334.20	1044.10	649.85	0.51	0.04	1.72	1.10	90.91
D	1.41	360.30	851.73	630.82	0.57	0.00	1.86	1.13	88.50
E	1.77	397.59	736.62	604.83	0.66	0.00	1.81	1.06	94.34
F	2.12	443.98	709.30	570.78	0.78	0.00	1.63	0.96	104.17
G	2.48	453.96	707.57	527.42	0.86	0.00	1.61	0.88	113.64
H	2.83	400.54	688.05	473.35	0.85	0.00	1.65	0.80	125.00
I	3.18	341.67	612.17	405.84	0.84	0.00	1.82	0.69	144.93

ผลการทดลองเปลี่ยนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็น 0.5 ในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ที่ตำแหน่งจุดติดตั้งที่ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 8 พบว่า ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งเครื่องกำเนิดแสงเปลี่ยนไป ตำแหน่งที่มีความส่องสว่างทุกพื้นที่ไม่น้อยกว่า 400 lx มีจำนวน 3 ตำแหน่งเท่านั้น ได้แก่ F, G และ H ซึ่งทั้ง 3 ตำแหน่งนี้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างสำหรับการพิจารณาความล่าช้าในการแพร่กระจาย พบว่า ตำแหน่ง H มีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจายเฉลี่ยต่ำที่สุด ซึ่งให้ค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลสูงที่สุด คือ 125 Mbps

4. ผลการทดลองการหาความกว้างลำแสง (Beam width) ของเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

การปรับเปลี่ยนความกว้างลำแสง จำแนกออกได้เป็น 2 แบบ คือ ปรับโดยใช้โคมบีบบังคับลำแสงและปรับมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ดังนี้

4.1 การปรับเปลี่ยนความกว้างลำแสงโดยใช้โคมบีบบังคับลำแสง

ในการทดลองนี้ได้สมมุติว่ารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด คือ แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ที่ตำแหน่ง I ($R = 3.18$ m) เมื่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนของผนังห้องเท่ากับ 0.8 และมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ เท่ากับ 70 องศา วัดจากเส้นปกติ นำรูปแบบดังกล่าวทำการปรับเปลี่ยนความกว้างมุมของเครื่องกำเนิดแสง ϕ คือ 90, 80, 70, 60 และ 50 องศา วัดจากเส้นปกติ โดยใช้โคมบีบบังคับลำแสงของเครื่องกำเนิดแสง คำนวณการแพร่กระจายความส่องสว่าง ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่าง และความล่าช้าในการแพร่กระจาย

ตารางที่ 9 ความส่องสว่างและความล่าช้าในการแพร่กระจาย โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ที่ตำแหน่ง I ($R = 3.18$ m) ซึ่งมีความกว้างลำแสงที่ต่างกัน โดยใช้โคมบีบบังคับลำแสง ($\rho=0.8$)

Angle (degree)	Illuminance (lx)			U_o	D_{RMS} (ns)			R_b (Mbps)
	Min.	Max.	Avg.		Min.	Max.	Avg.	
90°	444.90	765.16	519.82	0.86	0.00	1.79	0.73	136.99
80°	436.98	756.44	509.34	0.86	0.00	1.79	0.72	138.89
70°	392.37	695.47	461.17	0.85	0.00	1.80	0.70	142.86
60°	304.82	601.59	384.05	0.79	0.00	1.81	0.68	147.06
50°	138.24	564.78	305.77	0.45	0.00	0.51	0.16	625.00
40°	64.32	517.06	212.98	0.30	0.00	0.67	0.19	526.32
30°	31.82	471.00	128.40	0.25	0.00	0.41	0.18	555.56

จากการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($\rho=0.8$) ที่ตำแหน่ง I ($R=3.18$ m) พบว่าการปรับความกว้างมุมของเครื่องกำเนิดแสงที่ 80 องศา วัดจากเส้นปกติ โดยใช้โคมบีบบังคับลำแสง มีความส่องสว่างทุกพื้นที่ไม่น้อยกว่า 400 lx ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และค่าความล่าช้าในการแพร่กระจายเฉลี่ยต่ำกว่าเดิม ซึ่งให้ค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูล คือ 138.89 Mbps ซึ่งเพิ่มขึ้น 1.90 Mbps จากความกว้างมุมของเครื่องกำเนิดแสงที่ 90 องศา แสดงดังตารางที่ 9 จากการสังเกตการลดความกว้างมุมของเครื่องกำเนิดแสงลง โดยใช้โคมบีบบังคับลำแสง ส่งผลให้ความส่องสว่างมีค่าลดลง แต่จะทำให้ค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้น

4.2 การปรับเปลี่ยนความกว้างลำแสงโดยปรับมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$

ในการทดลองนี้ได้สมมติว่ารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด คือ แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ที่ตำแหน่ง I ($R=3.18$ m) เมื่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนของผนังห้องเท่ากับ 0.8 นำรูปแบบดังกล่าวมาทำการปรับเปลี่ยนความกว้างมุมของเครื่องกำเนิดแสงโดยการปรับมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ คือ 90, 80, 70, 60, 50, 40 และ 30 องศา วัดจากเส้นปกติ คำนวณการแพร่กระจายความส่องสว่าง ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่าง และความล่าช้าในการแพร่กระจาย

ตารางที่ 10 ความส่องสว่างและความล่าช้าในการแพร่กระจาย โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ที่ตำแหน่ง I ($R = 3.18$ m) ซึ่งมีความกว้างลำแสงที่ต่างกัน โดยปรับมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ($\rho=0.8$)

Semi-angle at half power $\Phi_{1/2}$ (degree)	Illuminance (lx)			U_o	D_{RMS} (ns)			R_b (Mbps)
	Min.	Max.	Avg.		Min.	Max.	Avg.	
90°	400.62	622.75	456.43	0.87	0.00	2.04	0.86	112.28
80°	410.10	669.04	472.12	0.87	0.00	1.92	0.78	128.21
70°	444.90	765.16	519.82	0.86	0.00	1.79	0.73	136.99
60°	478.73	909.37	580.89	0.82	0.00	1.65	0.66	151.52
50°	493.69	1125.80	652.37	0.76	0.00	1.48	0.56	178.57
40°	471.37	1513.00	731.37	0.65	0.00	1.21	0.45	222.22
30°	387.10	2345.20	817.72	0.47	0.00	0.91	0.32	312.50

จากการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด ($\rho=0.8$) ที่ตำแหน่ง I ($R = 3.18$ m) พบว่า การปรับความกว้างมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ของเครื่องกำเนิดแสงที่ 40 องศา วัดจากเส้นปกติ มีความส่องสว่างทุกพื้นที่ไม่น้อยกว่า 400 lx ความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และค่าความล่าช้าในการแพร่กระจายเฉลี่ยต่ำกว่าเดิม ซึ่งให้ค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูล คือ 222.22 Mbps ซึ่งเพิ่มขึ้น 85.23 Mbps จากความกว้างมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ของเครื่องกำเนิดแสงที่ 70 องศา แสดงดังตารางที่ 10 จากการสังเกตการลดความกว้างมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ของเครื่องกำเนิดแสงลง ส่งผลให้ค่าสูงที่สุดและค่าเฉลี่ยของความส่องสว่างมีค่าสูงขึ้น และความล่าช้าในการแพร่กระจายมีค่าลดลงหรือค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้น

วิจารณ์

1. ผลทดลองการออกแบบแบบจำลองพื้นที่ห้องทำงาน

การออกแบบจำลองพื้นที่ห้องทำงานเพื่อใช้ในการจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ โดยใช้พื้นที่จำลองขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 5 เมตร สูง 3 เมตร ประกอบด้วยโต๊ะทำงานที่มีความสูง 0.85 เมตร โดยกำหนดจุดติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงบริเวณเพดานเป็น 5 รูปแบบ ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง 1 ชุด, 2 ชุด, 4 ชุด, 8 ชุด และ 9 ชุด ซึ่งตัวรับสัญญาณแสงติดตั้งบริเวณบนโต๊ะทำงาน

2. ผลทดลองการแพร่กระจายความส่องสว่างและการแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสง

ในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงการนำข้อมูลจำเพาะที่ได้จากผู้ผลิตแอลอีดีเป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณหาความส่องสว่างและกำลังไฟฟ้าของแสง นั่นคือ ค่ากำลังไฟฟ้า (transmitter optical power) และค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy)

ผลการแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสงที่ได้แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าของแสงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความส่องสว่างมากขึ้น จึงพบว่าการแพร่กระจายกำลังไฟฟ้าของแสงมีรูปแบบการแพร่กระจายที่เหมือนกับความส่องสว่าง แต่เนื่องจากกำลังไฟฟ้าของแสงที่ภาครับได้มีปัจจัยของเครื่องรับแสงมาเกี่ยวข้อง นั่นคือ รัศมีในการมองเห็น (FOV) ของเครื่องรับแสง ซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่รับได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความส่องสว่างจึงมีอัตราส่วนที่ต่างกันเล็กน้อย ไม่เหมือนกันทั้งหมด

ผลการทดลองการแพร่กระจายความส่องสว่างได้แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ แบบที่ปราศจากการสะท้อนและแบบที่พร้อมด้วยการสะท้อน พบว่าแสงที่เกิดจากการสะท้อนจะทำให้ความส่องสว่างและกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในด้านความส่องสว่างถือได้ว่าเป็นผลดี แต่ในทางด้านการสื่อสารเรายังไม่สามารถสรุปได้ เนื่องจากต้องพิจารณาถึงความล่าช้าในการแพร่สัญญาณประกอบด้วย

จากผลการทดลองในการเพิ่มจำนวนชุดเครื่องกำเนิดแสงในรูปแบบจำลองที่ต่างกันจำนวน 5 รูปแบบ สามารถสังเกตเห็นว่าผลการแพร่กระจายความส่องสว่างที่มีแหล่งกำเนิดแสง 4 ชุด, 8 ชุด

และ 9 จุด นั้น มีค่าความส่องสว่างสูงกว่า 400 lx ในทุกพื้นที่ของห้องทำงาน ซึ่งเป็นไปตามกำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2549 ในสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน EN 12464-1 ที่ได้กำหนดไว้ว่าต้องมีค่าความสว่างระหว่าง 200 lx ถึง 750 lx ค่ะ

3. ผลการทดลองความล่าช้าในการแพร่กระจาย

ผลที่ได้แสดงความล่าช้าในการแพร่กระจายโดยปราศจากการสะท้อนและพร้อมด้วยการสะท้อนในรูปแบบพื้นที่จำลอง 5 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าความล่าช้าในการแพร่กระจายไม่ได้สอดคล้องกับปริมาณความส่องสว่าง จึงไม่สามารถกล่าวได้ว่าบริเวณที่มีความส่องสว่างสูงจะเป็นพื้นที่ที่มีประสิทธิภาพของการสื่อสารด้วยแสงมีค่าสูงตามด้วย ความล่าช้าในการแพร่กระจายจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของแสงที่มาจากเส้นทางที่แตกต่างกันมาถึงที่เครื่องรับแสงในเวลาที่แตกต่างกัน โดยเครื่องรับแสงเป็นเครื่องเดียวกัน การเกิดความล่าช้าในการแพร่กระจายส่วนใหญ่จะเกิดจากการแทรกสอดและรบกวนกันระหว่างแสงจากเครื่องกำเนิดแสงแบบหลายแหล่งกำเนิด และส่วนที่เหลือจะเกิดจากการสะท้อนของแสงมาแทรกสอดและรบกวน ดังนั้นการสะท้อนแสงของผนังและการแทรกสอดของแสงระหว่างแหล่งกำเนิดแสงจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ จึงสามารถกล่าวได้ว่าความล่าช้าในการแพร่กระจายน้อยจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการสื่อสารด้วยแสงมีค่าสูง

4. ผลการทดลองการหารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างแสงสว่างและการสื่อสารข้อมูล โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดการใช้งานในสภาวะห้องทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ พบว่า รูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด คือ แหล่งกำเนิดแสงแบบ 4 จุด ($\rho=0.8$) ติดตั้งที่ตำแหน่ง I ($R=3.18$ m) มีค่าความส่องสว่างสูงกว่า 400 lx ในทุกพื้นที่ของห้องทำงาน ค่าต่ำสุด 444.90 lx ให้ค่าความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่าง 0.86 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และมีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจายเฉลี่ย 0.73 ns สามารถคำนวณค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยสูงที่สุด คือ 136.99 Mbps ดังนั้นการหารูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานในสภาวะแวดล้อมนั้นๆด้วย

5. ผลการทดลองความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้

จากการลดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจาก 0.8 เหลือ 0.5 พบว่าในรูปแบบแหล่งกำเนิดแสงแบบ 4 ชุด ที่ตำแหน่งการติดตั้งเดียวกันจะทำให้ความส่องสว่างมีค่าลดลง แต่ความล่าช้าในการแพร่กระจายจะลดลงด้วย ทำให้อัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยสูงสุดมีค่าสูงขึ้น นั่นหมายความว่าแสงที่ได้จากการสะท้อนจะส่งผลดีต่อความส่องสว่าง แต่จะส่งผลเสียต่อการสื่อสารนั่นเอง

6. ผลการทดลองการหาความกว้างลำแสง (Beam width) ของเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

ในงานวิจัยนี้ทำการปรับเปลี่ยนความกว้างลำแสงของแหล่งกำเนิดแสงแบบ 4 ชุด ($\rho=0.8$) ติดตั้งที่ตำแหน่ง I ($R = 3.18$ m) จำแนกออกได้เป็น 2 แบบ คือ ปรับโดยใช้โคมบีบบังคับลำแสงและปรับมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ พบว่าความกว้างลำแสงของแหล่งกำเนิดแสงทั้ง 2 แบบมีผลกระทบต่อความส่องสว่างและการสื่อสารข้อมูล ดังนี้

แบบแรกปรับความกว้างลำแสงโดยใช้โคมบีบบังคับลำแสง พบว่า ความกว้างลำแสงของเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด คือ 80 องศา โดยวัดจากเส้นปกติ หมายถึงมีความกว้างรวม 160 องศา นั่นเอง โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านการสื่อสารข้อมูล ทำให้ค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยเท่ากับ 138.89 Mbps ซึ่งเพิ่มขึ้น 1.90 Mbps โดยที่มีค่าความส่องสว่างและความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่จะสังเกตได้ว่าค่าต่ำสุดของความส่องสว่างลดลงจาก 444.90 lx เหลือเพียง 436.98 lx ดังนั้น เมื่อปรับลดความกว้างมุมของเครื่องกำเนิดแสงลงโดยใช้โคมบีบบังคับลำแสง ส่งผลให้ความส่องสว่างมีค่าลดลงด้วย แต่จะทำให้ความล่าช้าในการแพร่กระจายลดลงหรือค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้น

แบบที่สองปรับความกว้างลำแสงโดยการปรับมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ของแหล่งกำเนิดแสง พบว่า ความกว้างลำแสงของเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด คือ 40 องศา วัดจากเส้นปกติ โดยมีความส่องสว่างและความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ค่าความล่าช้าในการแพร่กระจายเฉลี่ยต่ำกว่าเดิม โดยให้ค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยเท่ากับ 222.22 Mbps ซึ่งเพิ่มขึ้น 85.23 Mbps จากความกว้างมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ของเครื่องกำเนิดแสงที่ 70 องศา วัดจากเส้นปกติ ดังนั้นการลดความกว้างมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ของเครื่องกำเนิดแสงลง ส่งผลให้ค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของความส่องสว่างมีค่าสูงขึ้นและความล่าช้าในการแพร่กระจายลดลงหรือขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการวัดสมรรถนะของการใช้แอลอีดีเพื่อการทำงานร่วมกันระหว่างการส่องสว่างและการสื่อสารข้อมูลในสภาวะห้องทำงานด้วยเทคโนโลยีสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ การคำนวณหาความส่องสว่างและกำลังไฟฟ้าของแสง ได้ใช้ค่ากำลังไฟฟ้า (transmitter optical power) และค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy) เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณ ซึ่งเป็นข้อมูลจำเพาะที่ได้จากผู้ผลิตแอลอีดี

รูปแบบและตำแหน่งติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดจากการจำลองระบบ คือ แหล่งกำเนิดแสงแบบ 4 จุด ติดตั้งที่ตำแหน่งรัศมีที่วัดจากจุดศูนย์กลางห้องเท่ากับ 3.18 เมตร โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ 0.8 ซึ่งพบว่า ความส่องสว่างและความสม่ำเสมอของระดับความส่องสว่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีค่าความล่าช้าในการแพร่กระจายน้อยที่สุดหรือค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลสูงที่สุด จากผลลัพธ์ที่ได้จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีความส่องสว่างมากขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าของแสงที่เครื่องรับแสงจะมีค่ามากขึ้นด้วย โดยที่แสงจากแหล่งกำเนิดแสงแบบหลายแหล่งกำเนิดจะทำให้แสงทุกพื้นที่ของห้องมีระดับความส่องสว่างที่สม่ำเสมอ แต่แสงจากการสะท้อนและจากแหล่งกำเนิดแสงแบบหลายแหล่งกำเนิด จะทำให้ประสิทธิภาพในการสื่อสารข้อมูลลดลง โดยเป็นการเพิ่มความล่าช้าในการแพร่กระจายของสัญญาณ

ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ พบว่า เมื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จะส่งผลดีต่อการสื่อสาร แต่จะส่งผลเสียต่อความส่องสว่าง ซึ่งในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ แสงที่ได้จากการสะท้อนจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงแบบหลายแหล่งกำเนิด ในทางปฏิบัติอาจหลีกเลี่ยงแสงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่ง เปลี่ยนมาใช้งานด้านการสะท้อนของแสงทดแทน เพื่อให้การส่องสว่างและการสื่อสารข้อมูลมีความเหมาะสมที่สุด

ในการปรับความกว้างมุมของเครื่องกำเนิดแสง จำแนกออกได้เป็น 2 แบบ คือ ปรับโดยใช้โคมบีบบังคับลำแสงและปรับมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ สรุปได้ว่า การปรับลดความกว้างมุมของเครื่องกำเนิดแสงลงโดยใช้โคมบีบบังคับลำแสง ส่งผลให้ความส่องสว่างมีค่าลดลงด้วย แต่จะเพิ่มความล่าช้าในการแพร่กระจายลดลงหรือค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้น

ส่วนการปรับลดความกว้างมุมที่ทำให้เหลือครึ่งกำลัง $\Phi_{1/2}$ ของเครื่องกำเนิดแสงลง ส่งผลให้ค่าสูงที่สุดและค่าเฉลี่ยของความส่องสว่างมีค่าสูงขึ้น และความล่าช้าในการแพร่กระจายมีค่าลดลงหรือค่าขีดจำกัดสูงสุดของอัตราการส่งข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การปรับเปลี่ยนความกว้างลำแสงของเครื่องกำเนิดแสงจึงขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานในสภาวะแวดล้อมนั้น



ข้อเสนอแนะ

1. ผลที่ได้จากการศึกษาพารามิเตอร์ของเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ตามที่งานวิจัยนี้ได้กำหนดไว้ ยังไม่ครอบคลุมพารามิเตอร์ทั้งหมดของระบบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทุกตัวมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการสื่อสาร จึงควรมีการศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์อื่นเพิ่มเติม เช่น ระดับในการมองเห็น (FOV) ของเครื่องรับแสง พื้นที่รับแสงของเครื่องรับแสง และการขยายของแผ่นกรองแสง เป็นต้น เพื่อให้เกิดการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องให้เหมาะสมที่สุด
2. ในงานวิจัยนี้ได้จำลองห้องเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งในความเป็นจริง จะพบว่าห้องทำงานมีหลายรูปแบบ จึงควรมีการจำลองห้องในรูปแบบต่างๆศึกษาเพิ่มเติม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กฎกระทรวงแรงงาน. 2549. กำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง. ราชกิจจานุเบกษา, 6 มีนาคม 2549.

บุญยวีร์ จามจรีกุล. 2550. ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้ว. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

ไชยะ แซ่มซ้อย. 2544. พื้นฐานวิศวกรรมการส่องสว่าง. พิมพ์ครั้งที่ 1. เอ็มแอนด์อี, กรุงเทพมหานคร.

มงคล ทองสงคราม. 2546. วิศวกรรมการส่องสว่าง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ. พรินต์ติ้ง, กรุงเทพมหานคร.

Arnon, S. 2012. **Advanced Optical Wireless Communication Systems**. Cambridge University Press, Cambridge.

Biagi, M., T. Borogovac and T.D.C. Little. 2013. Adaptive Receiver for Indoor Visible Light Communications. **Adaptive Receiver for Indoor Visible Light Communications 31** (23): 3676-3686.

Ding, D., X. Ke and L. Xu. 2007. An Optimal Lights Layout Scheme for Visible-Light Communication System, 2-189-182-194.

Ding, J.P. and Y.F. Ji. 2012. Evolutionary Algorithm-Based Optimisation of the Signal-to-Noise Ratio for Indoor Visible-Light Communication Utilising White Light-Emitting Diode. **Evolutionary Algorithm-Based Optimisation of the Signal-to-Noise Ratio for Indoor Visible-Light Communication Utilising White Light-Emitting Diode 6** (6): 307-317.

- Do, T., H. Junho, J. Souhwan, S. Yoan and Y. Myungsik. 2012. Modeling and Analysis of the Wireless Channel Formed by Led Angle in Visible Light Communication, 354-357.
- Elgala, H., R. Mesleh and H. Haas. 2011. Indoor Optical Wireless Communication: Potential and State-of-the-Art. **Indoor Optical Wireless Communication: Potential and State-of-the-Art** 49 (9): 56-62.
- Ghassemlooy, Z. 2013. **Optical Wireless Communications**. CRC Press, New York.
- Jiayuan, W., K. Zhe and Z. Nianyu. 2011. Research on Indoor Visible Light Communication System Employing White Led Lightings, 934-937.
- Jinguo, Q., L. Yiyang and Z. Yan. 2012. Configuring Indoor Visible Light Communication Networks, 54-58.
- Komine, T. and M. Nakagawa. 2004. Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using Led Lights. **Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using Led Lights** 50 (1): 100-107.
- Nguyen, H.Q., J. Choi, M. Kang, Z. Ghassemlooy, D.H. Kim, S. Lim, T. Kang and C.G. Lee. 2010. A Matlab-Based Simulation Program for Indoor Visible Light Communication System, 537-541.
- SERC. 2007. **Scale of Electromagnetic Spectrum**. Available Source: <http://serc.carleton.edu/details/images/3786.html>.
- Taylor, A.E.F. 1990. **Illumination Fundamentals**. Optical Research Associates, California.
- Zumtobel. 2013. **The Lighting Handbook**. 4th. Zumtobel Lighting GmbH, Schweizer Strasse 30, Postfach 72, 6851 Dornbirn, AUSTRIA.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายสุภโชค วีระชวณะศักดิ์
เกิดวันที่	6 กันยายน 2528
สถานที่เกิด	อำเภอโนนรมณ์ จังหวัดชัยนาท
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ 5
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	แผนกบริหารเครือข่ายสื่อสาร กองบริหารเครือข่ายสื่อสาร ฝ่ายสื่อสารและโทรคมนาคม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (สำนักงานใหญ่) จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการความร่วมมือทางวิชาการและพัฒนาผู้เชี่ยวชาญระหว่าง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2555)