

ระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะโดยใช้การสื่อสารแบบเครือข่าย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Smart Street Lighting Control System with Networking Communication



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะโดยใช้การสื่อสารแบบเครือข่าย
โดย	นายณวัฒน์ สุขะไท
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศน์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์)	
.....	กรรมการ
(ดร.พิสิษฐ์พล จีรพงศานนุรักษ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ประโมทย์ อุณหิไวยะ)	

ณวัฒน์ สุขะไท : ระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะโดยใช้การสื่อสารแบบ
เครือข่าย. (Smart Street Lighting Control System with Networking
Communication) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารแบบเครือข่ายซึ่งคือ LoRaWAN ในการควบคุมการส่องสว่างของไฟถนนในช่วงเวลากลางคืนให้มีการใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ การประหยัดพลังงานของระบบนี้ทำได้โดยใช้ Sensor ในการตรวจสอบการเคลื่อนไหวของวัตถุและทำการตรวจสอบการจราจรบนถนน ระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนจะถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์การสื่อสารผ่านระบบ LoRaWAN ที่เรียกว่า Endpoint Module ซึ่งจะทำการรับและส่งข้อมูลเข้าสู่ Gateway ก่อนจะส่งข้อมูลไปประมวลผลที่ TheThingsNetwork ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น Server หลักในการสื่อสารและประมวลผล และทำการส่งการกลับไปยัง Endpoint Module ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนน โดยระบบจะทำการลดความสว่างของโคมไฟตามการตรวจจับของ Sensor ถ้าไม่มียานพาหนะผ่าน

จากการศึกษาพบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีเสถียรภาพที่ดีและระยะทางของการทำงานที่ไกลเกินกว่า 2 กิโลเมตร จากการลดแสงสว่างของดวงโคม สามารถทำการประหยัดพลังงานที่ใช้ได้เกินกว่า 40% ในถนนแบบ M Class ประมาณ 30% ใน P Class และ 10-20% ใน C Class มีงบประมาณในการติดตั้งระบบอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่มากนักรวมถึงสามารถพัฒนาต่อไปได้อีก ซึ่งจากการคำนวณทางด้านงบประมาณ จะเห็นได้ว่าสามารถคืนทุนได้เร็วในประมาณ 2 ปี ในถนนประเภท M Class และ P Class แต่จะคืนทุนได้ช้าในถนนประเภท C Class ซึ่งจะใช้เวลาถึง 10 ปี ทำให้การติดตั้งนั้นควรทำการติดตั้งในถนน M Class และ P Class เป็นหลักเนื่องจากสามารถประหยัดพลังงานได้ดีและคืนทุนได้ไว

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970429321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Lighting Control, Lighting, Accident Prevention, Communication
Network, LoRaWAN, DIALux, Control System, Energy Saving

Nathawat Sukhathai : Smart Street Lighting Control System with
Networking Communication . Advisor: Assoc. Prof. THAVATCHAI
TAYJASANANT, Ph.D.

This paper presents LoRaWAN based smart street lighting control system which allows to control night time street light autonomously with minimum energy consumption. The power saving system is done by using motion detection to measure the traffic congestion. Every area of street light has been equipped with LoRaWAN communication modules that sends and receives data with LoRaWAN Gateway which send the data to be compute by TheThingsNetwork then send the data back to control LED street light which has illuminance level calculated by DIALux. When autonomously controlling street lighting system, the server system decides which street light should be dimmed according to motion sensors.

The results show that the system can work efficiently, have good stability and reliability and can be used in a long-range communication for more than 2 kilometers. When the street light is dimmed, the system can save 40% of electrical energy in M Class road, 30% in P Class road and 10 to 20% in C Class road. The system also has an acceptable budget and can still be upgrade for better modules. The budget can be paid back in approximately 2 years in M Class and P Class road but need 10 years to pay back in C Class road. Which results in the system should be installing in M Class and P Class road mainly.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความกรุณาอย่างดียิ่งของ อาจารย์ธวัชชัย เตชสุนันต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ท่านอาจารย์ได้ให้คำแนะนำและความคิดเห็นต่างๆที่เป็นความรู้และประโยชน์เป็นอย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนชี้แนะให้เห็นข้อผิดพลาดและความบกพร่อง พร้อมทั้งแนะนำแนวทางแก้ไขต่างๆ นับตั้งแต่เริ่มทำวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ด้วยดี รวมทั้งได้มีความกรุณาในการตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จเรียบร้อย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านเป็นอย่างสูง ซึ่งประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์ (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) ศาสตราจารย์ ดร. ประโมทย์ อุณหวัทยะ (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) และดร.พิสิษฐ์พล จีรพงศานานุรักษ์ (กรรมการ) ที่ได้กรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งได้ให้คำแนะนำ แก้ไขในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ได้ให้กำลังใจ ข้อเสนอแนะและคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนนักวิจัยเพื่อนๆ พี่ๆน้องๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ณธวัฒน์ สุขะไท

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ณ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญกราฟ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง	3
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 นิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน	7
2.1 นิยามที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมและการสื่อสารต่างๆ.....	7
2.1.1 LoRaWAN	7
2.1.2 OSI Model.....	7
2.2 นิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแสงสว่าง.....	9
2.2.1 ความสว่าง (Illuminance)	10

2.2.2 ความส่องสว่าง (Luminance).....	10
2.2.3 ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity)	10
2.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มส่องสว่าง (I) และความสว่าง (E)	10
2.2.4.1 กฎกำลังสองผกผัน (Inverse Square Law)	10
2.2.4.2 กฎโคไซน์ (Cosine Law)	10
2.2.5 ความส่องสว่างเฉลี่ยบนถนน (Average Luminance , L_{AV}).....	11
2.2.6 ความสม่ำเสมอรวม (Overall Uniformity, U_o).....	12
2.2.7 ความสม่ำเสมอตามแนวยาว (Longitudinal Uniformity, U_l).....	12
2.2.8 Disability Glare	12
2.2.9 Discomfort Glare	12
2.3 การติดตั้งไฟถนน.....	14
2.4 ประเภทของถนนและมาตรฐานทางไฟฟ้าแสงสว่างของไฟถนน.....	15
2.4.1 มาตรฐานทางไฟฟ้าแสงสว่างของไฟถนนตามมาตรฐาน CIE 115	15
2.4.1.1 Motor Traffic (M).....	15
2.4.1.2 Conflict Area (C).....	16
2.4.1.3 Pedestrian Traffic (P)	17
2.4.2 มาตรฐานทางแสงสว่างของไฟถนนประเทศไทย.....	18
บทที่ 3 การใช้ระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายเพื่อทำระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน	20
3.1 ระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนน.....	20
3.2 วงจรระบบ LoRaWAN	22
3.2.1 ระบบ LoRaWAN Network	22
3.2.2 Schematic Diagram ของวงจรควบคุมความสว่างของดวงโคม	22
3.2.3 การตั้งค่า SX1301/SX1276 เพื่อให้ทำงานในย่านความถี่ AS923-925.....	24
3.2.4 การตั้งค่า LoRaWAN ที่ Endpoint Module และ TTN.....	24

3.3 การตั้งค่า LoRaWAN Gateway.....	24
บทที่ 4 การใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน	32
4.1 การพิจารณาพื้นที่ที่ต้องคำนวณ.....	32
4.2 ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์	33
4.2.1 DIALux	33
4.2.2 การใช้โปรแกรม DIALux ในการจำลองการส่องสว่างของหลอดไฟ	37
4.2.3 ผลของการจำลองแบบด้วยโปรแกรม DIALux	40
4.2.3.1 M Class.....	40
4.2.3.2 P Class.....	50
4.2.3.3 C Class.....	60
4.2.4 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบการส่องสว่างไฟถนนจาก DIALux	66
4.3 ข้อมูลของผู้ใช้รถใช้ถนนจริงในการทำการคำนวณค่าความประหยัดพลังงานของระบบ	70
บทที่ 5 ผลการควบคุมการส่องสว่างของระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะ	72
5.1 การใช้พลังงานรวมของระบบควบคุมไฟฟ้า	72
5.2 การวัดระดับความเสถียรในการทำงานของระบบ	76
5.3 งบประมาณในการจัดทำระบบและระยะเวลาคืนทุน	78
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	80
6.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	80
6.2 ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม.....	83
ภาคผนวก ก การตั้งค่าอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบ	87
ภาคผนวก ข การตั้งค่า LoRaWAN ที่ Endpoint Module	93
ภาคผนวก ค การตั้งค่า LoRaWAN ใน TTN	96
ประวัติผู้เขียน.....	99



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 การใช้ Zigbee ในการควบคุมระบบแสงสว่างและการรับส่งข้อมูล.....	3
รูปที่ 1.2 การใช้งานการสื่อสารผ่าน PLC ร่วมกับ GSM	4
รูปที่ 2.1 ระบบการทำงานของ LoRaWAN.....	9
รูปที่ 2.2 แสดงตกระบบบนพื้นใดๆ.....	11
รูปที่ 2.3 ลักษณะการติดตั้งไฟถนน	14
รูปที่ 2.4 การจัดวางโคมไฟถนนแบบต่างๆ.....	14
รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนน	20
รูปที่ 3.2 ระบบ LoRaWAN Network.....	22
รูปที่ 3.3 แสดง Schematic Diagram ของระบบ.....	23
รูปที่ 3.4 แสดงส่วนประกอบของ RAK 7243	25
รูปที่ 3.5 แสดงโปรแกรม Putty.....	26
รูปที่ 3.6 แสดงการเข้าสู่ระบบผ่าน SSH	27
รูปที่ 3.7 แสดงหน้าจอหลักของ Command “sudo gateway-config”	27
รูปที่ 3.8 แสดง Gateway ID ของ Gateway LoRaWAN และตัวเลือกการตั้ง Password	28
รูปที่ 3.9 หน้าจอสำหรับตั้งค่า Gateway ของ TheThingsNetwork.....	28
รูปที่ 3.10 แสดงการตั้งค่าความถี่ของ Gateway.....	29
รูปที่ 3.11 แสดงตัวเลือกการตั้งค่าการเชื่อมต่อกับ WIFI	30
รูปที่ 3.12 แสดงหน้า Console ของ TheThingsNetwork.....	30
รูปที่ 3.13 การแสดงค่าสถานะต่างๆของ Gateway ใน TTN	31
รูปที่ 4.1 จุดที่ต้องคำนวณภายในพื้นที่ที่ต้องการ.....	32

รูปที่ 4.2 การออกแบบ Road Lighting โดยใช้ DIALux	33
รูปที่ 4.3 การเลือกสร้างถนนใน DIALux.....	34
รูปที่ 4.4 การนำเข้าหลอดไฟเพื่อใช้ในการออกแบบในDIALux	35
รูปที่ 4.5 การตรวจสอบค่าดัชนีต่างๆเมื่อเทียบกับมาตรฐานของ CIE	36
รูปที่ 4.6 Oneside Arrangement.....	37
รูปที่ 4.7 การกำหนดค่าดัชนีต่างๆใน DIALux.....	38
รูปที่ 4.8 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M1 ผิวถนน R1	40
รูปที่ 4.9 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M1 ผิวถนน R3	41
รูปที่ 4.10 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M2 ผิวถนน R1	42
รูปที่ 4.11 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M2 ผิวถนน R3	43
รูปที่ 4.12 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M3 ผิวถนน R1	44
รูปที่ 4.13 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M3 ผิวถนน R3	45
รูปที่ 4.14 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M4 ผิวถนน R1	46
รูปที่ 4.15 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M4 ผิวถนน R3	47
รูปที่ 4.16 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M5 ผิวถนน R1	48
รูปที่ 4.17 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M5 ผิวถนน R3	49
รูปที่ 4.18 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P1 ผิวถนน R1	50
รูปที่ 4.19 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P1 ผิวถนน R3	51
รูปที่ 4.20 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P2 ผิวถนน R1	52
รูปที่ 4.21 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P2 ผิวถนน R3	53
รูปที่ 4.22การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P3 ผิวถนน R1	54

รูปที่ 4.23 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P3 ผิวถนน R3	55
รูปที่ 4.24 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P4 ผิวถนน R1	56
รูปที่ 4.25 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P4 ผิวถนน R3	57
รูปที่ 4.26 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P5 ผิวถนน R1	58
รูปที่ 4.27 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P5 ผิวถนน R3	59
รูปที่ 4.28 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C1 ผิวถนน R1	60
รูปที่ 4.29 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C1 ผิวถนน R3	61
รูปที่ 4.30 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C2 ผิวถนน R1	61
รูปที่ 4.31 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C2 ผิวถนน R3	62
รูปที่ 4.32 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C3 ผิวถนน R1	62
รูปที่ 4.33 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C3 ผิวถนน R3	63
รูปที่ 4.34 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C4 ผิวถนน R1	63
รูปที่ 4.35 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C4 ผิวถนน R3	64
รูปที่ 4.36 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C5 ผิวถนน R1	64
รูปที่ 4.37 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C5 ผิวถนน R3	65
รูปที่ 4.38 System Behavior ในช่วงเวลากลางคืน ของถนน M Class.....	70
รูปที่ 4.39 System Behavior ในช่วงเวลากลางคืน ของถนน P Class.....	71
รูปที่ 4.40 System Behavior ในช่วงเวลากลางคืน ของถนน C Class	71
รูปที่ 5.1 ระยะทางการใช้งานจริงระหว่าง LoRaWAN Module และ Gateway.....	76

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทถนนตามมาตรฐาน CIE แบบ M.....	15
ตารางที่ 2.2 การแบ่งประเภทไฟฟ้าแสงสว่างตามมาตรฐาน CIE แบบ M.....	16
ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทถนนสำหรับ Conflict Area.....	17
ตารางที่ 2.4 การแบ่งระดับความสว่างสำหรับ Conflict Area	17
ตารางที่ 2.5 การแบ่งประเภทถนนสำหรับ Pedestrian Traffic.....	18
ตารางที่ 2.6 การแบ่งระดับความสว่างสำหรับ Pedestrian Traffic	18
ตารางที่ 2.7 ความสว่างเฉลี่ยต่ำสุดตามประเภทถนน	19
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการติดตั้งโคมไฟถนน HPS 400 W.....	38
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการติดตั้งโคมไฟถนน HPS 250 W.....	39
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการติดตั้งโคมไฟถนน HQV 125 W.....	39
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองการลดความสว่างของแต่ละ Class ของถนนและผิวถนน	66
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบการลดแสงสว่างของหลอดไฟเมื่อเทียบจากการจำลอง	67
ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบการใช้พลังงานของหลอด LED ที่ใช้ LoRaWAN ควบคุม.....	73
ตารางที่ 5.2 แสดงระยะทางการใช้งานสูงสุดของแต่ละ LoRaWAN Module.....	77
ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณระหว่างแต่ละ LoRaWAN Module.....	77

สารบัญกราฟ

หน้า

กราฟที่ 4.1 เปรียบเทียบการลดแสงสว่างของหลอดไฟในถนนแบบ M Class	68
กราฟที่ 4.2 เปรียบเทียบการลดแสงสว่างของหลอดไฟในถนนแบบ P Class	68
กราฟที่ 4.3 เปรียบเทียบการลดแสงสว่างของหลอดไฟในถนนแบบ C Class	69
กราฟที่ 5.1 เปรียบเทียบความประหยัดพลังงานของระบบขออนนชนิด M Class	74
กราฟที่ 5.2 เปรียบเทียบความประหยัดพลังงานของระบบขออนนชนิด P Class	74
กราฟที่ 5.3 เปรียบเทียบความประหยัดพลังงานของระบบขออนนชนิด C Class	75
กราฟที่ 5.4 แสดงระดับความแรงของสัญญาณเทียบกับระยะทาง	76



บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนปัจจุบันนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อผู้ขับขี่ยานพาหนะในเวลากลางคืน เนื่องจากเป็นสิ่งที่กำหนดความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้ถนนทุกประเภท การมีไฟส่องสว่างถนนในปัจจุบันจึงจำเป็นต้องมีความเหมาะสมและสว่างเพียงพอต่อการมองเห็นเพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุบนถนน การออกแบบระบบไฟฟ้าส่องสว่างถนนจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงทั้งประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการใช้งาน รวมถึงการประหยัดพลังงานในแบบต่างๆ และวิธีการบำรุงรักษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะ โดยใช้ระบบการสื่อสารแบบเครือข่าย เข้ามาช่วยในการควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมด เพื่อให้สามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติ ไม่ต้องใช้มนุษย์ในการควบคุมตามเวลาจริง ซึ่งช่วยลดภาระในการดูแลระบบลดพลังงานที่ต้องใช้ และทำให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมความสว่างของหลอดไฟที่รับข้อมูลจากอุปกรณ์รับสัญญาณการเคลื่อนที่ เพื่อตรวจจับยานพาหนะที่ผ่านในพื้นที่เพื่อปรับความสว่างของหลอดไฟให้มีความเหมาะสม เมื่อไม่มียานพาหนะบนถนนก็จะทำการลดความสว่างของหลอดไฟเพื่อทำการประหยัดพลังงาน แต่ยังคงความสว่างตามมาตรฐานสากลโดยทำการคำนวณระดับความสว่างที่เหมาะสมด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ เพื่อให้ผู้ใช้ถนนสามารถใช้งานได้ตามปกติแม้ว่าจะมีปัญหาที่ระบบควบคุม และทำการเพิ่มระดับความสว่างของหลอดไฟไปสู่สถานะปกติเมื่อมียานพาหนะผ่าน โดยในการควบคุมจะใช้ระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายในการรับส่งข้อมูลและทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับสัญญาณ ทำให้ระบบควบคุมนี้มีประสิทธิภาพในกระประหยัดไฟฟ้าสูง มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ และสามารถใช้ได้ในระยะไกล

โดยระบบที่จะนำมาใช้เพื่อควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนนั้น จะใช้เทคโนโลยี LoRaWAN เข้ามาในการสื่อสารระหว่างตัวควบคุมความสว่างของหลอดไฟและตัวรับส่งข้อมูล รวมถึงใช้อินเตอร์เน็ต

ในการรับส่งข้อมูลต่อไปยังหน่วยประมวลผลและจัดการข้อมูลซึ่งจะใช้ TheThingsNetwork ในการทำหน้าที่จัดการ ประมวลผลและส่งต่อข้อมูลการควบคุมระบบไฟฟ้าไปยังหลอดไฟฟ้าที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาระบบควบคุมและการจัดการระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะโดยใช้การสื่อสารแบบเครือข่าย
- 2) เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างและซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะโดยใช้การสื่อสารแบบเครือข่าย
- 3) เพื่อจำลองแบบการทดลองอุปกรณ์ควบคุมของระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะโดยใช้การสื่อสารแบบเครือข่าย

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาและศึกษาเทคโนโลยีการสื่อสารแบบเครือข่าย คือ ระบบ LoRaWAN ก่อนจะนำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะที่มีความเหมาะสมในการควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะให้มีความประหยัดพลังงานมากที่สุด แต่ยังคงความสว่างถูกต้องตามมาตรฐานสากล
- 2) ทำการทดลองระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนด้วยการสื่อสารแบบเครือข่าย โดยมีต้นแบบคล้ายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้สามารถใช้งานในการควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความประหยัดพลังงานสูง และลดภาระในการดูแลระบบได้เป็นอย่างดี

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ดังนี้
 - 1.1) ศึกษาควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างและการสื่อสารระยะไกลแบบต่างๆ
 - 1.2) ศึกษานิยามและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่าง
 - 1.3) ศึกษาเทคโนโลยีการสื่อสารแบบเครือข่าย
 - 1.4) ศึกษาการออกแบบไฟแสงสว่างด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์
- 2) วิเคราะห์และระบุปัญหาที่จะศึกษา
- 3) กำหนดขอบเขตของงานวิจัย
- 4) ออกแบบและจำลองไฟแสงสว่างด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์
- 5) ออกแบบและจำลองระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างด้วยการสื่อสารแบบเครือข่าย
- 6) เก็บผลการทดลองที่ได้จากการจำลองระบบ

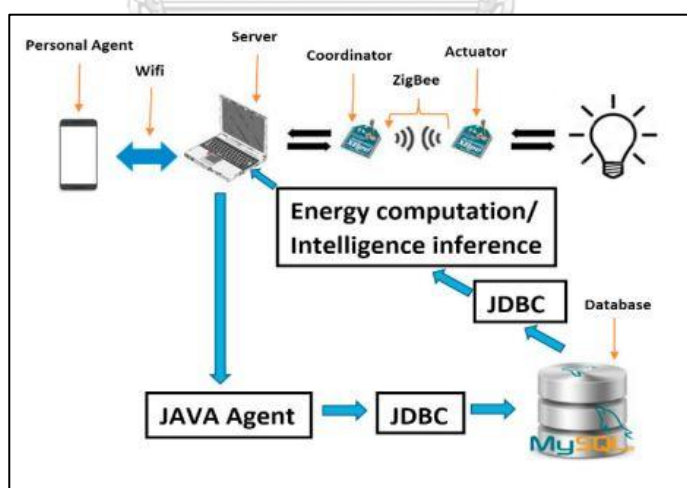
7) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองระบบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนที่สมบูรณ์และมีมาตรฐาน ที่สามารถประหยัดพลังงานได้มากที่สุด โดยที่สามารถส่องสว่างได้ตามมาตรฐานสากล
- 2) ระบบควบคุมไฟฟ้าถนนอัจฉริยะที่ใช้เครือข่าย LoRaWAN ในการจัดการที่สามารถนำไปติดตั้งได้จริง
- 3) ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางแสงสว่างที่ได้จากซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน
- 4) ผลการวิเคราะห์ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนและแบบจำลองระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนที่จำลองผ่านซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

จากที่งานวิจัยและวารสารต่างๆได้กล่าวถึงการใช้นวัตกรรมใหม่ๆในการควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างเพื่อใช้ในที่ต่างๆ จะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่มีความสนใจในเรื่องการสื่อสารระยะไกลแบบต่างๆ เช่น งานวิจัย [1] ได้กล่าวถึงการใช้นวัตกรรม Zigbee ซึ่งเป็นการสื่อสารไร้สายที่มีการรับส่งข้อมูลต่ำร่วมกับการใช้อินเตอร์เน็ตในการควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างและการส่งข้อมูลภายในอาคาร ทำให้สามารถปรับระดับแสงสว่างต่างๆภายในอาคารตามแบบที่ผู้ใช้งานชอบได้จากหน่วยประมวลผลกลาง

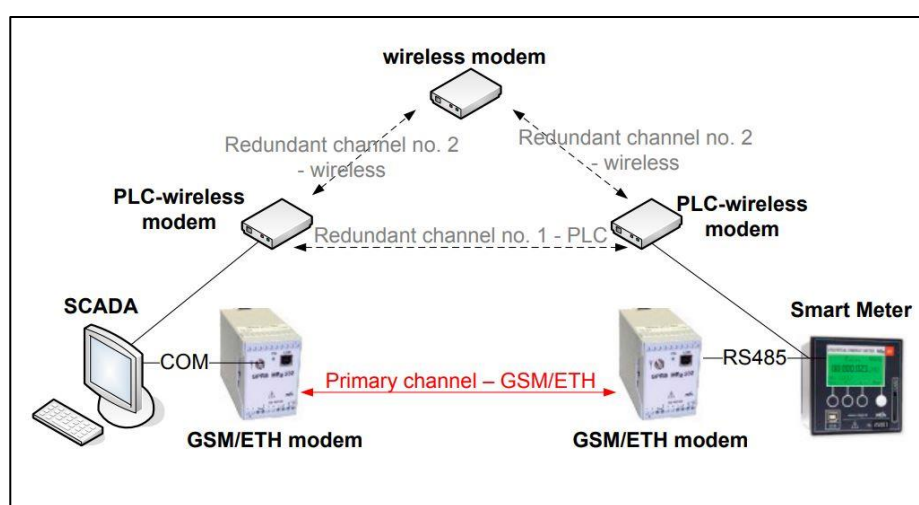


รูปที่ 1.1 การใช้ Zigbee ในการควบคุมระบบแสงสว่างและการรับส่งข้อมูล

งานวิจัย [2] ได้ใช้การส่งสัญญาณวิทยุ หรือ Radio Frequency Identification เพื่อทำการควบคุมแสงสว่างในจุดต่างๆของที่อยู่อาศัยและที่ทำงาน โดยทำการแบ่งการตั้งค่าเป็นหลายๆสัดส่วนตามการใช้งานของแต่ละบุคคล และต่อมามีการกล่าวถึงการใช้นวัตกรรม Narrow Band Internet of Things

หรือ เทคโนโลยี NB-IoT ในการควบคุมแสงสว่างในอุโมงค์ในประเทศจีน ซึ่งเป็นงานวิจัยของนักวิจัยจากประเทศจีน [3] โดยทำการควบคุมแสงสว่างให้อยู่ในความสว่างที่เหมาะสมและลดปัญหาทางแสงสว่างต่างๆที่มีผลต่อผู้ใช้อุโมงค์นั้นๆ

นอกจากนั้น ยังมีงานวิจัย [4] ซึ่งใช้ระบบการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า หรือ Power Line Communication (PLC) ในการควบคุมและตรวจสอบความผิดปกติของไฟฟ้าแสงสว่างถนน โดยใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยโทรศัพท์มือถือหรือ GSM และ Smart Meter ในการส่งสัญญาณและข้อมูลต่างๆ



รูปที่ 1.2 การใช้งานการสื่อสารผ่าน PLC ร่วมกับ GSM

จากงานวิจัย [5] [6] และ [7] ได้มีการกล่าวถึงประสิทธิภาพของผู้ใช้รถใช้ถนนในแสงสว่างแบบต่างๆ โดยสามารถแบ่งระดับการมองเห็นได้ 3 ระดับ คือ Scotopic, Mesopic และ Photopic ซึ่งแต่ละระดับจะแสดงความละเอียดของภาพที่มองเห็นได้ต่างกันไปคือ Scotopic จะมองเห็นภาพเป็นสีขาวดำเท่านั้นเนื่องจากได้รับแสงน้อย Mesopic จะมองเห็นภาพเป็นสีปนขาวดำ แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นสีใด เพราะมีแสงสลัวทำให้มองได้ไม่ชัด และ Photopic เป็นการมองเห็นที่เห็นสีได้ถูกต้องและบอกรายละเอียดของวัตถุได้ชัดเจน ซึ่งทำให้มีการทำการทดลองแบบต่างๆเพื่อให้ได้ไฟฟ้าแสงสว่างในถนนที่สามารถทำให้ประสิทธิภาพของผู้ใช้รถใช้ถนนอยู่ในระดับPhotopic

โดย [8] และ [9] ได้กล่าวถึงการใช้sensorที่ออกแบบพิเศษเพื่อตรวจจับความหนาแน่นของถนนและนำมาใช้ร่วมกับการพยากรณ์สภาพอากาศต่างๆ เช่น ฝน หมอก หิมะ หรือเมฆ เพื่อทำการควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างในถนนความเร็วสูง ทำให้ได้แสงสว่างตามมาตรฐานและมีประสิทธิภาพในการลดแสงเมื่อไม่ใช้งานซึ่งสามารถลดพลังงานที่ใช้ลงมากกว่า 50% เนื่องจากถนนบางถนนนั้นได้มีการใช้แสงมากเกินไปจนเกินความจำเป็น ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานทำให้ผู้วิจัยได้ทำการใช้หลอดไฟฟ้าที่มี

ความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นเพื่อให้ตรงกับมาตรฐานของไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน ซึ่งเปรียบเทียบกับหลอด 160 Watt ทั้งนี้ยังได้ทำการคิดคำนวณค่าความสูญเสียด้านพลังงานและทำการปรับให้พลังงานที่หลอดใช้และค่าความสว่างที่ได้จากหลอดมีความเหมาะสมต่อพื้นที่อีกด้วย งานวิจัย [10] ได้กล่าวถึงการติดตั้งระบบทดลองไฟฟ้าแสงสว่างที่สามารถหรี่ลงได้ในจีน ซึ่งได้ทำการลดการใช้งานบัลลาสต์ด้วยการใช้ระบบควบคุมกลางในการลดแสงสว่างแทน ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งได้นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาทางด้านหลอดไฟที่ใช้ในไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนด้วย ซึ่ง [11] ได้ทำการพัฒนาหลอดไฟที่ใช้ความถี่ต่ำแต่ให้แสงสว่างสูง โดยเป็นหลอดไฟไร้อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำงานที่ความถี่ 0.25 MHz จากที่ปกติใช้ในความถี่ 2.65 MHz หรือสูงกว่า ทำให้สามารถลดความยากลำบากในการควบคุม EMI ได้

ทั้งนี้ยังมีการนำพลังงานทางเลือกอื่นมาใช้งานเพื่อลดไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการส่องสว่างอีกด้วย งานวิจัย [12] ได้นำพลังงานแสงอาทิตย์มาติดตั้งบนตัวโคมเพื่อชาร์จไฟฟ้าเวลากลางวัน และใช้พลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่ในเวลากลางคืน โดยมีระบบเพื่อที่จะวัดกระแสไฟฟ้าที่ชาร์จได้เพื่อไม่ให้เกิดการชาร์จเกินและใช้ MOSFET ในการจ่ายพลังงานที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์สู่หลอดไฟ ซึ่งการใช้พลังงานแสงอาทิตย์นี้ช่วยลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ลงอย่างมาก รวมทั้งยังเพิ่มเติมระบบควบคุมโดยใช้ sensor เพื่อวัดความเร็วยานพาหนะที่วิ่งผ่านโดยใช้ Peizo sensor และ LDR sensor ร่วมกับ Arduino Micro Controller และใช้หลอด LED ในการส่องสว่าง ทำให้สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้และสามารถใช้งานในระยะยาวได้

งานวิจัยที่ [13] ก็ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการทำระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนเช่นเดียวกัน โดยใช้ระบบ remote control เพื่อทำการควบคุมระดับไฟฟ้าและให้แสงสว่างที่เหมาะสมต่อสถานะต่างๆของวัน เช่น จำนวนคนเดินเท้า คนขี่จักรยาน/จักรยานยนต์ รถยนต์ส่วนบุคคลและรถโดยสารต่างๆ โดยการปรับแสงสว่างตามเห็นสมควรในถนนถัดไปโดยการติดตั้ง sensor ที่ทุกๆสัญญาณไฟจราจรเพื่อนำข้อมูลไปประมวลผลและควบคุมสัญญาณไฟจราจรและไฟส่องสว่างในถนนถัดไป

งานวิจัยที่ [14] ได้เสนอการใช้ระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนผ่าน Cloud โดยสามารถให้ผู้ดูแลสามารถกำหนดได้ว่าถ้ามีเหตุการณ์เกิดขึ้นจะให้ทำอย่างไรกับระบบควบคุมแสงสว่างและระบบไฟจราจร ซึ่งสามารถควบคุมหลายๆที่ในเวลาเดียวกัน เพื่อทำการควบคุมสัญญาณไฟจราจรเมื่อเกิดอุบัติเหตุและสภาพอากาศไม่ปกติ เป็นต้น

และจากงานวิจัยที่ได้ศึกษามาแล้วทั้งหมด จะเห็นได้ว่ามีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารชนิดต่างๆในการควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างอย่างหลากหลาย โดยแต่ละเทคโนโลยีก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน

กันออกไป เช่น การใช้ Zigbee ในการสื่อสารนั้นจะใช้ได้ในระยะสั้นๆ ใช้พลังงานต่ำ การใช้ RF นั้นมีพลังงานสูงกว่า Zigbee แต่สามารถโคจรกวาดได้โดยง่าย การใช้ NB-IoT นั้นมีระยะการสื่อสารได้ไกล มีการส่งข้อมูลที่ไวมากและมีคุณภาพของสัญญาณดี แต่ต้องมีเสาสัญญาณขนาดใหญ่ในการติดตั้งเพื่อใช้งานและสามารถใช้งานได้แคบในพื้นที่ที่ติดตั้งเสาเท่านั้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้การสื่อสารระยะไกลโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN ร่วมกับการใช้งาน Internet of Things หรือ IoT ในการควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะ เนื่องจาก LoRaWAN นั้นสามารถสื่อสารได้ในระยะไกล แต่ใช้พลังงานต่ำเนื่องจากการส่งข้อมูลไม่บ่อยมากนัก แต่เพียงพอสำหรับการควบคุมไฟฟ้าถนน ทั้งยังเป็นระบบที่มีความทันสมัยและเริ่มเป็นที่แพร่หลายในวงการอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้มีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก จึงเห็นว่าควรศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลและนำมาปรับใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยมีเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ โดยกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงนิยามที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมและการสื่อสารชนิดต่างๆ รวมถึงนิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าแสงสว่าง

บทที่ 3 กล่าวถึงการใช้ระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายเพื่อทำระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน รวมถึงข้อมูลระบบสื่อสารแบบเครือข่ายที่ได้เลือกใช้ คือ ระบบ LoRaWAN

บทที่ 4 กล่าวถึงพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้าส่องสว่างบนถนนโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ และซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ได้เลือกใช้ในการออกแบบ คือ DIALux

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายเพื่อควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน และงบประมาณ รวมถึงประมาณระยะเวลาในการคืนทุน

บทที่ 6 กล่าวถึงสรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

นิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน

2.1 นิยามที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมและการสื่อสารต่างๆ

2.1.1 LoRaWAN

LoRa [15] ซึ่งย่อมาจาก **Long Range** เป็นเทคโนโลยีสัญญาณการสื่อสารอยู่โดยใช้เทคนิค Proprietary Spread Spectrum technology ซึ่งรูปแบบถูกพัฒนาโดย Semtech Corporation โดยมี LoRaWAN Protocol เป็นมาตรฐานสากล ที่กำหนดโดย LoRa Alliance เป็นการสื่อสารแบบไร้สายระยะกว้างที่ใช้พลังงานต่ำ ซึ่งสามารถนำไปสร้างระบบ Wireless Sensor Network ได้ โดยเทคโนโลยี LoRa เป็นส่วนของ RF PHYSICAL Layer ในการสื่อสารที่เป็นลิขสิทธิ์ของบริษัท Semtech

LoRa นั้นจะใช้ความถี่ในระดับต่ำกว่า 1 GHz หรือ Sub-gigahertz ที่ไม่มีลิขสิทธิ์ เช่น 169 MHz, 433 MHz, 868 MHz ในยุโรป และ 915 MHz ในสหรัฐอเมริกาตอนเหนือ โดย LoRa นั้นมีความสามารถในการสื่อสารในระยะไกลมากกว่า 10 กิโลเมตรด้วยการใช้พลังงานที่ต่ำมาก โดยเทคโนโลยีนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ LoRa ซึ่งเป็น Physical Layer [16] และ LoRaWAN [17] ซึ่งย่อมาจาก Long Range Wide Area Network เป็น Upper Layer โดย Physical Layer และ Upper Layer เป็นระดับชั้นในการทำงานของ Model ที่ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อเป็นมาตรฐานกลางในการทำงานของระบบเครือข่าย เรียกว่า Open System Interconnection หรือ OSI [18]

2.1.2 OSI Model

OSI Model เป็นแบบร่างที่ใช้อ้างอิงการสื่อสาร (Reference Model) แบ่งออกเป็นชั้น (Layer) 7 ชั้น โดยมีตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึงชั้น 7 (Layer 1 – 7) โดย Layer 1 จะอยู่ด้านล่างสุด และเรียงขึ้นไปจนถึง Layer 7 แต่ละ Layer ก็มีชื่อเรียกตามรูปแบบการสื่อสารและการทำงานของมันในแต่ละชั้นนั่นเอง โดยมีชื่อเรียกดังนี้

Layer 1: Physical Layer ทำหน้าที่ส่งสัญญาณสื่อเป็นบิตผ่านเครือข่ายทางไฟฟ้ากลไกหรือผ่านคลื่นวิทยุ โดยชั้นนี้จะครอบคลุมอุปกรณ์และสื่อที่หลากหลาย รวมไปถึงการเดินสายเคเบิล ตัวเชื่อมต่อ ตัวรับส่งสัญญาณต่างๆ และ ตัวทำซ้ำ (Repeater) ด้วย

Layer 2: Data Link Layer ทำหน้าที่ตั้งค่าการเชื่อมต่อกับเครือข่ายทางกายภาพที่ส่งข้อมูลเข้าสู่เครือข่ายเป็นชุด (Package) โดยแบ่งเป็นสองชั้นย่อยๆ ได้แก่ ชั้นควบคุมลิงค์ตรรกะและชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ ซึ่งจะทำงานร่วมกันในการสร้างความปลอดภัยในการเข้าถึงข้อมูล เช่น MAC

Address ซึ่งคือ หมายเลขรหัสในการเข้าถึงข้อมูลต่างๆ Ethernet ซึ่งคือเทคโนโลยีเครือข่าย อินเทอร์เน็ตความเร็วสูง และ ข้อกำหนดสัญญาณไร้สายต่างๆ เป็นต้น

Layer 3: Network ทำหน้าที่จัดการกับการกำหนดที่อยู่และการจัดเส้นทางข้อมูล ส่งไปยัง ทิศทางที่ถูกต้องในการส่งสัญญาณออกและรับเข้า ตัวอย่างเช่น IP หรือ Internet Protocol เป็นชั้น Network ของอินเทอร์เน็ต

Layer 4: Transport ทำหน้าที่จัดการกับชุดข้อมูลจากนั้นส่งมอบต่อไปและตรวจสอบ ข้อผิดพลาดของชุดข้อมูลเมื่อได้รับข้อมูลมา

Layer 5: Session ทำหน้าที่ตั้งค่าพิกัดและยกเลิกการสนทนา ประกอบด้วยการรับรองความ ถูกต้อง (Authentication) และการเชื่อมต่ออีกครั้งหลังจากการหยุดชะงักในการใช้งาน เช่น เช่น Transmission Control Protocol (TCP) และ User Datagram Protocol (UDP) ของอินเทอร์เน็ต เป็นต้น

Layer 6: Presentation ทำหน้าที่นำเสนอข้อมูลต่างๆและทำการแปลงข้อมูลขาเข้าและขา ออก จากข้อมูลที่นำเสนอรูปแบบหนึ่งไปอีกรูปแบบหนึ่ง ส่วนมากจะเป็นส่วนหนึ่งของ ระบบปฏิบัติการ เช่น การส่งข้อมูลที่ชัดเจนไปสู่ที่หนึ่งแล้วเข้ารหัสอีกที่หนึ่ง และกลับมาเป็นข้อมูล ชัดเจนที่อื่นๆ เป็นต้น

Layer 7: Application ทำหน้าที่ระบุค่าคู่คำด้านการสื่อสารและนำเสนอข้อมูลในรูปแบบ ภาพที่ผู้ใช้เข้าใจได้ โดยไม่ต้องประยุกต์ใช้ด้วยตัวเอง เช่น Application ของโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น

โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. Lower Layer หมายถึง Layer 1 – 4
2. Upper Layer หมายถึง Layer 5 – 7

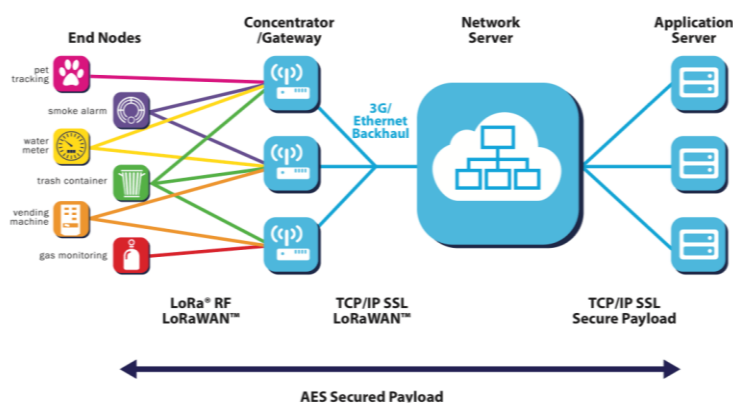
LoRa ที่เป็น Physical Layer นั้นจะมีการกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของฮาร์ดแวร์ของ LoRa โดยโดนจำกัดสิทธิ์และเป็นทรัพย์สินของบริษัทผู้ผลิต module โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำ การมุ่งเน้นไปที่การออกแบบระบบควบคุมไฟฟ้าถนนอัจฉริยะโดยใช้ LoRaWAN ร่วมกับ Internet of Things หรือ IoT [19] เพื่อให้มีความเหมาะสมและลดภาระในการดูแลระบบ โดยระบบจะทำหน้าที่ ปรับความสว่างของดวงโคมได้เอง โดยไม่ต้องมีผู้ดูแล ซึ่งจะใช้ Module LoRaWAN เป็น Physical Layer ร่วมกับ LoRaWAN Gateway ที่ทำหน้าที่เป็น Data Link Layer และใช้ TheThingsNetwork[17] ที่เป็นเว็บไซท์ในการรับส่งข้อมูล LoRaWAN ในการเป็น Network Layer,

Transport Layer และ Session Layer ส่วน Presentation Layer และ Application Layer นั้น จะใช้ Application ที่อยู่ในบริการของ TheThingsNetwork ซึ่งทางเว็บไซต์ที่ได้จัดการให้เป็นส่วนเสริมของบริการ ทำให้ไม่ต้องลงทุนและประหยัดงบประมาณได้ดี

LoRaWAN เป็นส่วนระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายที่ใช้ LoRa ในการทำงาน และสามารถใช้งานร่วมกับ IoT ได้ในระยะไกล โดย LoRaWAN เป็น Media Access Control หรือ MAC layer protocol แต่ส่วนใหญ่จะใช้งานเป็น Network Layer Protocol เพื่อทำการสื่อสารระหว่าง Gateway ที่ใช้พลังงานต่ำ (Low Power Wide Area Network) หรือ LPWAN gateways [20] และ อุปกรณ์ LoRaWAN Modules [21] หรือที่เรียกว่า Endpoint Modules

LoRaWAN สามารถแบ่งส่วนประกอบการทำงานได้เป็น 4 ส่วน ได้แก่

1. End-Devices หรืออุปกรณ์ต่างๆ เช่น Sensor เป็นต้น
2. Concentrator/Gateway หรือจุดเชื่อมต่อของเครือข่าย
3. Network Server หรือระบบเครือข่าย
4. Application Server หรือระบบประมวลผลข้อมูล



รูปที่ 2.1 ระบบการทำงานของ LoRaWAN

โดยแต่ละ LoRaWAN Gateway นั้นสามารถรับส่งข้อมูลกับ Endpoint Module ได้หลายอันพร้อมๆกัน โดยขึ้นอยู่กับอัตราการรับส่งข้อมูลและจำนวน Channel ที่ตัว Gateway รับได้

2.2 นิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแสงสว่าง

แสงเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่สามารถทำให้พื้นที่ที่แสงตกกระทบสว่าง ปริมาณพลังงานแสงที่เปล่งออกจากแหล่งกำเนิดแสงใดๆ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรืออัตราการใช้พลังงาน เรียกว่า ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous Flux) มีหน่วยวัดเป็น ลูเมน (Lumen, lm)

2.2.1 ความสว่าง (Illuminance)

ความสว่าง คือ ปริมาณแสงหรือฟลักซ์การส่องสว่างที่ตกลงบนพื้นผิวต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย ใช้สัญลักษณ์เป็น E มีหน่วยเป็น lux หรือ lm/m^2 โดยแสดงได้ดังสมการ

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (2.1)$$

2.2.2 ความส่องสว่าง (Luminance)

ความส่องสว่าง คือ ความเข้มข้นการส่องสว่างที่สะท้อนจากพื้นที่หนึ่งหน่วยของพื้นผิวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ใช้สัญลักษณ์เป็น L มีหน่วยเป็น cd/m^2 แสดงได้ดังสมการ

$$L = \frac{I}{A_1} \quad (2.2)$$

โดย A_1 คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับแนวแสงตกกระทบ

2.2.3 ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity)

ความเข้มส่องสว่าง คือความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่างในทิศทางหนึ่ง (ปริมาณแสงต่อมุมตัน) มีสัญลักษณ์เป็น I มีหน่วยเป็น candela (cd) แสดงได้ดังสมการ

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (2.3)$$

2.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มส่องสว่าง (I) และความสว่าง (E)

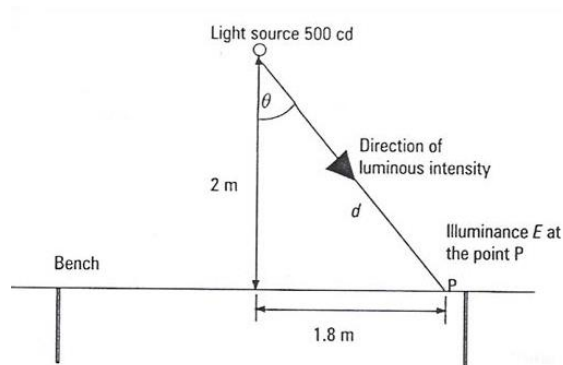
2.2.4.1 กฎกำลังสองผกผัน (Inverse Square Law)

ค่าความสว่างของจุดบนพื้นที่ที่ตั้งฉากกับแสงตกกระทบมีค่าเท่ากับกับความเข้มส่องสว่างในทิศทางที่ไปยังจุดนั้นหารด้วยกำลังสองของระยะทางระหว่างจุดนั้นกับแหล่งกำเนิดแสง ดังสมการ

$$E = \frac{I}{D^2} \quad (2.4)$$

2.2.4.2 กฎโคไซน์ (Cosine Law)

กฎโคไซน์กล่าวว่า ความสว่างบนพื้นผิวใดๆ จะแปรโดยตรงกับค่าโคไซน์ของมุมของแสงตกกระทบ โดยมุมของแสงตกกระทบ (θ) คือ มุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวและทิศทางของแสงตกกระทบ



รูปที่ 2.2 แสงตกกระทบบนพื้นใดๆ

จากรูปที่ 2.2 ให้ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบบนพื้นผิวอย่างตั้งฉาก จะได้ความสว่างบนพื้นผิว ดังสมการ

$$E_A = \frac{I}{D^2} \cos\theta \quad (2.5)$$

2.2.5 ความส่องสว่างเฉลี่ยบนถนน (Average Luminance , L_{AV})

ความส่องสว่างเฉลี่ยบนถนน คือ ค่าเฉลี่ยของความส่องสว่างของถนนในบริเวณที่พิจารณา

$$L_{av} = \frac{L_{sum}}{N} \quad (2.6)$$

โดย L_{sum} คือ ผลรวมของความส่องสว่างทุกจุดในช่วงที่กำลังพิจารณา
 N คือ จำนวนจุดที่พิจารณา

2.2.6 ความสม่ำเสมอรวม (Overall Uniformity, U_o)

$$U_o = \frac{L_{\min}}{L_{\text{av}}} \quad (2.7)$$

โดย L_{\min} คือ ค่าความส่องสว่างต่ำสุด

L_{av} คือ ค่าความส่องสว่างเฉลี่ย

ถ้าค่าความสม่ำเสมอรวมต่ำ การสังเกตเห็นวัตถุบนผิวถนนจะเป็นไปได้ยาก

2.2.7 ความสม่ำเสมอตามแนวยาว (Longitudinal Uniformity, U_l)

$$U_l = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \quad (2.8)$$

โดย L_{\min} คือ ค่าความส่องสว่างต่ำสุดของช่องวิ่ง

L_{\max} คือ ค่าความส่องสว่างสูงสุดของช่องวิ่ง

ค่า U_l จะทำให้ผู้ขับขี่มีความสบายตาในขณะที่ขับไปตามถนน ถ้าค่า U_l มีค่าต่ำ ค่าส่องสว่างของถนนจะน้อยและมากสลับกัน คล้ายกับเราขับรถผ่านทางม้าลาย ซึ่งจะทำให้ตาลายและอาจเกิดอุบัติเหตุได้

2.2.8 Disability Glare

ในการคำนวณ Disability Glare นั้นจะพิจารณาในเทอมของค่า Veiling Luminance (L_v) และค่า Threshold Increment (TI) ซึ่งมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

$$L_v = 10 \frac{E_{\text{eye}}}{\theta^2} \quad (2.9)$$

โดยที่ E_{eye} เป็นความสว่างที่ตา เนื่องจากต้นกำเนิดแสงบนระนาบตั้งฉากกับทิศทางการมอง

θ เป็นมุมระหว่างแนวมองกับแนวจากตาถึงต้นกำเนิดแสง มีหน่วยเป็นองศา

2.2.9 Discomfort Glare

Discomfort Glare นั้นคือแสงจ้าที่ทำให้ความสามารถในการมองเห็นลดลง และทำให้ไม่สบายตา โดยจะส่งผลมากน้อยตามคุณสมบัติของหลอดไฟ ประเภทโคมไฟ และวิธีการติดตั้งโคมไฟ

$$G = 13.84 - 3.31 \times \log I_{80} + 1.3 \left(\frac{I_{80}}{I_{88}} \right)^{0.5} - 0.08 \log \left(\frac{I_{80}}{I_{88}} \right) + 1.29 \log F + C + 0.97 \log L_{av} + 4.41 \log h' - 1.46 \log p$$

(2.10)

โดย I_{80} = Light Intensity of the luminaire at 80° เมื่อเทียบกับแนวตั้งฉาก

I_{88} = Light Intensity of the luminaire at 88° เมื่อเทียบกับแนวตั้งฉาก

F = Flash Area of Luminaires ที่มุม 80° เมื่อเทียบกับแนวตั้งฉาก

C = Color Factor ขึ้นอยู่กับชนิดของหลอดไฟ

L_{av} = ค่าเฉลี่ย Road Surface Luminance (cd/m^2)

h' = ค่าความสูงของเสาไฟเมื่อเทียบจากระดับสายตา

p = จำนวนเสาไฟต่อกิโลเมตร

โดยค่า G ที่คำนวณได้นั้นจะสามารถแบ่งเป็นระดับได้ดังนี้

$G = 1$ หมายถึง มีแสงจํากระดับที่ทนไม่ได้

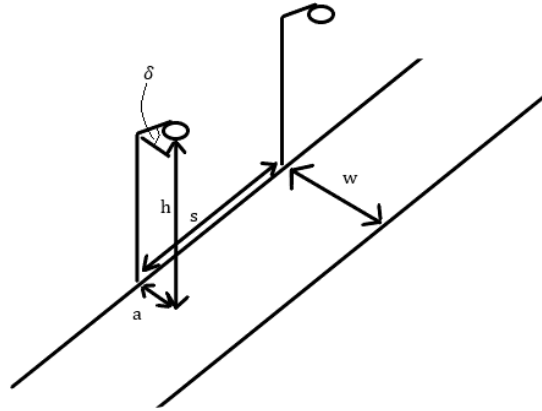
$G = 3$ หมายถึง มีแสงจํากระดับที่รบกวนสายตา

$G = 5$ หมายถึง มีแสงจํากระดับที่พอรับได้

$G = 7$ หมายถึง มีแสงจํากระดับที่น่าพอใจ

$G = 9$ หมายถึง ไม่รู้สึกรู้ว่ามีแสงจํา

2.3 การติดตั้งไฟถนน



รูปที่ 2.3 ลักษณะการติดตั้งไฟถนน

h คือ ความสูงของการติดตั้ง (Mounting Height)

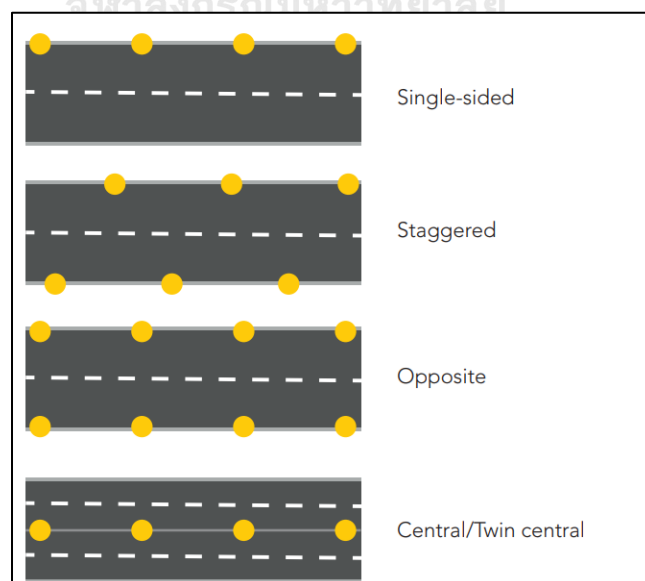
s คือ ระยะห่างระหว่างเสาไฟในแนวเดียวกัน (Spacing)

w คือ ความกว้างของถนน (Road width)

a คือ ระยะช่วงยื่น (Overhang)

δ คือ มุมเงยของดวงโคม (Tilt Angel)

รูปแบบการจัดวางไฟถนนนั้นมีหลายรูปแบบ โดยที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีดังนี้



รูปที่ 2.4 การจัดวางโคมไฟถนนแบบต่างๆ

2.4 ประเภทของถนนและมาตรฐานทางไฟฟ้าแสงสว่างของไฟถนน

2.4.1 มาตรฐานทางไฟฟ้าแสงสว่างของไฟถนนตามมาตรฐาน CIE 115 [22]

2.4.1.1 Motor Traffic (M)

มีการจัดการส่องสว่างไว้ 6 ระดับ คือ M1 ถึง M6 ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทถนนตามมาตรฐาน CIE แบบ M

ประเภทของถนน		ชนิดและความหนาแน่นของจราจร	ชนิดของถนน	ตัวอย่าง
สำหรับรถยนต์	M1	จราจรหนาแน่นและใช้ความเร็วสูง	ถนนที่มีทางวิ่งสวนเลนแยกกัน ไม่มีทางแยก มีการควบคุมการเข้าออกของรถ	มอเตอร์เวย์ทางด่วน
	M2		ถนนสายสำคัญสำหรับการจราจรด้วยรถยนต์เท่านั้น	ถนนใหญ่ ถนนสายหลัก
	M3	จราจรหนาแน่นและใช้ความเร็วปานกลางหรือจราจรที่มีคนเดินและมีความเร็วปานกลาง	มีทางวิ่งแยกสำหรับการจราจร ความเร็วต่ำ และ/หรือมีคนเดิน ถนนในตัวเมือง หรือชนบทที่สำคัญ	ถนนวงแหวน ถนนทางแยก
สำหรับรถและคนเดิน	M4	จราจรหนาแน่นปานกลางและใช้ความเร็วต่ำหรือมีคนเดิน	ถนนในเมืองหรือศูนย์การค้า ทางเข้าออกอาคารธุรกิจ มีการจราจรความเร็วต่ำหรือมีคนเดิน	ถนนใหญ่ ถนนธุรกิจ ถนนการค้า
	M5/ M6	จราจรหนาแน่นปานกลางถึงต่ำและมีการจำกัดความเร็ว	ถนนที่เชื่อมระกวางถนนในบริเวณที่อยู่อาศัยและถนนประเภท M1-M4	ถนนเชื่อม

Lighting class	Road surface				Threshold increment	Surround ratio
	Dry		Wet *			
	L_{av} in $cd \cdot m^{-2}$	U_o	U_l	U_o	f_{TI} in %	R_s
M1	2,0	0,40	0,70	0,15	10	0,5
M2	1,5	0,40	0,70	0,15	10	0,5
M3	1,0	0,40	0,60	0,15	15	0,5
M4	0,75	0,40	0,60	0,15	15	0,5
M5	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,5
M6	0,30	0,35	0,40	0,15	20	0,5

ตารางที่ 2.2 การแบ่งประเภทไฟฟ้าแสงสว่างตามมาตรฐาน CIE แบบ M

2.3.1.2 Conflict Area (C)

พื้นที่บริเวณทางร่วมหรือทางแยก ทางรถยนต์ที่ใช้งานร่วมกับจักรยานยนต์หรือผู้ใช้ถนน ทางลดขนาด และทางที่มีสิ่งกีดขวาง แบ่งพื้นที่ของถนนได้เป็น 5 ประเภท ดังตารางที่ 2.3 โดยสามารถจัดแบ่งระดับความสว่างไว้ 6 ระดับ คือ C0 – C5 ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทถนนสำหรับ Conflict Area

Conflict Area	Illuminance Lighting Class
อุโมงค์	$C(N)=M(N)$
ทางแยก	$C(N)=M(N-1)$
ทางข้ามทางรถไฟ: ไม่มีความยุ่งเหยิง มีความยุ่งเหยิงสูง	$C(N)=M(N)$ $C(N)=M(N-1)$
วงเวียนที่ไม่มีสัญญาณไฟ: มีความยุ่งเหยิงสูงหรือใหญ่ ความยุ่งเหยิงปานกลาง ไม่มีความยุ่งเหยิงหรือเล็ก	C1 C2 C3
ที่จอดรถ: มีความยุ่งเหยิงสูงหรือใหญ่ ความยุ่งเหยิงปานกลาง ไม่มีความยุ่งเหยิงหรือเล็ก	C1 C3 C5

ตารางที่ 2.4 การแบ่งระดับความสว่างสำหรับ Conflict Area

Lighting Class	$\bar{E}(lx)$ overwhole of used surface Minimum Maintained	U_o Uniformity of Illuminance Minimum
C0	50	0.4
C1	30	0.4
C2	20	0.4
C3	15	0.4
C4	10	0.4
C5	7.5	0.4

2.4.1.3 Pedestrian Traffic (P)

พื้นที่บริเวณคนเดินแบ่งออกเป็น 7 ประเภท ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งสามารถจัดระดับความสว่างได้ 7 ระดับ คือ P1 ถึง P7 ตามตารางที่ 2.6 โดยใช้ค่าความสว่างตามแนวนอนบน

ผิวถนนหรือฟุตบาทและค่าความสว่างตามแนวตั้งบนหน้าคน โดยคิดที่ระดับความสูง 1.5 เมตร เป็นตัวกำหนดระดับความสว่างของถนนแต่ละประเภท

ตารางที่ 2.5 การแบ่งประเภทถนนสำหรับ Pedestrian Traffic

Lighting Class	ลักษณะของถนน
P1	ถนนสายสำคัญ
P2	ถนนที่มีการใช้งานในตอนกลางคือสูง โดยคนเดินถนนและคนขี่จักรยาน
P3	ถนนที่มีการใช้งานในตอนกลางคือปานกลาง โดยคนเดินถนนและคนขี่จักรยาน
P4	ถนนที่มีการใช้งานในตอนกลางคือน้อย โดยคนเดินถนนและคนขี่จักรยาน
P5	ถนนที่มีการใช้งานในตอนกลางคือต่ำ โดยคนเดินถนนและคนขี่จักรยาน
P6	ถนนที่มีการใช้งานในตอนกลางคือต่ำมาก โดยคนเดินถนนและคนขี่จักรยาน
P7	ถนนที่มีความจำเป็นต้องให้แสงสว่างจากโคมไฟโดยตรงเท่านั้น

ตารางที่ 2.6 การแบ่งระดับความสว่างสำหรับ Pedestrian Traffic

Lighting Class	Horizontal Illuminance (lx) On whole of used surface maintained	
	Average	Minimum
P1	20	7.5
P2	10	3
P3	7.5	1.5
P4	5	1
P5	3	0.6
P6	1.5	0.2
P7	Not applicable	Not applicable

2.4.2 มาตรฐานทางแสงสว่างของไฟถนนประเทศไทย

การทางพิเศษแห่งประเทศไทย

ความสว่างเฉลี่ย

- บนทางแยกยกระดับ 21.5 lux

- บนทางขึ้น/ลง 15 lux
- บริเวณด้านเก็บค่าผ่านทาง 40 lux

ความสม่ำเสมอของความสว่าง

- $E_{\min} / E_{av} \geq 1/2.5 (\geq 0.40)$
- $E_{\min} / E_{\max} \geq 1/6 (\geq 0.17)$

กรมทางหลวง

ตารางที่ 2.7 ความสว่างเฉลี่ยต่ำสุดตามประเภทถนน

ประเภทถนน	ความสว่างเฉลี่ยในแนวนอนต่ำสุด (lx)		
	พื้นที่กลางเมือง	พื้นที่ในเมือง	พื้นที่ชนบท
มอเตอร์เวย์	21.5	15.0	10.75
ทางแยก	21.5	21.5	15.0
ทางสายหลัก	21.5	13.0	9.7
ทางสายรอง	13.0	9.7	6.5
ทางสายท้องถิ่น	9.7	6.5	2.1

ความสม่ำเสมอของความสว่าง

- $E_{\min} / E_{av} \geq 1/2.5 (\geq 0.40)$
- $E_{\min} / E_{\max} \geq 1/6 (\geq 0.17)$

การไฟฟ้านครหลวง

ความสว่างเฉลี่ยแนวราบ

- ไฟถนน/ไฟเชิงลาด/ไฟถนนยกระดับ 21.5 lux

ความสม่ำเสมอของความสว่าง

- $E_{\min} / E_{av} \geq 1/3 (\geq 0.33)$

ค่าตัวประกอบการบำรุงรักษา 0.8

ค่าความสว่างเฉลี่ยในแนวราบเริ่มต้น 26.8 lux

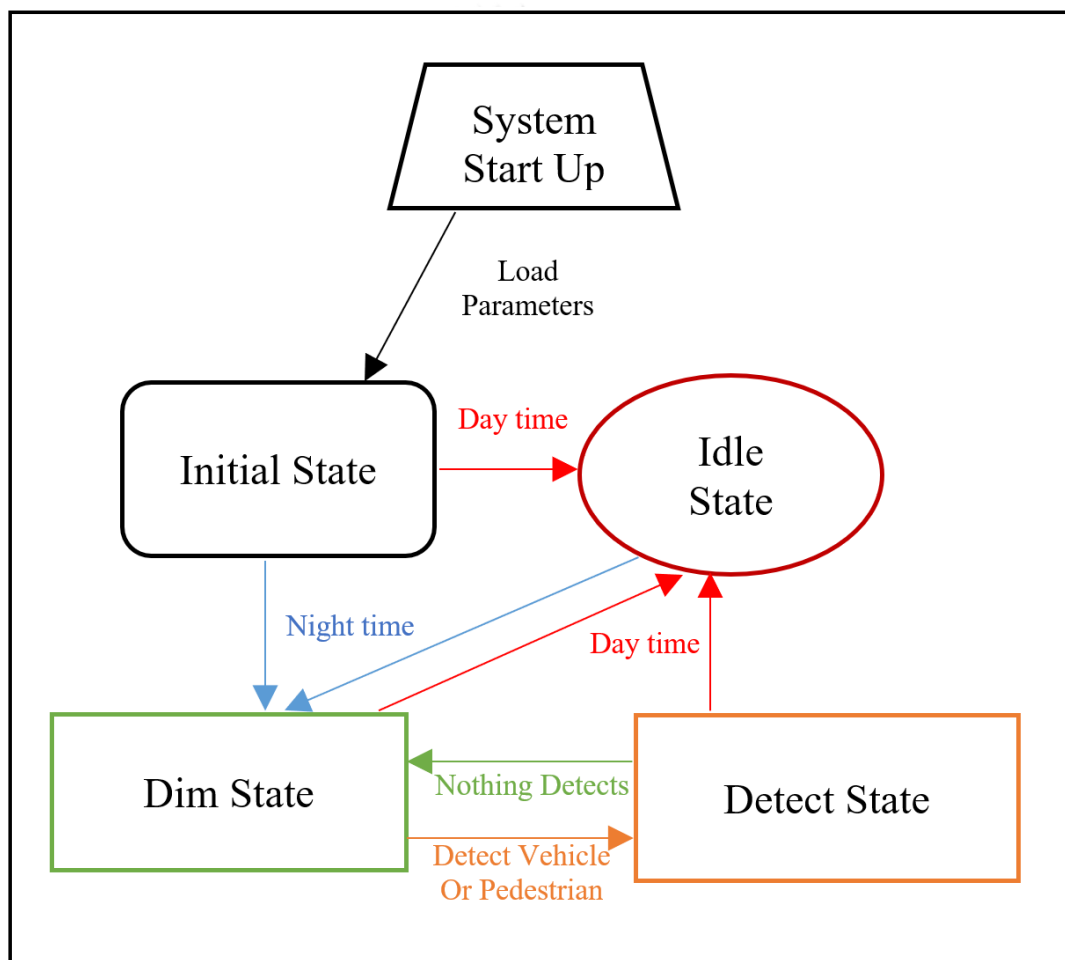
บทที่ 3

การใช้ระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายเพื่อทำระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน

ในเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงข้อมูลของการสื่อสารแบบเครือข่ายที่จะใช้ในการทำ การควบคุมระบบที่เหมาะสมในการใช้ควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน คือ LoRaWAN

3.1 ระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนน

การทำงานของระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนที่ได้ออกแบบนั้น จะทำงานตามรูปที่ 3.1 ด้านล่าง



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนน

โดยมีรายละเอียดระดับขั้นในการทำงาน ดังต่อไปนี้

- ระบบจะเริ่มต้นการทำงานจาก System Start Up ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจสอบการตั้งค่าต่างๆที่ได้ตั้งไว้ก่อนหน้า และทำการเริ่มต้นกระบวนการเข้าสู่ Initial State

- Initial State เป็น State หลังจากเริ่มต้นการทำงาน ทำหน้าที่ตรวจสอบการทำงานของระบบโดยรวม โดยจะตรวจสอบว่า ณ เวลานั้นเป็นเวลาเท่าใด เพื่อทำการส่งข้อมูลเพื่อให้หลอดไฟอยู่ใน State ต่อไป ถ้าเป็นเวลากลางวันจะส่งข้อมูลให้ระบบทำงานใน Idle State และถ้าอยู่ในเวลากลางคืนจะส่งข้อมูลให้เข้าสู่ Dim State

- Idle State เป็น State ที่จะทำหน้าที่สั่งหลอดไฟให้อยู่ในสถานะปิดหรือ OFF เนื่องจากเป็น State ที่ใช้ในเวลากลางวัน ไม่จำเป็นต้องมีไฟฟ้าส่องสว่างถนน โดยจะทำงานเมื่อเวลา 05.50 น. ถึง 18.50 น. ของวันเดียวกัน

- Dim State เป็น State ที่จะทำงานตอนกลางคืนเมื่อเริ่มต้น และเมื่อไม่มียานพาหนะผ่าน Sensor เป็นเวลานานเกินกว่า 5 วินาที โดยจะเริ่มเข้าสู่ State นี้เมื่อเวลา 18.50 น. ไปจนถึง 05.50 น. ของอีกวัน โดยใน State นี้ หลอดไฟฟ้าส่องสว่างถนนนั้นจะทำการถูกลดความสว่างลงตามค่าที่ได้ทำการคำนวณด้วย DIALux ซึ่งจะมีค่าต่ำที่สุดเพื่อให้ประหยัดพลังงานมากที่สุด แต่ยังคงอยู่เหนือกว่ามาตรฐานเพื่อป้องกันปัญหาไฟฟ้าดับเมื่อมีปัญหาที่ระบบ

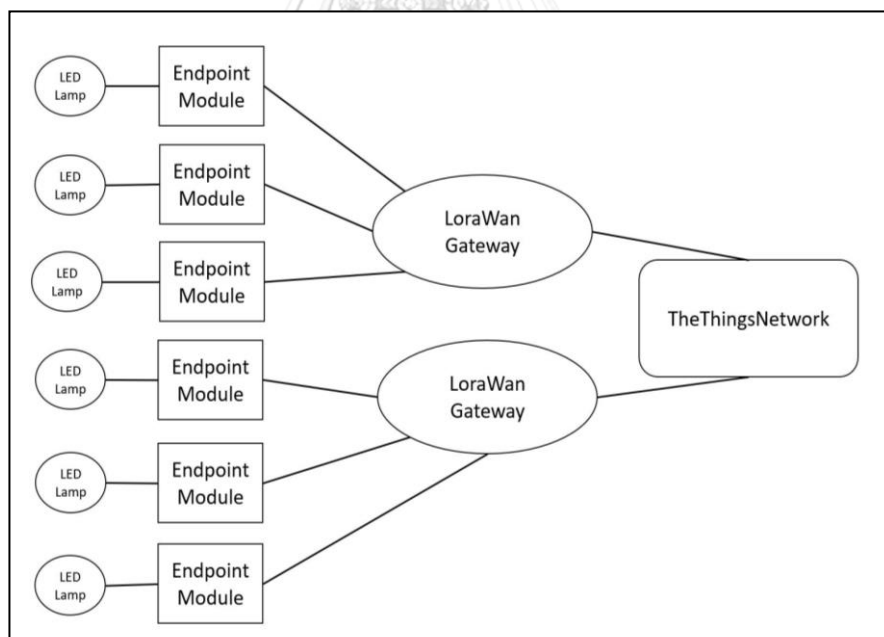
- Detect State เป็น State ที่จะทำงานตอนกลางคืนเหมือน Dim State แต่จะทำงานเมื่อมียานพาหนะผ่าน Sensor โดยจะทำงานด้วยการส่งข้อมูลไปหา Module Endpoint ที่อยู่ใกล้เคียงกับ Module Endpoint ที่ติดตั้งไว้กับ Sensor ที่มียานพาหนะผ่าน และทำให้บริเวณโดยรอบนั้นมีแสงสว่างเต็มกำลังหลอด

- การทำงานนั้นจะสลับไปมาระหว่าง Dim State และ Detect State ในเวลากลางคืน โดย Sensor จะทำการเช็คความมียานพาหนะผ่านหรือไม่ และส่งข้อมูลจาก Module LoRaWAN ไปสู่ Gateway LoRaWAN ที่อยู่ใกล้ที่สุดในบริเวณนั้น และตัว Gateway จะส่งข้อมูลต่อไปสู่ TheThingsNetwork ซึ่งจะทำการรับและการประมวลผลข้อมูลจาก Sensor และทำการส่งการไปยัง Endpoint Module ที่อยู่รอบบริเวณโดยผ่านทาง Gateway ทำให้ Endpoint Module ที่อยู่ในบริเวณนั้นๆ ทำงานตาม State ที่ถูกต้อง เพื่อส่องสว่างถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย ประหยัดพลังงาน และทำให้ภาระการบำรุงรักษาน้อยลง

3.2 วงจรระบบ LoRaWAN

3.2.1 ระบบ LoRaWAN Network

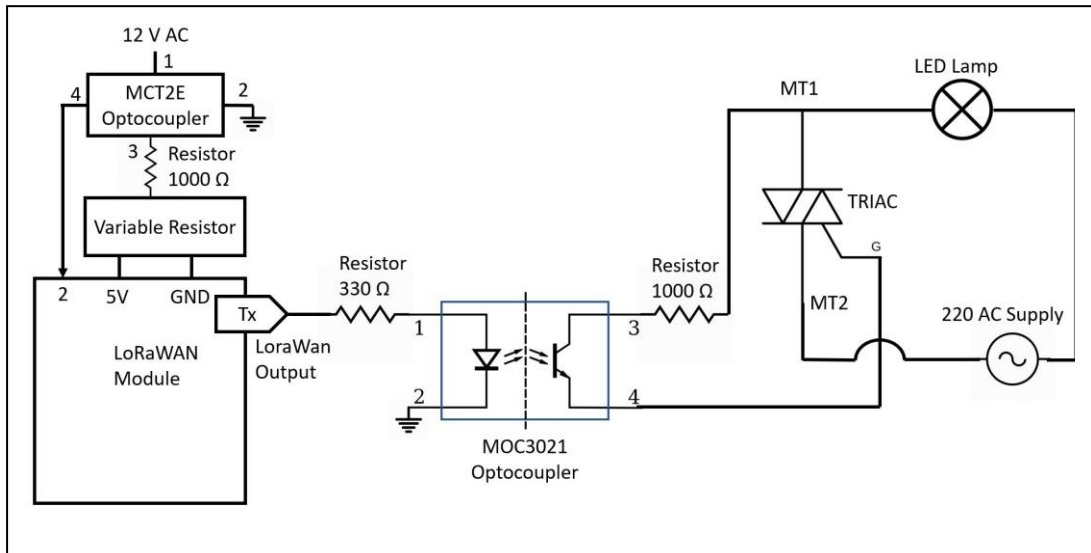
แผนภาพระบบการสื่อสารระยะไกลรูปที่ 3.2 ด้านล่างนี้แสดงถึงภาพรวมของระบบ LoRaWAN ที่ใช้ในการควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะ โดยทุกๆ Endpoint Module นั้นต่อเข้ากับหลอดไฟฟ้า 1 ดวงโคม และทุกๆ Endpoint Module จะเชื่อมต่อกับ LoRaWAN Gateway ในบริเวณนั้นๆ ซึ่งสามารถมีขนาดใหญ่เล็กขึ้นอยู่กับตัวเสาอากาศของ LoRaWAN Gateway และของ Endpoint Module และขึ้นอยู่กับสถานที่ที่ติดตั้งว่ามีสิ่งปลูกสร้างขวางเส้นทางของสัญญาณมากน้อยเพียงใด LoRaWAN Gateway จะทำการเชื่อมต่อไปยัง TheThingsNetwork หรือ TTN ด้วยระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อใช้ TTN ในการทำหน้าที่เป็น Network Server และ Application Server เพื่อประมวลผลข้อมูลโดยไม่ต้องติดตั้ง Server ประมวลผลกลางที่มีราคาสูง ซึ่ง TTN จะทำหน้าที่รับส่งข้อมูลจาก LoRaWAN Gateway ไปทำการประมวลผลและส่งข้อมูลในการควบคุมความสว่างของหลอดไฟกลับไปสู่ LoRaWAN Gateway ซึ่งจะทำการส่งข้อมูลไปสู่ Endpoint Module เพื่อทำการควบคุมหลอดไฟตาม Schematic Diagram ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ระบบ LoRaWAN Network

3.2.2 Schematic Diagram ของวงจรควบคุมความสว่างของดวงโคม

Schematic Diagram ด้านล่างนี้เป็นวงจรควบคุมแสงสว่างของระบบไฟฟ้าแต่ละดวงโคมที่ต่อเข้ากับ Endpoint Modules ซึ่งมีจุดสำคัญดังนี้



รูปที่ 3.3 แสดง Schematic Diagram ของระบบที่ Endpoint Module

1) วงจรนี้ทำงานโดยใช้ไฟฟ้า 12 V AC ในการจ่ายพลังงานให้แก่ MCT2E Optocoupler ก่อนต่อไปยังบอร์ด LoRaWAN เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงจาก Power Supply ก่อนที่จะเข้าสู่ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้เพื่อจ่ายพลังงานให้แก่ระบบควบคุมสัญญาณไฟแสงสว่างอัจฉริยะ ซึ่งเข้ากับ 10000 Ohm Resistor เพื่อจะต่อเข้ากับตัวต้านทานปรับค่าได้ หรือ Variable Resistor

2) ตัวต้านทานปรับค่าได้นั้นจะต่อเข้ากับพอร์ต 5V DC และ GND ของ LoRaWAN Module เพื่อจ่ายพลังงานให้กับบอร์ด และพอร์ต 4 ของ Optocoupler MCT2E จะต่อเข้ากับพอร์ต 2 ของบอร์ด LoRaWAN เพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของบอร์ดให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

3) โดยสัญญาณจากบอร์ดรองของ LoRaWAN จะถูกส่งออกไปทางพอร์ต Tx ซึ่งเป็นพอร์ตส่งสัญญาณจะถูกส่งต่อไปยัง Optocoupler MOC3021 ซึ่งต่อเข้ากับ Resistor 1000 Ohm ก่อนส่งต่อไปยัง TRIAC ที่จะทำการส่งสว่างของดวงโคมตามที่เราระบุค่าไว้ ด้วยวิธี Zero Crossing Detection

4) แสงสว่างของหลอดไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วย BT136 TRIAC-1 12V 1 Channel 250V/10 A โดยจะนำสัญญาณที่ได้รับจาก Lora ส่งเข้าสู่พอร์ต MT1 หรือ Anode 1 เพื่อส่ง

สัญญาณต่อไปที่หลอดไฟ LED พอร์ต MT2 หรือ Anode 2 ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และ พอร์ต G ต่อเข้ากับขาที่ 4 ของ Optocoupler MOC3021 โดยการเลือกใช้ TRIAC นั้นเพราะ TRIAC สามารถคงสถานะเดิมไว้จนกว่าจะมีสัญญาณใหม่เข้ามาสั่งการ ทำให้หากเกิดปัญหาขึ้นกับระบบ หรือไฟฟ้าขัดข้อง จะไม่มีสัญญาณสั่งการส่งมาจาก LoRaWAN Module ทำให้ TRIAC ทำงานอยู่ใน State เดิมต่อไป โดยไม่มีปัญหาไฟฟ้าส่องสว่างดับ

3.2.3. การตั้งค่า SX1301/SX1276 เพื่อให้ทำงานในย่านความถี่ AS923-925

เนื่องจาก SX1276 module ที่ใช้นั้นจะเป็น module ที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานที่ 915 MHz จึงต้องตั้งค่าให้ module 915 MHz นั้นย้ายย่านความถี่ไปทำงานในย่าน AS923-925 แทนซึ่งเป็นความถี่หลักในการใช้งานตามที่มาตรฐานในประเทศไทยกำหนดโดยกสทช[23] ซึ่งจะใช้ Code ที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

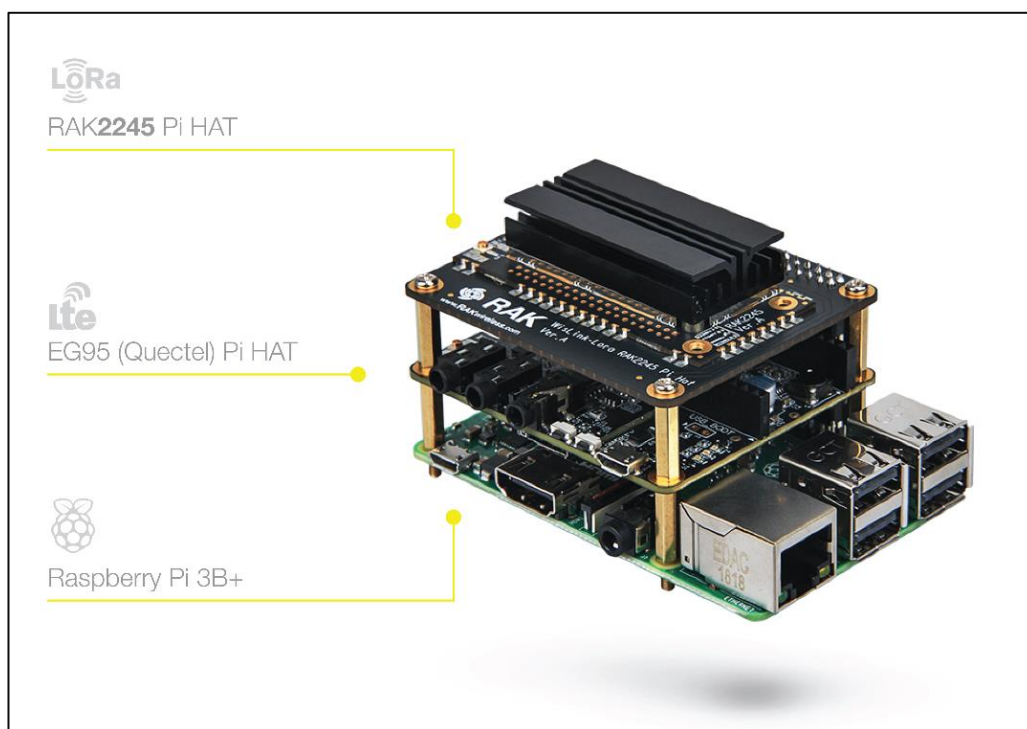
3.2.4 การตั้งค่า LoRaWAN ที่ Endpoint Module และ TTN

เนื่องจากการส่งข้อมูลจาก Endpoint Module ไปยัง Module นั้นจำเป็นต้องควบคุมระดับแรงดันของไฟฟ้าเพื่อลดความสว่างของหลอดไฟเมื่อไม่มีการใช้งาน ดังนั้นจึงใช้ Code ในภาคผนวก ข ใช้เพื่อ Control Endpoint Module ให้ส่งข้อมูลไปยัง TRIAC เพื่อกำหนดการทำงานของหลอดไฟ โดยในการทำงานระบบนั้น จะ Code ในภาคผนวก ค ใส่ลงใน Application ของ TTN เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและก่อนจะสั่งการไปยัง Endpoint Module

3.3 การตั้งค่า LoRaWAN Gateway

การจะใช้งาน LoRaWAN เพื่อควบคุมระบบไฟฟ้าต่างๆนั้นจำเป็นต้องมี Gateway เพื่อทำการรับส่งข้อมูลระหว่าง Endpoint Module ต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ Gateway RAK 7243 [24] ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 ซึ่งมาพร้อม Raspberry Pi 3B+ [25] ซึ่งเป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ โดย RAK 7243 จะมีส่วนประกอบสำคัญคือ RAK2245 [26] ซึ่งเป็น LoRaWAN Concentrator Module ที่ได้รับการพัฒนาต่อมาจาก RAK831 [27] และ Raspberry Pi 3B+ ซึ่งใช้ในการประมวลผล Code ก่อนจะทำการเชื่อมต่อเข้ากับ Internet เพื่อใช้งานร่วมกับ TheThingsNetwork.org ซึ่งเป็นเว็บไซต์ในการใช้ Server หลักในการประมวลผลของ LoRaWAN ในส่วน Network Server โดยตัว RAK 7243 นี้มี Channel ในการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 8 uplink channel และ 1 downlink channel ทำให้สามารถรับข้อมูลได้จาก Endpoint Module พร้อมๆกันจำนวน 8 ตัว และสั่งการได้ที่ละ 1 Endpoint Module และมีความเร็วในการรับส่งข้อมูล

อยู่ที่ประมาณ 1 ล้าน Package/วัน ทำให้สามารถต่อกับ Endpoint Module ได้มากกว่า 3000 อันพร้อมๆกัน



รูปที่ 3.4 แสดงส่วนประกอบของ RAK 7243

การตั้งค่า LoRaWAN Gateway นั้นจากแรกเริ่มจะได้ตัว RAK2245 และ Raspberry Pi 3B+ มาเป็นกล่องสีดำซึ่งจะทำการเชื่อมต่อบอร์ดต่างๆเข้าด้วยกันไว้อยู่แล้ว เนื่องจากการเชื่อมต่อกับ TheThingsNetwork นั้นจำเป็นต้องใช้อินเตอร์เน็ตจึงต้องเชื่อมต่อ Gateway เข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการตั้งค่าดัชนีต่างๆในการเชื่อมต่อ โดยสามารถเชื่อมต่อกับอินเตอร์เน็ตได้ 3 ช่องทาง คือ

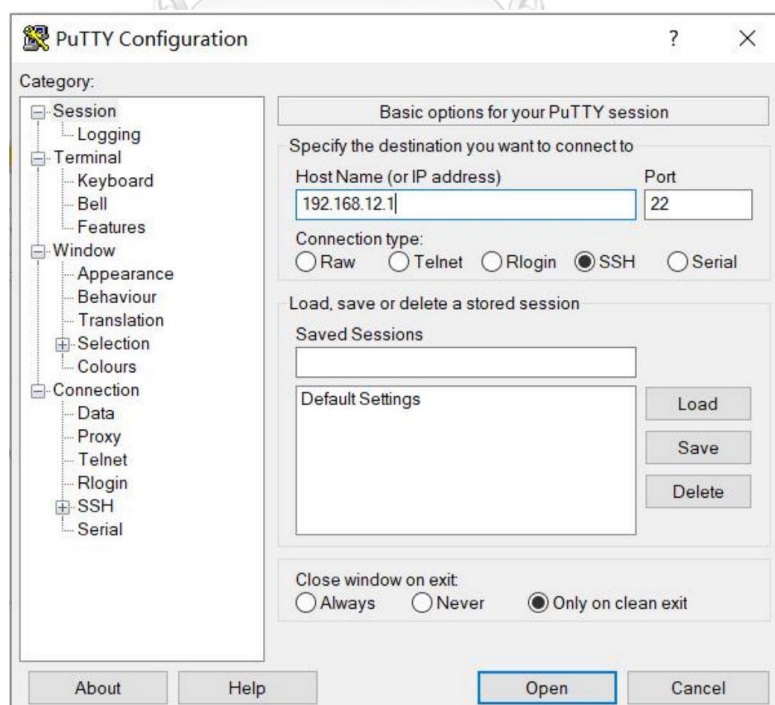
1. Wi-Fi เป็นเทคโนโลยีที่เชื่อมต่อกับอินเตอร์เน็ตแบบไร้สาย ที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE 802.11 ว่าด้วยเรื่องการเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตด้วย LAN Protocol ผ่าน MAC Address และ Physical Layer โดยการติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่อระยะไกล หรือที่เรียกว่า Wireless Local Area Network (WLAN) ที่เรียกว่า Router ซึ่งจะติดต่อผ่านคลื่นความถี่หลายคลื่นความถี่ เช่น 2.4 GHz, 5 GHz และ 60 GHz เป็นต้น โดยการเชื่อมต่อนั้นจะมี Protocol ในการเชื่อมต่อคือ Transmission Control Protocol/ Internet Protocol หรือ TCP/IP ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถสื่อสารจากต้นทางข้ามเครือข่ายอินเตอร์เน็ตไปยังปลายทางได้และสามารถหาเส้นทางที่จะส่งข้อมูลไปได้เองโดยอัตโนมัติ

2. LAN เป็นเทคโนโลยีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตด้วยสาย โดยจะทำการเชื่อมต่อผ่าน TCP/IP เช่นเดียวกับ Wi-Fi

3. LTE เป็นเทคโนโลยีการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตด้วยเครือข่ายโทรศัพท์มือถือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

การตั้งค่า LoRaWAN Gateway RAK 7243 นั้นจะมีขั้นตอนที่สำคัญในการติดตั้งเพื่อให้ทำการเชื่อมต่อได้กับทั้ง LoRaWAN Module และ TheThingsNetwork ดังต่อไปนี้

3.3.1 ใช้ Putty [28] เป็นโปรแกรมในการเชื่อมต่อกับระบบที่เป็นระบบสื่อสารระยะไกลหรือที่เรียกว่า Secure Shell หรือ SSH [29] ซึ่งเป็น Protocol ที่ใช้ในการเชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นผ่านอินเทอร์เน็ต ใช้เพื่อตั้งค่าการเชื่อมต่อเริ่มต้น โดยจำทำการใช้ Putty ในการเข้าสู่ระบบของ LoRaWAN Gateway โดยในที่นี้ใช้ IP Address [30] หรือชื่อเต็มว่า Internet Protocol Address เป็น หมายเลขที่ใช้สำหรับระบุตัวตนของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่ออยู่บนเครือข่าย ประกอบด้วยตัวเลข 4 ชุด ที่ไม่ซ้ำกันในแต่ละเครื่อง และใช้ Wifi Access Point Mode (Wifi AP Mode) [31] ซึ่งเป็น Mode การทำงาน หลักของ LoRaWAN Gateway ที่จะทำหน้าที่ลูกข่ายและทำการเชื่อมต่อผ่านทางสัญญาณไร้สายแบบ Access Point ซึ่งคือการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุดเท่านั้น



รูปที่ 3.5 แสดงโปรแกรม Putty

3.3.2 ทำการเข้าสู่ระบบผ่าน SSH โดยผ่าน Raspberry Pi 3B+ โดยใช้ ID และ Password ดั้งเดิมของ Raspberry Pi คือ Pi และ raspberry ตามลำดับ

```

pi@rak-gateway: ~
login as: pi
pi@192.168.12.1's password:
Linux rak-gateway 4.14.71-v7+ #1145 SMP Fri Sep 21 15:38:35 BST 2018 armv7l

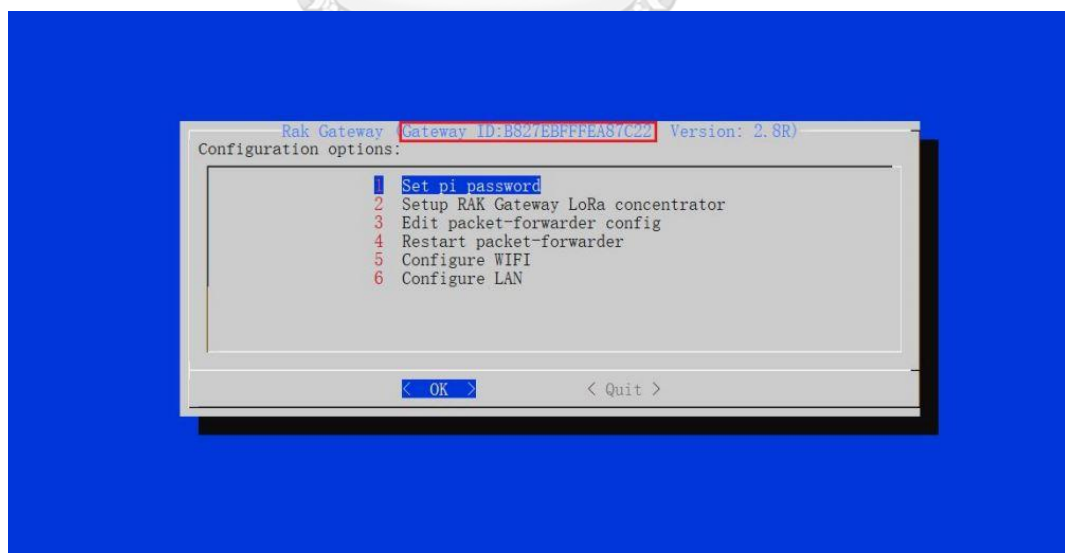
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Tue Apr 30 13:29:43 2019 from 192.168.12.65
pi@rak-gateway:~ $

```

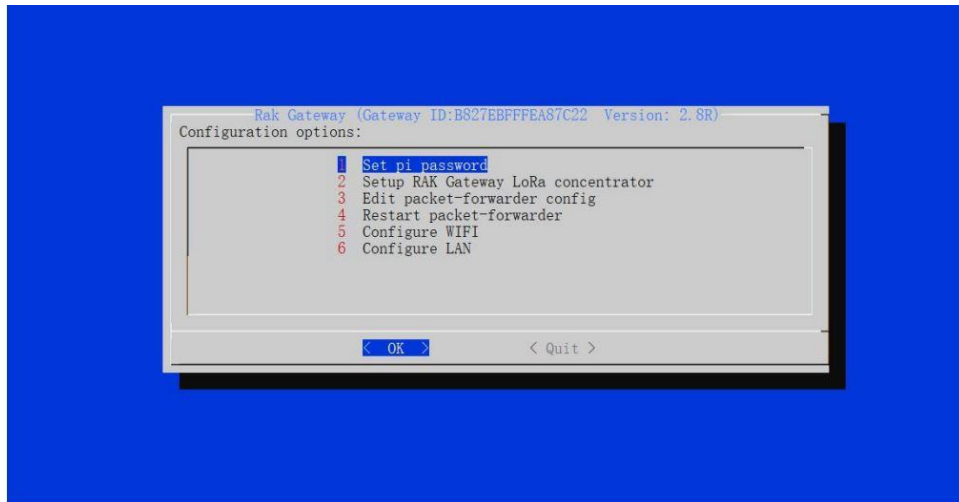
รูปที่ 3.6 แสดงการเข้าสู่ระบบผ่าน SSH

3.3.3 ใช้ Command “sudo gateway-config” เพื่อเข้าสู่หน้าจอหลักในการกำหนดค่าของ Gateway โดยหน้าจอหลักจะเป็นดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.7 แสดงหน้าจอหลักของ Command “sudo gateway-config”

3.3.4 ทำการจต Gateway ID ด้านบนของหน้าจอเพื่อเตรียมนำไปใส่ในในเว็บไซต์ Server TheThingsNetwork และทำการกำหนด Password ใหม่ให้แก่ Gateway เพื่อความปลอดภัย



รูปที่ 3.8 แสดง Gateway ID ของ Gateway LoRaWAN และตัวเลือกการตั้ง Password

Gateway ID
A unique, human-readable identifier for your gateway. It can be anything so be creative!

I'm using the legacy packet forwarder
Select this if you are using the legacy [Semtech packet forwarder](#).

Description
A human-readable description of the gateway

Frequency Plan
The [frequency plan](#) this gateway will use

Router
The router this gateway will connect to. To reduce latency, pick a router that is in a region which is close to the location of the gateway.

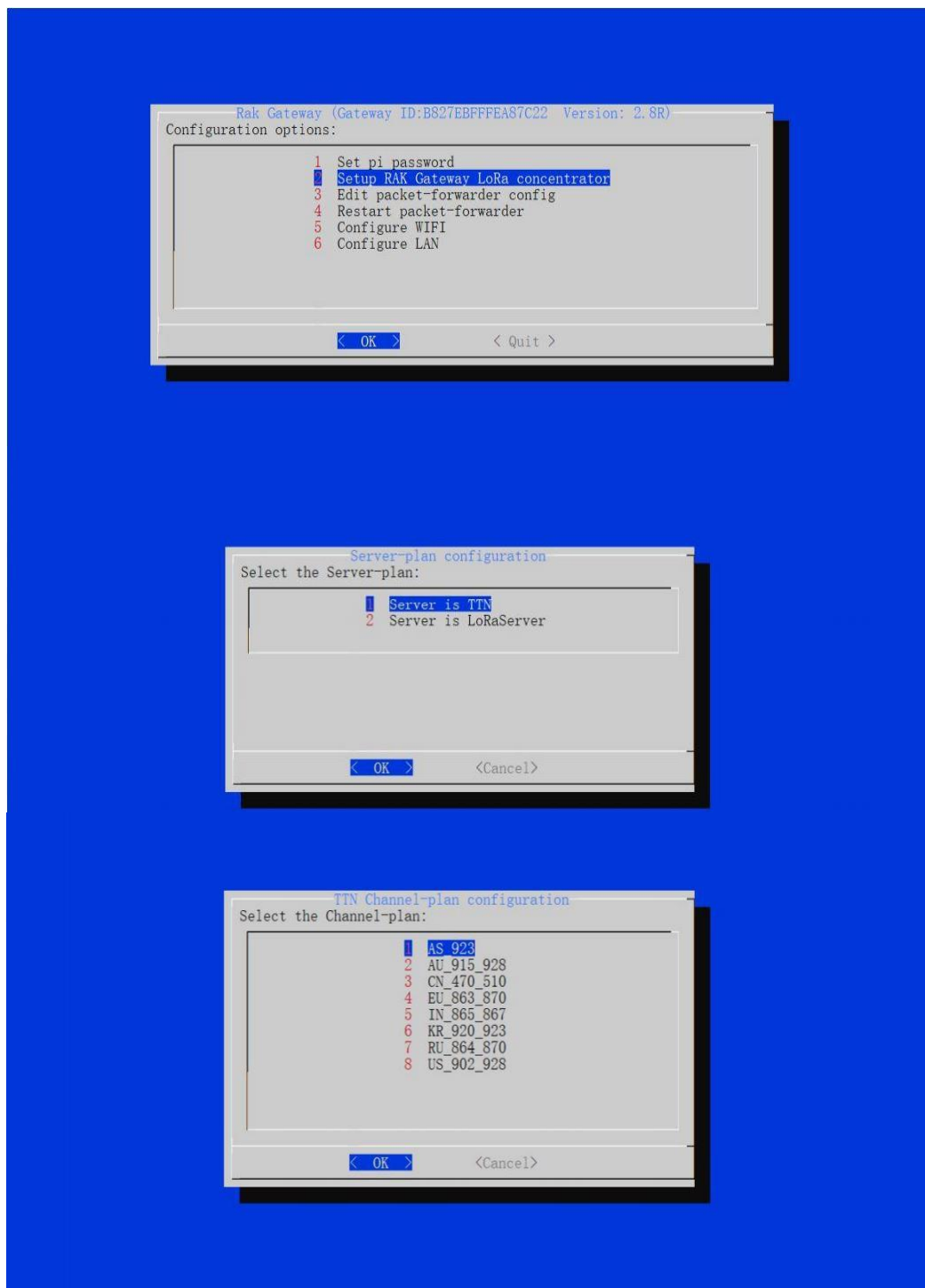
Location
The exact location of you gateway. This will be used if your gateway cannot determine its location by itself. Set a location by clicking on the map.

Antenna Placement
The placement of the gateway antenna

 indoor outdoor

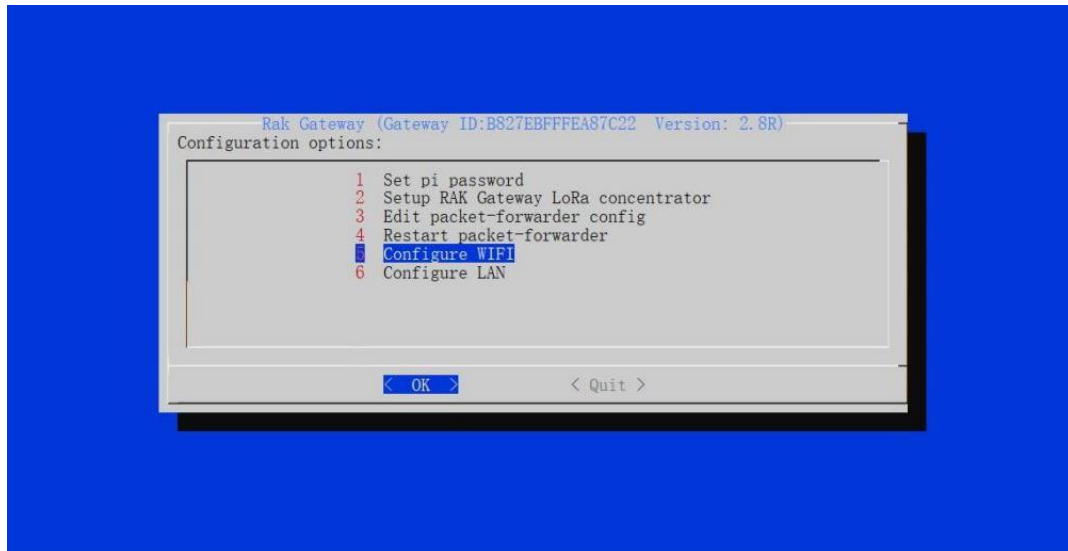
รูปที่ 3.9 หน้าจอสำหรับตั้งค่า Gateway ของ TheThingsNetwork

3.3.5 ทำการกำหนดค่าความถี่ของ Gateway ที่เราต้องการใช้งาน ซึ่งในประเทศไทย กำหนดให้ใช้ 923-923 MHz โดยเลือก ใช้ TTN หรือ TheThingsNetwork และกำหนดความถี่เป็น AS923 ซึ่งเป็นความถี่หลักที่ใช้ได้ในประเทศไทย



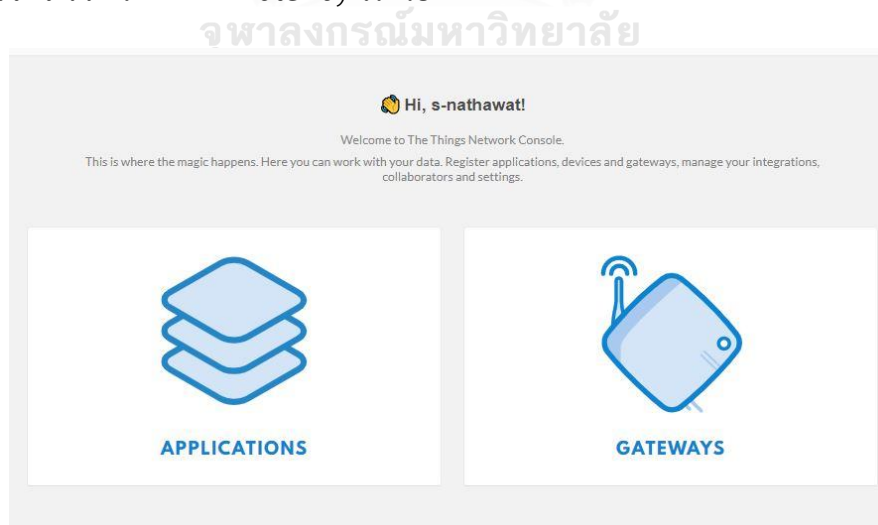
รูปที่ 3.10 แสดงการตั้งค่าความถี่ของ Gateway

3.3.6 เชื่อมต่อ LoRaWAN Gateway เข้ากับ Router ผ่าน Wi-fi ด้วยการเลือก Config WIFI เพื่อให้ตัว Gateway เชื่อมต่อเข้าสู่ Wifi ที่เราเลือกใช้โดยอัตโนมัติเมื่อเราเปิดการใช้งาน Gateway ซึ่งจะทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งานมากยิ่งขึ้นและมีความเสถียรภาพของสัญญาณที่ดี



รูปที่ 3.11 แสดงตัวเลือกการตั้งค่าการเชื่อมต่อกับ WIFI

3.3.7 หลังจากที่ตั้งค่า Gateway เรียบร้อยแล้ว เราสามารถเข้าไปที่ TheThingsNetwork เพื่อทำการลงทะเบียน Gateway ให้ออนไลน์ผ่าน TTN ในหน้า Console เพื่อใช้ TTN ในการประมวลผลสัญญาณ LoRaWAN ที่ผ่านเข้า Gateway โดยไม่จำเป็นต้องมี Server แยก ซึ่งในส่วนนี้ จะมีการจดจำสถานที่ที่ติดตั้ง Gateway ไว้ด้วย



รูปที่ 3.12 แสดงหน้า Console ของ TheThingsNetwork

3.3.8 ทำการลงทะเบียน LoRaWAN Module Endpoint ผ่านตัวเลือก Device เพื่อทำการต่อ Device เข้ากับ Gateway โดยหลังจากมีการเชื่อมต่อกันแล้ว ตัว Device จะสามารถส่งสัญญาณ Lora ไปหา Gateway หรือ Device อื่นๆที่เชื่อมต่อไว้กับ Gateway ได้

The screenshot shows the configuration page for a LoRaWAN Gateway in the TTN console. The gateway ID is eui-b827ebfffe715330. It is described as 'Nathawat Gateway' and is owned by 's-nathawat'. The status is 'connected'. The frequency plan is 'Asia 923-925MHz' and the router is 'ttn-router-asia-se'. The gateway key is displayed in a base64 format. The last seen time is '4 seconds ago'. There are 0 received and 0 transmitted messages.

INFORMATION

- Brand: RAKwireless
- Model: 7432
- Antenna: (dropdown menu)

LOCATION

Antenna Placement: outdoor

Altitude: (dropdown menu)

The location map shows the gateway is located in Pak Kret, Thailand. The map includes a coordinate box with the following values: Lat: 13.90725720, Lng: 100.54790528. The map also shows various roads and landmarks in the area, including Ban Mai, Don Mueang, Sai Mai, Bang Khen, Tha Raeng, and Khlong Sam Wa.

รูปที่ 3.13 การแสดงค่าสถานะต่างๆของ Gateway ใน TTN

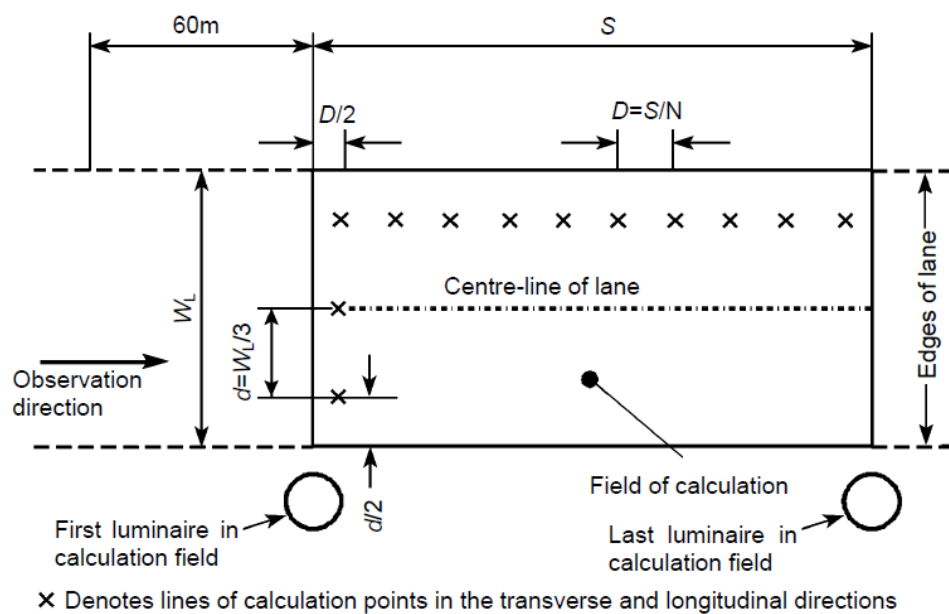
บทที่ 4

การใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน

เนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ โดยจะนำแบบที่ได้จากการออกแบบด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์นี้มาใช้ในการวิเคราะห์และหาค่าความส่องสว่างของหลอดไฟที่ถูกต้องตามมาตรฐานเพื่อควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างโดยใช้ LoRaWAN ว่าเมื่อระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายทำงาน เกิดการลดระดับความสว่างของแสงสว่างบนถนนลงแล้ว ความสว่างที่ได้นั้นต้องมีค่าเท่าใดจึงจะประหยัดพลังงานได้มากที่สุด โดยยังคงถูกต้องตามมาตรฐานของไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนและใช้สามารถใช้งานได้สำหรับผู้บริโภคใช้ถนน สามารถแบ่งการคำนวณและการจำลองได้ ดังต่อไปนี้

4.1 การพิจารณาพื้นที่ที่ต้องคำนวณ

การคำนวณจุดที่ต้องการคำนวณค่าความสว่างของถนนนั้นจะมีดัชนีสำคัญหลักๆ ดังนี้



รูปที่ 4.1 จุดที่ต้องคำนวณภายในพื้นที่ที่ต้องการ

โดยที่ N คือ จำนวนจุดที่ต้องการคำนวณ

D คือ ระยะห่างระหว่างจุดที่ต้องการคำนวณ

S คือ ระยะห่างระหว่างโคมในแนวเดียวกัน

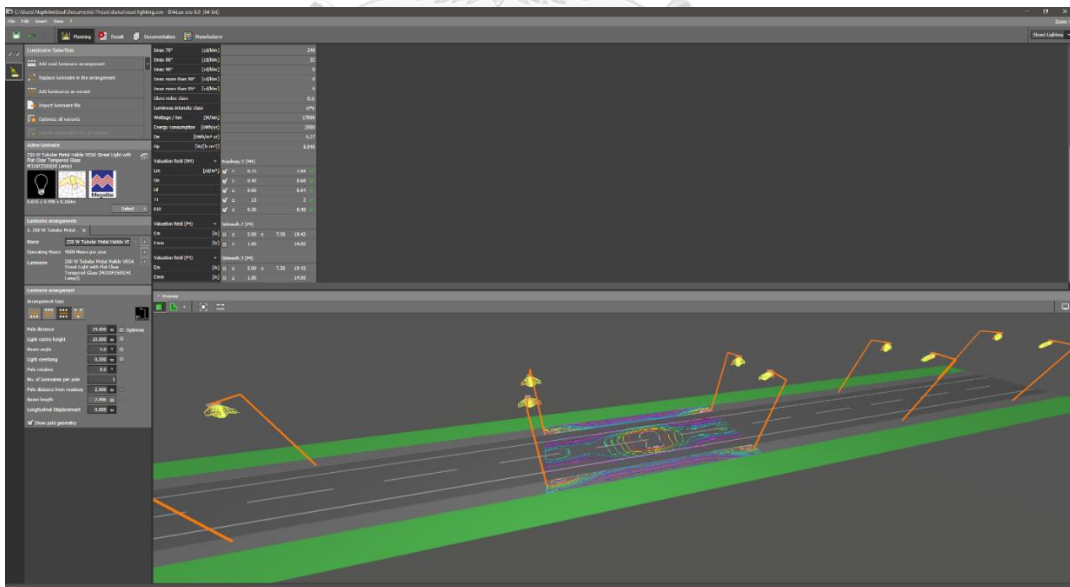
ถ้า $S \leq 50$ เมตร ; $N = 10$ แต่ถ้า $S > 50$ เมตร ; $D \leq 5$ เมตร

4.2 ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

การใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนนั้นสามารถออกแบบและคำนวณระบบไฟฟ้าส่องสว่างได้อย่างแม่นยำและชัดเจน โดยสามารถใช้ข้อมูลคอมพิวเตอร์และหลอดไฟแบบต่างๆที่ได้จากผู้ผลิตคอมพิวเตอร์ไฟและหลอดไฟ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลแสงสว่างของคอมพิวเตอร์ไฟและหลอดไฟนั้นๆได้ และซอฟต์แวร์สามารถแสดงผลการส่องสว่างจากคอมพิวเตอร์และหลอดไฟที่ได้ นำข้อมูลเข้ามาใช้ในโปรแกรมได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ เพื่อที่จะสามารถนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานต่างๆได้ว่าถูกต้องตามระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อนำมาวิเคราะห์และตรวจพิสูจน์ความถูกต้องการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนน โดยซอฟต์แวร์ที่ได้นำมาใช้มีดังนี้

4.2.1 DIALux

เป็นซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้เพื่อการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างที่รองรับทั้งการออกแบบภายในอาคาร นอกอาคารและถนน โดยสามารถสร้างแบบจำลองสามมิติเสมือนจริงที่สามารถทำการโต้ตอบอย่างทันทีได้ (Real Time Interactive 3D) สามารถนำข้อมูลจริงของคอมพิวเตอร์และหลอดไฟแบบต่างๆไปใช้ในการออกแบบได้ สามารถปรับค่าตัวแปรต่างๆทางแสงสว่างของข้อมูลที่น่าเข้าได้ รวมถึงเปลี่ยนลักษณะของวัสดุที่ใช้ รวมถึงสามารถใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์อื่นๆได้ เช่น AutoCAD เป็นต้น



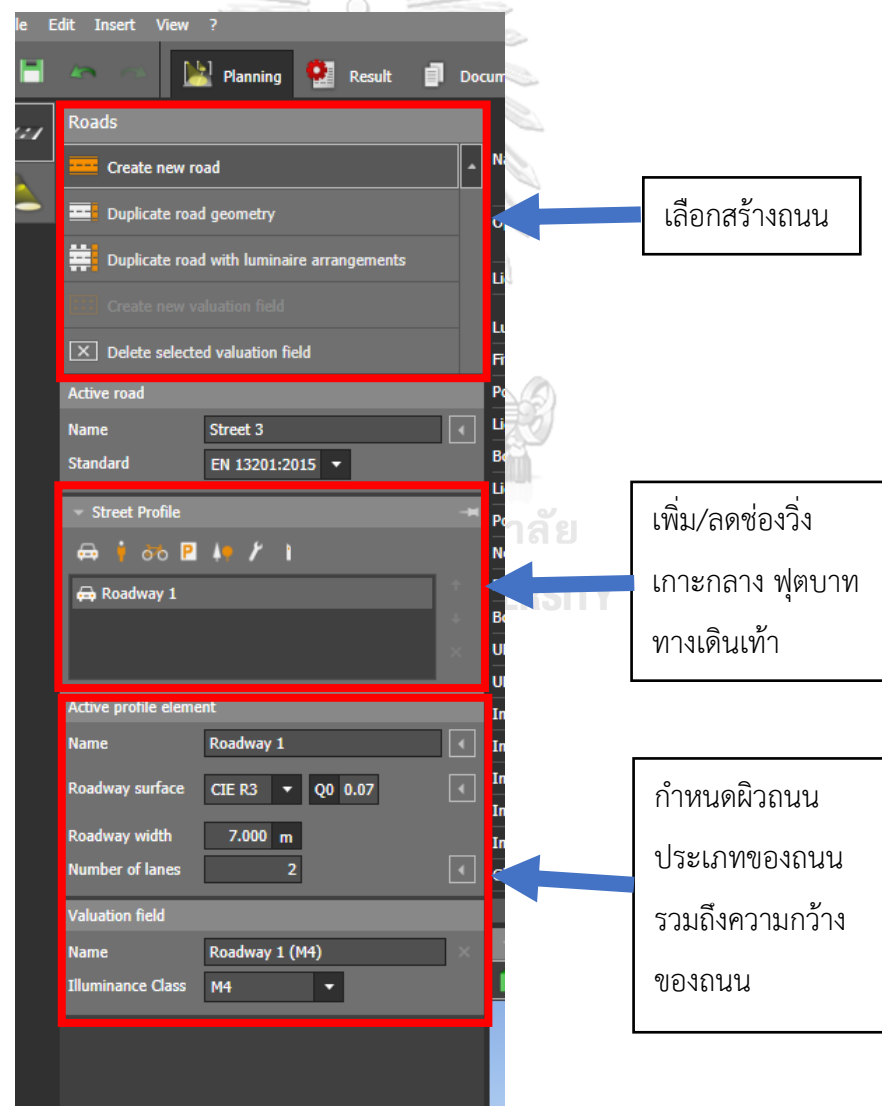
รูปที่ 4.2 การออกแบบ Road Lighting โดยใช้ DIALux

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ DIALux ในการออกแบบไฟฟ้าส่องสว่างบนถนนเพื่อหาค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่าง โดยในการจำลองจะหาค่าความสว่างของ

หลอดไฟที่มีความประหยัดพลังงานมากที่สุดเท่าที่จะมากได้ แต่ยังคงอยู่ในมาตรฐานเมื่อมีการลดความสว่างของหลอดไฟด้วยระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างด้วยการสื่อสารแบบเครือข่าย โดยสามารถใช้ DIALux ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องค่าต่างๆตามมาตรฐานของประเภทของถนนที่เลือกใช้ในการออกแบบได้

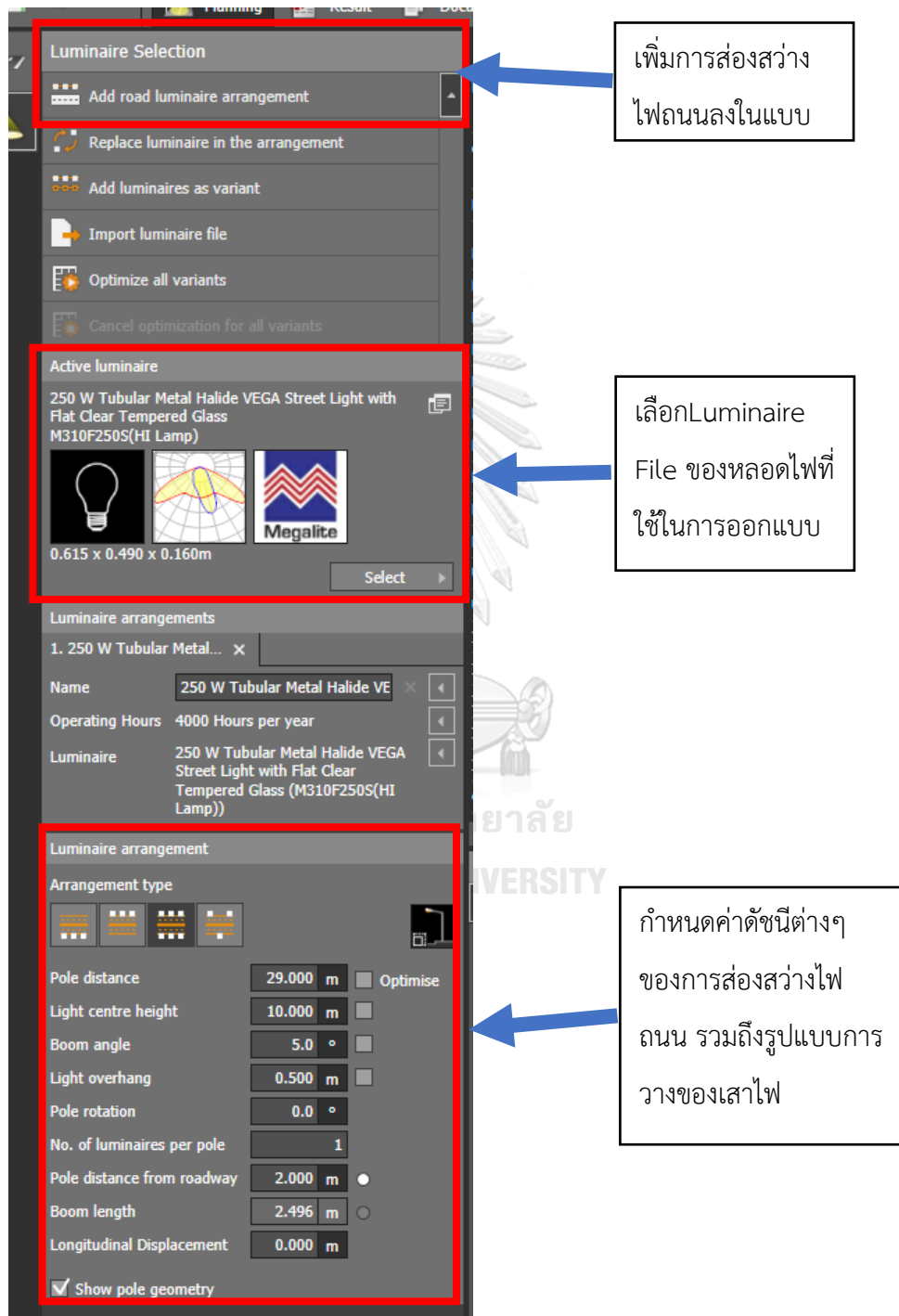
ตัวอย่างการใช้ DIALux ในการตรวจสอบความถูกต้อง โดยในที่นี้จะใช้การออกแบบถนนแบบ M4 เป็นตัวอย่าง โดยใช้ความสูงของเสาไฟอยู่ที่ 10 เมตรและใช้หลอด HPS 250 W ในการออกแบบ โดยสามารถทำตามขั้นตอนได้ดังนี้

1) ทำการสร้างถนนที่เราต้องการ สามารถเลือกลักษณะของผิวถนน รวมถึงประเภทของถนนตามมาตรฐาน CIE ได้ สามารถกำหนดจำนวนช่องวิ่ง รวมถึงเพิ่มเติมเกาะกลางถนนและทางเท้าได้



รูปที่ 4.3 การเลือกสร้างถนนใน DIALux

2) ทำการเพิ่มหลอดไฟที่จะใช้ในการออกแบบ โดยจะใช้ไฟล์ที่ได้จากผู้ผลิตหลอดไฟ และ กำหนดรูปแบบของการวางเสาไฟฟ้าส่องสว่าง โดยสามารถกำหนดค่าดัชนีต่างๆ เช่น ระยะห่างของเสา ความสูงของเสาไฟฟ้า มุมของโคม ลักษณะการวางเสาไฟ ฯลฯ



รูปที่ 4.4 การนำเข้าหลอดไฟเพื่อใช้ในการออกแบบในDIALux

3) หลังจากปรับค่าต่างๆตามข้อ 1) และ 2) ครบถ้วนแล้ว จะทำการตรวจสอบว่าได้ค่าตามมาตรฐานหรือไม่ โดยซอฟต์แวร์จะแสดงให้เห็นเป็นค่าดัชนีแต่ละดัชนีว่าอันไหนผ่านมาตรฐานบ้าง โดยมีเครื่องหมายกำกับไว้ รวมถึงดูข้อมูลค่าดัชนีต่างๆของไฟฟ้าแสงสว่างที่ได้ออกแบบ รวมถึงสามารถสร้างเป็นเอกสารเพื่อสรุปผลการออกแบบออกมาได้

Name		Street 1	
		<input checked="" type="checkbox"/> Generate output	
Optimization			Results: 1
Light loss factor		0.670	
Luminaire arrangement 1		250 W Tubular Metal Halide VEGA Street	
Fitting		1 x 250 W Tubular Single Ended Metal Hi	
Pole distance	[m]	29.000	
Light centre height	[m]	10.000	
Boom angle	[°]	5.0	
Light overhang	[m]	0.500	
Pole rotation	[°]	0.0	
No. of luminaires per pole		1	
Pole distance from roadway	[m]	<input checked="" type="radio"/>	2.000
Boom length	[m]	<input type="radio"/>	2.496
ULR		0	
ULOR		0	
Imax 70°	[cd/kdm]	240	
Imax 80°	[cd/kdm]	32	
Imax 90°	[cd/kdm]	0	
Imax more than 90°	[cd/kdm]	0	
Imax more than 95°	[cd/kdm]	0	
Glare index class		D.6	
Luminous intensity class		G*6	
Wattage / km		17000	
Energy consumption [kWh/yr]		2000	
De	[kWh/m ² yr]	6.27	
Dp	[W/(lx m ²)]	0.040	
Valuation field (M4)		Roadway 2 (M4)	
Lm	[cd/m ²]	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.75	2.84 ✓
Uo		<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.40	0.68 ✓
Ul		<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.60	0.64 ✓
TI		<input checked="" type="checkbox"/> ≤ 15	3 ✓
EIR		<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.30	0.48 ✓

ตรวจสอบค่าดัชนี
ทางแสงสว่างต่างๆ

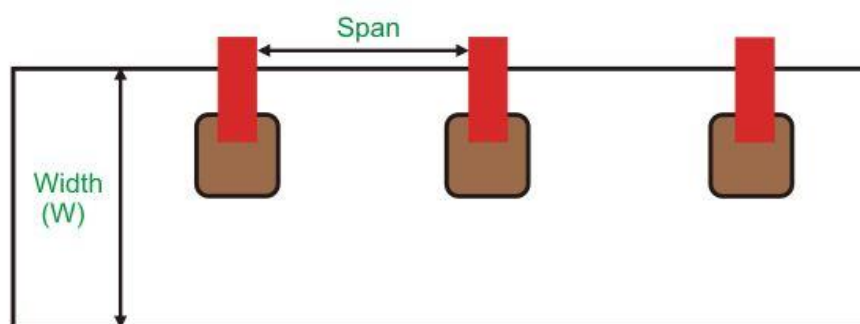
ตรวจสอบว่าตรงกับ
มาตรฐานหรือไม่

รูปที่ 4.5 การตรวจสอบค่าดัชนีต่างๆเมื่อเทียบกับมาตรฐานของ CIE

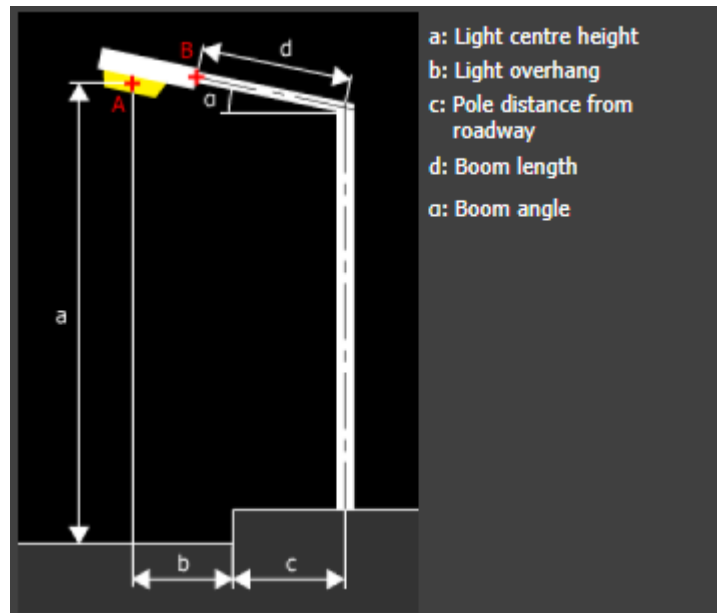
4.2.2 การใช้โปรแกรม DIALux ในการจำลองการส่องสว่างของหลอดไฟ

การใช้โปรแกรม DIALux ในการจำลองการส่องสว่างของหลอดไฟของถนนแต่ละ Class เพื่อหา illuminance ที่ถูกต้องตามมาตรฐาน CIE 140 [32] ซึ่งจากการจำลองการส่องสว่างนั้น จะใช้หลอด LED แทนที่หลอด HPS ที่ใช้อย่างแพร่หลายอยู่ในปัจจุบัน ที่โดยหลอดไฟ LED แบบไฟถนน 125 W, 250 W และ 400 W ตามลำดับ โดยจะปรับเปลี่ยนไปตามประเภทของถนนว่ามีความกว้างมากน้อยเพียงใดและมีช่องว่างจำนวนเท่าใดตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง [33] โดยจะทำการจำลองเพื่อหาว่าสามารถทำการลดความสว่างของหลอด LED ได้มากน้อยเพียงใดเพื่อจะให้ได้สามารถลดการใช้พลังงานได้มากที่สุดแต่ยังอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดไว้รวมถึงยังสามารถใช้ถนนได้ตามปกติ ไม่มีปัญหาแสงน้อย เป็นค่าแรงดันเป้าหมายที่จะลดแสงสว่างของหลอดไฟลง โดยจะทำให้สามารถประหยัดไฟได้มากที่สุดแต่ยังคงมีแสงสว่างมากพอให้ผู้ขับขี่ยานพาหนะใช้งานได้แม้ว่าจะเกิดปัญหาสิ่งใดขึ้นกับระบบ

การจำลองแบบนี้จะใช้มาตรฐานการติดตั้งโคมไฟถนนและเกณฑ์สมรรถนะของระบบส่องสว่างตามการไฟฟ้านครหลวงกำหนด โดยจะมีการแบ่งตามขนาดความสว่างของหลอดไฟที่ติดตั้ง โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เกณฑ์ที่กำหนดไว้เปรียบเทียบกับ Class ของถนนที่ถูกกำหนดโดย CIE 115 เพื่อทำการจำลองการส่องสว่างของไฟฟ้าแสงสว่างถนน ซึ่ง จะใช้เกณฑ์การติดตั้งโคมไฟถนนแบบหลอด HPS 400 W กับถนนแบบ M Class เกณฑ์การติดตั้งโคมไฟถนนแบบหลอด HPS 250 W กับถนนแบบ P Class และเกณฑ์การติดตั้งโคมไฟถนนแบบหลอด HQV 125 W กับถนนแบบ C Class ซึ่งจะมีค่าดัชนีที่สำคัญในการจำลองแบบดังตารางที่ 3.1 ถึง 3.3 โดยถนนทุก Class จะทำการจำลองแบบ Oneside arrangement ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 และค่าดัชนีต่างใน DIALux จะถูกกำหนดได้ตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 4.6 Oneside Arrangement



รูปที่ 4.7 การกำหนดค่าตัวชี้ต่างๆใน DIALux

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการติดตั้งโคมไฟถนน HPS 400 W

Site Parameters		
Roadway Data	Roadway Width	12 m
	Number of Lanes, total	3
	Posted Speed Limit	< 60 kmph
Light Pole Data	Luminaire Mounting Height	8.5 to 9.0 m
	Boom Length, horizontal	1.7 m
	Boom Angle	0 to 15 degree
	Distance Pole to Roadway	0.2 m
	Luminaires per Pole	1
	In-line pole spacing (one pole cycle)	40 m
	Layout	One side

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการติดตั้งโคมไฟถนน HPS 250 W

Site Parameters		
Roadway Data	Roadway Width	8 m
	Number of Lanes, total	2
	Posted Speed Limit	< 60 kmph
Light Pole Data	Luminaire Mounting Height	8.5 to 9.0 m
	Boom Length, horizontal	1.7 m
	Boom Angle	0 to 15 degree
	Distance Pole to Roadway	0.2 m
	Luminaires per Pole	1
	In-line pole spacing (one pole cycle)	40 m
	Layout	One side

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการติดตั้งโคมไฟถนน HQV 125 W

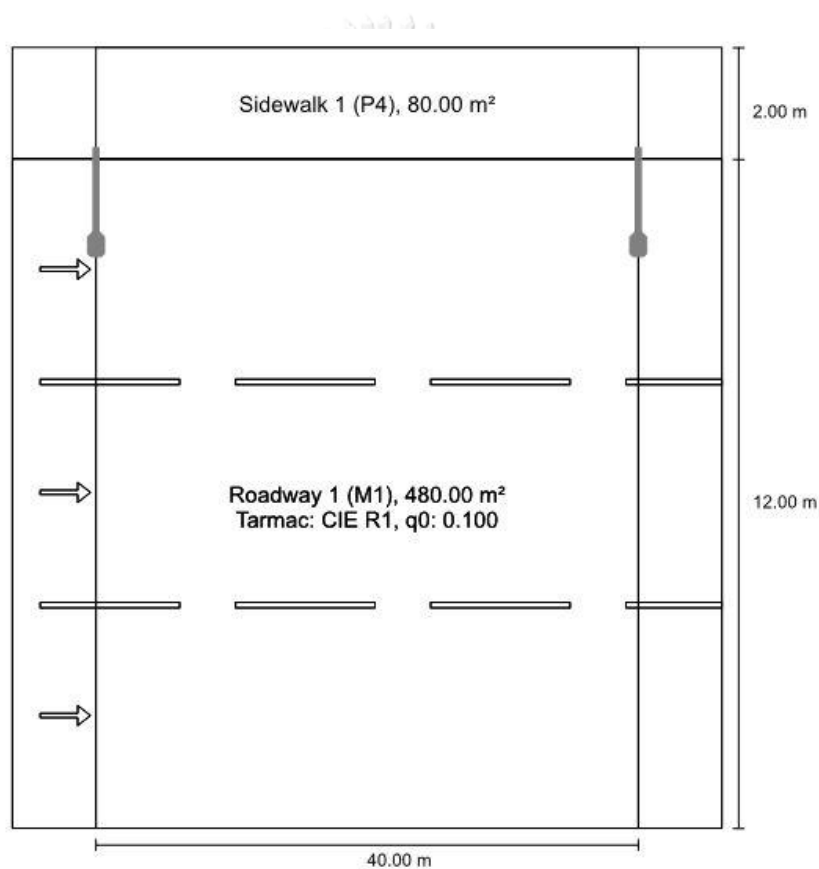
Site Parameters		
Roadway Data	Roadway Width	6 m
	Number of Lanes, total	2
	Posted Speed Limit	< 60 kmph
Light Pole Data	Luminaire Mounting Height	7.3 to 7.8 m
	Boom Length, horizontal	0.4 m
	Boom Angle	0 to 15 degree
	Distance Pole to Roadway	0.2 m
	Luminaires per Pole	1
	In-line pole spacing (one pole cycle)	32 m
	Layout	One side

4.2.3 ผลของการจำลองแบบด้วยโปรแกรม DIALux

การจำลองแบบด้วยโปรแกรม DIALux นั้นได้ทำการจำลองผลของถนนแต่ละชนิด ได้แก่ M Class, P Class และ C Class และแบ่งตามผิวถนนโดยได้ทำการจำลองผิวถนน R1 ซึ่งเป็นผิวถนนคอนกรีต และ R3 ซึ่งเป็นผิวถนนยางมะตอย โดยได้ผลการจำลองแบบดังต่อไปนี้

4.2.3.1 M Class

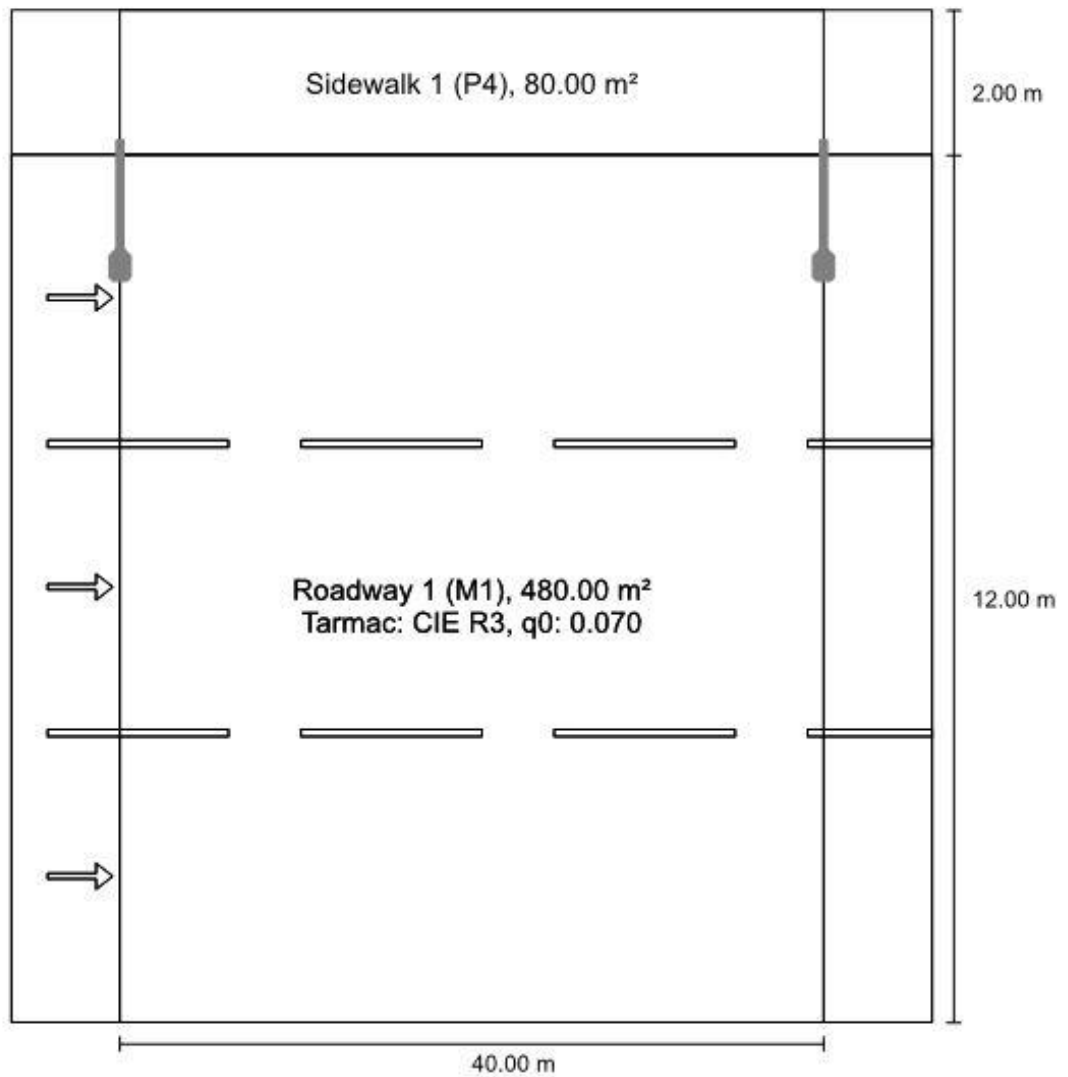
การจำลองแบบถนน M Class นั้นจะใช้หลอดไฟ LED 300 W ที่มี Lamp Flux เท่ากับหลอด HPS 400W คือ 40800 Lumens และ Luminous Efficacy ที่ 121 lm/W



Roadway 1 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	U _o ≥ 0.40	U _I ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 2.09	✓ 0.50	✓ 0.73	✓ 6	✓ 0.62

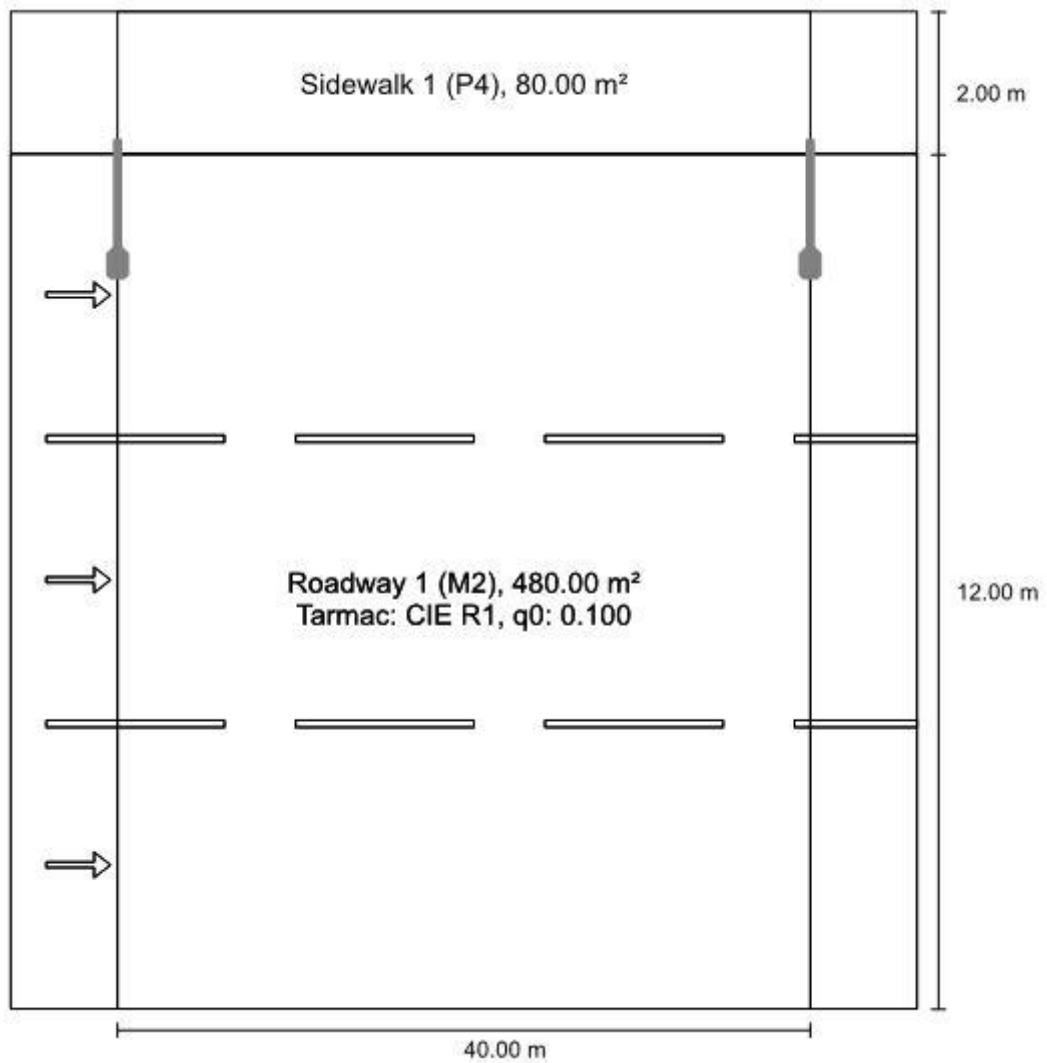
รูปที่ 4.8 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M1 ผิวถนน R1



Roadway 1 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 2.03	✓ 0.52	✓ 0.89	✓ 10	✓ 0.62

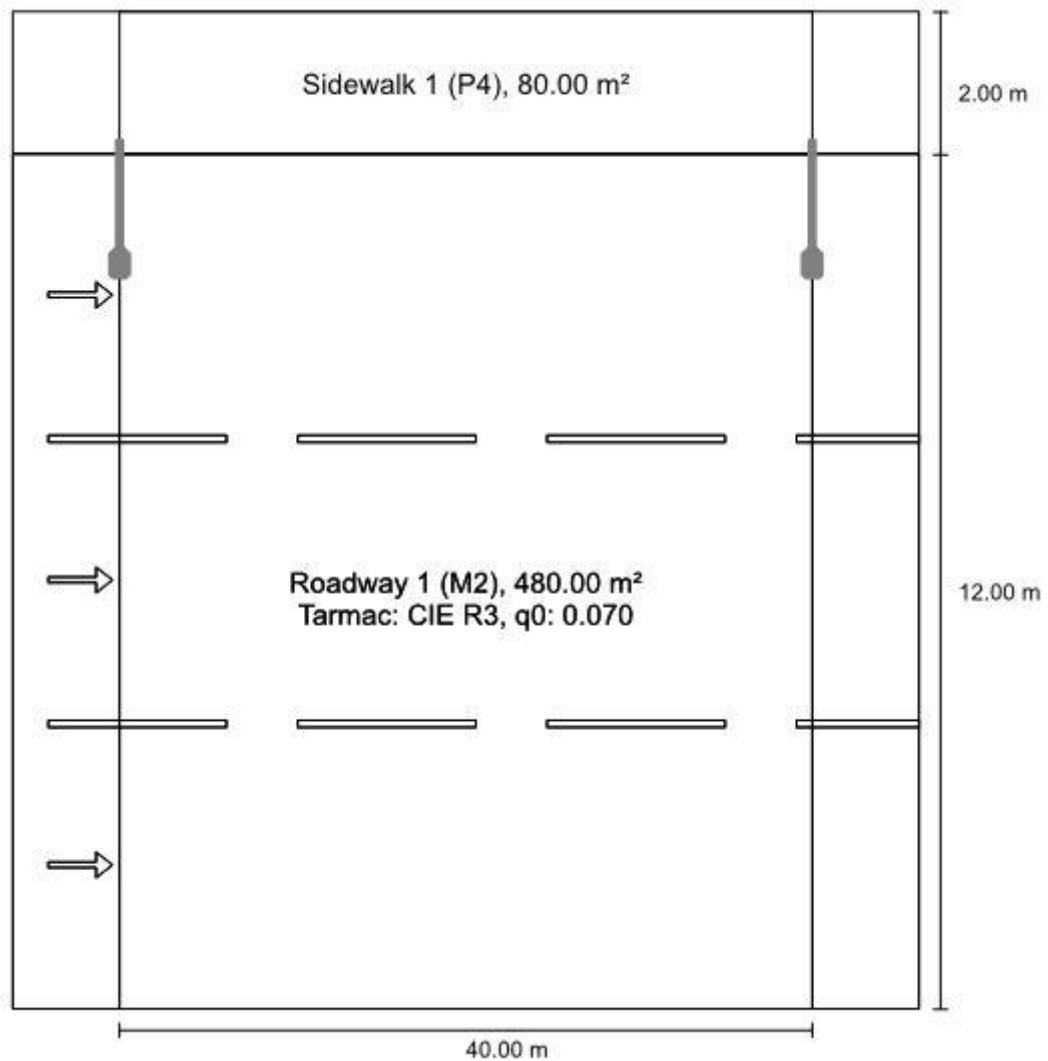
รูปที่ 4.9 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M1 ผิวถนน R3



Roadway 1 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	U_o ≥ 0.40	U_I ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 1.57	✓ 0.50	✓ 0.73	✓ 6	✓ 0.62

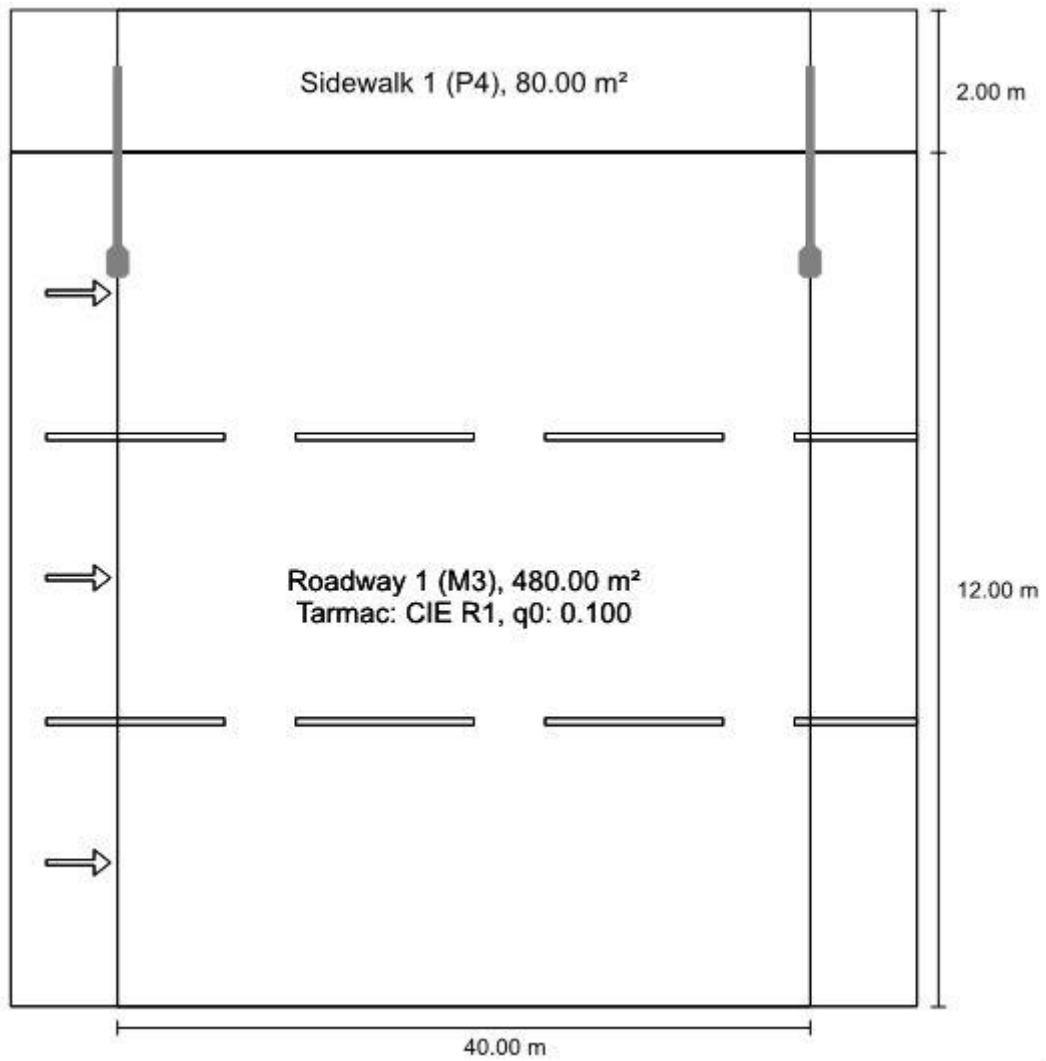
รูปที่ 4.10 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M2 ผิวถนน R1



Roadway 1 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	U_o ≥ 0.40	U_I ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 1.56	✓ 0.56	✓ 0.85	✓ 7	✓ 0.62

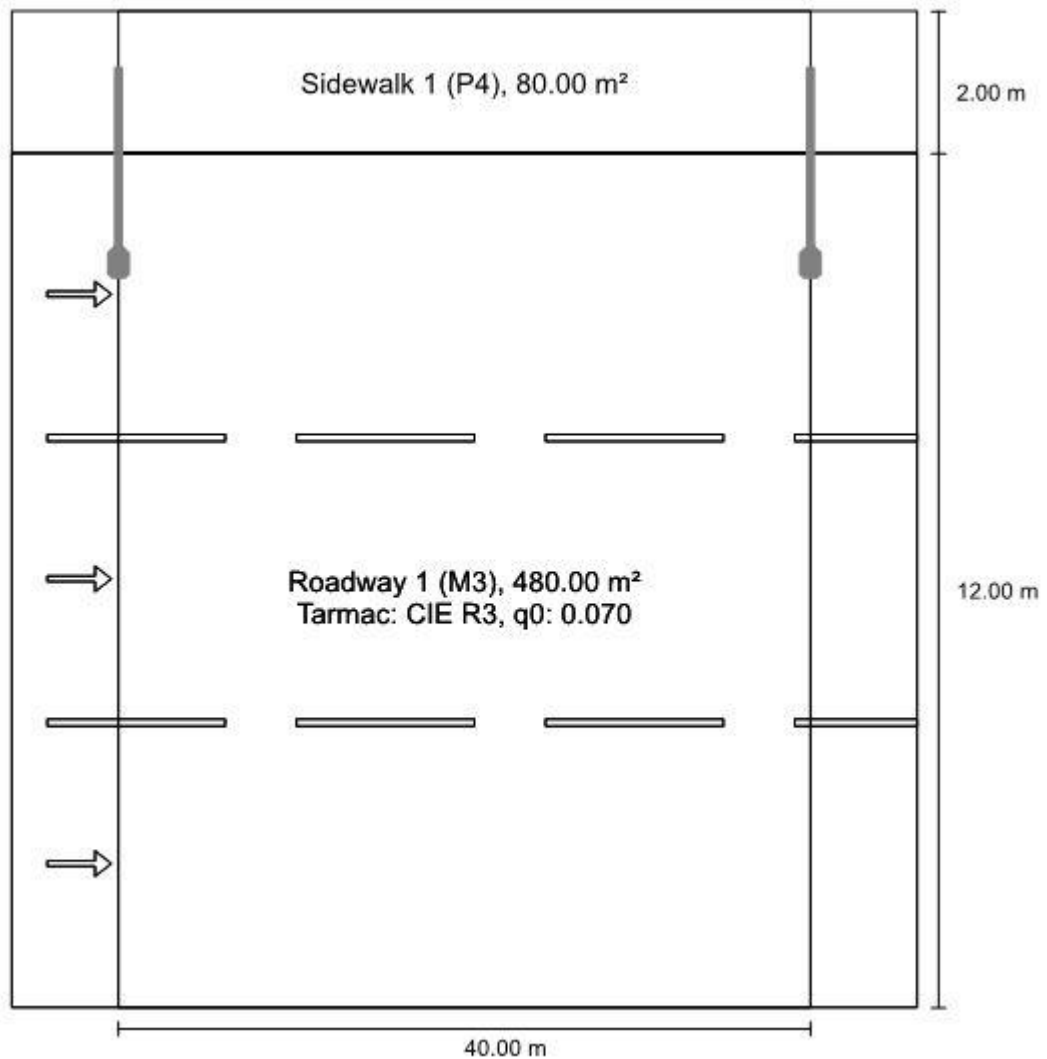
รูปที่ 4.11 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M2 ผิวถนน R3



Roadway 1 (M3)

Lm [cd/m²] ≥ 1.00	U_o ≥ 0.40	U_I ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 1.10	✓ 0.56	✓ 0.61	✓ 6	✓ 0.62

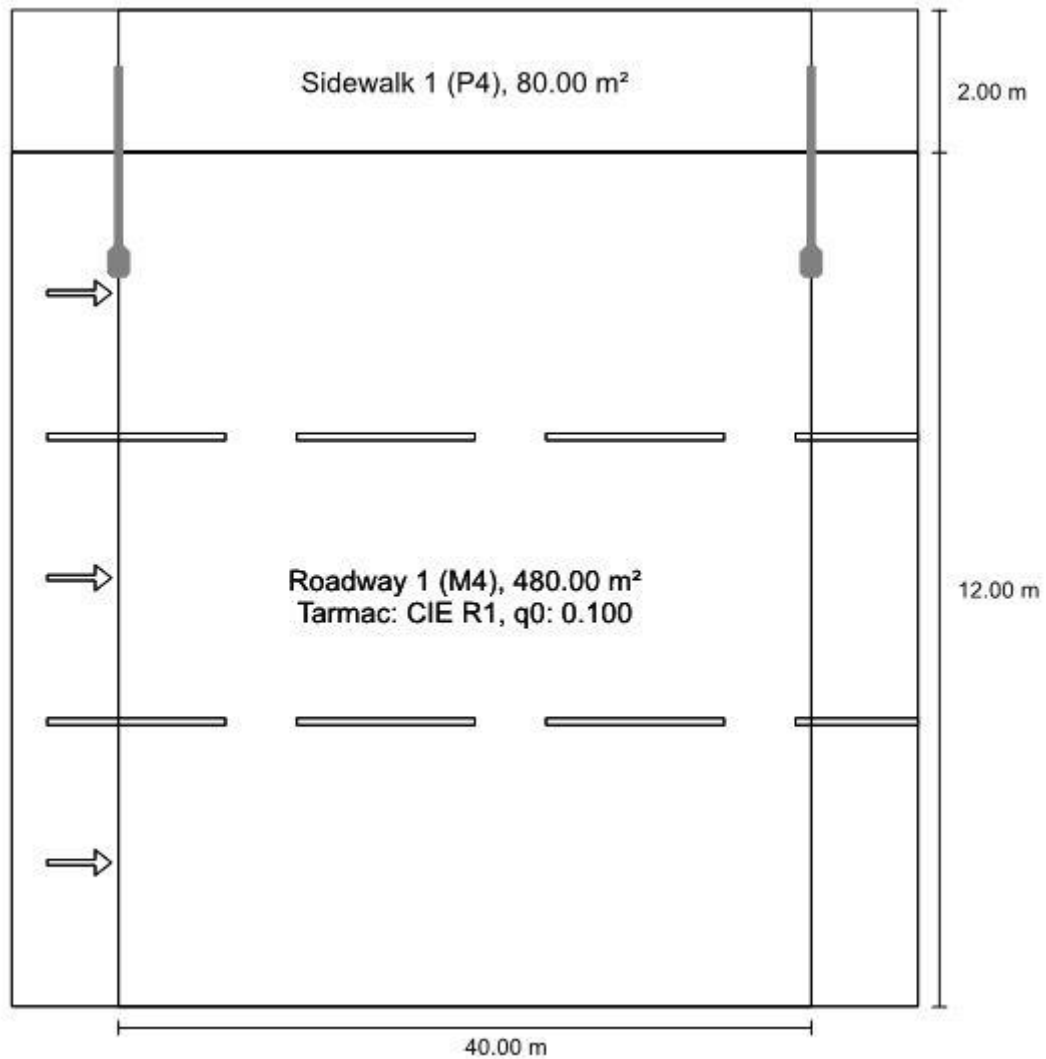
รูปที่ 4.12 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M3 ผิวถนน R1



Roadway 1 (M3)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.00	U _o ≥ 0.40	U _I ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 1.02	✓ 0.51	✓ 0.72	✓ 11	✓ 0.62

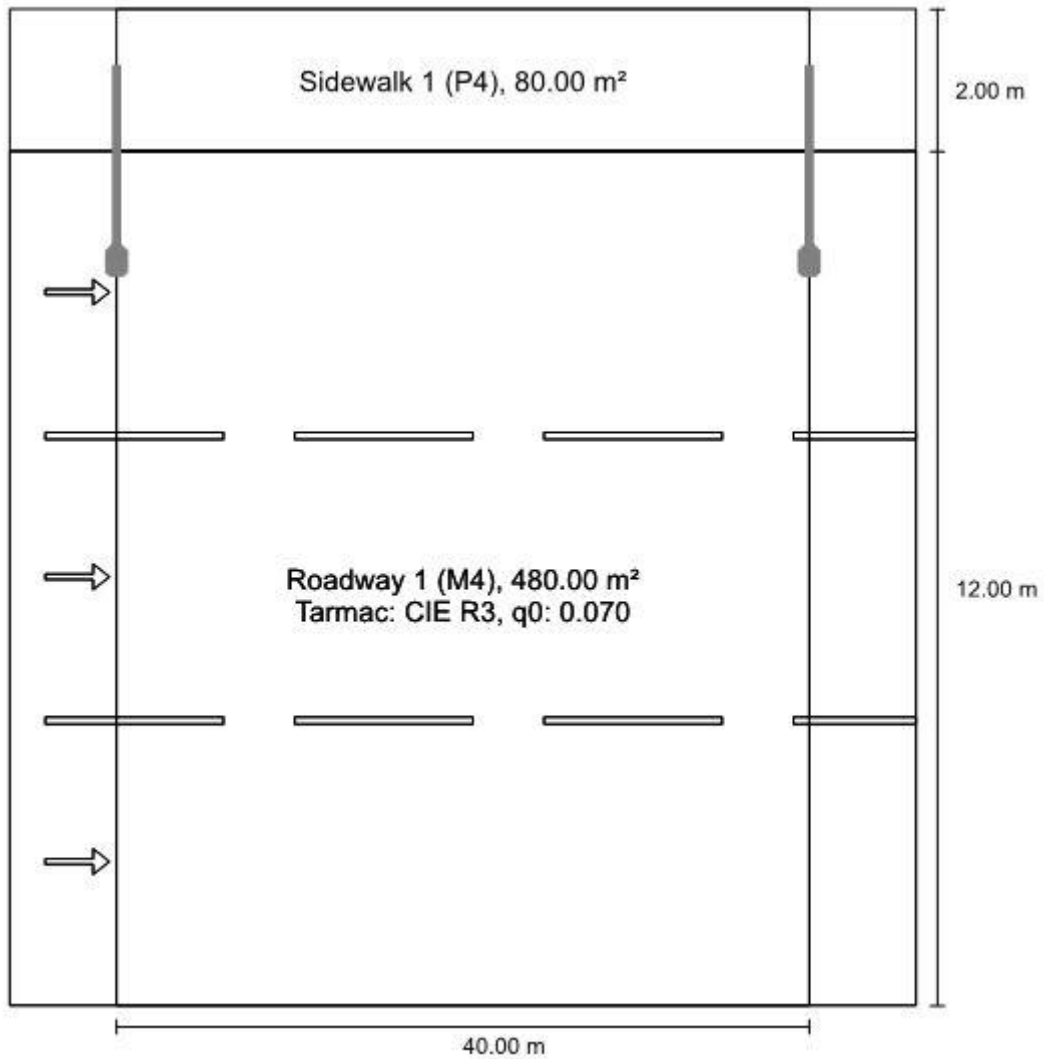
รูปที่ 4.13 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M3 ผิวถนน R3



Roadway 1 (M4)

Lm [cd/m²] ≥ 0.75	U_o ≥ 0.40	U_I ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 0.77	✓ 0.56	✓ 0.61	✓ 6	✓ 0.62

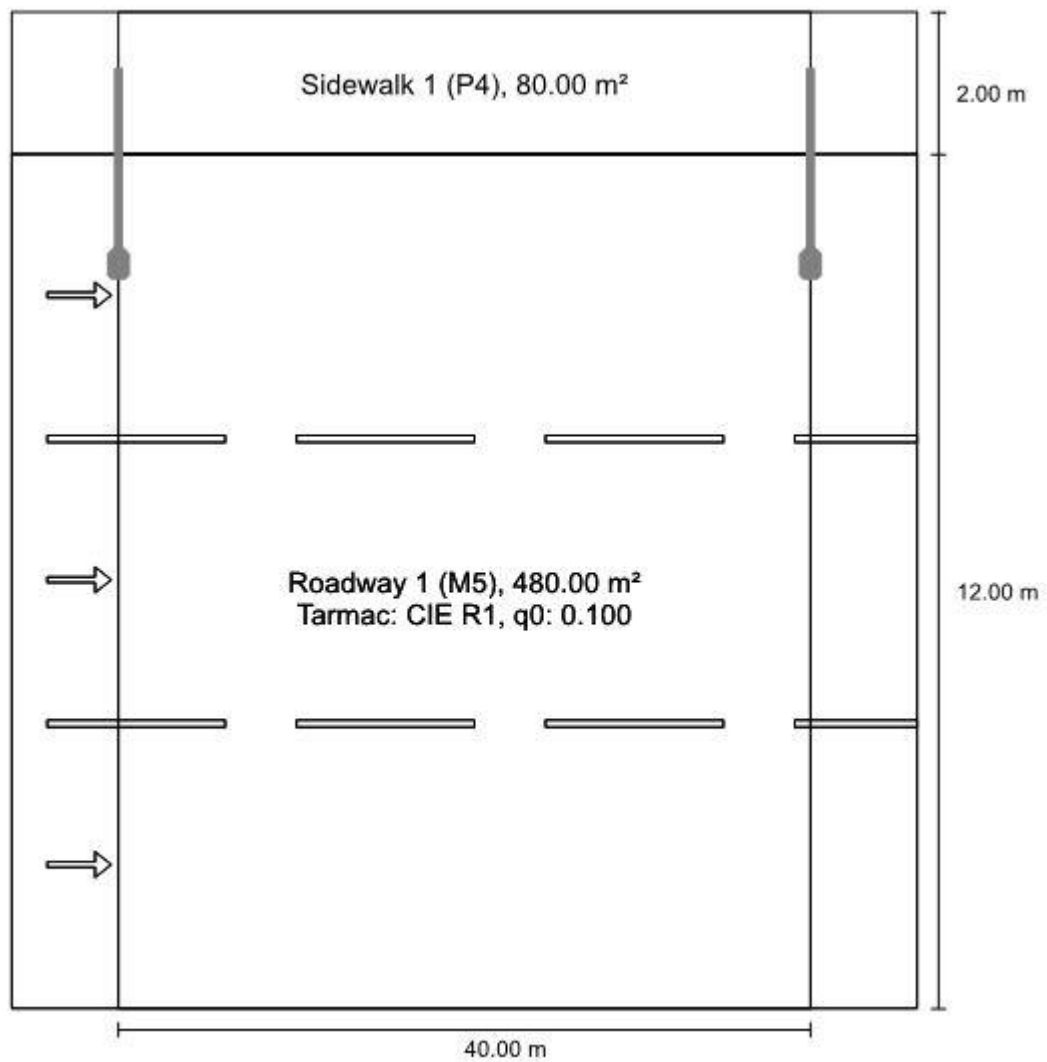
รูปที่ 4.14 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M4 ผิวถนน R1



Roadway 1 (M4)

Lm [cd/m ²] ≥ 0.75	U _o ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 0.76	✓ 0.47	✓ 0.65	✓ 11	✓ 0.62

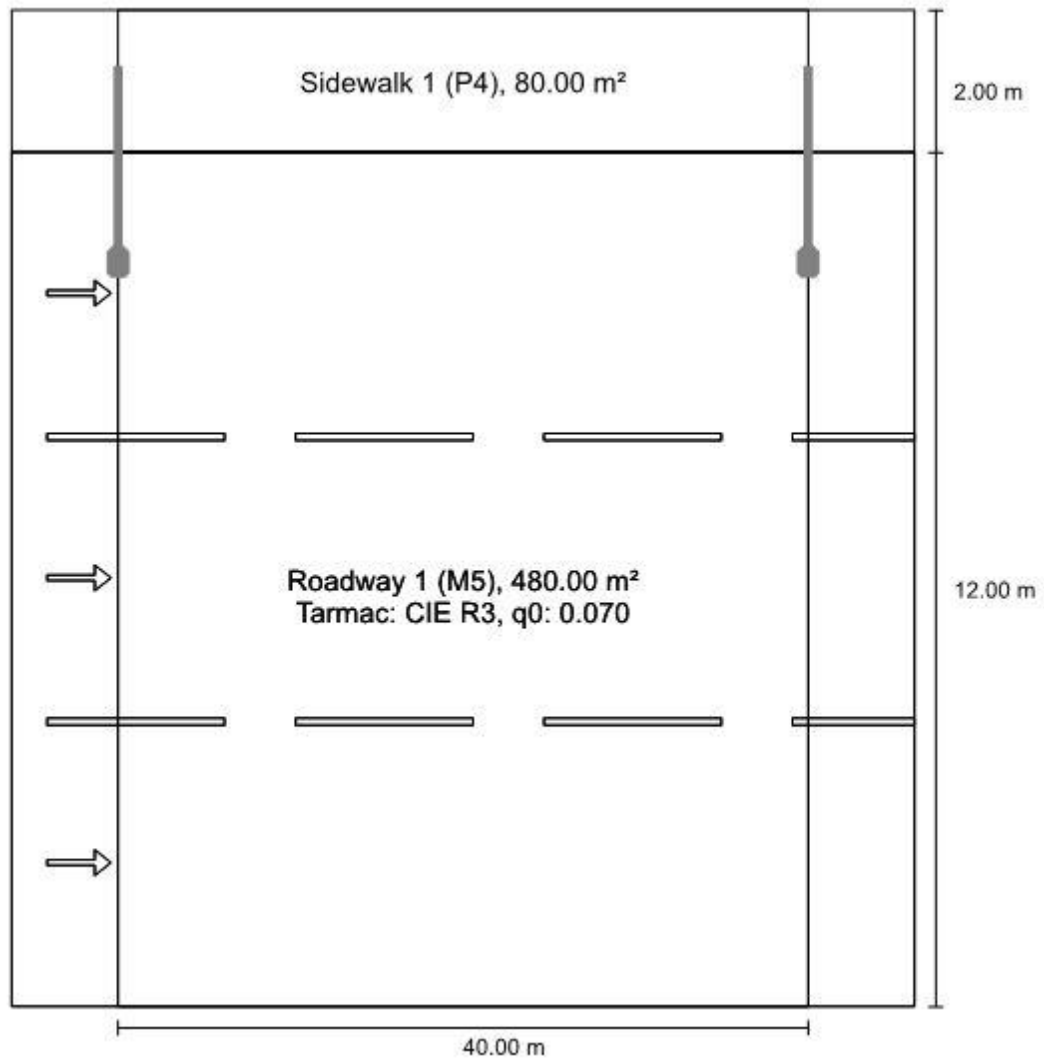
รูปที่ 4.15 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M4 ผิวถนน R3



Roadway 1 (M5)

Lm [cd/m ²] ≥ 0.50	Uo ≥ 0.35	UI ≥ 0.40	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 0.51	✓ 0.48	✓ 0.42	✓ 8	✓ 0.62

รูปที่ 4.16 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M5 ผิวถนน R1



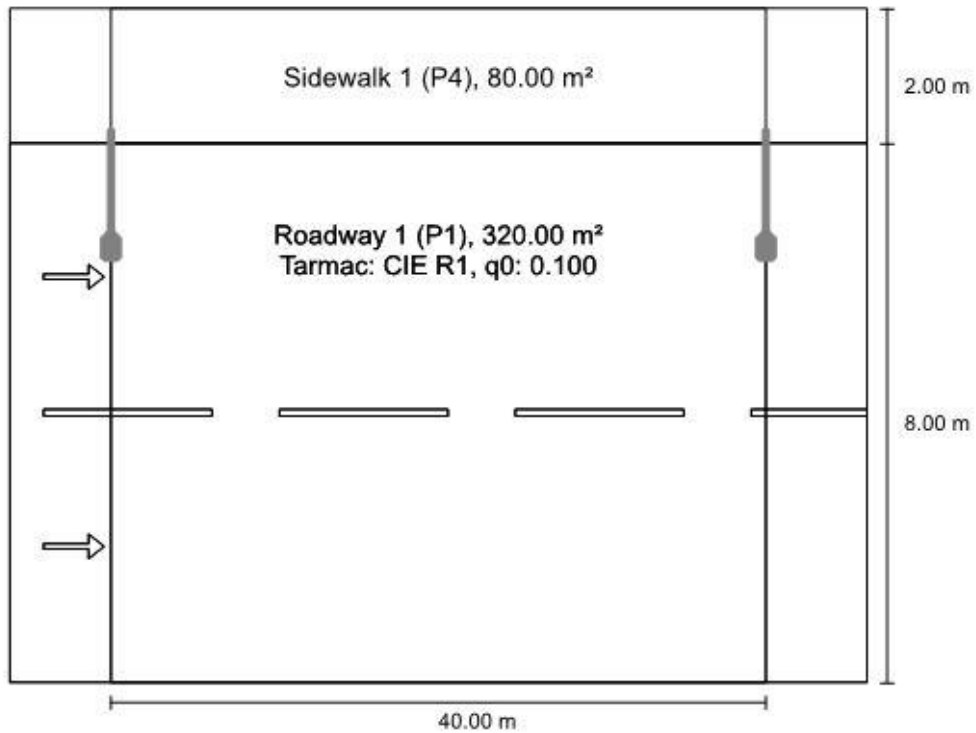
Roadway 1 (M5)

Lm [cd/m²] ≥ 0.50	Uo ≥ 0.35	UI ≥ 0.40	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 0.50	✓ 0.35	✓ 0.44	✓ 12	✓ 0.62

รูปที่ 4.17 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด M5 ผิวถนน R3

4.2.3.2 P Class

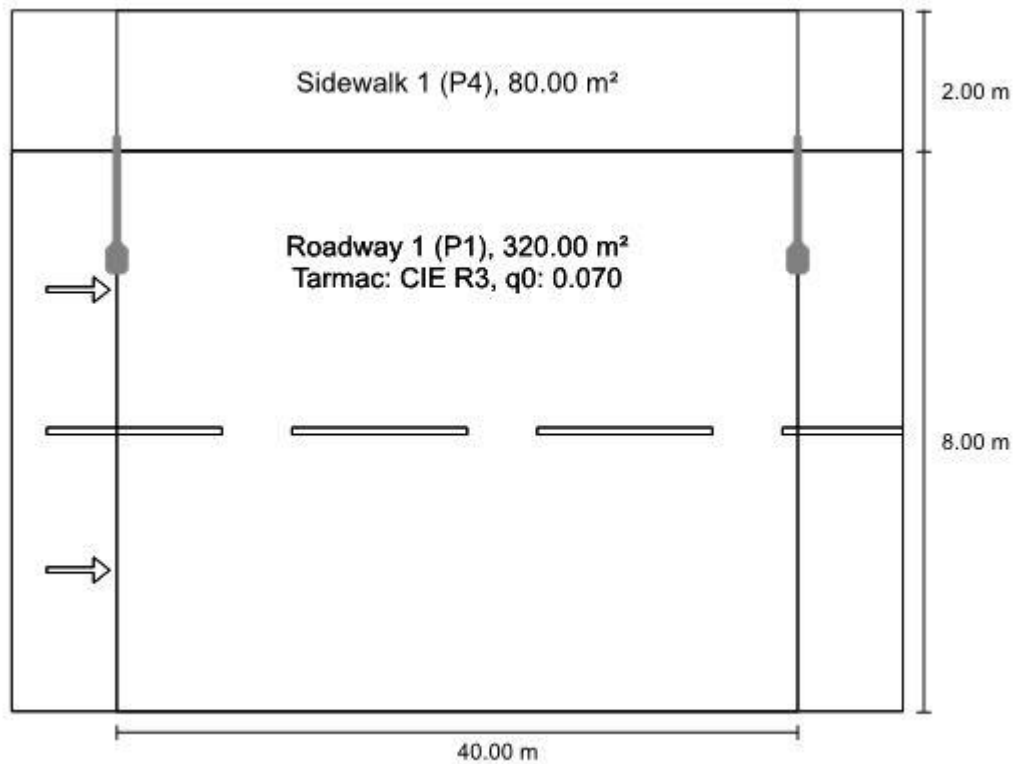
การจำลองแบบถนน M Class นั้นจะใช้หลอดไฟ LED 200 W ที่มี Lamp Flux เท่ากับหลอด HPS 250W คือ 30000 Lumens และ Luminous Efficacy ที่ 133 lm/W



Roadway 1 (P1)

Em [lx] ≥ 15.00 ≤ 22.50	Emin [lx] ≥ 3.00	Emin (v) ≥ 5.00	TI [%] ≤ 20	Emin (sc) ≥ 5.00
✓ 17.41	✓ 15.10	✓ 7.68	✓ 4	✓ 5.11

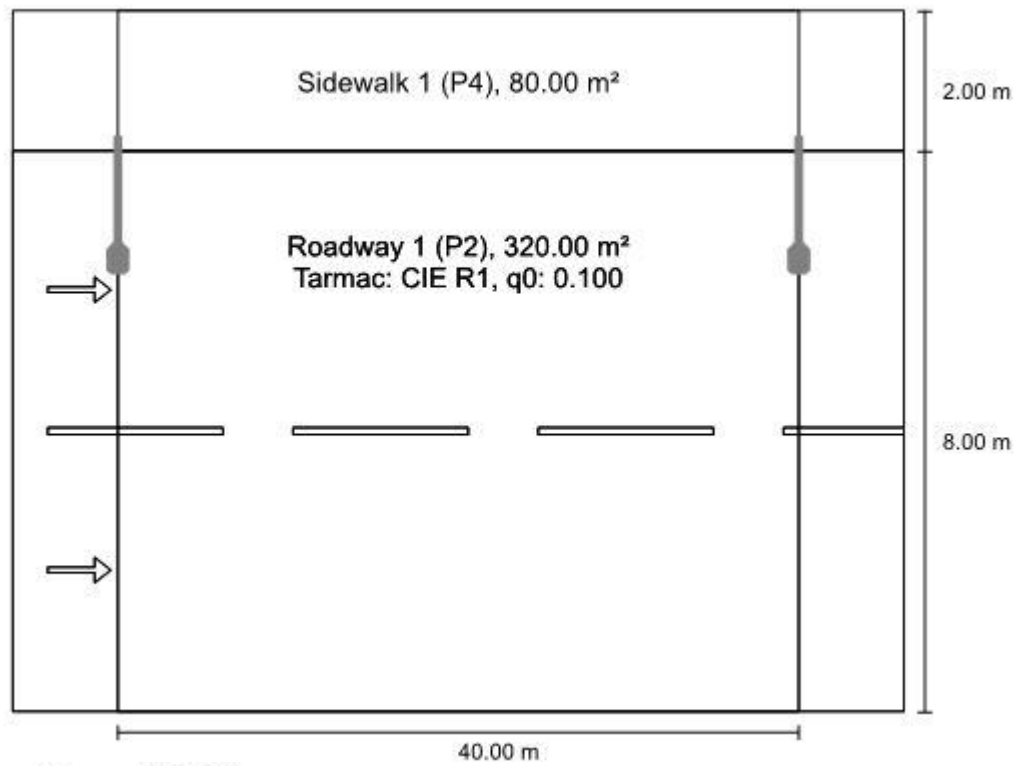
รูปที่ 4.18 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P1 ผิวถนน R1



Roadway 1 (P1)

Em [lx] ≥ 15.00 ≤ 22.50	Emin [lx] ≥ 3.00	Emin (v) ≥ 5.00	TI [%] ≤ 20	Emin (sc) ≥ 5.00
✓ 17.41	✓ 15.10	✓ 7.68	✓ 6	✓ 5.11

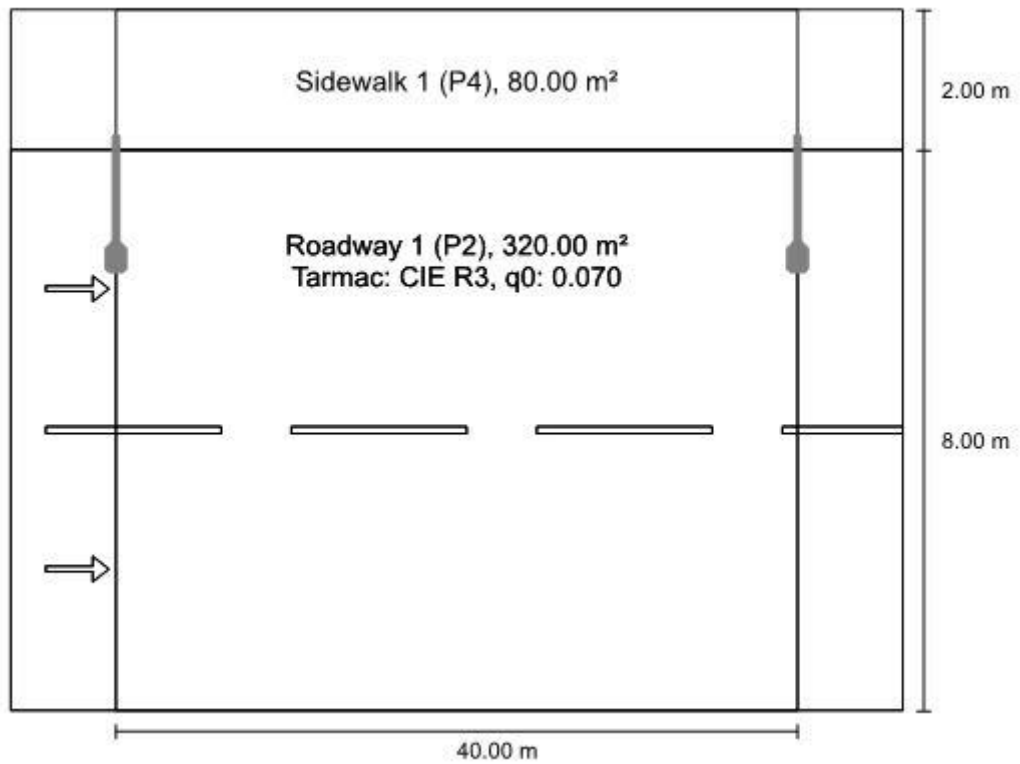
รูปที่ 4.19 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P1 ผิวถนน R3



Roadway 1 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00	Emin (v) ≥ 3.00	TI [%] ≤ 25	Emin (sc) ≥ 2.00
✓ 14.51	✓ 12.59	✓ 6.40	✓ 6	✓ 4.26

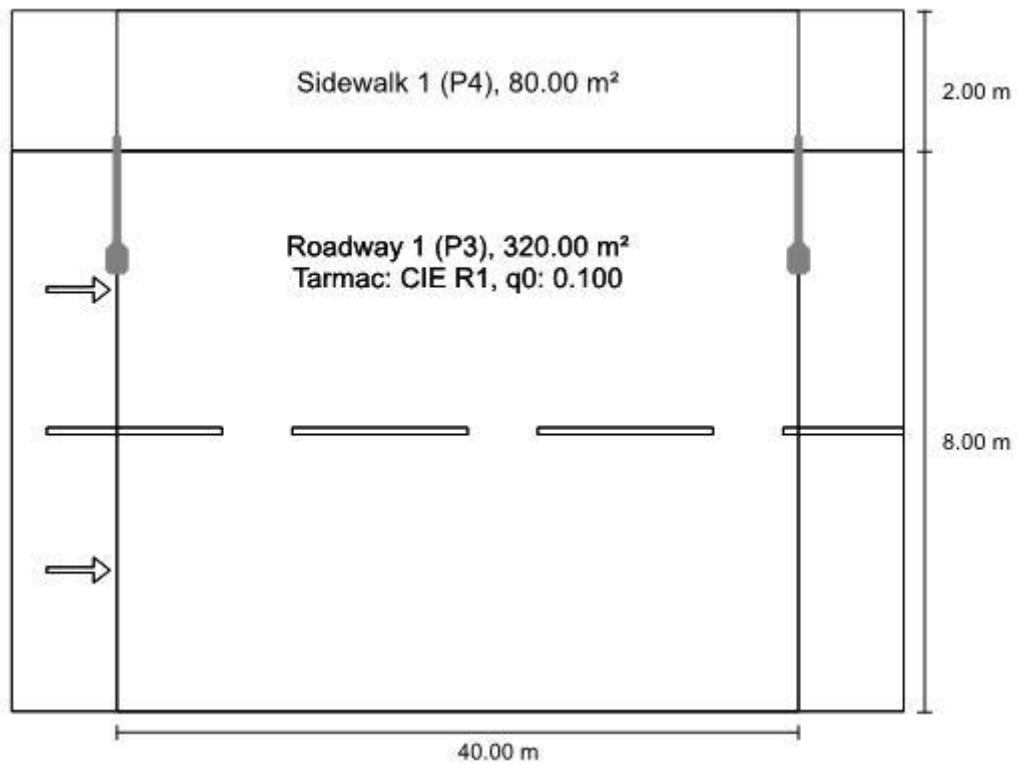
รูปที่ 4.20 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P2 ผิวถนน R1



Roadway 1 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00	Emin (v) ≥ 3.00	TI [%] ≤ 25	Emin (sc) ≥ 2.00
✓ 14.51	✓ 12.59	✓ 6.40	✓ 6	✓ 4.26

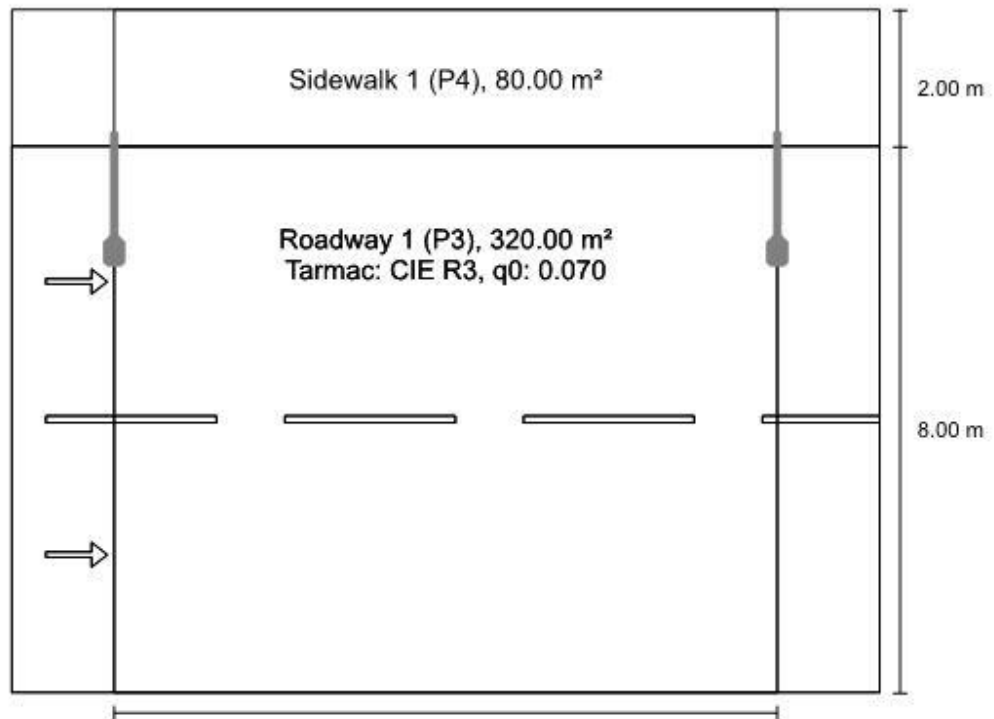
รูปที่ 4.21 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P2 ผิวถนน R3



Roadway 1 (P3)

Em [lx] ≥ 7.50 ≤ 11.25	Emin [lx] ≥ 1.50	Emin (v) ≥ 2.50	Emin (sc) ≥ 1.50	TI [%]
✓ 8.06	✓ 6.13	✓ 2.51	✓ 1.72	✓ 5

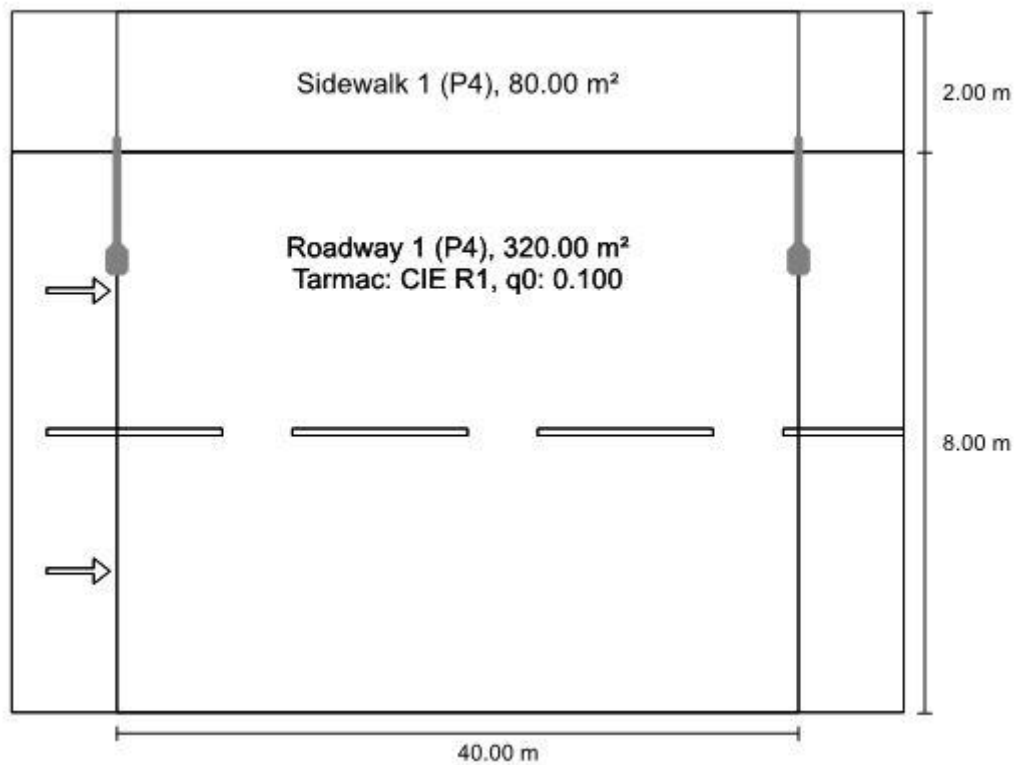
รูปที่ 4.22 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P3 ผิวถนน R1



Roadway 1 (P3)

Em [lx] ≥ 7.50 ≤ 11.25	Emin [lx] ≥ 1.50	Emin (v) ≥ 2.50	Emin (sc) ≥ 1.50	TI [%]
✓ 8.06	✓ 6.13	✓ 2.51	✓ 1.72	✓ 6

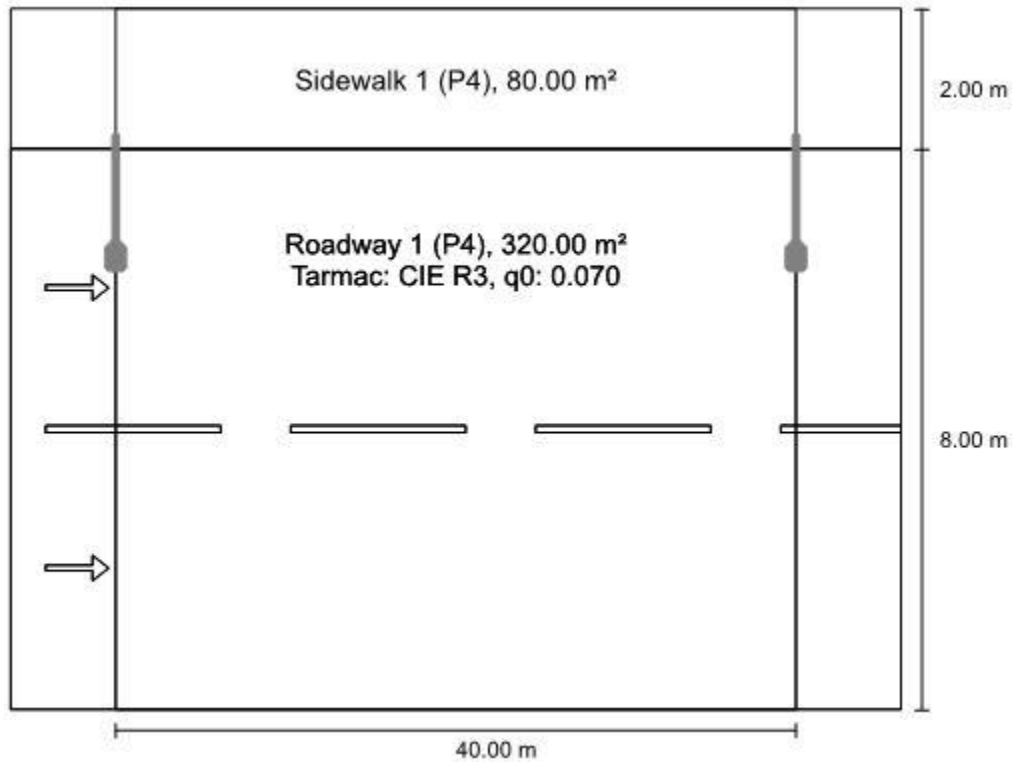
รูปที่ 4.23 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P3 ผิวถนน R3



Roadway 1 (P4)

Em [lx] ≥ 5.00 ≤ 7.50	Emin [lx] ≥ 1.00	Emin (v) ≥ 1.50	TI [%] ≤ 30	Emin (sc) ≥ 1.00
✓ 5.80	✓ 5.03	✓ 2.56	✓ 3	✓ 1.70

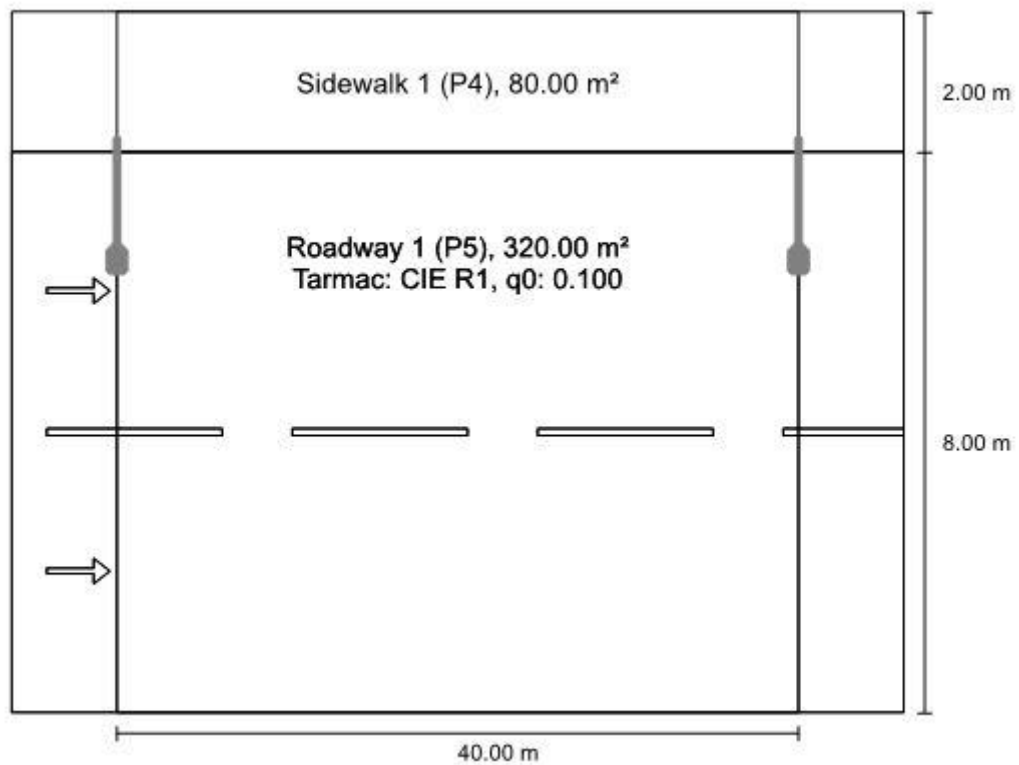
รูปที่ 4.24 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P4 ผิวถนน R1



Roadway 1 (P4)

Em [lx] ≥ 5.00 ≤ 7.50	Emin [lx] ≥ 1.00	Emin (v) ≥ 1.50	TI [%] ≤ 30	Emin (sc) ≥ 1.00
✓ 5.80	✓ 5.03	✓ 2.56	✓ 5	✓ 1.70

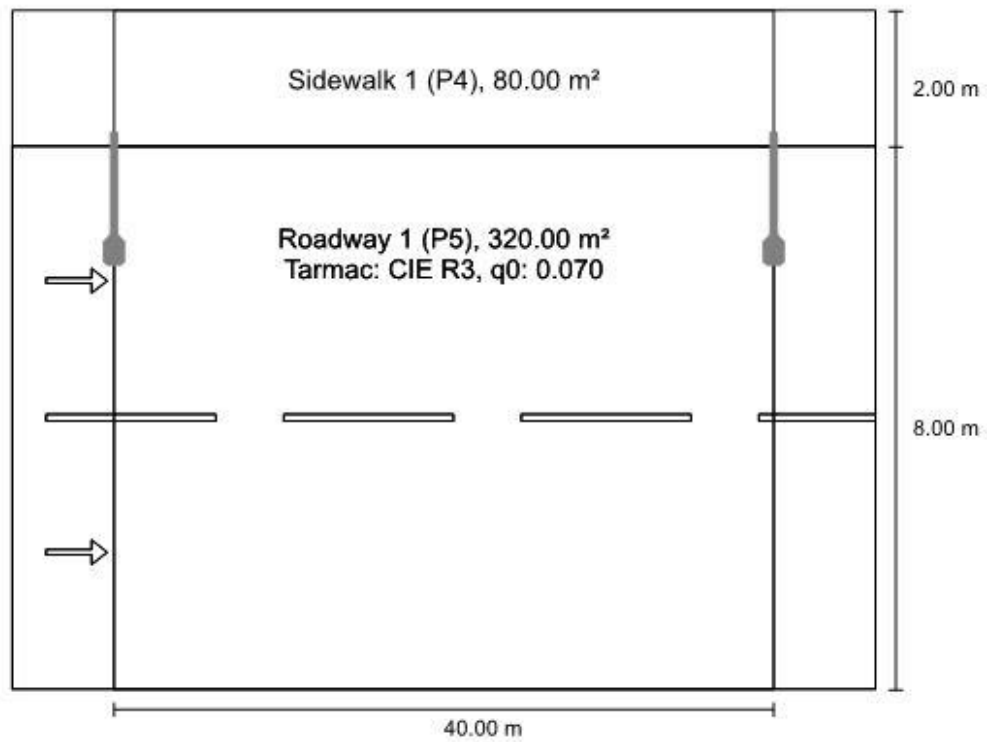
รูปที่ 4.25 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P4 ผิวถนน R3



Roadway 1 (P5)

Em [lx] ≥ 3.00 ≤ 4.50	Emin [lx] ≥ 0.60	Emin (v) ≥ 1.00	Emin (sc) ≥ 0.60	TI [%]
✓ 3.22	✓ 2.45	✓ 1.01	✓ 0.69	✓ 4

รูปที่ 4.26 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P5 ผิวถนน R1



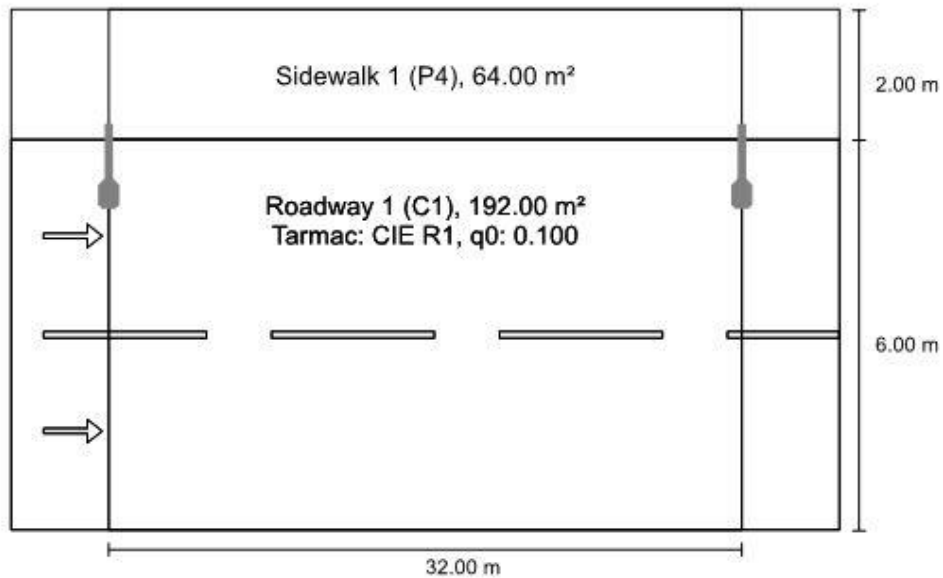
Roadway 1 (P5)

Em [lx] ≥ 3.00 ≤ 4.50	Emin [lx] ≥ 0.60	Emin (v) ≥ 1.00	Emin (sc) ≥ 0.60	TI [%]
✓ 3.22	✓ 2.45	✓ 1.01	✓ 0.69	✓ 5

รูปที่ 4.27 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด P5 ผิวถนน R3

4.2.3.3 C Class

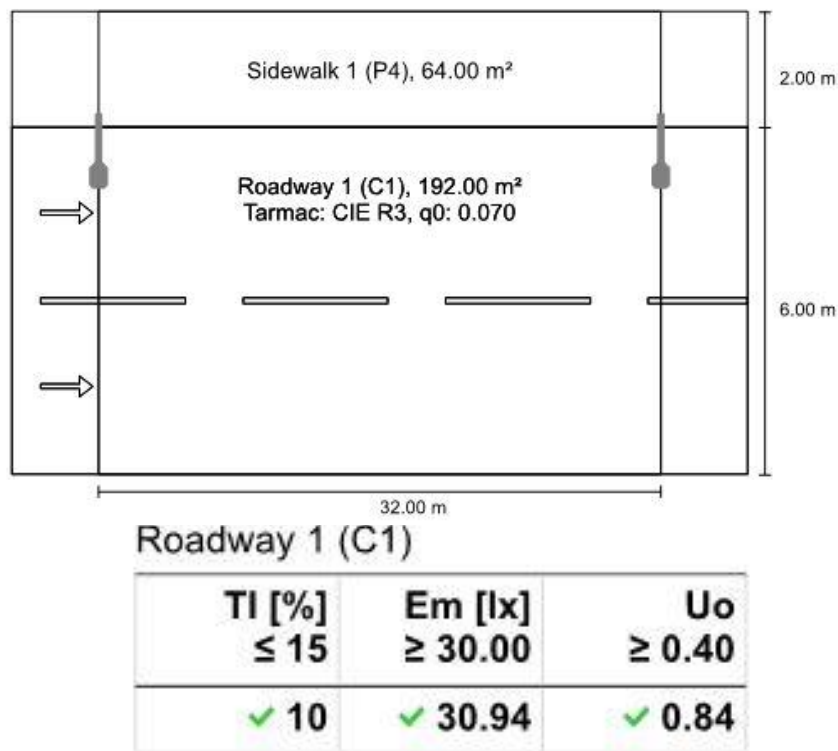
การจำลองแบบถนน M Class นั้นจะใช้หลอดไฟ LED 125 W ที่มี Lamp Flux เท่ากับหลอด HQV 125W คือ 14000 Lumens และ Luminous Efficacy ที่ 113 lm/W



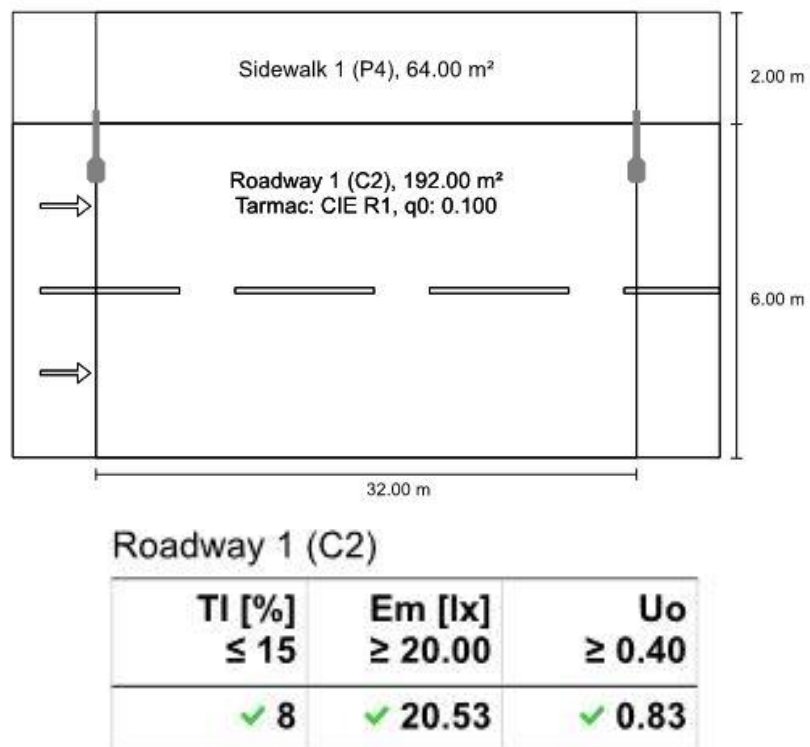
Roadway 1 (C1)

TI [%]	Em [lx]	U _o
≤ 15	≥ 30.00	≥ 0.40
✓ 8	✓ 30.94	✓ 0.84

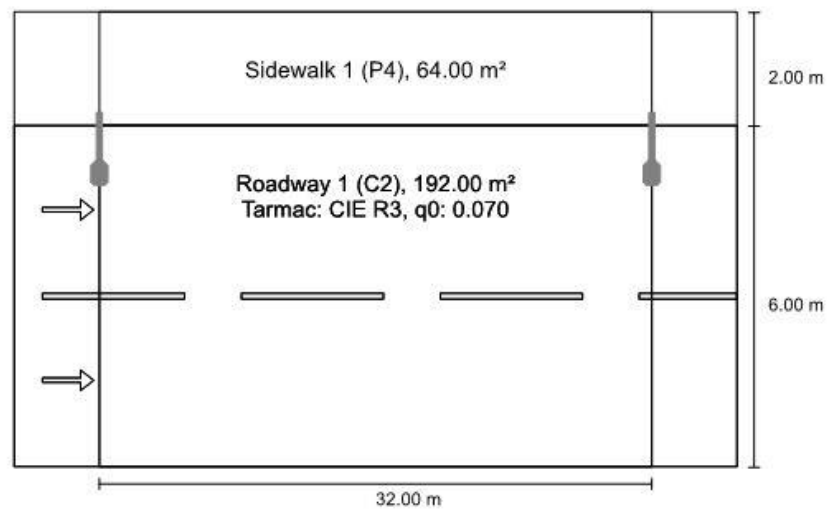
รูปที่ 4.28 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C1 ผิวถนน R1



รูปที่ 4.29 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C1 ผิวถนน R3



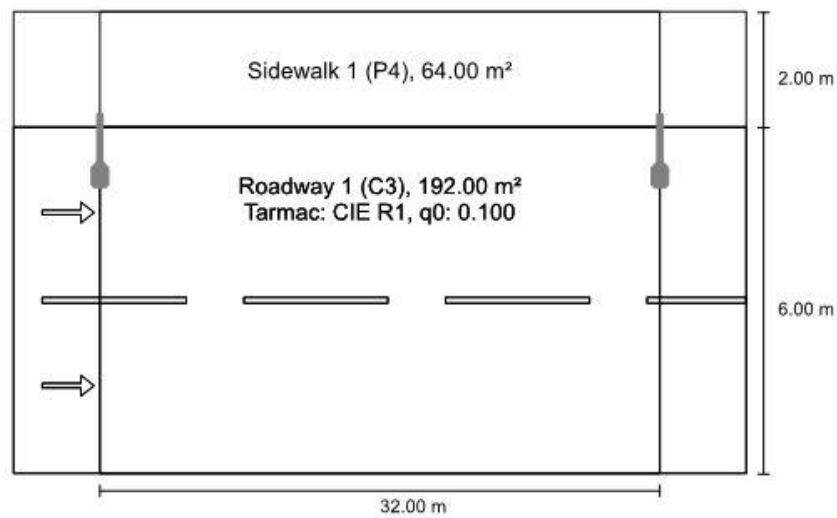
รูปที่ 4.30 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C2 ผิวถนน R1



Roadway 1 (C2)

TI [%]	Em [lx]	Uo
≤ 15	≥ 20.00	≥ 0.40
✓ 10	✓ 20.53	✓ 0.83

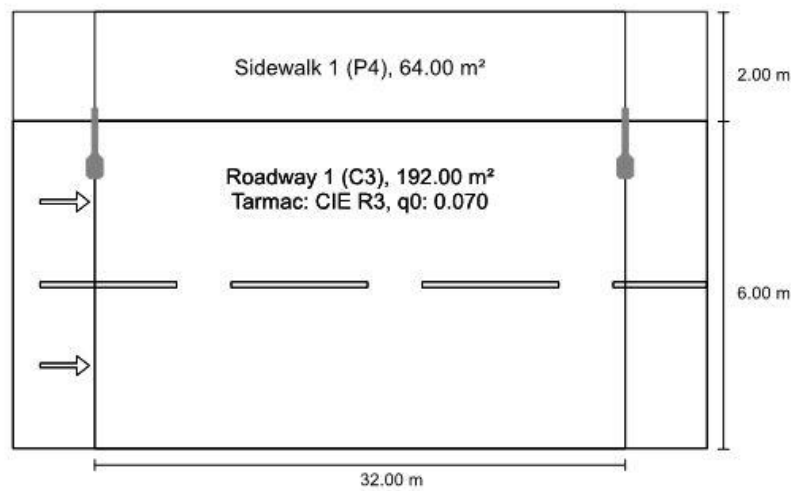
รูปที่ 4.31 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C2 ผิวถนน R3



Roadway 1 (C3)

TI [%]	Em [lx]	Uo
≤ 20	≥ 15.00	≥ 0.40
✓ 9	✓ 15.15	✓ 0.81

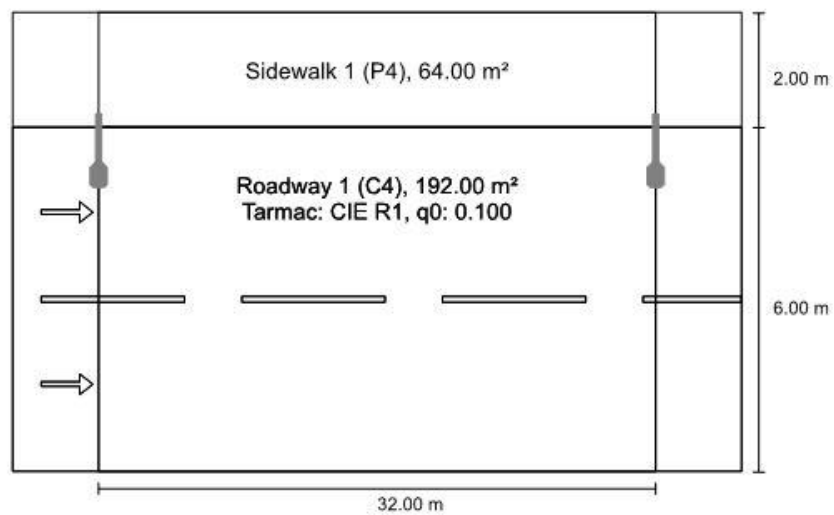
รูปที่ 4.32 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C3 ผิวถนน R1



Roadway 1 (C3)

TI [%]	Em [lx]	U _o
≤ 20	≥ 15.00	≥ 0.40
✓ 11	✓ 15.15	✓ 0.81

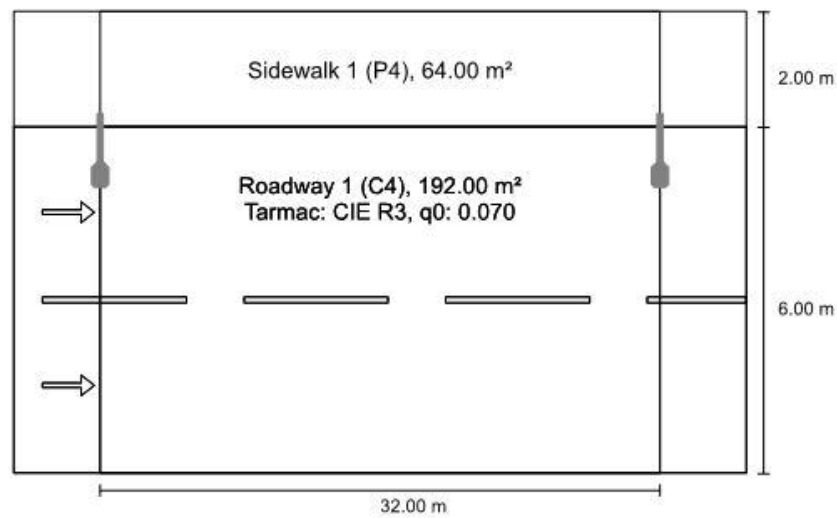
รูปที่ 4.33 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C3 ผิวถนน R3



Roadway 1 (C4)

TI [%]	Em [lx]	U _o
≤ 20	≥ 10.00	≥ 0.40
✓ 11	✓ 10.38	✓ 0.66

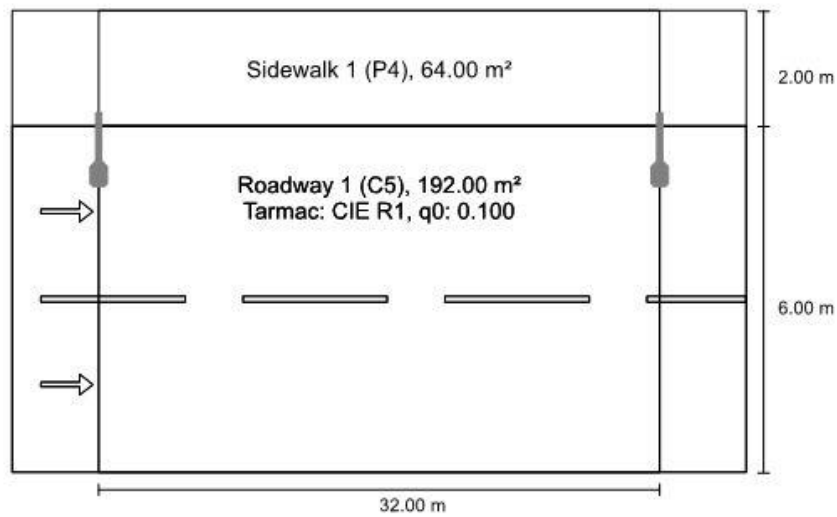
รูปที่ 4.34 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C4 ผิวถนน R1



Roadway 1 (C4)

TI [%]	Em [lx]	U _o
≤ 20	≥ 10.00	≥ 0.40
✓ 14	✓ 10.38	✓ 0.66

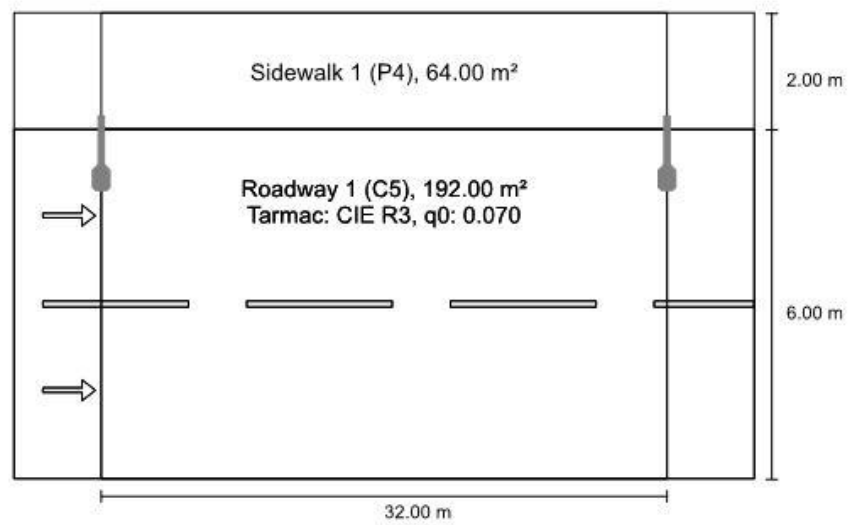
รูปที่ 4.35 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C4 ผิวถนน R3



Roadway 1 (C5)

TI [%]	Em [lx]	U _o
≤ 20	≥ 7.50	≥ 0.40
✓ 10	✓ 7.61	✓ 0.66

รูปที่ 4.36 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C5 ผิวถนน R1



Roadway 1 (C5)

TI [%]	Em [lx]	U _o
≤ 20	≥ 7.50	≥ 0.40
✓ 13	✓ 7.61	✓ 0.66

รูปที่ 4.37 การจำลองแบบถนนและการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของถนนชนิด C5 ผิวถนน R3

4.2.4 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบการส่องสว่างไฟถนนจาก DIALux

จากการจำลอง ได้ผลการจำลองว่าในแต่ละ Class ของถนนและผิวถนน ค่าการลดแสงสว่างให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้แตกต่างกัน ซึ่งจะได้ผลตามตารางที่ 3.1 โดยพลังงานที่หลอดไฟแต่ละหลอดใช้ของแต่ละผิวถนนจะคิดได้จาก Lamp Flux ที่ใช้ในการจำลองผิวถนนนั้นๆเมื่อเทียบกับ Luminous Efficacy ของหลอด จะได้เป็นสมการ คือ

$$\frac{\text{Lamp Flux Dimmed (lm)}}{\text{Luminous Efficacy (lm/W)}} = \text{Lamp Power Dimmed (W)} \dots\dots(3.1)$$

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองการลดความสว่างของแต่ละ Class ของถนนและผิวถนน

Class ของถนน	Lamp Flux เต็ม ของหลอด LED (lm)	Lamp Flux จากการจำลอง R1 (lm)	Lamp Power R1 (W)	Lamp Flux จากการจำลอง R3 (lm)	Lamp Power R3 (W)
M1	40000	24000	198.35	26700	220.66
M2		22100	182.64	24300	200.83
M3		21200	175.21	23200	191.74
M4		19100	157.85	20700	171.07
M5		17900	147.93	19300	159.50
P1	30000	17600	132.33	17600	132.33
P2		15200	114.29	15200	114.29
P3		14800	111.28	14800	111.28
P4		13500	101.50	13500	101.50
P5		12800	96.24	12800	96.24
C1	14000	11200	99.11	11200	99.11
C2		9800	86.73	9800	86.73
C3		7400	65.49	7400	65.49
C4		6800	60.18	6800	60.18
C5		5500	48.68	5500	48.68

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบการลดแสงสว่างของหลอดไฟเมื่อเทียบจากการจำลอง

Class ของถนน	Lamp Power เต็ม ของหลอด LED	Dimmed Lamp Power R1 (W)	Dimmed Percentage of Lamp Power R1 (%)	Dimmed Lamp Power R3 (W)	Dimmed Percentage of Lamp Power R1 (%)
M1	300 W	198.35	66.12	220.66	73.55
M2		182.64	60.88	200.83	66.94
M3		175.21	58.40	191.74	63.91
M4		157.85	52.62	171.07	57.02
M5		147.93	49.31	159.50	53.17
P1	200 W	132.33	66.16	132.33	66.16
P2		114.29	57.14	114.29	57.14
P3		111.28	55.64	111.28	55.64
P4		101.50	50.75	101.50	50.75
P5		96.24	48.12	96.24	48.12
C1	125 W	99.11	79.29	99.11	79.29
C2		86.73	69.38	86.73	69.38
C3		65.49	52.39	65.49	52.39
C4		60.18	48.14	60.18	48.14
C5		48.68	38.94	48.68	38.94

กราฟที่ 4.1 เปรียบเทียบการลดแสงสว่างของหลอดไฟในถนนแบบ M Class



กราฟที่ 4.2 เปรียบเทียบการลดแสงสว่างของหลอดไฟในถนนแบบ P Class



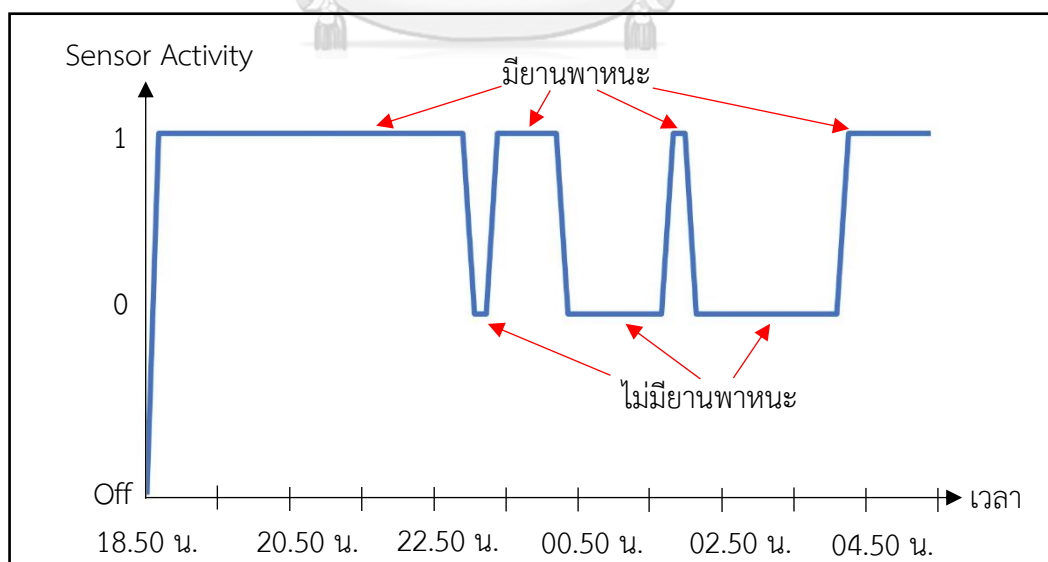
กราฟที่ 4.3 เปรียบเทียบการลดแสงสว่างของหลอดไฟในถนนแบบ C Class



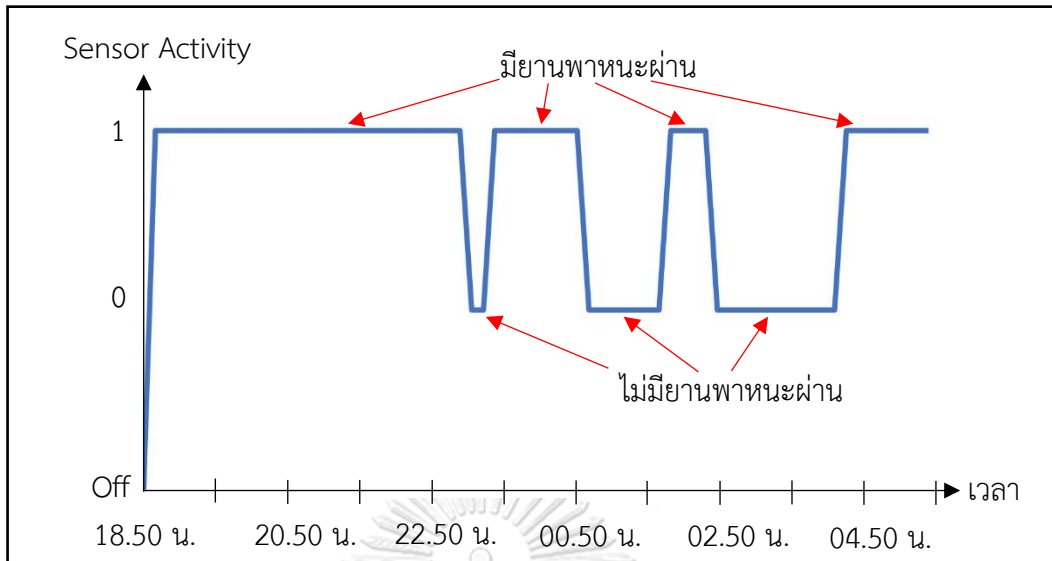
จากการจำลองแบบทั้งหมด ในส่วนของ M Class จะเห็นได้ว่าการปรับจากผิวถนน R1 ไปสู่ R3 นั้นมีผลต่อการจำลองแบบเป็นอย่างมาก เนื่องจากถนนมีความกว้างมากทำให้การกระจายแสงเป็นไปได้อย่างไม่ทั่วถึงถ้ามีความสว่างต่ำเกินไป ทำให้ค่าของความสว่างที่ต้องการมีความแตกต่างกันพอสมควรระหว่าง R1 และ R3 โดย R3 ซึ่งเป็นผิวถนนแบบขมดอยที่มีสีเข้มจะมีการสะท้อนของแสงน้อยกว่า R1 ซึ่งเป็นผิวคอนกรีตที่มีสีอ่อนเป็นอย่างมาก ในการจำลองนั้นการเพิ่มลดความสว่างของหลอดไฟจะมีผลต่อค่าความส่องสว่างและค่า Threshold Increment มากที่สุดและการกำหนด Boom Angle จะมีผลต่อค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) ทั้งโดยรวมและตามแนวยาว ในส่วนของ P Class และ C Class จะมีความแตกต่างระหว่าง R1 และ R3 น้อยกว่า M Class เนื่องจากถนนมีขนาดเล็ก สามารถทำการลดความสว่างของหลอดไฟโดยใช้ค่าเดียวกันได้ในผิวถนนทั้งสองแบบ เนื่องจากค่าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนผิวถนนนั้นจะมีแต่ค่า Threshold Increment เป็นหลัก

4.3 ข้อมูลของผู้ใช้รถใช้ถนนจริงในการทำการคำนวณค่าความประหยัดพลังงานของระบบ

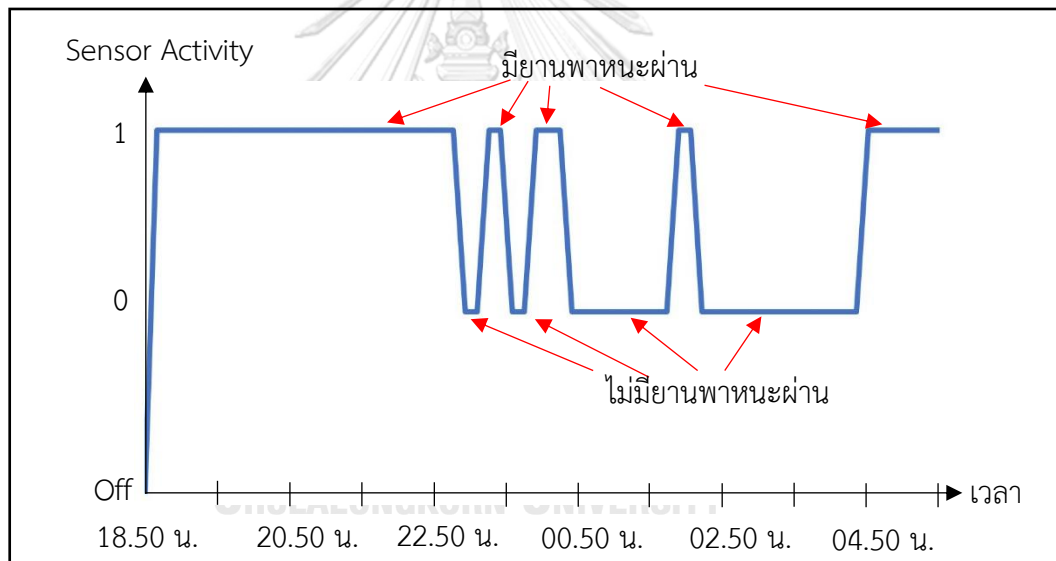
เนื่องจากการคำนวณพลังงานที่ใช้รวมของระบบจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาที่หลอดไฟนั้นทำงานจริง ในการทดสอบได้ทำการทดสอบโดยใช้ข้อมูลของผู้ใช้ถนนจริงในการคำนวณ โดยได้ทำการเก็บข้อมูลของการใช้ถนนจริงของถนนแต่ละ Class ตั้งแต่เวลา 18 นาฬิกา 50 นาที ไปถึง 5 นาฬิกา 50 นาทีของอีกวันในตอนเช้าเป็นระยะเวลาทั้งหมด 7 วันแล้วทำการเฉลี่ยระยะเวลาทั้งหมดที่ทำการเก็บข้อมูลได้เป็นกราฟ Sensor Activity ใน 1 วันเป็นช่วงเวลาทั้งหมด 11 ชั่วโมง โดยเวลาที่มียานพาหนะผ่าน Sensor ที่ได้ติดตั้งไว้กับ LoRaWAN Module ที่สื่อกับไฟแดง LoRaWAN Module ที่มี Sensor จะส่งสัญญาณไปสู่อ LoRaWAN Gateway ที่ทำการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลแล้วส่งต่อไปยัง LoRaWAN Endpoint Module ที่จุดที่ต้องการปรับลดระดับแสงสว่าง ซึ่งจะปรับแรงดันไฟฟ้าที่ Endpoint Module ให้ปล่อยแสงสว่างเต็มที่เมื่อมียานพาหนะผ่านหรือลดระดับแสงสว่างของหลอดไฟลงเมื่อไม่มียานพาหนะผ่านเป็นเวลาเกินกว่า 5 วินาที โดยข้อมูล System Behavior ที่ได้ทำการเทียบจากข้อมูลผู้ใช้ถนนจริงต่อสัปดาห์จะเห็นได้ว่า M Class มียานพาหนะผ่านเป็นเวลารวม 7 ชั่วโมง และไม่มียานพาหนะผ่านเป็นเวลารวม 4 ชั่วโมง P Class มียานพาหนะผ่านเป็นเวลารวม 7 ชั่วโมง 20 นาที และไม่มียานพาหนะผ่านเป็นเวลารวม 3 ชั่วโมง 40 นาที และ C Class มียานพาหนะผ่านเป็นเวลารวม 6 ชั่วโมง 30 นาที และไม่มียานพาหนะผ่านเป็นเวลารวม 4 ชั่วโมง 30 นาที



รูปที่ 4.38 System Behavior ในช่วงเวลากลางคืน ของถนน M Class



รูปที่ 4.39 System Behavior ในช่วงเวลากลางคืน ของถนน P Class



รูปที่ 4.40 System Behavior ในช่วงเวลากลางคืน ของถนน C Class

บทที่ 5

ผลการควบคุมการส่องสว่างของระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการควบคุมการส่องสว่างของระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะ โดยจะแบ่งผลการทดลองเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การเปรียบเทียบการใช้พลังงานรวมของระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะกับหลอด HPS แบบปกติ เปรียบเทียบระยะเวลาในการใช้งานของ LoRaWAN ระหว่าง module ต่างๆ และค่าความเสถียรของระบบ

5.1 การใช้พลังงานรวมของระบบควบคุมไฟฟ้า

จากที่กล่าวมาแล้วว่า การควบคุมการส่องสว่างของระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะนั้นได้ทำการออกแบบมาเพื่อลดพลังงานที่ใช้โดยระบบไฟฟ้าส่องสว่างแบบปกติ ซึ่งในการทดลองที่ได้ทำนั้นได้ใช้หลอด LED แทนการใช้หลอด HPS ซึ่งหลอด LED ที่ได้เลือกใช้นั้นเลือกโดยการใช้หลอด LED ที่มี Lamp Flux เท่ากับหลอด HPS ที่ต้องการจะทดแทนและมี Type ของการส่องสว่างที่ใกล้เคียงกัน โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ระบบ คือ ระบบ LED ร่วมกับ LoRaWAN และระบบ HPS แบบปกติ

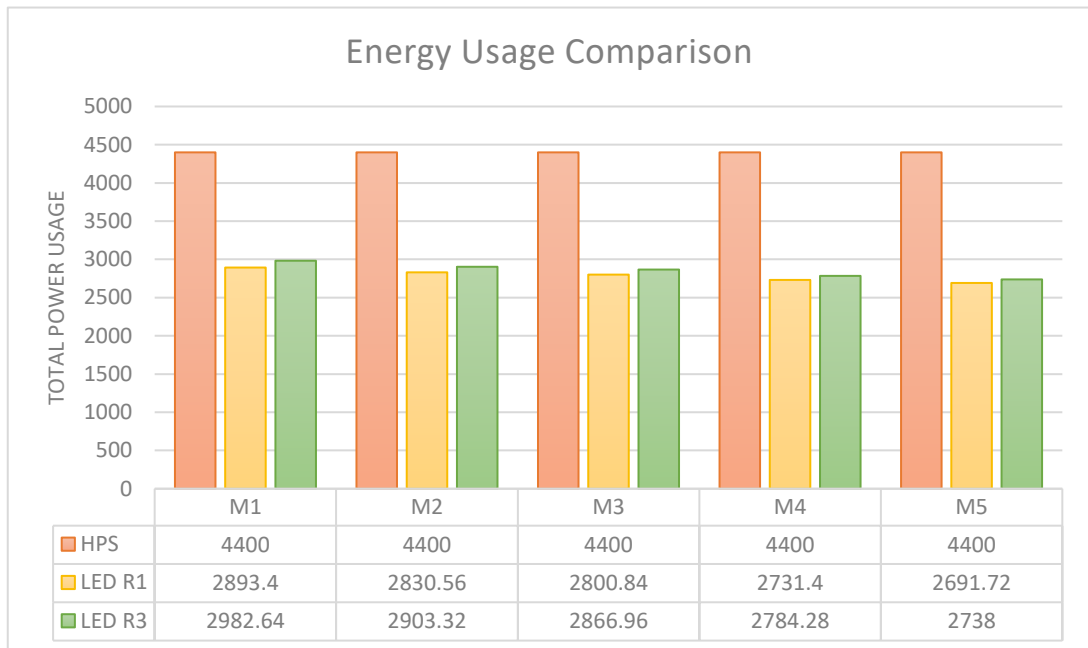
โดยการลดแสงสว่างของหลอด LED แต่ละหลอดจะใช้การจำลองแบบใน DIALux เป็นตัวกำหนดค่า Lamp Flux ของแต่ละดวงโคมที่แต่ละ Class ของถนนนั้นจะต้องใช้ในการส่องสว่างถนนให้อยู่ในมาตรฐานหลังการลดระดับแสงสว่างแล้ว และทำการคำนวณความประหยัดไฟฟ้าโดยการหาพลังงานที่หลอดไฟแต่ละหลอดใช้ในแต่ละถนน Class นั้นๆ และนำพลังงานที่ลดลงได้ของแต่ละหลอดมาเปรียบเทียบกับข้อมูลระยะเวลาที่ Sensor ตรวจจับยานพาหนะได้เพื่อหาพลังงานทั้งหมดที่สามารถจะประหยัดได้ ซึ่งจะได้ผลตามตารางที่ 5.1 ด้านล่าง โดยทำการเปรียบเทียบกับพลังงานที่ใช้ของหลอด LED 300 W กับ HPS 400 W สำหรับ M Class หลอด LED 200 W กับหลอด HPS 250 W สำหรับ P Class และหลอด LED 125 W กับหลอด HQV 125 W สำหรับ C Class โดยหลอด LED จะใช้ร่วมกับระบบ LoRaWAN โดยระบบที่ได้ทำการทดลองนั้นจะกำหนดให้หลอดไฟจะใช้พลังงานเต็มเมื่อมียานพาหนะผ่าน และจะถูกทำการลดการส่องสว่างเมื่อไม่มียานพาหนะผ่าน Sensor โดยจากการคำนวณเมื่อให้ระยะเวลาการทำงานของไฟฟ้าแสงสว่างอยู่ที่ 11 ชั่วโมงต่อวัน เท่ากับหลอด LED หลอด HPS 400 W ที่ใช้สำหรับ M Class จะใช้พลังงานรวมต่อวันเท่ากับ 4400 Wh และหลอด HPS 250 W สำหรับ P Class จะใช้พลังงานรวม 2750 Wh ต่อวัน ส่วนหลอด HQV สำหรับ C Class นั้นจะใช้พลังงานรวม 1375 Wh ต่อวัน ซึ่งร้อยละของการประหยัดพลังงานของระบบจะคิดจากพลังงานรวมที่ใช้ของระบบ LoRaWAN เทียบกับพลังงานรวมที่ใช้ของหลอด HPS

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบการใช้พลังงานของหลอด LED ที่ใช้ LoRaWAN ควบคุม

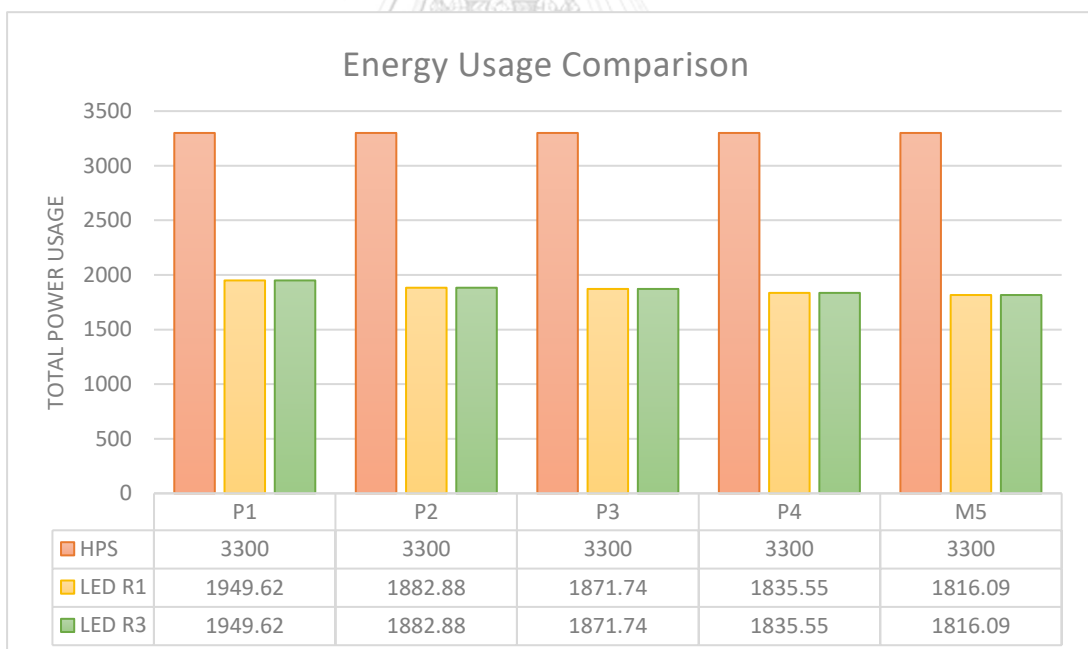
Class	Power LED R1 (W)	Power LED R3 (W)	Time (Hrs.)	Total Power LED R1 (Wh)	Total Power LED R3 (Wh)	Energy Saved LED R1 (%)	Energy Saved LED R3 (%)
M1	198.35	220.66	7 hrs. full illumination +4 hrs. dimmed	2893.4	2982.64	34.24	32.2
M2	182.64	200.83		2830.56	2903.32	35.67	34.02
M3	175.21	191.74		2800.84	2866.96	36.34	34.84
M4	157.85	171.07		2731.4	2784.28	37.92	36.72
M5	147.93	159.50		2691.72	2738.00	38.82	37.78
P1	132.33	132.33	7.3 hrs. full illumination +3.7 hrs. dimmed	1949.62	1949.62	40.92	40.92
P2	114.29	114.296		1882.88	1882.88	42.94	42.94
P3	111.28	111.28		1871.74	1871.74	43.28	43.28
P4	101.50	101.50		1835.55	1835.55	44.38	44.38
P5	96.24	96.24		1816.09	1816.09	44.97	44.97
C1	99.11	99.11	6.5 hrs. full illumination +4.5 hrs. dimmed	1258.50	1258.50	8.47	8.47
C2	86.73	86.73		1202.79	1202.79	12.52	12.52
C3	65.49	65.49		1107.21	1107.21	19.48	19.48
C4	60.18	60.18		1083.31	1083.31	21.21	21.21
C5	48.68	48.68		1031.56	1031.56	24.97	24.97

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าการประหยัดพลังงานของ P Class นั้นจะมากที่สุดแม้ว่าช่วงเวลาในการลดแสงสว่างนั้นจะน้อยกว่า Class อื่น ซึ่งเกิดขึ้นจากถนนมีขนาดเล็กกว่า M Class แต่หลอดไฟฟ้านั้นมี Lumens ที่มีความสว่างมาก ทำให้สามารถลดแสงสว่างที่ใช้ใน P Class ได้เยอะที่สุด ต่อมาคือ M Class และ P Class ซึ่งใน P Class นั้นจะลดได้น้อยที่สุดเนื่องจาก Lumen ของหลอดนั้นน้อยอยู่แล้ว ทำให้ลดความสว่างได้ไม่มากนัก ทั้งนี้การลดค่าความสว่างของทั้ง 3 Class ส่วนใหญ่จะมีปัญหาที่ค่าความส่องสว่าง (Em) และ Threshold Increment มากที่สุด เนื่องมาจากการลดความสว่างของหลอดไฟฟ้าทำให้หลอดไฟฟ้าผลิต Lumens ได้น้อยลง มีผลต่อค่าทั้ง 2 ค่าโดยตรง ซึ่งสามารถทำการเปรียบเทียบความประหยัดพลังงานของแต่ละ Class ของถนนได้ดังกราฟที่ 5.1-5.3 ด้านล่างนี้

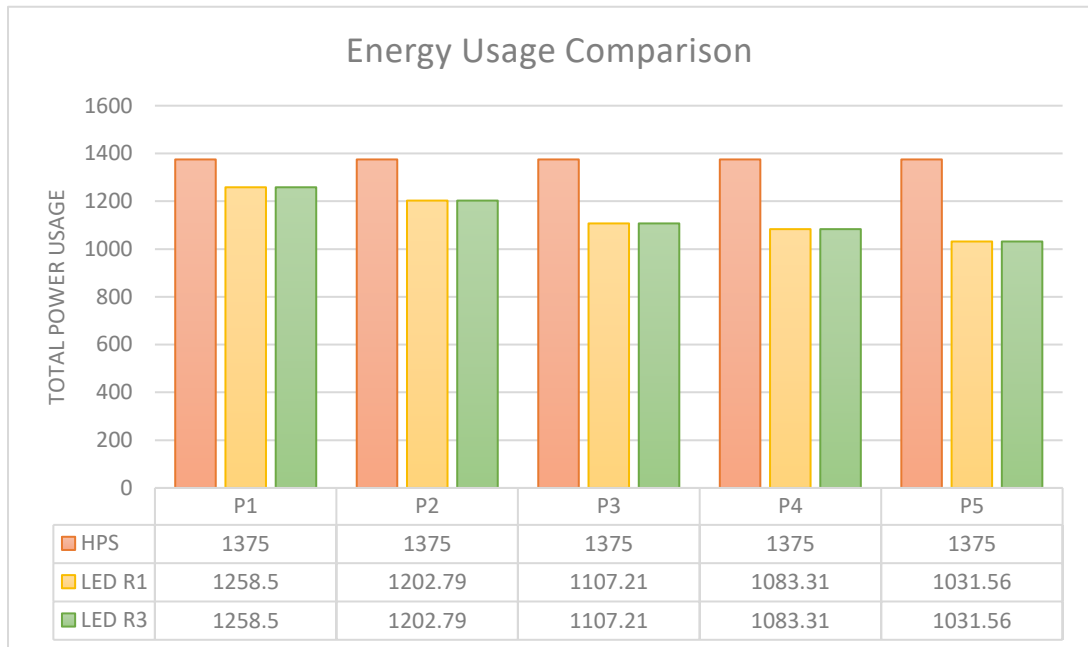
กราฟที่ 5.1 เปรียบเทียบความประหยัดพลังงานของระบบของถนนชนิด M Class



กราฟที่ 5.2 เปรียบเทียบความประหยัดพลังงานของระบบของถนนชนิด P Class



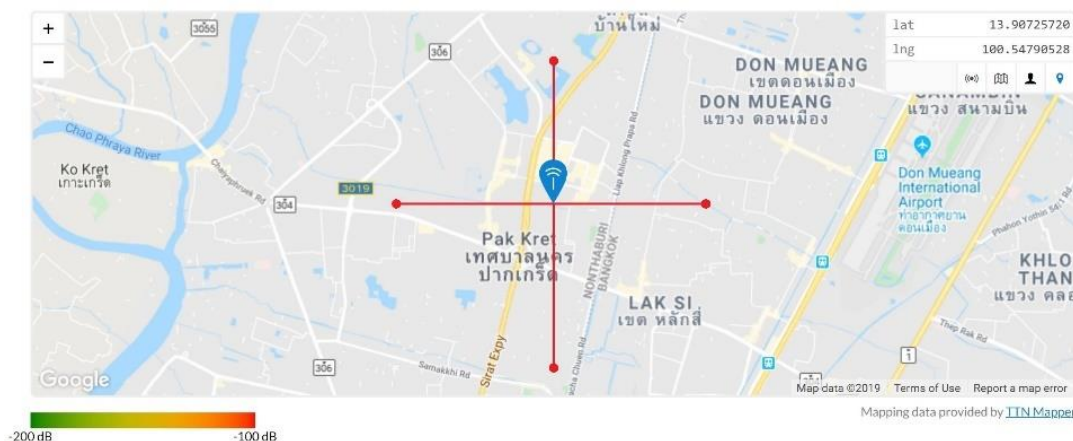
กราฟที่ 5.3 เปรียบเทียบความประหยัดพลังงานของระบบของถนนชนิด C Class



5.2 การวัดระดับความเสถียรในการทำงานของระบบ

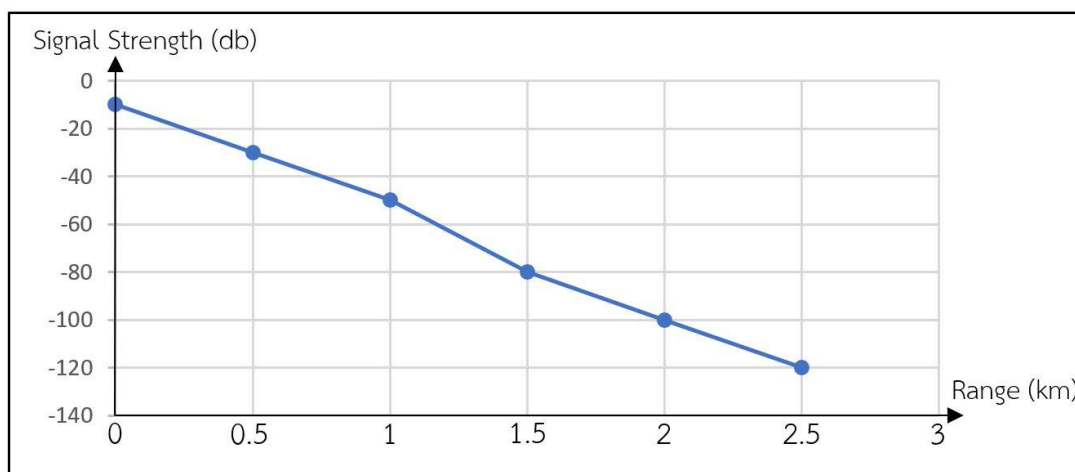
เนื่องจากการใช้ LoRa ในการควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างอัจฉริยะนั้น มีจุดประสงค์เพื่อการสื่อสารในระยะไกล จึงได้ทำการทดลองวัดระยะและระดับความแรงของสัญญาณที่ใช้งานได้จริงของแต่ละ Module LoRaWAN ที่มีในตลาดประเทศไทย เพื่อหาข้อดีข้อเสียของแต่ละ Module และเพื่อศึกษา Stability และ Reliability ของระบบ โดยในประเทศไทย กำหนดให้ใช้ LoRaWAN ในความถี่ 923-925 MHz ด้วยความแรงไม่เกิน 50 mW ในรอบการทำงาน 1 ชั่วโมง เนื่องจากระบบ LoRaWAN ที่ได้พัฒนามานั้น ทำงานตลอดเวลาในเวลากลางคืน และทำการส่งสัญญาณทุกๆวินาที ทำให้สามารถส่งความแรงได้มากที่สุดที่ 0.83 mW วิทยานิพนธ์นี้จึงใช้กำลังส่งของสัญญาณที่ 0.5 mW เพื่อให้สามารถใช้ได้ตามมาตรฐานที่ กสทช.กำหนด

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองวัดระยะที่สามารถใช้งานได้จริงของระบบทั้งหมด โดยทำการต่อ Module Endpoint เข้ากับ Gateway ผ่าน TTN แล้วทำการปิดกั้นเมื่อถึงระยะที่สัญญาณขาดหายไป โดยสัญญาณจะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งไม่สามารถติดต่อได้ มีระยะทางดังรูปที่ 5.1 และสามารถสรุปผลการทดลองได้ตามตารางที่ 5.3 ด้านล่าง



รูปที่ 5.1 ระยะทางการใช้งานจริงระหว่าง LoRaWAN Module และ Gateway

กราฟที่ 5.4 แสดงระดับความแรงของสัญญาณเทียบกับระยะทาง



ตารางที่ 5.3 แสดงระยะทางการใช้งานสูงสุดของแต่ละ LoRaWAN Module

ทิศทางที่ทดสอบ	ระยะห่างระหว่าง Gateway และ Endpoint		
	Cat LoRa Starter Kit Gravitech S76S	SX1276 ESP32	SX1278 Lora Arduino
เหนือ	2.41 km	2.43 km	2.31 km
ตะวันออก	2.51 km	2.52 km	2.36 km
ตะวันตก	2.44 km	2.47 km	2.32 km
ใต้	2.48 km	2.51 km	2.30 km

โดยจะสังเกตได้ว่า สัญญาณนั้นจะลดลงไปเรื่อยๆตามสิ่งกีดขวางที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะทางมากขึ้น และจะมีสัญญาณอยู่ที่ประมาณ -120 db ก่อนที่สัญญาณจะขาดหายไปในทุกๆทิศทางเท่าๆกัน

ต่อมาได้ศึกษาค่าความแรงของสัญญาณระหว่าง Endpoint Module และ Gateway LoRaWAN จากระยะทางที่สามารถใช้งานได้เติมค่าสัญญาณโดยไม่มีปัญหาในการเชื่อมต่อซึ่งคือ 1 กิโลเมตรของทุก Module โดยจะได้ค่านี้นี้จากค่าดัชนีที่ TheThingsNetwork ทำการเก็บค่าได้จาก Sensor บน LoRaWAN Module ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณระหว่างแต่ละ LoRaWAN Module

ทิศทางที่ทดสอบ	ค่าความแรงของสัญญาณ		
	Cat LoRa Starter Kit Gravitech S76S	SX1276 ESP32	SX1278 Lora Arduino
เหนือ	-109 dB	-111 dB	-107 dB
ตะวันออก	-111 dB	-121 dB	-117 dB
ตะวันตก	-106 dB	-108 dB	-101 dB
ใต้	-102 dB	-102 dB	-99 dB

5.3 งบประมาณในการจัดทำระบบและระยะเวลาคืนทุน

ในการติดตั้งนั้น เบื้องต้นจะมีปัจจัยหลักในการติดตั้งระบบ 2 อย่าง คือ LoRaWAN Gateway Concentrator ซึ่งจะมีราคาเริ่มต้นตั้งแต่ 9,000 บาท ไปจนถึง 28,000 บาท และ LoRaWAN Endpoint Module ซึ่งจะมีราคาประมาณ 500 บาทในระยะเริ่มต้นไปจนถึง 1,500 บาท โดยตัว LoRaWAN Gateway Concentrator นั้นจะมีรัศมีที่รับสัญญาณประมาณ 5 กิโลเมตรถึง 30 กิโลเมตรแล้วแต่สิ่งกีดขวางระหว่างตัว Concentrator และ Endpoint Module ส่วนตัว Endpoint Module จะมีระยะเท่าๆกันกับ Gateway แต่จะต้องติดตั้งในทุกๆหลอดหรือแนวถนน ทำให้สี่แยก 1 แห่งต้องใช้ 1 Gateway ร่วมกับ 4 Endpoint Module เป็นอย่างน้อยจึงมีราคาประมาณ 11,000 บาท – 34,000 บาทต่อสี่แยก ซึ่งถ้าทำการสั่งทำเป็นจำนวนมากน่าจะลดราคาได้พอสมควร แต่ยังคงต้องคิดคำนวณค่าการหาค่าต่างๆจาก DIALux และค่าดำเนินการระบบ ดังนั้นเนื่องจาก Gateway ที่ใช้จะมีระยะทำการอยู่ที่สี่แยก จะทำการเฉลี่ยค่า Gateway ไปรวมกับค่าใช้จ่ายต่อ 1 ดวงโคมเพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้นในการประมาณงบประมาณ โดยจะใช้ 10 ดวงโคมต่อถนน ดังนั้น 1 Gateway จะรับส่งข้อมูลกับ Endpoint Module จำนวน 40 modules ทำให้หลังจากคิดค่าดำเนินการระบบ และการจำลอง DIALux แล้ว งบประมาณต่อ 1 ดวงโคม จึงเป็นประมาณ 3,000 ถึง 4,000 บาท โดยจากการคำนวณค่าไฟฟ้าของแต่ละหลอด จะใช้พลังงานในแต่ละ Class แตกต่างกัน

ในการติดตั้งระบบไฟฟ้าแสงสว่างอัจฉริยะในถนนประเภท M Class หลอดไฟฟ้าจะใช้พลังงานประมาณ 2.8 หน่วยต่อวันต่อ 1 ดวงโคมเมื่อใช้ LED ร่วมกับ LoRaWAN โดยเทียบกับ 4.4 หน่วยต่อวันต่อ 1 ดวงโคมของหลอดแบบ HPS ในส่วนของ P Class หลอดไฟฟ้าจะใช้พลังงานประมาณ 1.9 หน่วยต่อวันต่อ 1 ดวงโคมเมื่อใช้ LED ร่วมกับ LoRaWAN เทียบกับ 3.3 หน่วยต่อวันต่อ 1 ดวงโคมของหลอดแบบ HPS และสุดท้ายใน C Class นั้น จะใช้พลังงานประมาณ 1.1 หน่วยต่อวันต่อ 1 ดวงโคมเมื่อใช้ LED ร่วมกับ LoRaWAN เทียบกับ 1.4 หน่วยต่อวันต่อ 1 ดวงโคมของหลอดแบบ HQV เมื่อคิดค่าไฟฟ้าตามค่าไฟฟ้าของกฟผ.และกฟภ.จะได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2.5 บาทต่อ

หน่วย จะได้ว่า M Class จะลดค่าใช้จ่ายไป 4 บาทต่อวันต่อดวงโคม หรือ 1460 บาทต่อปีต่อดวงโคม P Class จะลดค่าใช้จ่ายไป 3.5 บาทต่อวันต่อดวงโคมหรือ 1277.5 บาทต่อปีต่อดวงโคม และ C Class จะลดค่าใช้จ่ายไป 0.75 บาทต่อวันต่อดวงโคม หรือ 275.75 บาทต่อปีต่อดวงโคม ทำให้ใน M Class การติดตั้งระบบไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะนี้จะคืนทุนในประมาณ 2 ปี ถ้าใช้อุปกรณ์ในระดับเริ่มต้น P Class ใน 2 ปี 4 เดือน และ C Class ใน 10 ปีขึ้นไป และเนื่องจาก Lifetime ของ Module แต่ละ module นั้นจะมีประกันอยู่ที่มีระยะเวลาทานที่สุดประมาณ 5 ปีเท่านั้น การติดตั้งในถนนแบบ M Class และ P Class จึงน่าจะมีความคุ้มค่า แต่การติดตั้งใน C Class นั้นจะคืนทุนได้ช้าเกินกว่าระยะเวลาประกัน ทำให้มีความเสี่ยงต่อการทำงานของระบบ



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ประสงค์ในการนำเสนอแนวคิดและวิธีการวิเคราะห์ระบบที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนโดยใช้การสื่อสารแบบเครือข่าย เพื่อลดค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าที่ไม่จำเป็น สร้างระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างที่สามารถทำงานได้เองโดยอัตโนมัติ เพื่อช่วยลงภาระในการดูแลระบบ ลดพลังงานที่ต้องใช้ และลดความเสี่ยงของผู้ใช้รถใช้ถนน โดยทำการนำ LoRaWAN เข้ามาใช้ร่วมกับระบบการส่องสว่างของไฟถนนในปัจจุบันเพื่อออกแบบระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความเหมาะสมทั้งในทางค่าใช้จ่ายและการบำรุงรักษา

จากการจำลองและทดลองใช้เครือข่ายการสื่อสารระยะไกลเพื่อควบคุมระบบไฟฟ้าส่องสว่างถนนอัจฉริยะที่ได้ทำมา สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. ระบบมีความสามารถในการลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้เป็นอย่างมากและยังคงมีแสงสว่างเพียงพอต่อการใช้งานหากเกิดเหตุขัดข้องกับระบบ โดยยังสามารถมีความสว่างที่เพียงพอต่อผู้ใช้รถใช้ถนน ไม่ว่าจะเป็นผู้ขับขี่ยานพาหนะหรือผู้เดินบนทางเท้า เห็นได้ว่าสามารถใช้การสื่อสารระยะไกลเพื่อควบคุมระบบไฟฟ้าส่องสว่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีระยะเวลาใช้งานที่ไกลและเท่าๆกันในทุกทิศทางในทุกการทดสอบ รวมถึงมีความสามารถในการทำงานได้แม้มีปัญหาเกิดขึ้นกับระบบ เนื่องจาก TRIAC สามารถทำงานได้ที่ State เดิมจนกว่าจะถูกกระตุ้นใหม่ด้วยสัญญาณอื่น มีความสามารถในการเปิด-ปิดตนเองเมื่อถึงเวลาที่กำหนดไว้ ทำให้มีภาระในการดูแลระบบน้อย

2. ระบบมีความเสถียรของสัญญาณที่ดี สามารถทำงานได้ในระยะไกล โดยมีความสามารถที่จะใช้อุปกรณ์ Endpoint Module ในการควบคุมการลดความสว่างของดวงโคมได้อัตโนมัติ สามารถควบคุมระบบการส่องสว่างของไฟฟ้าถนนได้อย่างถูกต้องตามมาตรฐาน ทำให้ถนนที่ได้ทำการติดตั้งนั้นมีความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้ถนน อีกทั้งยังสามารถพัฒนาระบบต่อไปได้เมื่อต้องการโดยการเพิ่มแค่ Endpoint Module แต่ละจุดที่ต้องการจะติดตั้ง ทั้งนี้อุปกรณ์ต่างๆยังสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ทำให้เหมาะที่จะทำในโครงการใหญ่ๆได้ เช่น แสงสว่างบนถนนในหมู่บ้าน ไปจนถึงทางหลวงยกระดับต่างๆ เนื่องจากสามารถส่งสัญญาณ Node ต่อ Node ได้

3. จากผลการจำลองการส่องสว่างของไฟฟ้าถนน จะเห็นได้ว่าการลดค่าความสว่างของหลอดไฟฟ้านั้นจะมีผลโดยตรงต่อ Lumens ที่หลอดไฟผลิตได้ ทำให้ค่าความส่องสว่างลดลง เมื่อนำไป

จำลองเปรียบเทียบกันกับแต่ละ Class ของถนนจะเห็นได้ว่าการลดพลังงานที่ใช้ของหลอดไฟฟ้าจะมีผลโดยตรงต่อค่าความส่องสว่างของหลอดไฟฟ้าและค่า Threshold Increment ของถนนมากที่สุด

4. จากการคำนวณการส่องสว่างของไฟฟ้าถนน จะเห็นได้ว่าถนนแบบ P Class จะสามารถทำการลดระดับแสงสว่างได้มากที่สุด เกิดจากถนนมีขนาดเล็กกว่า M Class แต่หลอดไฟฟ้าที่ใช้เปรียบเทียบ Lumens กับ HPS นั้นมีค่า Efficacy สูง ทำให้หลอดไฟฟ้านั้นใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใน P Class จะสามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของหลอดไฟฟ้าได้เกิน 40% ด้านถนนแบบ M Class นั้นจะมีประสิทธิภาพในการลดน้อยกว่า P Class โดยจะได้ประมาณ 30% แต่ถนนแบบ C Class นั้นจะทำการลดพลังงานการใช้ไฟฟ้าได้น้อยมากเมื่อเทียบกับ P Class และ M Class โดยจะลดได้ประมาณ 10%-20% เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากถนนมีขนาดเล็กทำให้ใช้ไฟฟ้าในการส่องสว่างไม่มาก และหลอดไฟฟ้าที่ใช้ก็มีการส่องสว่างที่น้อยมากอยู่แล้วจึงไม่สามารถลดความสว่างได้มาก ทำให้ในการติดตั้งระบบนั้นจะลดพลังงานได้มากที่สุด ใน P Class และน้อยที่สุดใน C Class

5. จากการคิดคำนวณงบประมาณที่ต้องใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ จะเห็นได้ว่าระบบทั้งหมดจะมีค่าใช้จ่ายที่ไม่แพงจนเกินไป สามารถทำได้ในโครงการใหญ่ๆได้อย่างมีความคุ้มค่า โดยการติดตั้งบนถนนประเภท M Class จะคืนทุนได้ไวที่สุดใน 2 ปี และ P Class จะคืนทุนได้ไวที่สุดใน 2 ปี 4 เดือน แต่ใน C Class นั้นการคืนทุนจะใช้เวลาถึง 10 ปี ทำให้การติดตั้งในถนนแบบ C Class นั้นไม่ค่อยมีความคุ้มค่าในด้านงบประมาณและทำให้เกิดความเสี่ยงในการใช้งานระบบเนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนเกินระยะเวลาประกัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบระบบไฟฟ้าส่องสว่างถนนอัจฉริยะในวิทยานิพนธ์นี้เป็นเพียงการเริ่มต้นในการพัฒนาระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนที่มีมาตรฐาน แต่สามารถใช้ได้เพียงจุดการเชื่อมต่อที่ไม่มีสิ่งกีดขวางเป็นจำนวนมากเพียงเท่านั้น เนื่องจาก LoRaWAN นั้นถูกออกแบบมาเพื่อการสื่อสารระยะไกลและประหยัดพลังงานเป็นหลัก ทำให้ส่งข้อมูลได้ในระยะไกล แต่จะมีกำลังส่งน้อยลงเมื่อมีสิ่งกีดขวางเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องติดตั้งในพื้นที่ที่ความเหมาะสมในการส่งสัญญาณ จึงจะได้สัญญาณที่มีความแรง ไกล และมีเสถียรภาพสูง จึงควรมีการติดตั้งบนพื้นที่สูงและทำการพัฒนาตัว Module Endpoint ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. การเลือกหลอดไฟฟ้าเพื่อใช้งานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำโดยการเปรียบเทียบ Lumens ที่หลอดไฟฟ้า LED สามารถส่องสว่างได้เปรียบเทียบกับหลอดไฟฟ้าแบบ HPS และ HQV แต่หลอดไฟฟ้าที่ใช้ยังคงมีความสว่างที่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดอยู่มาก โดยสามารถทำการค้นคว้าเพิ่มเติมเพื่อค้นหาหรือผลิตคิดค้นหลอดไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นทั้งในด้านการส่องสว่างและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ เพื่อให้ระบบสามารถส่องสว่างถนนได้ในระดับที่ดียิ่งขึ้นและประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น

3. ในด้านการคืบทุนนั้น การติดตั้งบนถนนแบบ M Class และ P Class จะคืบทุนได้ในเวลาพอสมควร แต่ใน C Class นั้นจะใช้เวลานานมากเนื่องจากลดพลังงานที่ใช้ได้น้อย จึงควรติดตั้งใน M Class และ P Class ก่อนเนื่องจากคืบทุนได้ในระยะเวลาไม่มาก



บรรณานุกรม

1. Kumar, A., et al., *Implementation of Smart LED Lighting and Efficient Data Management System for Buildings*. Energy Procedia, 2017. **143**: p. 173-178.
2. de Bakker, C., et al., *Occupancy-based lighting control in open-plan office spaces: A state-of-the-art review*. Building and Environment, 2017. **112**: p. 308-321.
3. Zhao, L., et al., *An energy-saving fuzzy control system for highway tunnel lighting*. Optik, 2019. **180**: p. 419-432.
4. Mlynek, P., et al., *Narrowband Power Line Communication for Smart Metering and Street Lighting Control*. IFAC-PapersOnLine, 2015. **48**(4): p. 215-219.
5. Eloholma, M., et al., *Visual performance in night-time driving conditions*. Ophthalmic Physiol Opt, 2006. **26**(3): p. 254-63.
6. Eloholma, M., *Development of visual performance based mesopic photometry, in Helsinki University of Technology, Lighting Laboratory, Teknillinen korkeakoulu, Valaistuslaboratorio*. 2005.
7. Y. Akashi, M.S.R., and J. D. Bullough, *Driver decision making in response to peripheral moving targets under mesopic light levels*. Lighting Research and Technology, 2007. **39**: p. 53-67.
8. E. Bjelland, a.T.K., *Intelligent street lighting in Oslo, Norway*. Proceedings of the 6 th Right Light International conference on energy-efficient lighting, 2005.
9. Don, M., *Adaptive roadway lighting*. IMSA Journal, 2006.
10. H.S.H. Chung, N.M.H., S.Y.R Hui, and W.Z Mai, *Case Study of A Highly-Reliable Dimmable Road Lighting System with Intelligent Remote Control*. European Power Electronics Conference, 2005.
11. Godyak, J.W.S.a.V.A., *The development of low frequency, high output electrodeless fluorescent lamps*. Journal of the Illuminating Engineering Society, 1999. **28**(1): p. 7.
12. P. V. Manitha, S.S.A., K. Manikumar and K. Aswathaman, *Design and development of enhanced road safety mechanism using smart roads and*

- energy optimized solar street lights*. 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), 2017: p. 5.
13. A. K. Tripathy, A.K.M.a.T.K.D., *Smart lighting: Intelligent and weather adaptive lighting in street lights using IOT*. 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), 2017: p. 4.
 14. C. Gao, G.Y.a.C.L., *The research and implementation of multi-sensor collaboration in a smart lighting control system based on smart city operating system i-stack*. 2014 11th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA), 2014: p. 4.
 15. Semtech. *What is LoRa®?* ; Available from: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
 16. Techopedia. *Physical Layer*. Available from: <https://www.techopedia.com/definition/8866/physical-layer>.
 17. Thethingsnetwork. *LoRaWAN Architecture*. Available from: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture.html>.
 18. NetPrime, R. *OSI MODEL 7 LAYERS*. 2015; Available from: <http://netprime-system.com/osi-model-7-layers/>.
 19. Morgan, J. *A Simple Explanation Of 'The Internet Of Things'*. Available from: <https://www.forbes.com/sites/jacobmorgan/2014/05/13/simple-explanation-internet-things-that-anyone-can-understand/#1a4759201d09>.
 20. Waviot. *What is LPWAN*. Available from: <https://waviot.com/technology/what-is-lpwan>.
 21. Maker.IO. *Introduction to LoRa Technology – The Game Changer*. Available from: <https://www.digikey.com/en/maker/blogs/introduction-to-lora-technology>.
 22. L'Eclairage, C.I.d., *CIE 115: Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic*. 2010. p. 45.
 23. กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, ค., *มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์ สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคม ที่ไม่ใช่ประเภท Radio Frequency Identification: RFID ซึ่งใช้คลื่นความถี่ย่าน ๙๒๐ - ๙๒๕ เมกะเฮิรตซ์*. 2560.
 24. Shenzhen Rakwireless Technology Co., L. *Rak7243 WisDevice* Available from: <https://www.rakwireless.com/en-int/products/rak7243/>.

25. Foundation, R.P. *Raspberry Pi 3 Model B+*. Available from: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>.
26. Rakwireless. *RAK2245 Pi HAT Edition - AS923*. Available from: <https://store.rakwireless.com/products/rak2245-pi-hat?variant=26653392666724>.
27. Rakwireless. *RAK831 Gateway Module - AS923*. Available from: <https://store.rakwireless.com/products/rak831-gateway-module?variant=22375114801252>.
28. Tatham, S. *PuTTY*. 2018; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/PuTTY>.
29. SSH Communications Security, I. *SSH PROTOCOL*. Available from: <https://www.ssh.com/ssh/protocol/>.
30. Microsoft. *Understanding TCP/IP addressing and subnetting basics*. Available from: <https://support.microsoft.com/en-us/help/164015/understanding-tcp-ip-addressing-and-subnetting-basics>.
31. Team, A.M. *What's Wi-Fi station mode and AP mode?* 2019; Available from: <https://support.yardian.com/hc/en-us/articles/115010018588-What-s-Wi-Fi-station-mode-and-AP-mode->.
32. L'Eclairage, C.I.d., *CIE 140: Road Lighting Calculations*. 2019. p. 41.
33. การไฟฟ้านครหลวง, ข้อมูลการติดตั้งโคมไฟถนนแะเกณฑ์สมรรถนะ.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การตั้งค่าอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบ

การตั้งค่า Module SX1301/1276 .ให้ใช้ได้iny่านความถี่ AS923-925 ตามที่กสทชกำหนด
นั้นจำเป็นต้องใช้ Code ดังต่อไปนี้

```
{
  "SX1301_conf": {
    "lorawan_public": true,
    "clksrc": 1,
    "clksrc_desc": "radio_1 provides clock to concentrator for
most devices except MultiTech. For MultiTech set to 0.",
    "antenna_gain": 0,
    "antenna_gain_desc": "antenna gain, in dBi",
    "lbt_cfg": {
      "enable": true,
      "rssi_target": -80,
      "chan_cfg": [
        { "freq_hz": 923200000, "scan_time_us": 128 },
        { "freq_hz": 923400000, "scan_time_us": 128 },
        { "freq_hz": 923600000, "scan_time_us": 128 },
        { "freq_hz": 923800000, "scan_time_us": 128 },
        { "freq_hz": 924000000, "scan_time_us": 128 },
        { "freq_hz": 924200000, "scan_time_us": 128 },
        { "freq_hz": 924400000, "scan_time_us": 128 },
        { "freq_hz": 924600000, "scan_time_us": 128 }
      ],
      "sx127x_rssi_offset": -4
    },
    "radio_0": {
      "enable": true,
      "type": "SX1257",
      "freq": 923600000,
      "rssi_offset": -166.0,
      "tx_enable": true,
      "tx_freq_min": 923200000,
      "tx_freq_max": 925000000
    },
    "radio_1": {
      "enable": true,
      "type": "SX1257",
      "freq": 924600000,
      "rssi_offset": -166.0,
```

```
        "tx_enable": false
    },
    "chan_multiSF_0": {
        "desc": "Lora MAC, 125kHz, all SF, 923.2 MHz",
        "enable": true,
        "radio": 0,
        "if": -400000
    },
    "chan_multiSF_1": {
        "desc": "Lora MAC, 125kHz, all SF, 923.4 MHz",
        "enable": true,
        "radio": 0,
        "if": -200000
    },
    "chan_multiSF_2": {
        "desc": "Lora MAC, 125kHz, all SF, 923.6 MHz",
        "enable": true,
        "radio": 0,
        "if": 0
    },
    "chan_multiSF_3": {
        "desc": "Lora MAC, 125kHz, all SF, 923.8 MHz",
        "enable": true,
        "radio": 0,
        "if": 200000
    },
    "chan_multiSF_4": {
        "desc": "Lora MAC, 125kHz, all SF, 924.0 MHz",
        "enable": true,
        "radio": 0,
        "if": 400000
    },
    "chan_multiSF_5": {
        "desc": "Lora MAC, 125kHz, all SF, 924.2 MHz",
        "enable": true,
        "radio": 1,
        "if": -400000
    },
    "chan_multiSF_6": {
        "desc": "Lora MAC, 125kHz, all SF, 924.4 MHz",
        "enable": true,
        "radio": 1,
        "if": -200000
    },
    },
```

```

"chan_multiSF_7": {
  "desc": "Lora MAC, 125kHz, all SF, 924.6 MHz",
  "enable": true,
  "radio": 1,
  "if": 0
},
"chan_Lora_std": {
  "desc": "Lora MAC, 250kHz, SF7, 924.5 MHz",
  "enable": true,
  "radio": 1,
  "if": -100000,
  "bandwidth": 250000,
  "spread_factor": 7
},
"chan_FSK": {
  "desc": "FSK 50kbps, 924.8 MHz",
  "enable": true,
  "radio": 1,
  "if": 200000,
  "bandwidth": 125000,
  "datarate": 50000
},
"tx_lut_0": {
  "desc": "TX gain table, index 0",
  "pa_gain": 0,
  "mix_gain": 8,
  "rf_power": -6,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_1": {
  "desc": "TX gain table, index 1",
  "pa_gain": 0,
  "mix_gain": 10,
  "rf_power": -3,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_2": {
  "desc": "TX gain table, index 2",
  "pa_gain": 0,
  "mix_gain": 12,
  "rf_power": 0,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_3": {

```



```
        "desc": "TX gain table, index 3",
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 8,
        "rf_power": 3,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_4": {
        "desc": "TX gain table, index 4",
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 10,
        "rf_power": 6,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_5": {
        "desc": "TX gain table, index 5",
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 12,
        "rf_power": 10,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_6": {
        "desc": "TX gain table, index 6",
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 13,
        "rf_power": 11,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_7": {
        "desc": "TX gain table, index 7",
        "pa_gain": 2,
        "mix_gain": 9,
        "rf_power": 12,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_8": {
        "desc": "TX gain table, index 8",
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 15,
        "rf_power": 13,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_9": {
        "desc": "TX gain table, index 9",
```

```
        "pa_gain": 2,  
        "mix_gain": 10,  
        "rf_power": 14,  
        "dig_gain": 0  
    },  
    "tx_lut_10": {  
        "desc": "TX gain table, index 10",  
        "pa_gain": 2,  
        "mix_gain": 11,  
        "rf_power": 16,  
        "dig_gain": 0  
    },  
    "tx_lut_11": {  
        "desc": "TX gain table, index 11",  
        "pa_gain": 3,  
        "mix_gain": 9,  
        "rf_power": 20,  
        "dig_gain": 0  
    },  
    "tx_lut_12": {  
        "desc": "TX gain table, index 12",  
        "pa_gain": 3,  
        "mix_gain": 10,  
        "rf_power": 23,  
        "dig_gain": 0  
    },  
    "tx_lut_13": {  
        "desc": "TX gain table, index 13",  
        "pa_gain": 3,  
        "mix_gain": 11,  
        "rf_power": 25,  
        "dig_gain": 0  
    },  
    "tx_lut_14": {  
        "desc": "TX gain table, index 14",  
        "pa_gain": 3,  
        "mix_gain": 12,  
        "rf_power": 26,  
        "dig_gain": 0  
    },  
    "tx_lut_15": {  
        "desc": "TX gain table, index 15",  
        "pa_gain": 3,  
        "mix_gain": 14,
```

```
        "rf_power": 27,  
        "dig_gain": 0  
    }  
},  
"gateway_conf": {  
    "server_address": "router.as2.thethings.network",  
    "serv_port_up": 1700,  
    "serv_port_down": 1700,  
    "servers": [ {  
        "server_address": "router.as2.thethings.network",  
        "serv_port_up": 1700,  
        "serv_port_down": 1700,  
        "serv_enabled": true  
    } ]  
}  
}
```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

การตั้งค่า LoRaWAN ที่ Endpoint Module

ในการตั้งค่าการใช้งาน Module LoRaWAN ที่ Endpoint Module จะมีการตั้งค่าให้ตัว Module ทำการส่งข้อมูลไปยัง TRIAC เพื่อควบคุมหลอดไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

```
#define rx 5 //LORA TX
#define tx 4 //LORA RX
#define TFT_CS 15
#define TFT_RST 16
#define TFT_DC 2

int sensorstat = 0;
int prevsensor = 0;
boolean sensoract = 0;
boolean sensoractdel = 0;

String incomingString = "gg";
String PrStr;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  myserial.begin(115200);
  tft.initR(INITR_BLACKTAB);
  tft.setRotation(tft.getRotation()-1);
  tft.setCursor(5, 5);
  tft.fillScreen(SX12XX_BLACK);
  tft.setTextColor(SX12XX_WHITE);
  tft.setTextSize(2);
  tft.print("LRM");
  tft.setTextColor(SX12XX_RED);
  tft.setTextSize(1);
  tft.println(" LoRa Messenger");
  tft.println();
  delay(100);
}

void loop() {
  int sensorValue = analogRead(A0);
  //tft.println(sensorValue);
  delay(20);
  if(sensorValue < 100){
    pressed
```

```

    sensorstat=0;}
else if(sensorValue >= 100 && sensorValue <=240){
    sensorstat=1;}
else if(sensorValue >= 350 && sensorValue <=520){
    sensorstat=2;}
else if(sensorValue >= 520 && sensorValue <=700){
    sensorstat=3;}
else if(sensorValue > 700){
    sensorstat=4;}

if(sensorstat==prevsensor){sensoract=0;}
else if(sensorstat != 0)
{sensoract=1;
String messStr = "AT+SEND=0,";           // messStr(AT COMMAND) is to
be sent to the LoRa module to send the relevant data
messStr += (incomingString.length()-2);
messStr += ",";
messStr += incomingString;
myserial.print(messStr);
tft.setTextColor(SX12XX_GREEN);
tft.setTextSize(1);
tft.println("Pressed sensor");
if(sensorstat == 3){
tft.setCursor(5, 5);
tft.fillScreen(SX12XX_BLACK);
tft.setTextColor(SX12XX_WHITE);
tft.setTextSize(2);
tft.print("LRM");
tft.setTextColor(SX12XX_RED);
tft.setTextSize(1);
tft.println(" LoRa Messenger");
tft.println();}
tft.setTextColor(SX12XX_GREEN);
tft.setTextSize(1);
}

if (Serial.available()){
    incomingString = Serial.readString();
    if(incomingString.length()>2){
        tft.setCursor(5, 5);
        tft.fillScreen(SX12XX_BLACK);
        tft.setTextColor(SX12XX_WHITE);
        tft.setTextSize(2);
        tft.print("LRM");

```

```

        tft.setTextColor(SX12XX_RED);
        tft.setTextSize(1);
        tft.println("  WiFi:LRM_ESP8266");
        tft.println();
        tft.setTextColor(SX12XX_GREEN);
        tft.setTextSize(1);
        tft.print("YOU:");
        String messStr = "AT+SEND=0,";          // messStr(AT COMMAND)
is to be sent to the LoRa module to send the relavant data
        messStr += (incomingString.length()-2);
        messStr += ",";
        messStr += incomingString;
        myserial.print(messStr);
        tft.println(incomingString);
    }
}
//else if (sensoract == 1){
//String messStr = "AT+SEND=0,2,hi";
//    myserial.print(messStr);
//    tft.println(messStr);          //debug mess
//}
else if (myserial.available()){          // this will read the
incoming data from the lora and decode it and print it on serial monitor
    incomingString = myserial.readString();
    String recTest = incomingString.substring(1,4);
    if(recTest == "RCV"){
        String messagesize;
        int addr_start = incomingString.indexOf(',');
        int addr_mid = incomingString.indexOf(',', addr_start + 1);
        messagesize = incomingString.substring(addr_start + 1, addr_mid);
        PrStr = incomingString.substring(addr_mid + 1, (addr_mid + 1 +
messagesize.toInt()));
        tft.setTextColor(SX12XX_BLUE);
        tft.print("HIM: ");
        tft.println(PrStr);
    }
}
prevsensor = sensorstat;
}

```

ภาคผนวก ค

การตั้งค่า LoRaWAN ใน TTN

การตั้งค่าการทำงานของระบบใน TTN นั้นสามารถทำได้โดยใช้ Code ต่อไปนี้ ซึ่งจะมีค่าที่สำคัญที่ต้องกำหนดในการลดแสงสว่างของไฟฟ้าถนนตามที่ได้คำนวณผ่าน DIALux คือ dim_val ที่จะใช้สำหรับสั่งการทำงานของ function zero_cross ของ TRIAC

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

int counter = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  Serial.println("LoRa Sender");

  if (!LoRa.begin(433E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }

  LoRa.setTxPower(20);
}

void loop() {
  Serial.print("Sending packet: ");
  Serial.println(counter);

  // send packet
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print("hello ");
  LoRa.print(counter);
  LoRa.endPacket();

  counter++;

  delay(5000);
}
```

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  Serial.println("LoRa Receiver");

  if (!LoRa.begin(433E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }
}

void loop() {
  // try to parse packet
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    // received a packet
    Serial.print("Received packet ");

    // read packet
    while (LoRa.available()) {
      Serial.print((char)LoRa.read());
    }

    // print RSSI of packet
    Serial.print(" with RSSI ");
    Serial.println(LoRa.packetRssi());
  }
}

int LAMP = 4;
int dim_val = 0;
void setup()
{
  pinMode(LAMP, OUTPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), zero_cross, CHANGE);
}

void loop()
{
  int data=analogRead(A0);
  int data1 = map(data, 0, 1023,10,49);
  dim_val=data1;
}

```



```
void zero_cross()
{
  int dimming_time = (200*dim_val);
  delayMicroseconds(dimming_time);
  digitalWrite(LAMP, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(LAMP, LOW);
}
```



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายณธวัฒน์ สุขะไท
วัน เดือน ปี เกิด	14 ธันวาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ปัจจุบัน	7/200 หมู่ 6 ต.บ้านใหม่ อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY