การศึกษาและวิเคราะห์คุณภาพแสงสว่างไฟถนนสำหรับการใช้งานบนพื้นผิวที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน

THE STUDY AND ANALYSIS OF LIGHTING QUALITY OF ROAD LIGHTING SYSTEMS BASED ON APPLICATION IN DIFFERENT ROAD SURFACE PROPERTIES

สัณฐิติ อยู่มาก*, อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล**

Suntiti Yoomak*, Atthapol Ngaopitakkul**

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

***Corresponding author, Email:** atthapol.ng@kmitl.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนเพื่อวิเคราะห์คุณภาพแสงสว่างไฟถนนระหว่างการใช้งานโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงกับโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง บนพื้นผิวถนนที่มีคุณลักษณะแตกต่างกันทั้งในกรณีพื้นผิวถนนแห้งและเปียก เนื่องจากความสูงเสาไฟถนน ระยะห่างระหว่างเสาไฟถนน ความกว้างถนนรวมถึงคุณลักษณะการติดตั้งโคมไฟถนน ล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพแสงสว่าง ในการจำลองจึงกำหนดลักษณะของถนนเป็นถนนชนิดมีเกาะกลางถนน มีการติดตั้งเสาไฟถนนทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ แบบด้านตรงข้าม แบบด้านตรงข้ามสลับและแบบกิ่งคู่บนเกาะกลางถนน รวมถึงกำหนดค่าความสูงเสาไฟถนนและระยะห่างระหว่างเสาไฟถนนด้วย โดยเลือกพิจารณาวิเคราะห์คุณภาพแสงสว่างจากค่าความส่องสว่างเฉลี่ย ค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสง อ้างอิงจากเกณฑ์การส่องสว่างของกรมทางหลวงของประเทศไทย ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงยังคงให้คุณภาพแสงสว่างจากค่าความส่องสว่างเฉลี่ยและค่าความสว่างเฉลี่ยสูงกว่าการใช้โคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าความสม่ำเสมอแสงพบว่า โคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงมีค่าที่ดีกว่า สำหรับคุณสมบัติของพื้นผิวถนนที่เปลี่ยนแปลงพบว่า ไม่มีผลกระทบต่อค่าความส่องสว่าง โดยพื้นผิวถนนแห้งที่มีคุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์ความส่องสว่างเฉลี่ย (Q_0) มากจะให้คุณภาพแสงสว่างดีตามมา สำหรับพื้นผิวถนนเปียกพบว่าโดยรวมมีค่าความสว่างเฉลี่ยเพิ่มขึ้นแต่กลับให้ค่าความสม่ำเสมอแสงที่ลดลงอย่างมาก

คำสำคัญ: โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูง โคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง พื้นผิวถนน คุณภาพแสงสว่าง

Abstract

This research proposes road lighting system simulation to lighting quality analysis between high pressure sodium (HPS) luminaires and light emitting diode (LED) luminaires. The simulation is carried out on different road surface properties based on dry and wet road surfaces. Mounting height, pole spacing, road width and pole arrangement are major contributing factors in lighting quality. In case study, road lighting with a traffic island is used. There are three types of pole arrangements: an opposite arrangement, a staggered arrangement and a twin-central arrangement. Mounting height and pole spacing are determined. The lighting quality in term of average illuminance, average luminance and uniformity are studied based on Department of Highways in Thailand. Results of simulation show that the HPS luminaires provide better lighting quality from average illuminance and average luminance than the LED luminaire. However, the LED luminaires can give greater uniformity. Different road surface properties have not an effect on average illuminance. In addition, dry road surfaces that are more average luminance coefficient (Q0) value result in higher lighting quality. For wet road surfaces, the overall average luminance is increased but the uniformity is drastically reduced.

Keywords: High Pressure Sodium Luminaire, Light-Emitting Diode Luminaire, Road Surfaces, Lighting Quality

บทนำ

ในปัจจุบันการติดตั้งระบบไฟฟ้าแสงสว่างไฟถนนมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในทุกพื้นที่มีการใช้รถใช้ถนน ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มความปลอดภัยในการสัญจรให้กับผู้ใช้รถใช้ถนนในเวลากลางคืน ระบบแสงสว่างไฟถนนยังช่วยให้ผู้ขับขี่มีทัศนวิสัยในการมองเห็นที่ชัดเจนมากขึ้นหรือเทียบเท่ากับในเวลากลางวัน และทำให้ผู้ขับขี่สามารถรับรู้ข้อมูลข่าวสารที่สำคัญต่างๆ ได้อย่างครบถ้วนและมีประสิทธิภาพ ความต้องการไฟฟ้าแสงสว่างของถนนในแต่ละบริเวณอาจแตกต่างกันไปตามลักษณะทางกายภาพของถนน สภาพการจราจร และสภาพแวดล้อมของถนนในแต่ละพื้นที่ นอกจากนี้ในบางกรณียังสามารถใช้อุปกรณ์อำนวยความปลอดภัยอื่นๆ มาทดแทนไฟฟ้าแสงสว่างได้ ซึ่งมีราคาถูกกว่าและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน เช่น เครื่องหมายจราจรบนพื้นทาง หลักนำทาง เป้าสะท้อนแสงและไฟกระพริบ เป็นต้น การติดตั้งไฟฟ้าแสงสว่างบริเวณทางแยก ทางรวม ทางโค้ง และบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงแนวทางเดินรถ แสงสว่างจากระบบไฟถนนก็จะช่วยเพิ่มความปลอดภัย นอกจากนี้ไฟฟ้าแสงสว่างไฟถนนยังมีประโยชน์ด้านความปลอดภัยมากในพื้นที่เขตชุมชนหรือในเมือง เพราะไม่เพียงแต่ทำให้ผู้ใช้ทางมีความปลอดภัยด้านการจราจร แสงสว่างยังช่วยป้องกันอาชญากรรมให้กับคนเดินเท้าได้อีกด้วย การติดตั้งไฟฟ้าแสงสว่างมีประโยชน์อย่างสมบูรณ์ได้ถ้ามีการใช้มาตรฐานที่ถูกต้องและจุดที่ติดตั้งไม่ก่อให้เกิดอันตราย แต่อย่างไรก็ตามในการติดตั้งใช้งานจริง ไม่มีความจำเป็นต้องติดตั้งระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนทุกสาย เพราะในการออกแบบระบบแสงสว่างไฟถนนจำเป็นต้องศึกษาเรื่องของพลังงานประกอบไปด้วย ต้องหาความเหมาะสมระหว่างระบบแสงสว่างที่มีประสิทธิภาพกับการใช้พลังงานให้น้อยที่สุด ดังนั้นในบางพื้นที่จึงใช้สิ่งที่สามารถทดแทนได้

ซึ่งการพิจารณาว่าถนนช่วงใด มีความเหมาะสมในการติดตั้งไฟฟ้าแสงสว่าง จึงเป็นสิ่งที่ต้องการพิจารณาในรายละเอียดอย่างถี่ถ้วน ด้วยเหตุนี้ กรมทางหลวงจึงมีมาตรฐานในการติดตั้งที่ระบุไว้อย่างชัดเจนจากมาตรฐานการติดตั้งของกรมทางหลวง ฉบับตุลาคม 2554 ซึ่งเป็นฉบับใหม่ล่าสุด โดยได้ระบุไว้เกี่ยวกับคู่มือการติดตั้งการส่องสว่างตามท้องถนนที่แบ่งแยกตามความเหมาะสมของถนน เช่น ค่าความสว่าง ค่าความสม่ำเสมอของแสง ซึ่งการติดตั้งเสาไฟเพื่อการส่องสว่างนั้นจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขและข้อกำหนดของกรมทางหลวง ซึ่งกำหนดไว้เพื่อความปลอดภัยของผู้ขับขี่ และผู้ใช้รถใช้ถนน

สำหรับระบบแสงสว่างไฟถนนในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มาจากหลอดโซเดียมความดันไอสูง แต่ในปัจจุบันพบว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงได้รับความสนใจในระบบแสงสว่างไฟถนนมากกว่าและกำลังเป็นที่นิยมเนื่องจากทั่วโลกให้ความสนใจและมีการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวหลอดไฟอย่างรวดเร็ว มีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพและคุณลักษณะของหลอดไดโอดเปล่งแสง ในงานวิจัยที่ [1-3] กล่าวโดยรวมว่าในปีที่ผ่านมา หลอดไดโอดเปล่งแสงได้รับความสนใจในระบบแสงสว่างไฟถนน เนื่องมาจากประสิทธิภาพของความส่องสว่างมากกว่า 150 lm/W มีอายุการใช้งานยาวนาน 50000-100000 ชั่วโมง ดัชนีความถูกต้องสีสูง (CRI) 70-90 รวมไปถึงความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน และในงานวิจัยที่ [4, 5] นำเสนอว่าหลอดโซเดียมความดันไอสูงให้แสงที่มีอุณหภูมิสีต่ำลักษณะสีของแสงเป็นสีเหลือง แต่จากการศึกษาพบว่าแสงสว่างที่ได้จากหลอดไดโอดเปล่งแสงมีข้อดีกว่าในระบบไฟถนน เนื่องจากเป็นแสงที่เพิ่มวิสัยทัศน์การมองเห็นและเพิ่มประสิทธิภาพความส่องสว่าง ในงานวิจัยที่ [6] กล่าวว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่นิยมเนื่องมาจาก มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน สามารถเลือกลักษณะสีของแสงได้ มีความน่าเชื่อถือและอายุการใช้งานยาวนาน และในส่วนของงานวิจัยที่ [7, 8] ก็แสดงให้เห็นว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายเช่น จอโทรศัพท์มือถือและจอแอลซีดี อื่นๆ ในการให้แสงสว่างภายในอาคาร รวมไปถึงใช้ในระบบแสงสว่างไฟถนนอีกด้วย

ในลำดับต่อมาเป็นงานวิจัยที่ศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง ในงานวิจัยที่ [9] นำเสนอการออกแบบกระจกการกระจายแสงรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับหลอดไดโอดเปล่งแสง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความสบายตาในการมองเห็นในระบบแสงสว่างไฟถนน และทำการปรับปรุงระบบระบายความร้อน ระบบการจ่ายไฟฟ้า ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงโอกาสที่นำโคมไฟหลอดไดโอดเปล่งแสงมาใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบแสงสว่างไฟถนน ในบทความที่ [10] พูดถึงความเป็นไปได้ในการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงแทนหลอดไฟแบบเก่า โดยออกแบบวงจรกำลังในการควบคุมกระแสและระบบระบายความร้อน ผลสรุปสามารถนำหลอดไดโอดเปล่งแสงไปใช้แทนหลอดแบบดังเดิมได้ แต่ต้องเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบป้องกัน กระแสแรงดันและอุณหภูมิ ในงานวิจัยที่ [11] ได้อธิบายเกี่ยวกับการออกแบบการกระจายแสงของโคมไฟถนนชนิดหลอดไดโอดเปล่งแสง ใช้โคมไฟถนนขนาด (การจำลอง) 75 วัตต์ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของเลนส์กระจายแสง ค่าความสว่างและค่าความสม่ำเสมอแสงให้เหมาะสมกับระบบไฟถนน ในงานวิจัยที่ [12] นำเสนอเลนส์กระจายแสงสำหรับโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง ที่สามารถเพิ่มค่าความสม่ำเสมอแสงในระบบแสงสว่างไฟถนนได้ ออกแบบให้เลนส์กระจายแสงเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่สมมาตรกัน สามารถบังคับแสงสว่างให้อยู่บนพื้นผิวถนนได้เกือบทั้งหมด ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถช่วยเพิ่มค่าความสม่ำเสมอแสงได้ 77%

ต่อมาจะเป็นในส่วนของงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงหรือหลอดไฟชนิดเก่ากับโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง ในงานวิจัยที่ [13] การวิเคราะห์และเปรียบเทียบแสงสำหรับระบบแสงสว่างในสวนสาธารณะ ในวงจรขับหลอดอิเล็กทรอนิกส์สำหรับโคมไฟหลอดไดโอดเปล่งแสงกับบัลลาสต์แกนเหล็กสำหรับหลอดโซเดียมความดันไอสูง ในมุมมองของการมองเห็นจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีสเปกตรัมแสงแตกต่างกัน สรุปได้ว่าการใช้โคมไฟหลอดไดโอดเปล่งแสงยังมีความสว่างน้อยกว่าการใช้หลอดโซเดียมความดันไอสูง แต่มีการประหยัดพลังงานมากกว่า ในบทความที่ [14] ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงแทนหลอดแสงจันทร์ในระบบแสงสว่างไฟถนนสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 50% และจากผลสำรวจความพึงพอใจของประชาชนที่ยอมรับได้ 80% ดังนั้นควรมีการสนับสนุนการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสง ในบทความที่ [15] นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงกับหลอดโซเดียมความดันไอสูงสำหรับระบบแสงสว่างไฟถนน เพื่อหาข้อสรุปว่าการใช้หลอดกำเนิดแสงแบบไหนมีประสิทธิภาพทางพลังงานมากกว่า และนำเสนอปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหลอดไดโอดเปล่งแสงและหลอดโซเดียมความดันไอสูง เช่น Mesopic Vision การหรี่แสง สีของแสง ผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงยังมีประสิทธิภาพทางแสงต่ำอยู่ แต่สามารถลดการใช้พลังงานในระบบแสงสว่างไฟถนน ซึ่งแสงสว่างที่ได้จากหลอดไดโอดเปล่งแสง (แสงสีขาว) สามารถเพิ่มทัศนวิสัยการมองเห็นในช่วงเวลากลางคืนได้ ในบทความที่ [16] นำเสนอการออกแบบประสิทธิภาพทางพลังงานในระบบแสงสว่างไฟถนนประเทศกาตาร์ ใช้โปรแกรม DIALux4.9 ในการศึกษาประสิทธิภาพความสว่างระหว่างหลอดไฟ 3 ชนิด หลอดไดโอดเปล่งแสง หลอดเมทัลฮาไลด์และหลอดโซเดียมความดันไอสูง จากงานวิจัยสรุปได้ว่าระบบแสงสว่างที่ได้ทำการออกแบบโดยใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 40% และ 9% เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้หลอดเมทัลฮาไลด์ และหลอดโซเดียมความดันไอสูงตามลำดับ

จากงานวิจัยที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าการใช้โคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงเข้ามาแทนระบบแสงสว่างแบบเก่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานและทัศนวิสัยโดยรวมของผู้ใช้รถใช้ถนนได้ ดั้งนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพแสงสว่างไฟถนนจากการใช้โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงกับโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง เมื่อมีการใช้งานบนพื้นผิวถนนที่มีคุณสมบัติการกระจายแสงแตกต่างกันทั้งในรูปแบบพื้นผิวถนนแห้งและพื้นผิวถนนเปียก

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ทำการวิเคราะห์คุณภาพแสงสว่างจากค่าความส่องสว่างเฉลี่ย ความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสงของแสง ในระบบแสงสว่างไฟถนนของประเทศไทย โดยเป็นการศึกษาจากการจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนด้วยโปรแกรม DIALux ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงกับโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง ในการใช้งานบนพื้นผิวถนนที่มีความแตกต่างกันทั้งในสภาวะพื้นผิวถนนแห้งและพื้นผิวถนนเปียก

วิธีดำเนินการวิจัย

1. คุณลักษณะพื้นผิวถนนที่ใช้ในการจำลอง

ค่าความสว่างบนพื้นผิวถนนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการมองเห็นและความสะดวกสบายของผู้ขับขี่ โดยทั่วไปประสิทธิภาพของความสว่างจะถูกกำหนดด้วยแสงสว่างที่ออก

จากหลอดไฟและโคมไฟถนนสะท้อนผ่านพื้นผิวถนนเข้าสู่ตาผู้ขับขี่ ดังนั้น ตัวหลอดไฟ โคมไฟถนน และคุณสมบัติการสะท้อนแสงบนพื้นผิวถนน ล้วนมีอิทธิพลต่อคุณภาพแสงสว่าง

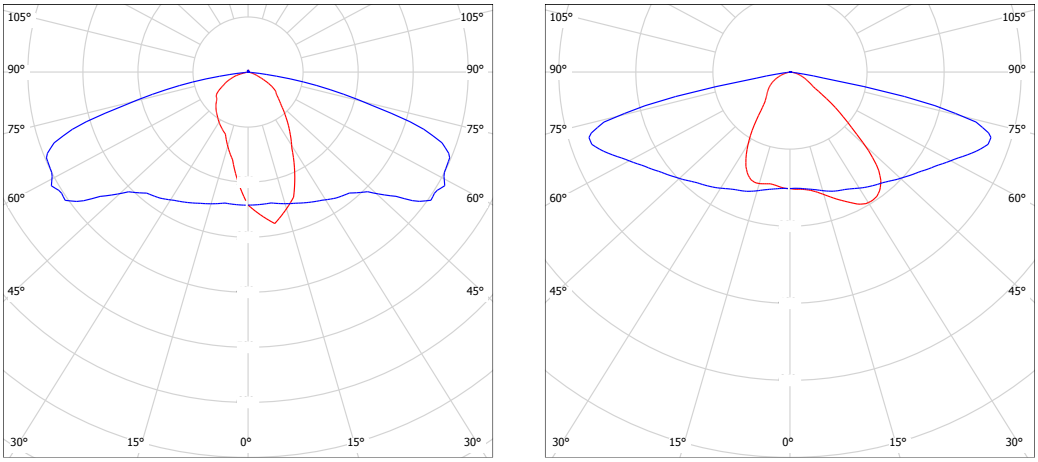
โดยทั่วไปพื้นผิวถนนที่นำมาใช้งานจะมีคุณสมบัติการกระจายแสงที่แตกต่างกันออกไป และเมื่อผิวถนนเกิดการเปียกแฉะ จะเกิดการสะท้อนแสงเป็นหย่อมๆ ทำให้มีค่าความสม่ำเสมอแสงลดลงอย่างมาก ส่งผลกระทบต่อทัศนวิสัยของผู้ขับขี่บนท้องถนน และอาจส่งผลต่อความปลอดภัยในการใช้รถใช้ถนน ในการกำหนดสมบัติการสะท้อนแสงของผิวถนน ถูกแบ่งออกตามมาตรฐานของ CIE ในสภาวะพื้นผิวถนนแห้งแบ่งออกเป็น 4 แบบ โดยใช้สัมประสิทธิ์ค่า Q_0 (R1 R2 R3 และ R4) และในสภาวะพื้นผิวถนนเปียกอีก 4 แบบ โดยใช้สัมประสิทธิ์ค่า Q_0 (W1 W2 W3 และ W4) แสดงดังตารางที่ 1 เป็นตัวบอกประเภทของผิวถนนคุณสมบัติในการสะท้อนแสง [17-18]

ตารางที่ 1 แสดงมาตรฐานของระดับการสะท้อนแสงของผิวถนน Q_0 ทั้งในสภาวะผิวถนนแห้ง (R) และพื้นผิวถนนเปียก (W) [19]

ลักษณะผิวถนน	ระดับผิวถนน	มาตรฐาน Q_0	ลักษณะผิวถนน
ผิวถนนแห้ง	R1	0.10	- แทน ผิวถนนคอนกรีต (Portland cement concrete) หรือผิวถนนแอสฟัลท์ที่ผสมหินบดและมีหินบดสีขาวสะท้อนแสงได้ดีไม่น้อยกว่า 12% ของจำนวนหินบด
	R2	0.07	- แทน ผิวถนนแอสฟัลท์ที่ผสมหินบดที่สะท้อนแสงไม่ดีไม่น้อยกว่า 60% ของจำนวนหินบด
	R3	0.07	- แทน ผิวถนนแอสฟัลท์ที่ผสมหินบดสีทึบแสง
	R4	0.08	- แทน ผิวถนนดาดด้วยแอสฟัลท์ที่มีผิวเรียบมาก
ผิวถนนเปียก	W1	0.11	- พื้นผิวถนน R1 ในลักษณะเปียกแต่ไม่ถึงกับท่วม
	W2	0.15	- พื้นผิวถนน R2 ในลักษณะเปียกแต่ไม่ถึงกับท่วม
	W3	0.20	- พื้นผิวถนน R3 ในลักษณะเปียกแต่ไม่ถึงกับท่วม
	W4	0.25	- พื้นผิวถนน R4 ในลักษณะเปียกแต่ไม่ถึงกับท่วม

2. การออกแบบระบบแสงสว่างไฟถนน

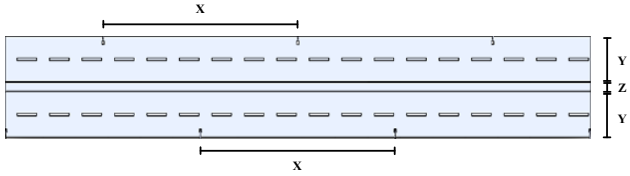
ในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองระบบแสงสว่างด้วยโปรแกรม DIALux เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพแสงสว่าง โดยใช้มาตรฐานของกรมทางหลวง ตุลาคม 2554 [20] เป็นเกณฑ์พิจารณาสำหรับการจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนทางหลวงสายหลัก มีเกณฑ์มาตรฐานกำหนดไว้คือ มีความส่องสว่างเฉลี่ยต่ำสุด 21.5 lux ค่าความสว่างเฉลี่ยต่ำสุด 1.5 cd/m^2 และมีค่าความสม่ำเสมอของความสว่างมากกว่า 0.4 โดยการจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนเลือกใช้โคมไฟถนนชนิดหลอดโซเดียมความดันไอสูงขนาด 250 W ที่มีการติดตั้งจริงบนถนนสายหลัก แสดงการกระจายแสงดังภาพที่ 1(ก) เทียบกับโคมไฟถนนชนิดหลอดไดโอดเปล่งแสงขนาด 120 W แสดงการกระจายแสงดังภาพที่ 1(ข)



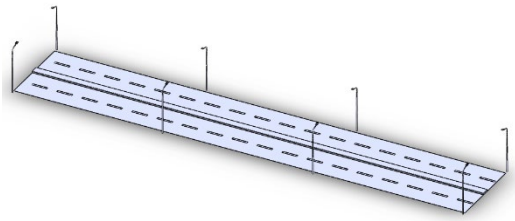
(ก) หลอดโซเดียมความดันไอสูง (ข) หลอดไดโอดเปล่งแสง

ภาพที่ 1 แสดงแผนภาพเส้นโค้งการกระจายแสง (Polar Curve) ของโคมไฟถนน

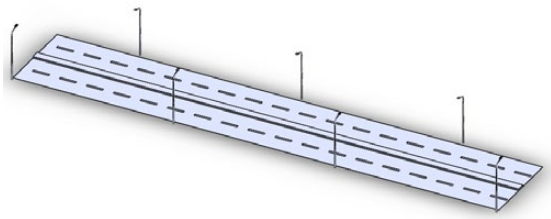
ความกว้างของถนนเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญเพราะมีผลต่อค่าความสว่าง ความส่องสว่าง และความสม่ำเสมอของแสง เมื่อความกว้างของถนนมีขนาดกว้างขึ้น คุณภาพของแสงจากโคมไฟถนนจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง ในกรณีศึกษาจึงพิจารณาถนนในรูปแบบถนนมีเกาะกลางแสดงดังภาพที่ 2 มีการติดตั้งเสาไฟแบบด้านตรงข้ามด้านตรงข้ามสลับและกิ่งคู่อยู่ตรงกลางดังภาพที่ 3 กำหนดให้ค่าความกว้างถนน (Y) ระยะห่างระหว่างเสาไฟถนน (X) และความกว้างของเกาะกลางถนน (Z) เท่ากับ 7 เมตร 36 เมตร และ 1.5 เมตร ตามลำดับ มีลักษณะเสาไฟถนนในการจำลองแสดงดังภาพที่ 4 มีค่าความสูงเสาไฟถนน (1) 9 เมตร ระยะยื่นของดวงโคมไฟถนน (2) 1.8 เมตร มุมเงย (3) 15 องศา ความยาวแขนโคมไฟถนน (4) 2.5 เมตร ตามมาตรฐานคู่มือแนะนำการออกแบบงานไฟฟ้าแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจร ของกรมทางหลวงชนบท [20]



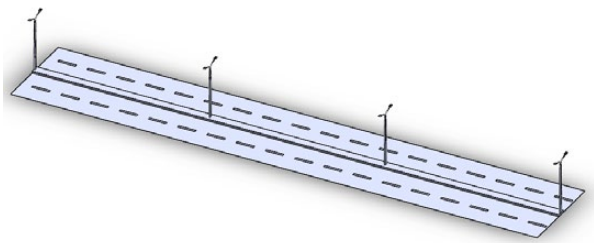
ภาพที่ 2 รูปแบบของถนนมีเกาะกลาง



การติดตั้งโคมไฟถนนแบบด้านตรงข้าม

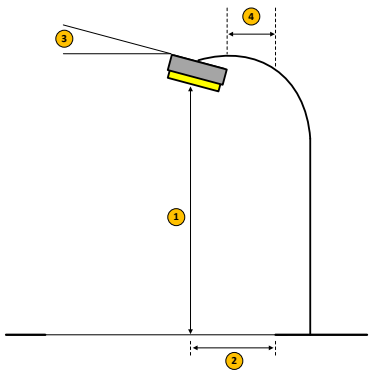


การติดตั้งโคมไฟถนนแบบด้านตรงข้ามสลับ



การติดตั้งโคมไฟถนนแบบกิ่งคู่อยู่บนเกาะกลางถนน

ภาพที่ 3 รูปแบบการติดตั้งเสาไฟถนน



ภาพที่ 4 แสดงลักษณะองค์ประกอบของเสาไฟถนน

ผลการวิจัย

ผลลัพธ์จากการจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนด้วยโปรแกรม DIALux ระหว่างการใช้โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูง เปรียบเทียบกับการใช้โคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง เพื่อวิเคราะห์คุณภาพแสงสว่างไฟถนน ในกรณีที่มีการใช้พื้นผิวถนนที่แตกต่างกัน ทั้งในสภาวะพื้นผิวถนนแห้ง (มีพื้นผิวถนนชนิด R1 R2 R3 และ R4) และสภาวะพื้นผิวถนนเปียก (มีพื้นผิวถนนชนิด W1 W2 W3 และ W4) โดยจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนรูปแบบถนนมีเกาะกลาง เลือกใช้การติดตั้งเสาไฟถนนแบบ ด้านตรงข้าม ด้านตรงข้ามสลับและกิ่งคู่อยู่บนเกาะกลางกลาง พิจารณาคุณภาพแสงสว่างไฟถนนจากค่าความส่องสว่างเฉลี่ย (E_{av}) ค่าความสว่างเฉลี่ย (L_{av}) และค่าความสม่ำเสมอแสง (U_o) โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากเกณฑ์การส่องสว่างไฟถนนของประเทศไทยในถนนสายหลัก ที่กำหนดให้มีค่าความส่องสว่างเฉลี่ย ค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสง มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 21.5 lux 1.5 cd/m^2 และ 0.4 ตามลำดับ

กรณีที่ 1 การจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนในกรณีพื้นผิวแห้ง ชนิด R

ผลจากการจำลองจะแบ่งออกเป็นพื้นผิวถนนแห้งชนิด R1 R2 R3 และ R4 เพื่อวิเคราะห์คุณภาพแสงสว่างไฟถนนจากการใช้โคมไฟถนนชนิดหลอดโซเดียมความดันไอสูงกับโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง ที่มีการติดตั้งเสาไฟถนนแบบ ด้านตรงข้าม ด้านตรงข้ามสลับและกิ่งคู่อยู่บนเกาะกลางถนน แสดงผลการจำลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลการจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนเปรียบเทียบระหว่างการใช้โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงกับหลอดไดโอดเปล่งแสง ในกรณีถนนมีเกาะกลาง สภาวะพื้นผิวถนนแห้ง ชนิด R

ถนนมีเกาะกลางกว้าง 14 เมตร								
ประเภทพื้นผิวถนน	ข้อมูล	มาตรฐาน	โคมไฟถนน HPS			โคมไฟถนน LED		
			ด้านตรงข้าม	ด้านตรงข้ามสลับ	กิ่งคู่	ด้านตรงข้าม	ด้านตรงข้ามสลับ	กิ่งคู่
R1	E_{av} (lux)	≥21.5	36	36	37	19	19	14
	L_{av} (cd/m^2)	≥1.5	3.55	3.55	3.55	1.94	1.94	1.36
	U_o	≥0.4	0.68	0.69	0.67	0.64	0.63	0.59
R2	E_{av} (lux)	≥21.5	36	36	37	19	19	14
	L_{av} (cd/m^2)	≥1.5	2.63	2.63	2.66	1.37	1.37	1.02
	U_o	≥0.4	0.65	0.65	0.63	0.68	0.70	0.63
R3	E_{av} (lux)	≥21.5	36	36	37	19	19	14
	L_{av} (cd/m^2)	≥1.5	2.60	2.60	2.61	1.33	1.33	1.01
	U_o	≥0.4	0.61	0.62	0.53	0.74	0.78	0.57
R4	E_{av} (lux)	≥21.5	36	36	37	19	19	14
	L_{av} (cd/m^2)	≥1.5	2.86	2.86	2.88	1.42	1.42	1.12
	U_o	≥0.4	0.58	0.60	0.46	0.73	0.74	0.51

จากการใช้โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้งานได้ทุกสภาวะพื้นผิวถนนสำหรับการติดตั้งทั้ง 3 รูปแบบ เนื่องจากมีค่าความส่องสว่างเฉลี่ย ค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสงมากกว่ามาตรฐานกำหนด โดยทั้ง 3 รูปแบบ การติดตั้งเสาไฟถนนมีค่าคุณภาพแสงสว่างใกล้เคียงกัน เนื่องจากตัวโคมไฟถนนมีฟลักซ์ส่องสว่างสูง จึงทำให้มี

ประสิทธิภาพแสงสว่างใกล้เคียงกัน ในส่วนของการใช้โคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งโคมไฟถนนทั้ง 3 รูปแบบ โดยรวมแล้วยังให้ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยและค่าความสว่างเฉลี่ยต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด ยกเว้นค่าความสม่ำเสมอแสง สำหรับการติดตั้งในรูปแบบด้านตรงข้ามและด้านตรงข้ามสลับแสดงให้เห็นว่ามีค่าความส่องสว่างเฉลี่ย ค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสงมากกว่าการติดตั้งแบบกิ่งคู่อยู่บนเกาะกลางถนน

จากการเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างโคมไฟถนนทั้ง 2 ชนิด โดยรวมแล้วโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงจะให้ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยและค่าความสว่างเฉลี่ยสูงกว่าการใช้โคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง เมื่อเปรียบเทียบจากการติดตั้งเสาไฟถนนในรูปแบบเดียวกัน แต่สำหรับค่าความสม่ำเสมอแสงการใช้โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับการติดตั้งเสาไฟถนนทั้ง 3 รูปแบบ แต่การใช้โคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแบบด้านตรงข้ามและด้านตรงข้ามสลับให้ค่าความสม่ำเสมอแสงดีกว่าการติดตั้งแบบกิ่งคู่อยู่บนเกาะกลางถนน

สำหรับคุณภาพแสงสว่างบนพื้นผิวถนนที่แตกต่างกัน ในกรณีของโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงแสดงให้เห็นว่ารูปแบบของพื้นผิวถนนที่แตกต่างกัน (R1, R2, R3 และ R4) จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความส่องสว่างเฉลี่ย เมื่อพิจารณาค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสงจากการใช้งานบนพื้นผิวถนนทั้ง 4 ชนิด แสดงให้เห็นว่าโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงให้ค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสงดีที่สุดในกรณีพื้นผิวถนนเป็นชนิด R1 โดยพื้นถนนชนิด R4 จะให้ค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสงดีรองลงมาจากพื้นผิวถนนชนิด R1 ส่วนสำหรับพื้นผิวถนนชนิด R2 และ R3 พบว่ามีค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสงไฟถนนใกล้เคียงกัน

ในกรณีของโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงแสดงให้เห็นว่า รูปแบบของพื้นผิวถนนที่แตกต่างกัน (R1, R2, R3 และ R4) ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความส่องสว่างเฉลี่ย เมื่อพิจารณาที่ค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสง จากการใช้งานบนพื้นผิวถนนทั้ง 4 ชนิด พบว่าพื้นพิวถนนที่มีคุณสมบัติแบบ R1 สามารถให้ค่าความสว่างเฉลี่ยได้ดีที่สุด ในพื้นผิวถนนแบบ R2 R3 และ R4 มีค่าความสว่างเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน สำหรับค่าความสม่ำเสมอแสงพื้นผิวถนนชนิด R2 R3 และ R4 มีค่าความสม่ำเสมอแสงดีกว่าพื้นผิวถนนชนิด R1 เล็กน้อย

จากผลในการจำลองทางแสงสว่างสำหรับกรณีถนนมีเกาะกลาง มีการติดตั้งเสาไฟถนนแบบด้านตรงข้าม ด้านตรงข้ามสลับและกิ่งคู่อยู่บนเกาะกลางถนน แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวถนนชนิด R1 ให้คุณภาพแสงสว่างดีที่สุดสำหรับการใช้งานกับโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงและโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความส่องสว่างเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือพื้นผิวถนนชนิด R4 สำหรับพื้นผิวถนนชนิด R2 และ R3 จะให้คุณภาพแสงสว่างใกล้เคียงกัน แต่การใช้งานโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงแสดงให้เห็นว่ายังมีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยและค่าความสว่างเฉลี่ยต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้นในกรณีติดตั้งเสาไฟถนนแบบด้านตรงข้ามและด้านตรงข้ามสลับบนพื้นผิวถนนชนิด R1 เท่านั้นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับค่าความสม่ำเสมอแสงพบว่ามีค่าสูงกว่ามาตรฐานกำหนดในทุกกรณีการใช้งานและมีค่ามากกว่าการใช้โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูง

กรณีที่ 2 การจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนในกรณีประเภทพื้นผิวเปียก ชนิด W

ผลจากการจำลองจะแบ่งออกเป็นพื้นผิวถนนเปียกชนิด W1 W2 W3 และ W4 เพื่อวิเคราะห์คุณภาพแสงสว่างไฟถนนจากการใช้โคมไฟถนนชนิดหลอดโซเดียมความดันไอสูงกับโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง ที่มีการติดตั้งเสาไฟถนนแบบ ด้านตรงข้าม ด้านตรงข้ามสลับและกิ่งคู่อยู่บนเกาะกลางถนน แสดงผลการจำลองดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนเปรียบเทียบระหว่างการใช้โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงกับหลอดไดโอดเปล่งแสง ในกรณีถนนมีเกาะกลาง สภาวะพื้นผิวถนนเปียก ชนิด W

ถนนมีเกาะกลางกว้าง 14 เมตร								
ประเภทพื้นผิวถนน	ข้อมูล	มาตรฐาน	โคมไฟถนน HPS			โคมไฟถนน LED		
			ด้านตรงข้าม	ด้านตรงข้ามสลับ	กิ่งคู่	ด้านตรงข้าม	ด้านตรงข้ามสลับ	กิ่งคู่
W1	E_{av} (lux)	≥21.5	36	36	37	19	19	14
	L_{av} (cd/m^2)	≥1.5	5.09	5.10	5.22	2.33	2.34	2.05
	U_o	≥0.4	0.44	0.45	0.35	0.50	0.54	0.36
W2	E_{av} (lux)	≥21.5	36	36	37	19	19	14
	L_{av} (cd/m^2)	≥1.5	7.02	7.04	7.19	3.09	3.10	2.85
	U_o	≥0.4	0.26	0.29	0.21	0.30	0.35	0.21
W3	E_{av} (lux)	≥21.5	36	36	37	19	19	14
	L_{av} (cd/m^2)	≥1.5	9.10	9.13	9.27	3.90	3.91	3.69
	U_o	≥0.4	0.17	0.19	0.14	0.20	0.22	0.14
W4	E_{av} (lux)	≥21.5	36	36	37	19	19	14
	L_{av} (cd/m^2)	≥1.5	10.07	10.11	10.19	4.23	4.24	4.04
	U_o	≥0.4	0.11	0.11	0.09	0.13	0.13	0.08

จากการใช้โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งเสาไฟถนนทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยและค่าความสว่างเฉลี่ยใกล้เคียงกันและเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานกำหนดในทุกสภาวะพื้นผิวเปียก (W1, W2, W3 และ W4) แต่สำหรับค่าความสม่ำเสมอแสง มีเพียงกรณีการติดตั้งแบบด้านตรงข้ามและด้านตรงข้ามสลับบนพื้นผิวถนนเปียก W1 เท่านั้นที่ผ่านมาตรฐานกำหนด ส่วนการใช้โคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งเสาไฟถนนแบบกิ่งคู่อยู่บนเกาะกลางถนนให้คุณภาพแสงสว่างน้อยกว่าการติดตั้งในรูปแบบอื่นๆ เมื่อพิจารณาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยพบว่าการติดตั้งเสาไฟถนนทั้ง 3 รูปแบบยังให้ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยที่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด แต่ค่าความสว่างเฉลี่ยของการใช้งานโคมไฟถนนหลอด

ไดโอดเปล่งแสงกลับมีค่าสูงกว่ามาตรฐานกำหนดในทุกกรณีศึกษา สำหรับค่าความสม่ำเสมอแสงจะมีเพียงบางกรณีเท่านั้นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

จากการเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างโคมไฟถนนทั้ง 2 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบจากการติดตั้งเสาไฟถนนในรูปแบบเดียวกัน โดยรวมแล้วโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงให้ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยและค่าความสว่างเฉลี่ยสูงกว่าการใช้โคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสง สำหรับค่าความสม่ำเสมอแสงการใช้โคมไฟถนนทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาจากการใช้งานบนพื้นผิวเปียกที่ระดับเดียวกัน อย่างไรก็ตามการติดตั้งเสาไฟถนนในรูปแบบกิ่งคู่อยู่บนเกาะกลางถนนให้ค่าความสม่ำเสมอแสงต่ำกว่าการติดตั้งอีกสองรูปแบบ

คุณภาพแสงสว่างบนพื้นผิวถนนเปียก ในกรณีของโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูง แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติของพื้นผิวถนนเปียกที่แตกต่างกัน (W1, W2, W3 และ W4) จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความส่องสว่างเฉลี่ย โดยพิจารณาจากผลการจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนที่มีการติดตั้งเสาไฟถนนรูปแบบเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสง จากการใช้งานบนพื้นผิวถนนเปียกทั้งหมด 4 รูปแบบแสดงให้เห็นว่าโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงให้ค่าความสว่างดีที่สุดบนพื้นผิวถนนเปียกชนิด W4 W3 W2 และ W1 ตามลำดับ ในส่วนของค่าความสม่ำเสมอแสงการใช้งานบนพื้นผิวถนนเปียก W1 จะให้ค่าความสม่ำเสมอแสงดีที่สุด รองลงมาเป็นพื้นผิวถนน W2 W3 และ W4 ตามลำดับ

สำหรับกรณีของโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงแสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติของพื้นผิวถนนเปียกที่แตกต่างกัน (W1, W2, W3 และ W4) ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความส่องสว่างเฉลี่ย โดยพิจารณาจากผลการจำลองระบบแสงสว่างไฟถนนที่มีการติดตั้งเสาไฟถนนรูปแบบเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสง จากการใช้งานบนพื้นผิวถนนเปียกทั้งหมด 4 รูปแบบแสดงให้เห็นว่าโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการใช้งานโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูง คือ มีค่าความสว่างเฉลี่ยดีที่สุดบนพื้นผิวถนนเปียกชนิด W4 W3 W2 และ W1 ตามลำดับ ในส่วนของค่าความสม่ำเสมอแสงการใช้งานบนพื้นผิวถนนเปียก W1 จะให้ค่าความสม่ำเสมอแสงดีที่สุด รองลงมาเป็นพื้นผิวถนน W2 W3 และ W4 ตามลำดับ

จากผลในการจำลองทางแสงสว่างสำหรับกรณีถนนมีเกาะกลาง มีการติดตั้งเสาไฟถนนแบบด้านตรงข้าม ด้านตรงข้ามสลับและติดตั้งแบบกิ่งคู่อยู่บนเกาะกลางถนน แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวถนนเปียกชนิด W4 ให้ค่าความสว่างเฉลียดีที่สุดแต่ในทางตรงกันข้ามมีค่าความสม่ำเสมอแสงต่ำที่สุด สำหรับการใช้งานโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงและโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงบนผิวถนนเปียกที่มีคุณสมบัติพื้นผิวถนนแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่ามีเพียงเฉพาะการติดตั้งเสาไฟถนนแบบด้านตรงข้ามและด้านตรงข้ามสลับ บนพื้นผิวถนนชนิด W1 เท่านั้นสำหรับโคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงที่มีคุณภาพแสงสว่างผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้ง 3 ค่า แต่ในกรณีอื่นๆ ยังมีค่าความสม่ำเสมอแสงต่ำเกินไป สำหรับโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงแสดงให้เห็นว่ามีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากคุณสมบัติของพื้นผิวถนนไม่มีผลต่อค่าความส่องสว่าง อย่างไรก็ตามพบว่าการติดตั้งเสาไฟถนนแบบด้านตรงข้ามและด้านตรงข้ามสลับ บนพื้นผิวถนนชนิด W1 มีความเหมาะสมมากที่สุดเนื่องจากมีค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสงที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

สรุปและอภิปรายผล

แสงสว่างจากโคมไฟถนนถือเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณภาพแสงสว่างไฟถนน เช่น ค่าความส่องสว่างเฉลี่ย ค่าความสว่างเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอแสง ดังนั้นโคมไฟถนนที่มี

คุณสมบัติแตกต่างกันส่งผลให้มีคุณภาพแสงสว่างไฟถนนแตกต่างกันด้วย จากการเปรียบเทียบคุณภาพแสงสว่างไฟถนนระหว่างการใช้โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงและโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงพบว่า โคมไฟถนนหลอดโซเดียมความดันไอสูงมีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยและค่าความสว่างเฉลี่ยสูงกว่า เนื่องมาจากตัวโคมไฟถนนมีค่าฟลักซ์ส่องสว่างที่สูงกว่า แต่ในทางตรงกันข้ามโคมไฟถนนหลอดไดโอดเปล่งแสงสามารถให้ค่าความสม่ำเสมอแสงที่ดีกว่าเนื่องจากโคมไฟถนนชนิดนี้ใช้เลนส์เป็นตัวกระจายแสง ทำให้สามารถควบคุมความเข้มแสงสว่างบนพื้นผิวถนนได้ดีกว่า

สำหรับคุณภาพแสงสว่างไฟถนนบนพื้นผิวที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันพบว่า คุณสมบัติของพื้นผิวถนนไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความส่องสว่าง ในกรณีพื้นผิวถนนแห้งที่มีคุณสมบัติ Q_0 สูงจะให้คุณภาพแสงสว่างที่ดีกว่าพื้นผิวถนนที่มีคุณลักษณะ Q_0 ต่ำ สำหรับในกรณีพื้นผิวถนนเปียกพบว่า ทำให้เกิดความสว่างบนพื้นผิวขึ้นเป็นหย่อมๆ ส่งผลให้โดยรวมมีค่าความสว่างเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามกลับทำให้มีค่าความสม่ำเสมอแสงลดลง ส่งผลกระทบต่อทัศนวิสัยของผู้ขับขี่

เอกสารอ้างอิง

[1] E. F. Schubert. (2003). *Light-Emitting Diodes*. 1th ed. New York: Cambridge University Press.

[2] Y. K. Cheng and K. W. E. Cheng. (2006). *General Study for using LED to replace traditional lighting Devices*. in 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, pp. 173-177.

[3] C. R. B. S. Rodrigues, P. S. Almeida, G. M. Soares, J. M. Jorge, D. P. Pinto, and H. A. C. Braga. (2011). *An experimental comparison between different technologies arising for public lighting: LED luminaires replacing high pressure sodium lamps*. in IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 141-146.

[4] J. Fraytag, M. F. da Silva, N. B. Chagas, R. N. do Prado, and M. A. D. Costa. (2010). *Lighting systems energy efficiency based on different human visual conditions*. in 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2010, pp. 1-6.

[5] I. Lewin. (1999). Lamp Color and Visibility in Outdoor Lighting Design. presented at the Conference of the Institution of Lighting Engineers.

[6] Alan, M. (2003). Solid state lighting-a world of expanding opportunities at LED 2002, III-V Rev. 1(16): 30-33.

[7] X. Luo, T. Cheng, W. Xiong, Z. Gan and S. Liu. (2007). Thermal analysis of an 80 W light-emitting diode street light fixture. IET Optoelectron. 1(5): 191-196.

[8] iu S. and Luo X.B. (2011). LED Packaging for Lighting Applications: Design, Manufacturing and Reliability, John Wiley and Sons, pp. 3-6.

[9] Yi Luo, Xianpeng Zhang, Jiayao Liu, Changbo Zhou, Keyuan Qian, Yanjun Han, (2008, Aug. 2-15). LED street lighting technologies with high human-eye comfortability, Nano-Optoelectronics Workshop, 2008. i-NOW 2008. International, pp. 84-85.

[10] Y. K. Cheng, K. W. E. Cheng. (2006, Nov. 12-14). General Study for using LED to replace

traditional lighting devices, Power Electronics Systems and Applications, 2006. ICPESA ‹06. 2nd International Conference on. pp. 173-177.

[11] V.C. Bender, F.B. Mendes, T. Maggi, M.A. Dalla Costa, T.B. Marchesan. (2013, Oct. 27-31). Design methodology for street lighting luminaires based on a photometrical analysis, Power Electronics Conference (COBEP), 2013 Brazilian, pp. 1160-1165.

[12] Kai Yang, Jidong Song, Yuqing Chen, Bin Lin. (2011, July 29-31). Secondary light distribution design for LED street light. Electronics and Optoelectronics (ICEOE), 2011 International Conference on, vol.2, pp. V2-378-V2-381.

[13] C. Rodrigues, P.S. Almeida, G.M. Soares, J.M. Jorge, D.P. Pinto, H. Braga, A C. (2011, June 27-30). An experimental comparison between different technologies arising for public lighting: LED luminaires replacing high pressure sodium lamps, Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on, pp. 141-146.

[14] Su-Chin Huang, Li-Ling Lee, Ming-Shan Jeng, Yao-Ching Hsieh. (2012, Nov. 11-14). Assessment of energy-efficient LED street lighting through large-scale demonstration. Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on, pp. 1-5.

[15] Li. Fusheng, Dahua Chen, Xianjie Song, Yuming Chen. (2009, March 27-31). LEDs: A Promising Energy-Saving Light Source for Road Lighting, Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific, pp. 1-3.

[16] S. Alzubaidi, P.K. Soori. (2012, June 6-7). Study on energy efficient street lighting system design. Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, 2012 IEEE International, pp. 291-295.

[17] CIE/PIARC. (1984). Road surfaces and lighting. Joint technical report No. 066.

[18] CIE. (1979). Road Lighting for Wet Conditions. Publication No. 47.

[19] แนวทางการปฏิบัติด้านประสิทธิผลทางพลังงานของโคมไฟถนน, มาตรฐานการปฏิบัติวิชาชีพ สภาวิศวกรรมกุมภาพันธ์ 2554.

[20] คู่มือแนะนำการออกแบบงานไฟฟ้าแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจร, ของกรมทางหลวงชนบท, ตุลาคม 2554.