

**แนวทางการออกแบบช่องเปิดผนังอาคารสำนักงาน
โดยใช้กระจกอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แสงธรรมชาติ
Design Guidelines for Enhancing Daylight Performance in Office Building
by Using Electrochromic Glass**

ภัทรกร หลิมชุตระกุล¹ และ อวิรุทธ์ ศรีสุธาพรรณ^{2*}
Pattarakon Limchutrakul¹ and Awiroot Srisutapan^{2*}

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12121 ประเทศไทย
Faculty of Architecture and Planning, Thammasat University, Pathumthani 12121, Thailand

* Corresponding author e-mail: yok_zon@hotmail.com¹, awi_cl@hotmail.com^{2*}

Received 21/1/2020 Revised 12/5/2020 Accepted 26/05/2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการนำแสงธรรมชาติและการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการใช้กระจกอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นกระจกที่สามารถปรับเปลี่ยนความขุ่น -ใสของกระจก ปรับเปลี่ยนค่าการส่องผ่านของแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ได้ โดยศึกษาตัวแปรอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่อัตราส่วนต่าง ๆ การวางทิศทางของอาคาร และเปรียบเทียบกับกระจกประเภทอื่น ๆ ที่มีค่าการส่องผ่านของแสงใกล้เคียงกับกระจกอิเล็กทรอนิกส์ ทำการจำลองและประเมินผลแสงธรรมชาติแบบพลวัตโดยใช้โปรแกรม DIVA for Rhino และด้านพลังงานไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม eQUEST 3.65 ผลการศึกษาพบว่า กระจกอิเล็กทรอนิกส์ให้ผลในการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคารใกล้เคียงกับกระจกชนิดอื่น ๆ เมื่อมีสถานะใส แต่จะช่วยป้องกันการเกิดแสงจ้าให้กับช่องเปิดที่ได้รับแสงตรงจากดวงอาทิตย์ได้มากเมื่อกระจกเปลี่ยนเป็นสถานะขุ่น ซึ่งจะส่งผลในการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารด้วย นอกจากนี้ยังช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าของอาคารในทิศตะวันออกและทิศตะวันตกได้ร้อยละ 25.80 และ 28.86 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กระจกลามิเนตสีเขียว แต่อย่างไรก็ดี การวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์เป็นเรื่องที่ควรพิจารณาควบคู่กันไปด้วย

คำสำคัญ

กระจกอิเล็กทรอนิกส์
แสงธรรมชาติ
อาคารสำนักงาน

Abstract

The objectives of this research were to study the efficiency of daylight and energy consumption from electrochromic glass which can adjust to be either tint or transparency as well as the visible light transmission and solar heat gain coefficient. By studying the variable of window to wall ratio, building orientation and comparing with other types of glass. DIVA for Rhino was used for simulating and evaluating daylight performance. eQUEST 3.65 was used for analyzing energy consumption. The results showed that electrochromic glass was similar to other types of glass in transmitting daylight into the building when the status is transparent. Moreover, it can prevent glare when the glass turns into fully tinted stated. As a result, it will affect the reduction of heat transfer into the building as well. Furthermore, it can save electric energy in air conditioning and lighting systems including building energy consumption, especially in the east and the west by 25.80 and 28.86 percent respectively when compared with the use of green laminated glass. However, economic issue should be considered.

Keywords

Electrochromic Glass

Daylight

Office Building

1. บทนำ

การออกแบบอาคารสำนักงานโดยทั่วไปจะใช้ผนังกระจกเป็นองค์ประกอบของเปลือกอาคาร ซึ่งนอกจากจะช่วยให้ผู้ใช้งานในอาคารสามารถมองเห็นทัศนียภาพภายนอกแล้ว ยังช่วยให้พื้นที่ใช้งานในอาคารได้รับแสงธรรมชาติด้วย ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่างในอาคารลดลง แต่ในขณะเดียวกันบางช่วงเวลาอาจทำให้มีพื้นที่ภายในอาคารได้รับแสงอาทิตย์ตรงอันเป็นสาเหตุของการเกิดแสงจ้าและความร้อน ส่งผลต่อความสบายตาและการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาโดยการออกแบบ คือ การพิจารณาเลือกใช้กระจกที่มีประสิทธิภาพ คือ กระจกที่สามารถนำแสงธรรมชาติเข้าสู่พื้นที่ภายในอาคารได้ค่อนข้างมากและป้องกันความร้อนได้ดี

เทคโนโลยีกระจกในปัจจุบันเริ่มพัฒนากระจกให้สามารถปรับเปลี่ยนสถานะจากกระจกใสเป็นกระจกขุ่นควบคุมโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้ค่าการส่องผ่านของแสง (Visible Light Transmission: VLT) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (Solar Heat Gain Coefficient: SHGC) ของกระจกเปลี่ยนไปได้

เดิมทีเทคโนโลยีกระจกนี้มีการใช้งานเฉพาะภายในอาคาร แต่ปัจจุบันถูกพัฒนาให้สามารถใช้งานกับภายนอกอาคารได้ด้วย กระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิกเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีกระจกดังกล่าว ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระจกชนิดนี้มีประสิทธิภาพด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าเทคโนโลยีกระจกชนิดอื่น ๆ (Baetens, Jelle & Gustavsen, 2010), (Sbar, Podbelski, Yang & Pease, 2012).

เพื่อนำมาสู่ข้อเสนอแนะวิธีการใช้กระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิก ในการออกแบบช่องเปิดผนังภายนอกอาคารสำนักงานงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้กระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิกในการนำแสงธรรมชาติมาใช้งานในอาคาร

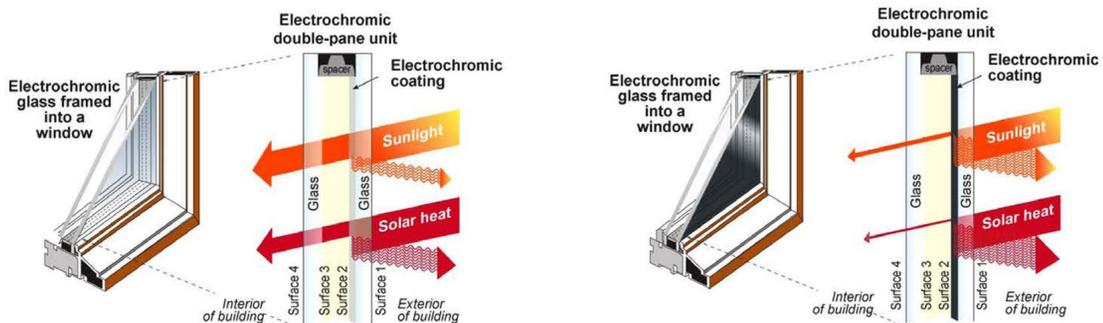
2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีกระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิก

อิเล็กทรอนิกส์โครมิก คือ แผ่นฟิล์มบางที่นำมาประกอบเป็นกระจกฉนวนกันความร้อน (Insulating Glass Unit : IGU) เมื่อเกิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าทำให้กระจกเปลี่ยนสถานะจากใสเป็นขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 1 (ขวา) เนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีส่งผลให้ฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีทึบ ในทางกลับกันเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับชั่วคราว กระจกจะกลับมาเป็นสถานะใสอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 1 (ซ้าย) ทั้งนี้กระแสไฟฟ้าถูกควบคุมโดย DC Power Supply ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 5 โวลต์ และใช้พลังงานไฟฟ้าควบคุมสถานะของกระจก 60 วัตต์ต่อพื้นที่กระจก 140 ตารางเมตร (Sbar, Podbelski, Yang & Pease, 2012) ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคาร

2.2 มาตรฐานการประเมินแสงธรรมชาติภายในอาคาร

การประเมินแสงธรรมชาติภายในอาคารประกอบด้วย 2 วิธี คือ การประเมินแสงธรรมชาติแบบอพลวัต (Static Daylighting Evaluation Method) และการประเมินแสงธรรมชาติแบบพลวัต (Dynamic Daylighting Evaluation Method) (Mardaljevic, Heschong & Lee, 2009) มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 1 แสดงหลักการทำงานของกระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิก (Shows the operation of electrochromic glass)

1) การประเมินแสงธรรมชาติแบบพลวัต (Static Daylighting Evaluation Method)

การประเมินแสงธรรมชาติแบบพลวัตด้วยวิธีตัวประกอบแสงธรรมชาติ (Daylight Factor Method : DF) เป็นการเปรียบเทียบสัดส่วนของความส่องสว่างภายในต่อความส่องสว่างภายนอกโดยคำนวณได้จาก (ความส่องสว่างแนวราบภายในของตำแหน่งที่อ้างอิง x 100)/ความส่องสว่างแนวราบภายนอกที่ไม่โดนแสงตรงจากดวงอาทิตย์

2) การประเมินแสงธรรมชาติแบบพลวัต (Dynamic Daylighting Evaluation Method)

การประเมินแสงธรรมชาติแบบพลวัตเป็นการจำลองแสงธรรมชาติภายใต้สภาพท้องฟ้าจริงที่เกิดขึ้นในทุก ๆ ชั่วโมง โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศของแต่ละสถานที่ตั้ง ทำให้ปริมาณแสงธรรมชาติที่ประเมินได้มีความละเอียดและถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงผลได้ด้วยค่าต่าง ๆ ดังนี้

- Spatial Daylight Autonomy (sDA)

อธิบายถึงร้อยละของพื้นที่ที่ได้รับแสงธรรมชาติที่มีความส่องสว่างมากกว่า 300 ลักซ์ เป็นระยะเวลา มากกว่าร้อยละ 50 ของชั่วโมงการทำงานตลอดปี เช่น ค่า $sDA_{300/50\%} = 55$ หมายถึง ร้อยละ 55 ของพื้นที่ใช้งานประจำได้รับแสงธรรมชาติที่มีความส่องสว่างอย่างน้อย 300 ลักซ์ เป็นระยะเวลาอย่างน้อยร้อยละ 50 ของชั่วโมงการทำงานตลอดปี

- Annual Sunlight Exposure (ASE)

อธิบายถึงร้อยละของพื้นที่ที่ได้รับแสงธรรมชาติที่มีความส่องสว่างมากกว่า 1,000 ลักซ์ เป็นระยะเวลา มากกว่า 250 ชั่วโมง ของชั่วโมงการทำงานตลอดปี เช่น ค่า $ASE_{1000,250} = 10$ หมายถึง ร้อยละ 10 ของพื้นที่ใช้งานประจำได้รับแสงธรรมชาติที่มีความส่องสว่างมากกว่า 1,000 ลักซ์ เป็นระยะเวลา มากกว่า 250 ชั่วโมง ของชั่วโมงการทำงานตลอดปี

- Useful Daylight Illuminance (UDI)

อธิบายถึงร้อยละของชั่วโมงการทำงานตลอดทั้งปี ที่สามารถใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติได้โดยจะแบ่งการประเมินออกเป็นช่วง (Mardaljevic, 2017) เช่น $UDI_{300-3,000} = 80$ หมายถึง ร้อยละ 80 ของช่วงเวลางานตลอดปีได้รับแสงธรรมชาติที่มีความส่องสว่างในช่วง 300-3,000 ลักซ์ ทั้งนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

0-300 ลักซ์ : เป็นช่วงที่แสงธรรมชาติไม่เพียงพอต่อการใช้งาน

300-3,000 ลักซ์ : เป็นช่วงที่แสงธรรมชาติเพียงพอต่อการใช้งาน และใช้แสงธรรมชาติได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า

3,000 ลักซ์ ขึ้นไป : เป็นช่วงที่แสงธรรมชาติเข้ามา ยังพื้นที่มากเกินความต้องการ ทำให้เกิดความไม่สบายตา หรือแสงจ้า

2.3 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผ่านมามีหลายประเทศมีการศึกษา ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโดยใช้ เทคโนโลยีกระจกอัจฉริยะ เช่น กระจกเทอร์โมโครมิก (Thermochromic Glass), กระจกลิควิด คริสตัล (Liquid Crystals Glass), กระจก Suspended Particles และ กระจกอิเล็กโตรโครมิก (Electrochromic Glass) เป็นต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การวิจัยในประเทศไทย

จากการศึกษาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหน้าต่างกระจก 3 ชนิด คือ เทอร์โมโครมิก, PDLC (Polymer-Dispersed Liquid Crystal), และโลว์-อี ในเขตอากาศร้อนชื้น พบว่ากระจกที่ช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในการทำความเย็นของอาคารขนาดใหญ่ในเขตอากาศร้อนชื้นได้ดี คือ กระจกลามิเนตเทอร์โมโครมิกโลว์-อี รองลงมาคือกระจกฉนวนกันความร้อน PDLC และกระจก ลามิเนต PDLC ตามลำดับ ผลของการประหยัดพลังงานแปรผันตรงกับอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังทึบ และเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ราคาของกระจกควรต่ำลง แต่หากราคาของกระจกทั้ง 3 ชนิด ไม่สามารถต่ำลงได้ กระจกลามิเนตโลว์-อี เป็นทางเลือก รองลงมา (Na Songkhla, 2015)

2) การวิจัยในต่างประเทศ

ต่อมาได้มีการพัฒนามาเป็นกระจกลิควิด คริสตัล และกระจก Suspended Particles ซึ่งเป็นเทคโนโลยี กระจกที่ควบคุมสถานะโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อ เปลี่ยนจากกระจกขุ่นเป็นใส ซึ่งจำเป็นต้องจ่ายกระแสไฟฟ้า ตลอดระยะเวลาที่กระจกอยู่ในสถานะใส จึงไม่เหมาะสมกับการใช้ในระยะเวลา (Baetens, Jelle & Gustavsen, 2010) ในขณะที่กระจกอิเล็กโตรโครมิกใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยมาก ในการเปลี่ยนสถานะจากใสเป็นขุ่น ซึ่งเป็นผลดีต่อการใช้

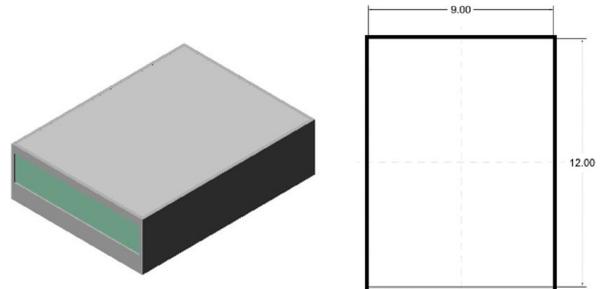
พลังงานไฟฟ้าของอาคาร การศึกษาประสิทธิภาพด้าน การประหยัดพลังงานของกระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิกใน ประเทศสหรัฐอเมริกาทั้ง 3 พื้นที่ที่มีสภาพอากาศแตกต่างกัน ซึ่งควบคุมกระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิกตามฤดูกาล คือ ช่วงฤดู หนาวกระจกจะอยู่ในสถานะใสเพื่อรับแสงธรรมชาติและ ความร้อนจากแสงอาทิตย์ ในทางตรงกันข้ามฤดูร้อน กระจกจะอยู่ในสถานะขุ่นเพื่อป้องกันความร้อนจาก แสงอาทิตย์ ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำ ความเย็นลง จากผลการศึกษาพบว่ากระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิก มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า ร้อยละ 45 เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกชั้นเดียว ซึ่งใช้กระจก อิเล็กทรอนิกส์โครมิกกับอาคารที่ตั้งอยู่ในพื้นที่สภาพอากาศร้อน จะประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าในพื้นที่สภาพอากาศเย็น (Sbar, Podbelski, Yang & Pease, 2012)

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า เทคโนโลยีกระจกถูกนำมาศึกษาในประเด็นของประสิทธิภาพ การประหยัดพลังงานเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้การใช้กระจก อิเล็กทรอนิกส์โครมิก ซึ่งเป็นกระจกที่ใช้พลังงานน้อยมากเพื่อ ควบคุมการเปลี่ยนสถานะจากใสเป็นขุ่น จึงเป็นผลดีต่อการ ใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคาร และส่งผลให้อาคารประหยัด พลังงานได้ดียิ่งขึ้น เมื่อนำมาใช้กับอาคารที่ตั้งอยู่ใน สภาพอากาศเขตร้อน แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ ยังขาดการนำมา ศึกษาในประเด็นของประสิทธิภาพการใช้แสงธรรมชาติ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงนำเทคโนโลยีกระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิก มาศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของประสิทธิภาพการใช้แสง ธรรมชาติและการประหยัดพลังงานภายใต้สภาพภูมิอากาศ ของประเทศไทย

3. วิธีการศึกษา

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองรวมทั้งสิ้น 160 กรณี โดยจำลองการใช้แสงธรรมชาติด้วยโปรแกรม DIVA for Rhino v 4.1.0.8 ร่วมกับ Grasshopper ขึ้นแบบจำลอง สำนักงานผ่านโปรแกรม Rhinoceros 5 ซึ่งโปรแกรม ดังกล่าวสามารถจำลองแสงธรรมชาติแบบพลวัตได้ โดยใช้ ชุดคำสั่งพื้นฐานในการจำลองแสงธรรมชาติจากโปรแกรม Radiance และใช้ไฟล์สภาพอากาศกรุงเทพมหานคร ในรูปแบบ .epw อีกทั้งยังสามารถแสดงผลการจำลองได้ ทั้งค่า sDA ASE และ UDI พร้อมกันภายใต้สภาพท้องฟ้า จริงตลอดทั้งปี ทั้งนี้ตัวแปรที่นำมาศึกษามีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1 กำหนดห้องสำนักงานกรณีศึกษา ขนาด 9.00 x 12.00 x 3.00 เมตร ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของ ความกว้าง x ลึก x สูง ที่ได้จากการศึกษารวบรวมข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง ขนาดห้องสำนักงานของอาคารสำนักงานในชั้นต่างๆ ไป โดยปราศจากสิ่งกีดขวาง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองสำนักงาน ขนาด 9.00 x 12.00 x 3.00 เมตร (Shows the office model size 9.00 x 12.00 x 3.00 m.)

3.2 อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังทึบ ร้อยละ 60 70 80 และ 90 ดังแสดงในรูปที่ 3

3.3 ทิศของช่องเปิด ทำการจำลองทั้งหมด 4 ทิศ ดังนี้ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก

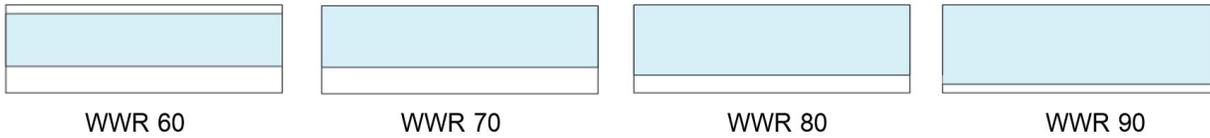
3.4 ตัวอย่างกระจกที่ทำการศึกษา คือ กระจก ที่ใช้กันโดยทั่วไป และกระจกที่มีค่าการส่องผ่านของแสง โกล่เคียงกัน 5 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1

3.5 ควบคุมค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) พื้น ผนัง และฝ้าเพดาน มีค่าร้อยละ 20 50 80 ตามลำดับ

3.6 ควบคุมระนาบพื้นที่ใช้งาน มีความสูง 0.76 เมตร

3.7 ควบคุมช่วงเวลาในการศึกษา ตั้งแต่ 8:00- 18:00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาทำการของอาคารสำนักงาน คิดเป็นเวลา 3,650 ชั่วโมง ต่อปีรวมวันหยุดราชการ

3.8 การควบคุมช่วงเวลาที่ใช้ในการกำหนด สถานะของกระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิก มาจากการหาค่า HSA (Horizontal Shadow Angle) และ VSA (Vertical Shadow Angle) ในแต่ละทิศ ทุกวันที่ 21 ของเดือนมกราคมถึง ธันวาคม ซึ่งครอบคลุมช่วง Summer Solstice, Winter Solstice และ Equinox ตั้งแต่ช่วงเวลาเวลา 8:00 – 18:00 น. โดยช่วงเวลาที่หาค่า HSA และ VSA มากกว่า 90 องศา เป็นช่วงเวลาที่กระจกไม่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ตรง จึงควบคุมกระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิกให้อยู่ในสถานะใส ในทางตรงกันข้ามช่วงเวลาที่หาค่า HSA และ VSA น้อยกว่า 90 องศา เป็นช่วงเวลาที่กระจกได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ตรง จึงควบคุมกระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิกให้อยู่ในสถานะขุ่น ดังแสดง ในรูปที่ 4-7



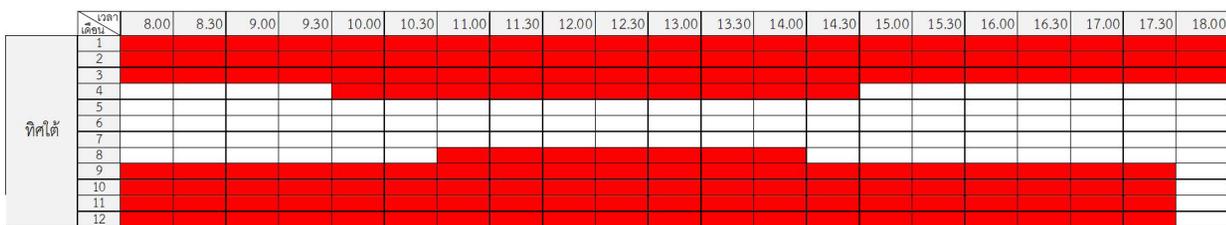
รูปที่ 3 แสดงอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่ร้อยละ 60 70 80 และ 90
(Shows the window to wall ratio 60 70 80 and 90 percent)

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างกระจกที่ทำการศึกษา คือ กระจกที่มีค่าการส่องผ่านของแสงใกล้เคียงกัน 5 ชนิด (Shows the sample of the study glass in five types of glass with similar visible light transmittance)

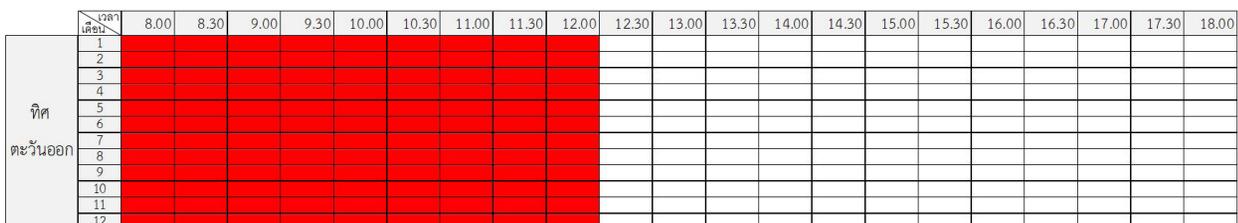
ชนิดกระจก	VLT (%)	SHGC (%)	U-value (W/ m ² °C)
1. กระจกลามิเนตสีเขียว (Green Laminated Glass) หนา 12.76 mm.	71	0.52	5.52
2. กระจกฉนวนกันความร้อนสีเขียว (Green Insulated Glass) หนา 21.00 mm.	60	0.4	1.62
3. กระจกสีเขียว (Single Green Tinted Float Glass) หนา 10.00 mm.	63	0.49	5.63
4. กระจกแผ่นรังสีต่ำสีเทาอ่อน (Single Gray Low-E Glass) หนา 6.00 mm.	61	0.54	3.67
5. กระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิก (Electrochromic Glass) หนา 25.09 mm.			
• สถานะใส (Clear Stated)	60	0.41	1.59
• สถานะขุ่นทั้งหมด (Fully Tinted Stated)	1	0.09	1.59



รูปที่ 4 แสดงช่วงเวลาที่กระจกได้รับแสงอาทิตย์ตรงในทิศเหนือ
(Shows the time when the glass receives the sunlight from the north)



รูปที่ 5 แสดงช่วงเวลาที่กระจกได้รับแสงอาทิตย์ตรงในทิศใต้
(Shows the time when the glass receives the sunlight from the south)



รูปที่ 6 แสดงช่วงเวลาที่กระจกได้รับแสงอาทิตย์ตรงในทิศตะวันออก
(Shows the time when the glass receives the sunlight from the east)

ทิศ	เดือน	เวลา																					
		8.00	8.30	9.00	9.30	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00	15.30	16.00	16.30	17.00	17.30	18.00	
ตะวันตก	1																						
	2																						
	3																						
	4																						
	5																						
	6																						
	7																						
	8																						
	9																						
	10																						
	11																						
	12																						

■ = ช่วงเวลาที่กระจกได้รับแสงอาทิตย์ตรง □ = ช่วงเวลาที่กระจกไม่ได้รับแสงอาทิตย์ตรง

รูปที่ 7 แสดงช่วงเวลาที่กระจกได้รับแสงอาทิตย์ตรงในทิศตะวันตก (Shows the time when the glass receives the sunlight from the west)

ทิศ	เดือน	เวลา																				
		8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00 น.										
ทิศเหนือ	4 - 8																					
	1 - 3, 9 - 12																					
ทิศใต้	1 - 4, 8 - 12																					
	5 - 7																					
ทิศตะวันออก	1 - 12																					
ทิศตะวันตก	1 - 12																					

□ สถานะใส ■ สถานะขุ่น

รูปที่ 8 แสดงช่วงเวลากำหนดสถานะของกระจกอิเล็กโทรโครมิกในแต่ละทิศ (Shows time intervals determining the state of the electrochromic glass in each direction)

จากรูปที่ 4-7 จะเห็นได้ว่าแสงอาทิตย์ตรงเกิดขึ้นแตกต่างกัน 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาทั้งวัน และช่วงเวลาระหว่างวัน ทำให้กระจกอิเล็กโทรโครมิกมีช่วงเวลาที่อยู่ในสถานะใส หรือขุ่น แตกต่างกันในแต่ละทิศ ดังแสดงในรูปที่ 8 สามารถสรุปได้ ดังนี้

- ทิศเหนือ : เดือนมกราคม-มีนาคม และ เดือนกันยายน-ธันวาคม
- : สถานะใส ช่วงเวลา : 8.00-18.00 น.
- : เดือนเมษายน-สิงหาคม
- : สถานะขุ่น ช่วงเวลา : 8.00-18.00 น.
- ทิศใต้ : เดือนพฤษภาคม-กรกฎาคม
- : สถานะใส ช่วงเวลา : 8.00-18.00 น.
- : เดือนมกราคม-เมษายน และ เดือนสิงหาคม-ธันวาคม
- : สถานะขุ่น ช่วงเวลา : 8.00-18.00 น.
- ทิศตะวันออก : ตลอดทั้งปี
- : สถานะใส ช่วงเวลา : 12.00-18.00 น.
- : ตลอดทั้งปี
- : สถานะขุ่น ช่วงเวลา : 8.00-12.00 น.
- ทิศตะวันตก : ตลอดทั้งปี
- : สถานะใส ช่วงเวลา : 8.00-12.00 น.
- : ตลอดทั้งปี
- : สถานะขุ่น ช่วงเวลา : 12.00-18.00 น.

4. วิธีการประเมินแสงธรรมชาติ

งานวิจัยนี้ศึกษาโดยใช้วิธีการประเมินแสงธรรมชาติแบบพลวัต (Dynamic Daylighting Evaluation Method) ซึ่งแสดงผลด้วยค่า $sDA_{300/50\%}$, $ASE_{1000,250}$, $UDI_{300-3,000}$ ดังแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3

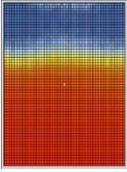
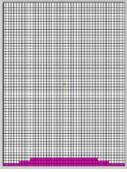
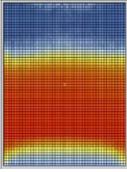
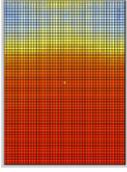
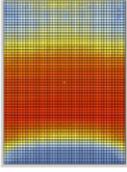
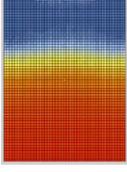
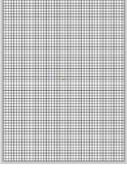
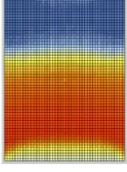
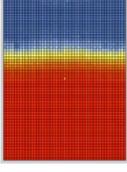
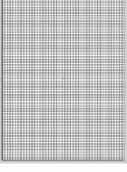
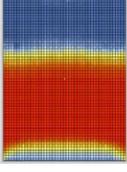
5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการจำลองแสงธรรมชาติแสดงผลด้วยค่า sDA ในแต่ละทิศ

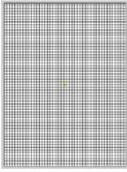
จากรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาจากภาพรวมของค่า $sDA_{300/50\%}$ จะเห็นว่า แนวโน้มของค่า $sDA_{300/50\%}$ ของกระจกทุกชนิดในทิศเหนือ (9a) ทิศใต้ (9b) ทิศตะวันออกช่วงบ่าย (9e) และทิศตะวันตกช่วงเช้า (9d) จะแปรผันไปตามขนาดอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่บดบัง และคุณสมบัติค่าการส่องผ่านของแสงของกระจกแต่ละชนิด

ส่วนทิศตะวันออกในช่วงเช้า (9c) และทิศตะวันตกช่วงบ่าย (9f) เนื่องจากช่องเปิดอยู่ในทิศทางที่ได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง การใช้กระจกลามิเนตสีเขียว กระจกฉนวน กระจกโพลตสีเขียว และกระจกที่มีการแผ่รังสีต่ำ จะทำให้มีค่า $sDA_{300/50\%}$ สูงตามไปด้วย ในขณะที่กระจกอิเล็กโทรโครมิกจะมีการเปลี่ยนสถานะเป็นขุ่น ทำให้ไม่มีแสงเข้ามาภายในอาคาร ค่า $sDA_{300/50\%}$ จึงเท่ากับ 0

ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างผลการจำลองการใช้แสงธรรมชาติของกระจกอิเล็กทรอนิกส์โปร่งใสในแต่ละทิศ (Shows the simulation effect of natural light usage by the transparent electrochromic glass in each direction)

Orientation	WWR	sDA _{300/50%}	ASE _{1000,250}	UDI _{300-3,000} : 80%
North	90			
		65.90 %	3.80 %	40.48 %
South	90			
		74.30 %	16.20 %	37.89 %
East	90			
		61.70 %	0.00 %	32.11 %
West	90			
		64.10 %	0.00 %	46.96 %

ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างผลการจำลองการใช้แสงธรรมชาติของกระจกอิเล็กทรอนิกส์ทึบในแต่ละทิศ (Shows the simulation effect of natural light usage by the tint electrochromic glass in each direction)

Orientation	WWR	sDA _{300/50%}	ASE _{1000,250}	UDI _{300-3,000} : 80%
North, South East, West	90			
		0.00 %	0.00 %	0.00 %
				
		0% 100%	< 250 > 250	0% 100%

โดยสรุป การใช้กระจกอิเล็กทรอนิกส์จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นชุ่นทางด้านทิศตะวันออกในช่วงเช้า และทิศตะวันตกในช่วงบ่าย เพื่อป้องกันแสงจ้า ทำให้ในช่วงเวลาดังกล่าวไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติได้ แต่ในทิศทางอื่น ๆ ยังคงทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ร้อยละ 50 ขึ้นไปตลอดช่วงเวลาใช้งานทั้งปี เช่นเดียวกันกับกระจกชนิดอื่น ๆ แม้ว่าจะใช้อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่เพียงร้อยละ 60 ก็ตาม

5.2 ผลการจำลองแสงธรรมชาติแสดงผลด้วยค่า UDI ในแต่ละทิศ

จากรูปที่ 10 แสดงค่า $UDI_{300-3,000}$ จากการใช้กระจกทุกชนิดในทิศเหนือ (10a) ทิศใต้ (10b) ทิศตะวันออกช่วงบ่าย (10e) และทิศตะวันตกช่วงเช้า (10d) จะแปรผันไปตามขนาดอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง โดยที่อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่ร้อยละ 60 มีค่า $UDI_{300-3,000}$ ซึ่งเป็นความส่องสว่างในช่วงที่มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 30 - 40 ที่อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่ร้อยละ 90 มีค่า $UDI_{300-3,000}$ ประมาณร้อยละ 40 - 50 และอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่สูงขึ้นไม่ได้ส่งผลทำให้ค่า $UDI_{300-3,000}$ แตกต่างกันมากนัก

สำหรับทิศตะวันออกในช่วงเช้า (10c) และทิศตะวันตกช่วงบ่าย (10f) ช่องเปิดที่ใช้กระจกอิเล็กทรอนิกส์จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นชุ่น ทำให้ค่า $UDI_{300-3,000} = 0$ ส่วนช่องเปิดที่ใช้กระจกลามิเนตสีเขียว กระจกฉนวนกระจกโพลีคาร์บอเนต และกระจกที่มีการแผ่รังสีต่ำ จะมีค่า $UDI_{300-3,000}$ อยู่ในช่วงร้อยละ 40 - 60 ซึ่งสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับด้านทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออกช่วงบ่าย และทิศตะวันตกช่วงเช้า

5.3 ผลการจำลองแสงธรรมชาติแสดงผลด้วยค่า ASE ในแต่ละทิศ

จากรูปที่ 11 เนื่องจากทิศเหนือ (11a) เป็นทิศที่ได้รับแสงอาทิตย์ตรงไม่มากนัก ทำให้ค่า $ASE_{1000,250}$ ที่เกิดจากการเลือกใช้กระจกทุกชนิดและที่ทุกอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง มีค่าใกล้เคียงกันและไม่เกินร้อยละ 10 ในทิศใต้ (11b) ทิศตะวันออกในช่วงเช้า (11c) และทิศตะวันตกช่วงบ่าย (11f) เป็นทิศที่ได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง กระจกอิเล็กทรอนิกส์จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นชุ่น ทำให้ไม่มีแสงธรรมชาติเข้ามาภายในอาคาร ค่า $ASE_{1000,250} = 0$ ในขณะที่การใช้กระจกลามิเนตสีเขียว กระจกฉนวน กระจกโพลีคาร์บอเนต และกระจกที่มีการแผ่รังสีต่ำ จะปล่อยให้แสงธรรมชาติผ่านเข้ามาตามปกติ จึงทำให้มีค่า $ASE_{1000,250}$ สูงตามไปด้วย และค่า $ASE_{1000,250}$

ที่เกิดจากการเลือกใช้อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่ 70 80 และ 90 จะมีค่าใกล้เคียงกัน

ในทิศตะวันออกช่วงบ่าย (11e) และทิศตะวันตกช่วงเช้า (11d) กระจกทุกชนิดที่ติดตั้งอยู่ในทิศทางนี้ จะไม่ได้รับแสงอาทิตย์ตรงมากนัก ทำให้ค่า $ASE_{1000,250}$ ก่อนข้างต่ำ

สำหรับช่องเปิดในทุกทิศทางและทุกอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่มีการติดตั้งกระจกอิเล็กทรอนิกส์ จะสามารถลดการเกิดแสงจ้าได้ทั้งหมด ทำให้มีค่า $ASE_{1000,250}$ ต่ำมาก

5.4 ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละทิศ

จากรูปที่ 12 พบว่าเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังเพิ่มขึ้น ทำให้แนวโน้มของการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งในทิศตะวันออกสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้า (12a) ได้มากถึงร้อยละ 25.80 และทิศตะวันตกลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (12b) ได้มากถึงร้อยละ 28.86 ทั้งนี้กระจกอิเล็กทรอนิกส์ก็มีการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 60 วัตต์ ต่อพื้นที่กระจก 140 ตารางเมตร (Sbar, Podbelski, Yang & Pease, 2012) ในการควบคุมสถานะของกระจก 1 ครั้ง ซึ่งใช้ระยะเวลา 10 นาที ทำให้กระจกมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน

6. อภิปรายและสรุปผล

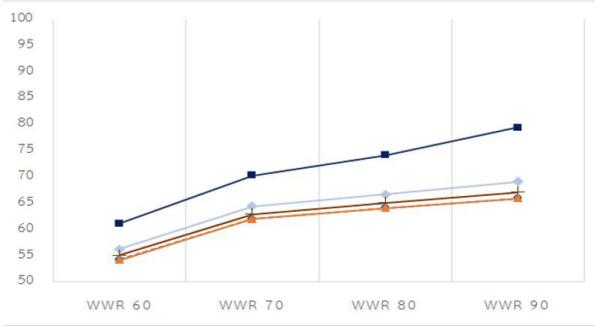
จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถพิจารณาได้ ดังนี้

6.1 ประสิทธิภาพในการใช้แสงธรรมชาติ :

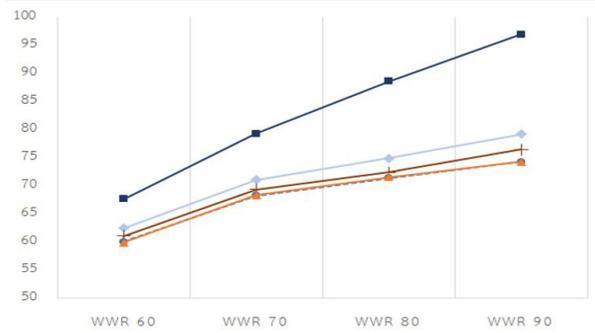
กระจกอิเล็กทรอนิกส์สถานะใสให้ผลการนำแสงธรรมชาติไม่แตกต่างจากการใช้กระจกชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีค่าการส่องผ่านของแสงใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นสถานะชุ่น จะช่วยในด้านการป้องกันการเกิดแสงจ้าได้มาก

6.2 ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน :

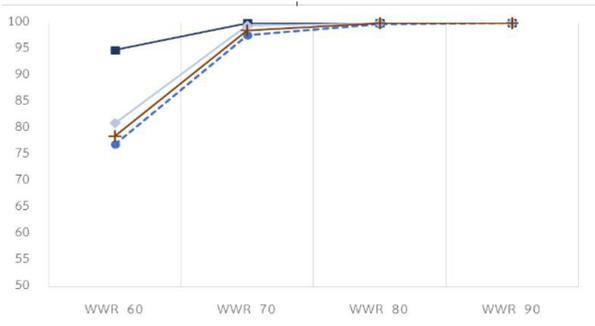
เมื่อกระจกอิเล็กทรอนิกส์สามารถป้องกันแสงตรงจากดวงอาทิตย์ได้ ก็จะช่วยในการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารด้วย ทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศและระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ทั้งนี้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าของอาคารในทิศตะวันออกและทิศตะวันตกได้ร้อยละ 25.80 และ 28.86 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กระจกลามิเนตสีเขียว แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์เป็นเรื่องที่ควรพิจารณาควบคู่กันไปด้วย



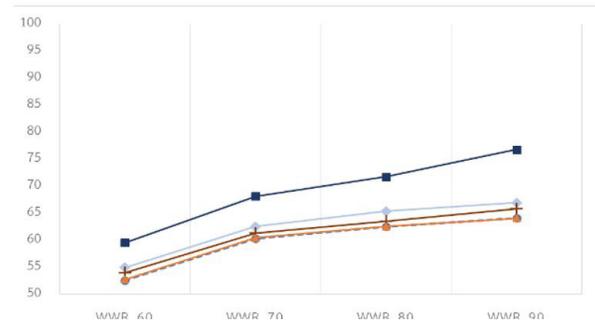
(a) North : 8.00-18.00 น.



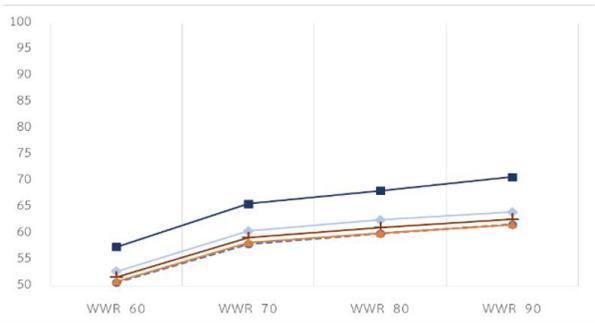
(b) South : 8.00-18.00 น.



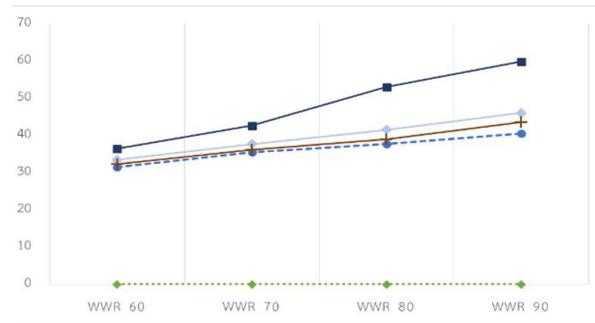
(c) East : 8.00-12.00 น.



(d) West : 8.00-12.00 น.



(e) East : 12.00-18.00 น.



(f) West : 12.00-18.00 น.



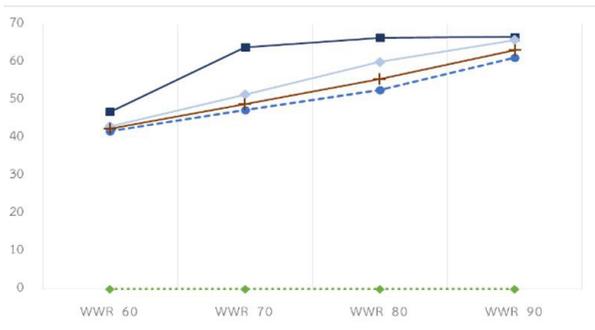
รูปที่ 9 แสดงค่า $sDA_{300/50\%}$ ของกระจกแต่ละชนิดที่อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่ร้อยละ 60 70 80 และ 90 ในแต่ละทิศตลอดทั้งปี (Shows the $sDA_{300/50\%}$ of each type of glass at the window to wall ratio 60, 70, 80 and 90 percent in each direction throughout the year)



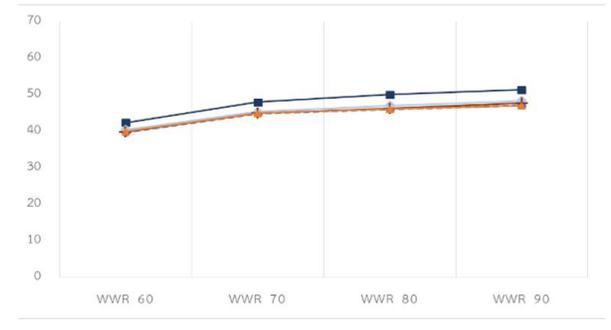
(a) North : 8.00-18.00 น.



(b) South : 8.00-18.00 น.



(c) East : 8.00-12.00 น.



(d) West : 8.00-12.00 น.



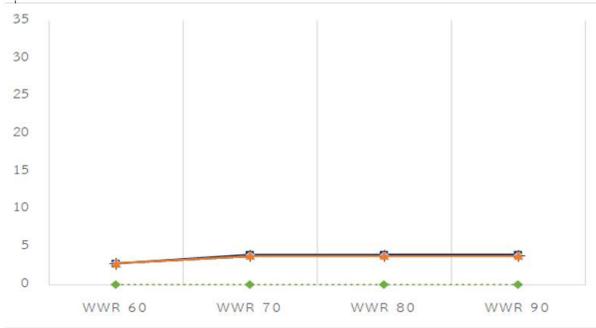
(e) East : 12.00-18.00 น.



(f) West : 12.00-18.00 น.



รูปที่ 10 แสดงค่า $UDI_{300-3,000}$ ของกระจกแต่ละชนิดที่อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่ร้อยละ 60 70 80 และ 90 ในแต่ละทิศตลอดทั้งปี (Shows the $UDI_{300-3,000}$ of each type of glass at the window to wall ratio 60 70 80 and 90 percent in each direction throughout the year)



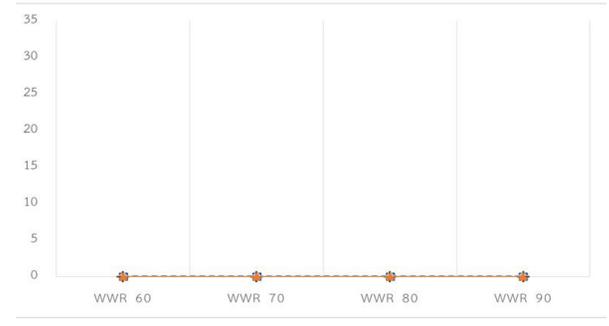
(a) North : 8.00-18.00 น.



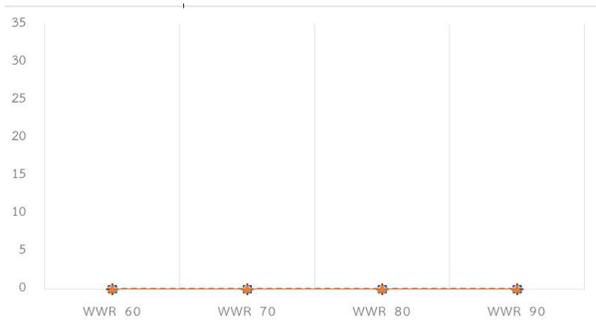
(b) South : 8.00-18.00 น.



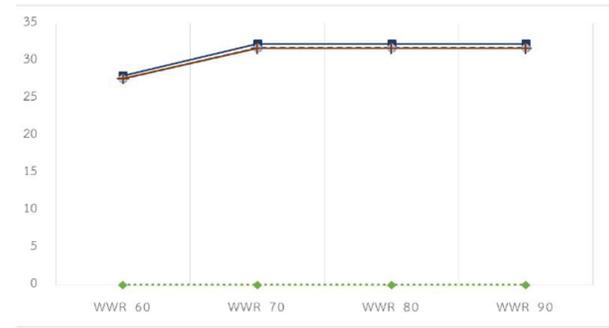
(c) East : 8.00-12.00 น.



(d) West : 8.00-12.00 น.



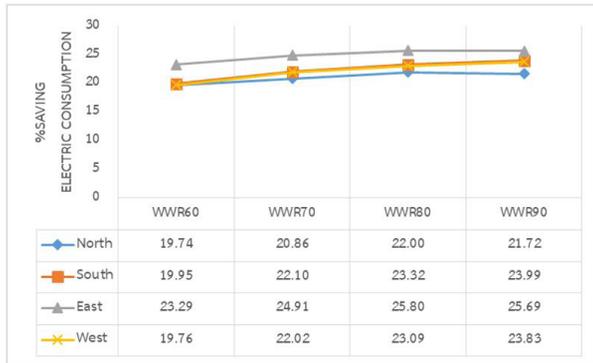
(e) East : 12.00-18.00 น.



(f) West : 12.00-18.00 น.

กระจกอลามินเนตสีเขียว
 กระจกฉนวนกันความร้อนสีเขียว
 กระจกสีเขียว
 กระจกแผ่นรังสีต่ำสีเทาอ่อน
 กระจกอเล็กโทรโครมิก สถานะใส
 กระจกอเล็กโทรโครมิก สถานะขุ่นทั้งหมด

รูปที่ 11 แสดงค่า $ASE_{1000,250}$ ของกระจกแต่ละชนิดที่อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่ร้อยละ 60 70 80 และ 90 ในแต่ละทิศตลอดทั้งปี
 (Shows the $ASE_{1000,250}$ of each type of glass at the window to wall ratio 60, 70, 80 and 90 percent in each direction throughout the year)



(a) Electric consumption



(b) Electric demand

รูปที่ 12 แสดงการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของกรณีกระจกอิเล็กทรอนิกส์เปรียบเทียบกับกรณีกระจกลามิเนตสีเขียวที่อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่ร้อยละ 60 70 80 และ 90 (Shows energy savings of electrochromic glass cases compared with green laminated glass cases from the window to wall ratio 60, 70, 80, and 90 percent.)

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของกระจกอิเล็กทรอนิกส์กับการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารที่อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่ร้อยละ 60 70 80 และ 90 (Shows the comparison of electrochromic glass electric consumption with building electric consumption from the window to wall ratio 60, 70, 80, and 90 percent.)

WWR	Glass Area (m ²)	Electric Consumption of Electrochromic Glass Window	Electric Consumption of Office Room
60	16.2	0.546	13,572.5
70	18.9	0.642	13,432.5
80	21.6	0.737	13,352.5
90	24.3	0.824	13,450.0

6.3 ความเหมาะสมในการใช้งาน : กระจกอิเล็กทรอนิกส์อาจไม่จำเป็นสำหรับการใช้งานทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ เนื่องจากช่วงเวลาในการตอบสนองของกระจกกับแสงธรรมชาติเพื่อเปลี่ยนสถานะมีไม่มากนัก ซึ่งการใช้กระจกชนิดอื่นอาจจะมีเหมาะสมกว่า แต่ในทางกลับกันการตอบสนองของกระจกกับแสงธรรมชาติในด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนสถานะในระหว่างวันตลอดทั้งปี จึงอาจสรุปได้ว่ากระจกอิเล็กทรอนิกส์มีความเหมาะสมในการใช้งานด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมากกว่า

7. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งวัน อาจมีการศึกษาถึงการนำกระจกอิเล็กทรอนิกส์กับระบบเซ็นเซอร์ตรวจสอบร่วมกับระบบควบคุมอาคาร (Building Automation System : BAS) เพื่อศึกษาถึงผลของการตอบสนองหรือเปลี่ยนสถานะของกระจกตามสภาพแวดล้อมจริงมากขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย ประเภททุนวิจัยทั่วไปสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ตามสัญญาเลขที่ TUGG 28/2562

References

- Baetens, R., Jelle, P. B., & Gustavsen, A. (2010). Properties Requirements and Possibilities of Smart Windows for Dynamic Daylight and Solar Energy Control in Building: A state-of-the-art Review. *Solar Energy*, 94, 87-105.
- Mardaljevic, J., Heschong, L., & Lee, E. S. (2009). Daylight Metrics and Energy Savings. *Lighting Research and Technology* 2009, (0), 1 - 23.
- Mardaljevic J. (2017). *Climate-Based Daylight Modelling*. Retrived Jan 22, 2019, from <http://climate-based-daylighting.com/doku.php?id=academic:climate-based-daylight-modelling>
- Na Songkhla, S. (2015). *Energy Efficiency of Thermochromic (TC), Polymer-Dispersed Liquid Crystal (PDLC), and Low-E Glass Windows in Tropical Climate* (Master's Thesis). Faculty of Architecture, Chulalongkorn University.
- Sbar, L. N., Podbelski, L., Yang, M. H., & Pease, B. (2012). Electrochromic Dynamic Windows for Office Buildings. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1, 125-139.