



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การทดสอบการต้านแรงลมของผนังบานเกล็ดอลูมิเนียมแบบปรับได้

Wind resistance test for the adjustable aluminum louvers

วิชมา โพธิ์ทอง^{1,2*} สุวรรณ หอมหวล^{1,2}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² ศูนย์ทดสอบประตู หน้าต่าง และระบบผนังกระจกสำหรับงานอาคาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, กำแพงแสน, นครปฐม 73140

Watchama Phothong^{1,2*} Suwan Homhual^{1,2}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom Province. 73140

² Testing Center of Doors, Windows and Curtain Wall in Buildings, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom Province. 73140

* Corresponding author.

E-mail: fengwmp@ku.ac.th; Telephone: 0 8394 26593

วันที่รับบทความ 14 กันยายน 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 2 พฤศจิกายน 2564 ; วันที่ตอบรับบทความ 2 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบการทำงานของกลไกควบคุมการปรับมุมของผนังบานเกล็ดอลูมิเนียมแบบปรับได้ ในขณะที่แรงลมกระทำ โดยมีสวิตช์ควบคุมการทำงานและมอเตอร์กระแสตรงเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนการปรับมุม และการเปิดปิดของผนังบานเกล็ด ส่งกำลังผ่านชุดเฟืองตัวหนอนและชุดเฟืองดอกจอกไปยังใบบานเกล็ดแต่ละใบ ซึ่งชุดผนังบานเกล็ด (Louver) มีขนาดสูง 2900 มม. กว้าง 2660 มม. ใบบานเกล็ดเป็นชนิดวงรี (ellipse) ความกว้าง 300 มม. ผลการทดสอบพบว่า ความเร็วลมระหว่าง 6-24 เมตรต่อวินาที ที่กระทำบนผนังบานเกล็ด พบว่าความต้านทานแรงลมบนใบบานเกล็ดด้านซ้าย ใบบานเกล็ดตรงกลาง และใบบานเกล็ดด้านขวาของบานเกล็ดอยู่ระหว่าง 9-188 นิวตัน, 34 - 187 นิวตัน และ 12-189 นิวตัน ตามลำดับ และพบว่าแรงที่กระทำกับใบบานเกล็ดที่เปิดทำมุมอยู่ 30 องศา จะมากกว่าแรงที่กระทำกับใบบานเกล็ด ที่ปิดอยู่ ในขณะที่ความเร็วลมประมาณ 9 เมตรต่อวินาที เมื่อกระทบต่อแผงผนังบานเกล็ด กลไกจะเริ่มขยับตัว และไม่สามารถที่จะควบคุมมุมเปิดของใบบานเกล็ดให้นิ่งอยู่ได้ การทดสอบงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าแผงผนังบานเกล็ด ที่มีกลไกควบคุมการปรับมุมใบบานเกล็ดยังมีขีดจำกัดคือสามารถทำงานปรับมุมและต้านทานลมที่มากกระทบได้ในระดับความเร็วต่ำ

คำสำคัญ

ผนังบานเกล็ดอลูมิเนียมแบบปรับได้ ความต้านทานแรงลม บานเกล็ดรูปวงรี

Abstract

This research is to study and test the capacity of the adjustable mechanism for controlling the blade of aluminum louvers while resisting to the wind pressure. The louvers are controlled by a switch to adjust the blade angle, driven by a DC motor through a transmission system consisting of a worm gear and bevel gear set. A set of adjustable louver panels, available in sizes 2900 mm of height and 2660 mm of width, are mounted with the ellipse blades with a width of 300 mm. The test results when applying the wind speed between 6-24 m/s to the louver panel specimen showed that the force resistance at the left position, the middle position and the right position of the louver panel were between 9-188 N, 34-187 N and 12-189 N, respectively. The force acting on the louver when opening the blades at an angle of 30

degree was higher than the closing blades operation. While, the mechanism for adjusting the blade of louver was unable to control in stability when the wind speed more than 9 m/s. The testing of this research can be concluded that the adjustable mechanism for controlling the blade of aluminum louvers could operate for adjusting the louver blade angle and is able to resist the wind pressure in lower speed.

Keywords

adjustable aluminum louvers; wind resistance; ellipse blades

1. คำนำ

การก่อสร้างอาคารในปัจจุบัน มีรูปแบบทันสมัย กล่าวคือ มีรูปทรงที่แตกต่าง ความแข็งแรงของโครงสร้าง ความสวยงาม แต่การอนุรักษ์พลังงานยังคงเป็นส่วนที่ผู้ออกแบบและสร้างต้องคำนึงถึงอยู่เสมอ ซึ่งเป็นการจัดการกับพฤติกรรมผู้อยู่อาศัย โดยการรณรงค์เรื่องต่าง ๆ เช่น การปิดไฟและเครื่องปรับอากาศเมื่อไม่ใช้ เป็นต้น นอกจากนั้นการออกแบบอาคารบ้านเรือนเพื่อให้ประหยัดพลังงานถือเป็นส่วนสำคัญอย่างมาก และมีการศึกษาจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาการพัฒนาหรือการปรับตัวของเปลือกอาคารเพื่อการประหยัดไฟฟ้าและพลังงานโดยประกอบขึ้นจากระบบและกลไกต้นทุนต่ำ [1] ได้มีการศึกษาหลักสำคัญในการออกแบบอาคารคือต้องทำให้ภายในอาคารมีอุณหภูมิเหมาะสมกับการอยู่อาศัย ไม่ร้อนอบอ้าว ลดความร้อนภายนอกที่จะเข้ามาภายในอาคารเพื่อลดการทำงานของเครื่องปรับอากาศ โดยต้องใช้พลังงานหรือไฟฟ้าน้อยที่สุด ซึ่งหลักในการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานมีดังนี้ [2]

1) รูปทรงอาคารและการใช้พื้นที่ โดยตัวอาคารควรวางตามยาวจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกเพื่อรับแสงอาทิตย์น้อยที่สุด พื้นที่ใช้สอยอยู่ทิศเหนือ ระเบียงทางเดินควรเปิดโล่งและอยู่ทิศใต้ของอาคาร

2) หลังคาและเปลือกอาคาร ควรป้องกันความร้อนที่เข้าหลังคาด้วยการออกแบบหลังคา 2 ชั้นและภายในควรบุฉนวนกันความร้อนอย่างดี ซึ่งช่องว่างระหว่างชั้นดังกล่าวควรมีลมธรรมชาติหรือพัดลมช่วยระบายอากาศร้อนภายในด้วย

ผนังอาคารหรือเปลือกอาคารควรเป็นวัสดุที่มีความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) มาก เก็บความร้อนได้สูง หากจำเป็นต้องใช้กระจกเป็นเปลือกอาคารควรเลือกใช้กระจก Low Emission Glass (Low-e) ที่ไม่ยอมให้คลื่นรังสีความร้อนผ่านเข้ามาภายในอาคาร

การออกแบบช่องเปิดสำหรับเปลือกอาคาร มีส่วนช่วยให้ลมธรรมชาติช่วยระบายความร้อนของอาคารได้ ซึ่งควรมีช่องเปิดที่รองรับการระบายอากาศจากความต่างกันของอุณหภูมิขณะลมนิ่งด้วย

3) ด้านงานวิศวกรรม เป็นส่วนช่วยอย่างมากในการออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน เช่น

การระบายอากาศของอาคารต้องออกแบบอาคารให้อากาศไหลเข้าออกได้ ทั้งด้วยระบบระบายอากาศโดยธรรมชาติหรือระบายอากาศทางกล เช่น การใช้พัดลมดูดอากาศ เป็นต้น

ระบบปรับอากาศ เป็นระบบที่ใช้พลังงานสูงที่สุดในอาคาร ควรเลือกขนาดและชนิดให้เหมาะสมกับการใช้งานและขนาดห้องและผู้ติดตั้งควรพิจารณาตำแหน่งการติดตั้งทั้งส่วนทำความเย็นด้านในอาคารและส่วนระบายความร้อนของระบบปรับอากาศให้เหมาะสม เพื่อลดการทำงานและช่วยประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น

ระบบไฟฟ้าและแสงสว่าง ควรใช้หลอดประหยัดไฟ (หลอด LED) ในทุกพื้นที่ของอาคาร ซึ่งจะลดความร้อนเข้าสู่อาคารน้อยและราคาไม่แพง และออกแบบอาคารให้แสงธรรมชาติเข้าช่วย และ/หรือควบคุมการเปิดปิดไฟแสงสว่างให้เป็นอัตโนมัติ จะช่วยให้ประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นได้ สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำการพิจารณาด้านวิศวกรรมร่วมกับการออกแบบเปลือกอาคารเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานและประหยัดไฟฟ้า โดยการใช้นั่งบานเกล็ด (Louver) ซึ่งเริ่มเป็นที่นิยมใช้กันมากขึ้นในการใช้เป็นเปลือกอาคาร เพราะนอกจากแสง ความร้อน และลมบางส่วนสามารถเล็ดลอดเข้ามาในอาคารเพื่อช่วยลดความร้อนและเพิ่มแสงสว่างในอาคารได้แล้วนั้น ยังสามารถช่วยลดแต่งอาคารให้สวยงามได้อีกด้วย โดยผนังบานเกล็ดขนาดใหญ่สำหรับผนังอาคารนั้นมีหลายแบบ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นบานติดตาย มุมของบานเกล็ดคงที่ ซึ่งค่อนข้างแข็งแรง แต่ไม่สามารถปรับแสงหรือลมตามที่ต้องการได้ สำหรับผนังบาน

เกล็ดที่สามารถปรับแสงได้นั้น มีข้อดีคือสามารถปรับเปลี่ยนความร้อน แสง ลม และอุณหภูมิที่เข้ามาภายในห้องได้ แต่ผู้ผลิตต้องออกแบบให้แข็งแรงพอและมีกลไกที่สามารถเคลื่อนไหวได้เมื่ออยู่ในสภาวะต่าง ๆ เช่นมีแรงลมกระทำ โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบผนังบานเกล็ดนั้นยังไม่มีรองรับใช้ในประเทศไทย โดยเฉพาะผนังบานเกล็ดแบบปรับมุมได้ ซึ่งการศึกษาถึงรูปแบบ กลไกการทำงานและความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการเป็นส่วนช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์ และมาตรฐานสำหรับผนังบานเกล็ดเพื่อรองรับรูปแบบอาคารที่แข็งแรง ทนสมัย และสวยงามในอนาคต

เพราะฉะนั้นการทดสอบการทำงานของกลไกและแรงที่กระทำเป็นส่วนสำคัญมากในการสร้างผนังบานเกล็ด เพื่อให้ทราบข้อจำกัดการทำงานและประสิทธิภาพในการต้านแรงลมของแผงบังเกล็ดที่ใช้ทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังกล่าวต่อไป

2. ผนังบานเกล็ดหรือแผงกันแดด

ปัจจุบันเริ่มมีการคิดค้นออกแบบเทคโนโลยีอุปกรณ์ผนังบานเกล็ดหรือแผงกันแดดภายนอกอาคารหลายแบบ ซึ่งอุปกรณ์กันแสงภายนอกอาคาร (Exterior Shading Devices) นั้นมีหลายคำที่มีความหมายใกล้เคียงกัน เช่นผนังบานเกล็ดบังแดด (Sun Louvers or Shading Louvers) ผนังบานเกล็ดบังสายตา (Venetian Blind) ผนังกรุแผ่นประกอบ (Slate Facade) และส่วนกันแดดนอกอาคาร โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะเป็นผนังปิดล้อมให้กับช่องเปิดโถงสำหรับการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ เช่น โถงทางเดิน หรือแม้แต่ผนังอาคารโดยผนังบานเกล็ดนี้ หมายถึงชุดแผ่นบานเกล็ดวางซ้อนกันตามแนวนอนหรือแนวตั้ง ใช้สำหรับควบคุมทิศทางของลมและแสง ผนังบานเกล็ดสามารถผลิตจากวัสดุชนิดต่าง ๆ ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติและราคาแตกต่างกัน เช่น ไม้จริง ไม้สังเคราะห์ ไฟเบอร์ซีเมนต์ อลูมิเนียม เหล็ก โลหะคอมโพสิต แผ่นอะคริลิก แผ่นกระจกไปจนถึงแผ่นโซลาร์เซลล์ (Solar Photovoltaic) สำหรับผนังบานเกล็ดหรือแผงบังลมนั้น มีหลายรูปร่าง เช่น แผ่นเรียบ แผ่นเกล็ดรูปตัว Z บานเกล็ดรูปตัว L หรือแบบพับขึ้นรูปครึ่งวงรี (Semi-elliptical Blades) เป็นต้น รูปที่ 1

แสดงตัวอย่างตัวอย่างอาคารที่ใช้แผงบังแดดทำจากอลูมิเนียมและแผ่นเป็นแบบตัว Z



รูปที่ 1 ผนังบานเกล็ดของอาคาร T-Mobile Arena Hall (ที่มา: <https://www.c-sgroup.com/architectural-louvers/projects>)

รูปแบบผนังบานเกล็ดหรือแผงกันแดดในห้องตลาดสามารถแบ่งได้ตามวิธีควบคุมเป็น 3 ระบบคือ แบบติดตาย (Fixed Louvers) แบบปรับได้ (Adjustable Louvers) และแบบม้วนหรือพับเก็บได้ (Retractable Louvers) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ระบบบานเกล็ดติดตาย (Fixed louver)

ผนังบานเกล็ดชนิดติดตายนี้ ใบบานเกล็ดจะมีค่ามุมองศาติดตั้งและระยะห่างระหว่างใบบานเกล็ดตัวไม่สามารถปรับได้ โดยการบานเกล็ดชนิดนี้จะมีข้อดีคือทนทานต่อสภาพอากาศต่าง ๆ ได้ดี ไม่ว่าจะเป็นแรงลม พายุฝุ่น หรือแดด โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างของบานเกล็ด ช่องว่างระหว่างแผ่นและองศาที่ติดตั้ง จะต้องมีการคำนวณและทดสอบมุมมองศาให้สอดคล้องกับตำแหน่งที่ตั้งของอาคารและทิศทางของแสง ลม ที่กระทำกับอาคารนั้น รูปที่ 2 เป็นตัวอย่างการติดตั้งบานเกล็ดอลูมิเนียมแบบติดตาย

2.2 ระบบบานเกล็ดแบบปรับได้ (Adjustable louvers)

เป็นบานเกล็ดชนิดสามารถควบคุมการเปิดปิดและปรับมุมองศาของใบบานเกล็ดหรือของแผงบังสายตาได้ โดยการควบคุมผ่านมือหมุน สวิตช์ รีโมทไร้สาย หรือระบบปรับมุมได้อัตโนมัติ ซึ่งบานเกล็ดจะปรับมุมมองศาของใบบานเกล็ดขึ้นกับทิศทางของแสงอาทิตย์ และมีการนำระบบติดตามแสงอาทิตย์มาใช้วัดจุดประสงค์เพื่อปรับทัศนวิสัยในการมองสู่ภายนอก ปรับแสงที่เข้าอาคารเพิ่มเมื่อต้องการลดการใช้พลังงานแสงสว่าง

ภายในอาคาร ช่วยปรับลดแสงเข้าอาคารเพื่อลดความร้อนที่เข้าสู่ภายในอาคาร ช่วยประหยัดพลังงานเครื่องปรับอากาศ ช่วยเพิ่มช่องลมเพื่อการระบายอากาศ และช่วยลดแรงลมเมื่อมีลมพายุกระทำกับอาคาร ผนังบานเกล็ดชนิดนี้มีประสิทธิภาพมากในการบังแดด แต่เนื่องจากผนังบานเกล็ดหรือแผงกันแดดแบบปรับได้นี้จะประกอบด้วยกลไกเพื่อให้สามารถปรับมุมได้ จะทำให้ราคาค่อนข้างสูงมากกว่าแบบติดตาย และความแข็งแรงของใบจะลดลงเนื่องจากกลไกขับเคลื่อนเช่นกัน รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างบานเกล็ดแบบปรับได้



รูปที่ 2 ผนังบานเกล็ดอลูมิเนียมแบบ Fixed Type Louver (ที่มา: <http://thai.aluminumcladdingpanel.com>)



รูปที่ 3 ผนังบานเกล็ดอลูมิเนียมแบบ Adjustable Louver (ที่มา: <https://thai.alibaba.com/product-detail/openable-louvre-roof-system-adjustable-louver-60731323194.html>)

2.3 ระบบบานเกล็ดแบบม้วนหรือพับเก็บได้ (Retractable louvers)

ผนังบานเกล็ดหรือแผงกันแสงชนิดนี้จะเป็นโครงสร้างหลังคาส่วนนอกอาคารดังตัวอย่างตามรูปที่ 4 ซึ่งนอกจากจะปรับมุมมองของบานเกล็ดได้แล้ว ยังสามารถม้วนหรือพับเก็บได้ด้วยกลไกแบบต่าง ๆ ซึ่งวัตถุประสงค์เพื่อปรับแสงและกันฝนสำหรับผู้ใช้งานด้านใต้แผงเท่านั้น เนื่องจากกลไกมีความซับซ้อนมากโครงสร้างจะไม่แข็งแรง แต่เหมาะกับอาคารทันสมัยเพราะช่วยเพิ่มความสวยงามให้อาคารได้

3. มาตรฐานการทดสอบชุดบานเกล็ด

มาตรฐานเป็นสิ่งจำเป็นต่อความปลอดภัยและการพัฒนาสำหรับผลิตภัณฑ์ สำหรับแผงบังแดดหรือผนังบานเกล็ด นั้นยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบรับรองในประเทศไทย โดยเฉพาะแบบปรับมุมได้ จะขอก้าวถึงมาตรฐานการทดสอบของบานเกล็ดแบบติดตายของต่างประเทศดังนี้



รูปที่ 4 ผนังบานเกล็ดแบบ Retractable Louvers (ที่มา: https://designershadesolutions.ie/retractable-tilting-louvre-roof-system-awning-frameless/#group_6033-1)

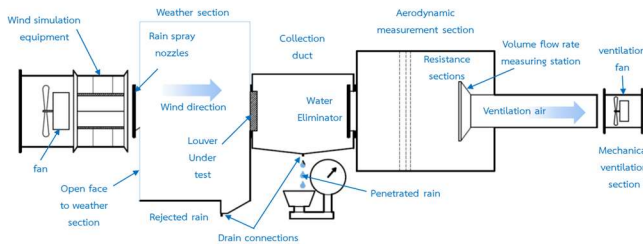
3.1 มาตรฐานการทดสอบ British Standard

มาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับทดสอบการทนสภาพอากาศของผนังบานเกล็ด หมายเลข BS EN 13030:2001 ซึ่งพัฒนาโดยหน่วยงาน BSRIA ร่วมมือกับ HEVAC และได้รับการรับรองในปี 2001 ในฐานะมาตรฐานของอังกฤษและยุโรป ใช้เพื่อการทดสอบบานเกล็ดแบบติดตาย ซึ่งใช้กับตัวอย่าง

ทดสอบขนาด 1 ตารางเมตร ติดบนชุดอุโมงค์ทดสอบ บานเกล็ดจะถูกแบ่งเป็นระดับต่าง ๆ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของอากาศเข้าหรือออก และอัตราการซึมผ่านของน้ำ รายละเอียดการทดสอบมีดังนี้ [3]

1) การทดสอบการรั่วไหลของน้ำ (Water Penetration) ซึ่งต้องทำการทดสอบจนกว่าค่าที่ได้จะเสถียร และอย่างน้อยต้องเป็นเวลา 30 นาที ใช้ความเร็วลมที่สร้างจากอุปกรณ์จำลองที่ความเร็ว 13 เมตรต่อวินาที (30 ไมล์ต่อชั่วโมง) และหัวฉีดของน้ำขนานกับกระแสลม ฟันในอัตรา 75 ลิตรต่อชั่วโมง แล้วตรวจสอบปริมาณน้ำฝนที่ไหลผ่านบานเกล็ดมายัง ส่วนกักเก็บน้ำที่ผ่านบานเกล็ด (Collection duct) ตามรูปที่ 5 แล้วนำปริมาณน้ำฝนดังกล่าวเทียบหาระดับผลิตภัณฑ์ (Class) ตามตารางที่ 1

ผลการทดสอบตามมาตรฐานนี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วลมของพัดลมดูดอากาศด้านหลังเครื่องด้วย โดยต้องปรับความเร็วลมให้ได้ค่าที่กำหนดไว้ (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 เมตรต่อวินาที) จะทำให้ผลิตภัณฑ์หนึ่งสามารถมีหลายระดับผลิตภัณฑ์ (Class) ได้เนื่องจากใช้ความเร็วลมทดสอบที่ต่างกัน



รูปที่ 5 แผนผังการทดสอบการรั่วไหลของน้ำของมาตรฐาน BS EN 13030:2001, [3]

ตารางที่ 1 ระดับผลิตภัณฑ์ของผนังบานเกล็ด เรื่องการรั่วไหลของน้ำของมาตรฐาน BS EN 13030:2001, [3]

Class	Rain Rejection Effectiveness	Max Allowable Rain Penetration (L/h/m ²)
A	0.99 - 1	0.75
B	0.95 - 0.989	3.75
C	0.80 - 0.949	15
D	< 0.80	>15

2) การหาค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยผ่านอากาศของผนังบานเกล็ด จากความดันลด (Pressure Drop) เป็นการทดสอบเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยอากาศ (Discharge Coefficient, CD) ซึ่งเป็นค่าใช้วัดความต้านทานของอากาศที่ไหลผ่านบานเกล็ด โดยทดสอบที่ชุดอุโมงค์ลมเดียวกับการทดสอบการรั่วไหลของน้ำ แต่ใช้ความเร็วต่างกัน โดยค่า CD สูงขึ้นเท่าใดความต้านทานของบานเกล็ดระบายอากาศก็ยิ่งลดลง ตามตารางที่ 2

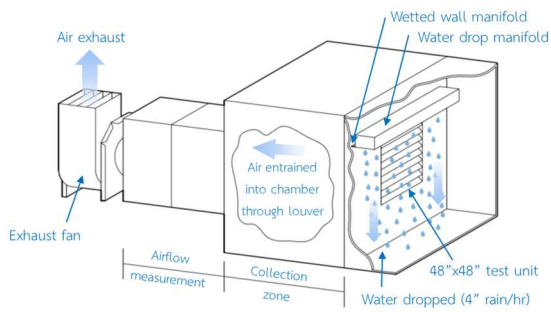
3.2 มาตรฐานการทดสอบของ Air Movement and Control Association (AMCA)

มาตรฐานสำหรับการทดสอบบานเกล็ด AMCA-500L ของสมาคม AMCA ใช้ขนาดของบานเกล็ดทดสอบคือ 1 ตารางเมตร การทดสอบมี 3 ส่วนดังนี้ [4]

1) การทดสอบการรั่วไหลของน้ำ (Water Penetration Test) ซึ่งทำโดยปล่อยน้ำให้หยดลงทางด้านหน้าของบานเกล็ดทดสอบ โดยให้ตกลงมาในแนวตั้งเพื่อจำลองสภาพอากาศฝนตกแบบปกติด้วยอัตราขั้นต่ำ 4 นิ้วต่อชั่วโมง และมีพัดลมดูดอากาศออกข้างหลังที่ความเร็ว 6.5 เมตรต่อวินาที ตามรูปที่ 6 แล้วนำปริมาณน้ำที่ไหลผ่านแผงบานเกล็ดไปยังโซนกักเก็บ Collection Zone เทียบหาระดับผลิตภัณฑ์ (Class) ตามตารางที่ 1

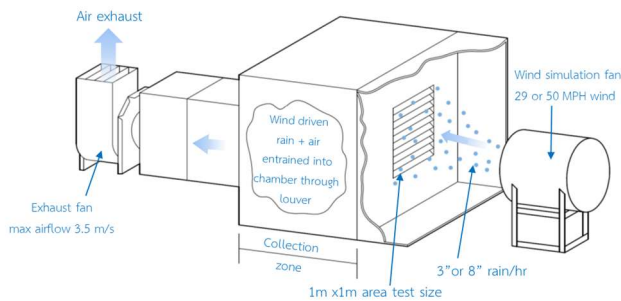
ตารางที่ 2 ระดับผลิตภัณฑ์ของผนังบานเกล็ด เรื่องสัมประสิทธิ์การปล่อยผ่านอากาศ (CD) ของมาตรฐาน BS EN 13030:2001, [4]

Class	Discharge Loss Coefficient (C _D)	Rating
A	> 0.4	Excellent
B	0.3 - 0.399	Very Good
C	0.2 - 0.299	Good
D	< 0.199	Fair



รูปที่ 6 แผนผังการทดสอบการรั่วไหลของน้ำของ AMCA-500L, [4]

2) การทดสอบลมและน้ำฝน (Wind-driven Rain Testing) เป็นการทดสอบการทำงานของผนังบานเกล็ดภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีพายุ โดยใช้พัดลมกำลังสูงซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าผนังบานเกล็ดเป่าลมผ่านชั้นทดสอบ และหัวฉีดน้ำจะพ่นน้ำไปยังแผงบานขึ้นทดสอบตามรูปที่ 7 โดยการทดสอบลมและน้ำฝนนั้น จะประกอบไปด้วย 2 แบบคือ



รูปที่ 7 แผนผังการทดสอบลมและน้ำฝนของ AMCA-500L, [4]

2.1) การทดสอบในสภาพแวดล้อมพายุธรรมชาติ โดยพัดลมเป่าอากาศที่ความเร็ว 12.96 เมตรต่อวินาที (29 ไมล์ต่อชั่วโมง) และพ่นน้ำที่ปริมาณน้ำ 3 นิ้วต่อชั่วโมง

2.2) การทดสอบในสภาพแวดล้อมพายุหนัก โดยพัดลมเป่าอากาศที่ความเร็ว 20.30 เมตรต่อวินาที (50 ไมล์ต่อชั่วโมง) และพ่นน้ำที่ปริมาณน้ำ 8 นิ้วต่อชั่วโมง

การทดสอบทั้ง 2 แบบนี้จะมีพัดลมดูดอากาศข้างหลังทำงานที่ความเร็ว 3.5 เมตรต่อวินาที และใช้เวลาทดสอบรอบละ 30 นาที แล้วทำน้ำที่ผ่านผนังบานเกล็ดทดสอบในส่วนโซนกักเก็บ เทียบหาระดับผลิตภัณฑ์ (Class) ตามตารางที่ 1 เช่นกัน

3) การหาค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยผ่านอากาศของผนังบานเกล็ด จาก Pressure Drop เป็นการทดสอบเพื่อคำนวณค่า Discharge Coefficient (CD) โดยจะอ่านค่าขณะทำการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ และการทดสอบลมและน้ำฝน

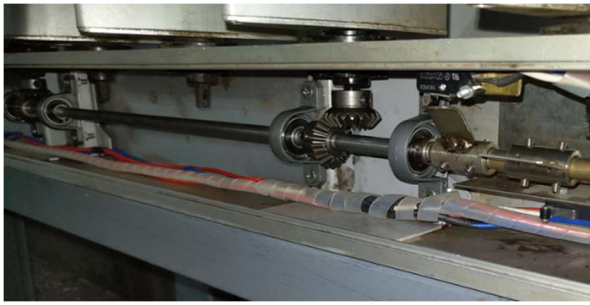
ผนังบานเกล็ดหรือแผงบังแดดแบบติดตายและแบบปรับมุมได้จะใช้มาตรฐานการทดสอบที่แตกต่างกัน โดยบานเกล็ดแบบปรับมุมได้จะไม่มีการทดสอบการกันน้ำและการไหลผ่านของอากาศ เนื่องจากการปรับมุมได้ทำให้มีการรั่วไหลของน้ำได้ทางผู้วิจัยจึงทำการทดสอบโครงสร้างของผนังบานเกล็ดแบบปรับมุมได้โดยการหาขนาดแรงที่กระทำกับใบบานเกล็ดซึ่งเกิดจากการจำลองลมปะทะกับผนังบานเกล็ด โดยปรับบานเกล็ดมุมต่าง ๆ โดยประยุกต์ใช้การสร้างความดันในห้องสร้างความดัน Chamber สำหรับติดตั้งผนังบานเกล็ด

4. ผนังบานเกล็ดแบบปรับมุมได้

ปัจจุบันผนังบานเกล็ดที่มีขายทั่วไปส่วนใหญ่เป็นแบบบานติดตาย บางบริษัทจึงได้พัฒนาผนังบานเกล็ดให้เป็นแบบปรับมุมได้ สำหรับตัวอย่างทดสอบเป็นผนังบานเกล็ดอลูมิเนียมขนาดสูง 2900 มม. กว้าง 2660 มม. ใบบานเกล็ดเป็นชนิดวงรี ความกว้าง 300 มม. ตามรูปที่ 8 [5] โดยมีการพัฒนากลไกบังคับการเปิดปิด เป็นระบบเฟืองดอกจอก ซึ่งจะสามารถปรับมุมเปิดปิดได้ไม่เกิน 180 องศา ตามรูปที่ 9

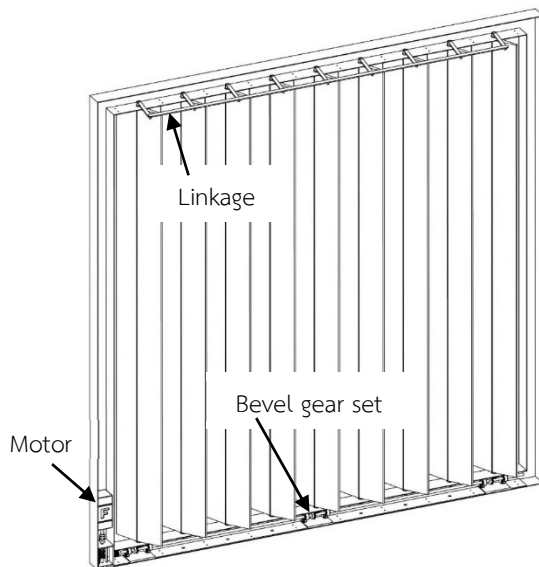


รูปที่ 8 ผนังบานเกล็ดอลูมิเนียมชนิดใบวงรี แบบแนวตั้งของบริษัท เอ็ม.วี.พี. โพรสตาโรส



รูปที่ 9 ชุดกลไกเพื่องดกจากควบคุมการปรับมุมใบบานเกล็ด

กลไกการปรับมุมด้วยระบบเฟืองดกจากของผนังบานเกล็ดนี้ เนื่องจากไม่ได้ส่งกำลังขับเคลื่อนไปยังใบบานเกล็ดทุกใบ จะต้องใช้กลไกแบบขึ้นต่อโยงกัน (Linkage) ช่วยส่งกำลังไปยังใบที่เหลือด้านบนของผนังบานเกล็ดตามรูปที่ 10 ซึ่งการส่งกำลังแบบนี้จะทำให้ชุดบานเกล็ดสามารถปรับมุมได้ไม่เกิน 180 องศา จึงต้องมีการปรับตั้งมุมเริ่มต้นในสภาวะปิดเพื่อป้องกันการขัดกันของระบบส่งกำลัง



รูปที่ 10 กลไกชุดเพื่องดกจากและขึ้นต่อโยงกัน สำหรับควบคุมการทำงานของใบผนังบานเกล็ด

5. วิธีการทดลอง

5.1 ติดตั้งผนังบานเกล็ดทดสอบเข้ากับห้องสร้างความดัน

ห้องสร้างความดัน (Chamber) ของศูนย์ทดสอบประตูหน้าต่าง และระบบผนังกระจกสำหรับงานอาคาร (TDWCB) คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ม.เกษตรศาสตร์ วิทยาเขต

กำแพงแสน จ.นครปฐม สามารถสร้างความดันระดับต่าง ๆ ซึ่งประยุกต์ใช้เพื่อทดสอบผนังบานเกล็ดได้ จึงทำการติดตั้งผนังบานเกล็ดทดสอบประกบติดกับห้องสร้างความดันตามรูปที่ 11 โดยห้องสร้างความดันนั้นเชื่อมต่ออยู่กับพัดลมระบายอากาศ (Blower) ที่ใช้สร้างความดันในห้อง โดยห้องสร้างความดันที่ใช้ทดสอบผนังบานเกล็ดนี้มีขนาดหน้ากว้าง 3.7 ม. สูง 2.9 ม. และลึก 0.6 ม. ใช้พัดลมระบายอากาศขนาด 5 แรงม้า ปรับความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์ สามารถสร้างความเร็วลมได้ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากผนังบานเกล็ดทดสอบมีช่องว่างระหว่างใบมาก อากาศจึงรั่วไหลได้ ความสามารถในการสร้างความดันของห้องจะลดลง จึงต้องสร้างโครงกรอบสำหรับพัดลมพารมขนาดใหญ่ติดประกบกับผนังบานเกล็ดทดสอบอีกด้าน และทำการ seal ช่องว่างที่เกิดจากการติดตั้งทั้งหมดโดย พัดลมพารมดังกล่าวจะช่วยดูดอากาศของห้องเพื่อช่วยให้ความดันในห้องสร้างความดันเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 11 การติดตั้งผนังบานเกล็ดกับห้องสร้างความดัน (Chamber)

5.2 ติดตั้งชุดวัดแรงกระทำกับใบบานเกล็ด

การวัดแรงกระทำกับใบบานเกล็ดแต่ละจุดนั้นจะใช้โหลดเซลล์ (Load Cell) แบบ S-type ซึ่งมีช่วงการวัดค่าไม่เกิน 500 นิวตัน ความละเอียด 1 นิวตัน โดยออกแบบชุดวัดให้สามารถกดลงที่กึ่งกลางใบบานเกล็ดได้ ตามรูปที่ 12 โดยชุดวัดแรงดังกล่าวจะติดตั้งบนโครงสร้างที่ยึดกับโครงชุดทดสอบอย่างแน่นหนา

5.3 สร้างความเร็วลมสำหรับทดสอบผนังบานเกล็ด

แรงลมที่กระทำกับผนังบานเกล็ดจะสร้างที่ระดับต่าง ๆ โดยใช้ห้องสร้างความดัน สร้างความดันที่ใช้ทดสอบความต้านทานแรงลมของประตู และหน้าต่างของศูนย์ TDWCB

สำหรับทดสอบผนังบานเกล็ดในขณะปะทะลมที่ความเร็วลมต่างกัน ในช่วงที่เกิดพายุโซนร้อน (Tropical Storm) ซึ่งเป็นพายุหมุนเขตร้อนขนาดใหญ่อ่อนกำลังขณะเคลื่อนตัวในทะเลมีความเร็วลมสูงสุดใกล้ศูนย์กลาง 63-118 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีกำลังแรงพอที่จะทำให้ลายบ้านเรือนที่มีโครงสร้างไม่แข็งแรงได้ [6] โดยสามารถเปลี่ยนค่าความเร็วของลมเป็นความดันเพื่อใช้สำหรับทดสอบจากสมการความดันพลศาสตร์ (Dynamic Pressure) [7]



รูปที่ 12 การติดตั้งโหลดเซลล์ ชนิด S-type บริเวณกลางใบบานเกล็ดสำหรับทดสอบการต้านแรงลมชุดผนังบานเกล็ดบานเกล็ด

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

โดยที่ p คือค่าความดันพลศาสตร์หน่วยเป็น ปาสคัล ρ คือความหนาแน่นของไหล หน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร v คือ ความเร็วของไหล หน่วยเป็น เมตรต่อวินาที วัดโดยด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Windmill Anemometer)

เมื่อแทนค่าความหนาแน่นของอากาศ [8] โดยใช้ค่าความหนาแน่นของอากาศ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะได้สมการ

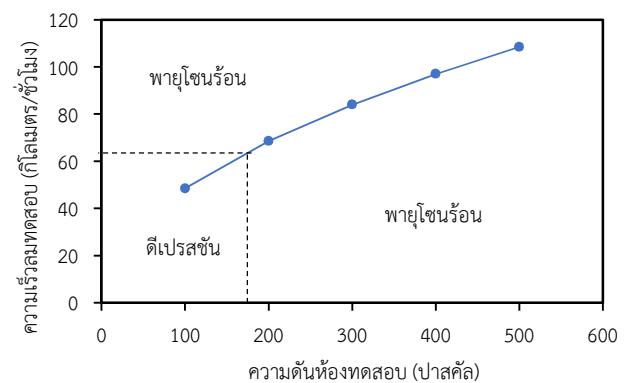
$$v = 4.63 p^{0.5} \quad (2)$$

โดยที่ v คือค่าความเร็วของลม หน่วยเป็น กิโลเมตรต่อชั่วโมง p คือ ความดันที่ใช้ทดสอบ หน่วยเป็น ปาสคัล

โดยความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วลมสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 3 และรูปที่ 13

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วลมและระดับของพายุ

ความดัน (Pressure) (ปาสคัล)	ความเร็วลม (Wind velocity) (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)	ชนิดพายุ (Storm)
100	46.30	Depression
200	65.48	
300	80.19	Topical Storm
400	92.60	
500	103.53	



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วลม

5.4 การทดสอบผนังบานเกล็ดอลูมิเนียม

หลังจากติดตั้งผนังบานเกล็ด กับตู้สร้างความดันแล้ว ทำการปิดด้วยพลาสติกใส เพื่อกันการรั่วของอากาศออกในขณะทำการสร้างความดันระดับต่าง ๆ โดยทำการทดลองดังนี้

5.4.1 ปรับใบผนังบานเกล็ด ให้ปิดทั้งหมด (เปิด 0 องศา) และทำการติดตั้งชุดโหลดเซลล์สำหรับวัดแรงต้านแรงลม ให้สัมผัสไปที่ตำแหน่งใบผนังบานเกล็ด ฝั่งซ้ายในแนวตั้งฉากกับแกนใบ วางโหลดเซลล์ตามรูปที่ 12 หลังจากนั้นเพิ่มความดันในห้องสร้างความดันขึ้นทีละ 40 ปาสคัล จนความดันห้องทดสอบเป็น 320 ปาสคัล โดยบันทึกค่าแรงต้านแรงลมที่อ่านได้จากจอแสดงผลของชุดโหลดเซลล์ทุกระดับความดันที่เพิ่มขึ้น

5.4.2 ทำซ้ำการทดลองตามข้อ 4.1 แต่เปลี่ยนตำแหน่งการวัดแรงโดยติดตั้งโหลดเซลล์วัดแรงที่กึ่งกลางของใบกลางของผนังบานเกล็ด และที่ตำแหน่งใบผนังบานเกล็ด ฝั่งขวา โดย

ทดลองที่ความดันเดิมคือเพิ่มความดันห้องสร้างความดันขึ้นที่ละ 40 ปาสคัล ไปจนถึง 320 ปาสคัล

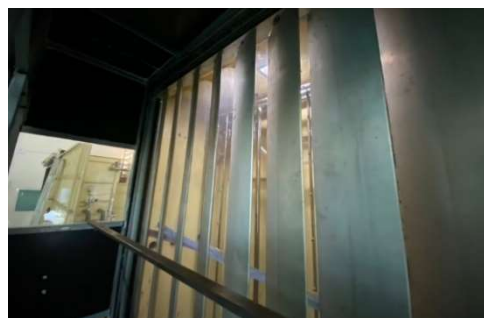
5.4.3 ทำการปรับมุมใบผนังบานเกล็ด ให้เปิดที่มุมประมาณ 30 องศา แล้วทดสอบวัดแรงกดที่ใบผนังบานเกล็ด ผึ่งซ้าย, กึ่งกลาง และผึ่งขวาของผนังบานเกล็ด ตามลำดับ ทดสอบที่ความดันเดิมคือเพิ่มความดันห้องสร้างความดันขึ้นที่ละ 40 ปาสคัล ไปจนถึง 320 ปาสคัล โดยวิธีการให้ทำซ้ำข้อ 5.4.1 และ 5.4.2

6. ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดสอบผนังบานเกล็ดดอลูมิเนียมกลไกขับเคลื่อนระบบเพื่อกดออก หลังทำการประยุกต์ห้องสร้างความดัน (Chamber) ของศูนย์ทดสอบประติมากรรมต่างและระบบผนังกระจกสำหรับงานอาคาร สำหรับใช้ทดสอบผนังบานเกล็ด ในขณะที่ปะทะลมที่ความเร็วลมต่างกัน โดยใช้วิธีสร้างความดันเทียบแทนตามสมการ (1) แสดงตัวอย่างลักษณะการปรับมุมใบบานเกล็ดเพื่อทดสอบแบบปิดและเปิด 30 องศาตามรูปที่ 14 (ก) และ 14 (ข) ตามลำดับ



(ก)



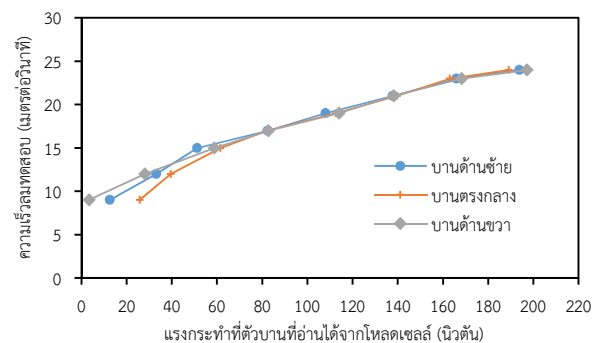
(ข)

รูปที่ 14 ภาพผนังบานเกล็ด ขณะทดสอบเมื่อปิดบานเกล็ด (ก) และเปิดใบผนังบานเกล็ด 30 องศา (ข)

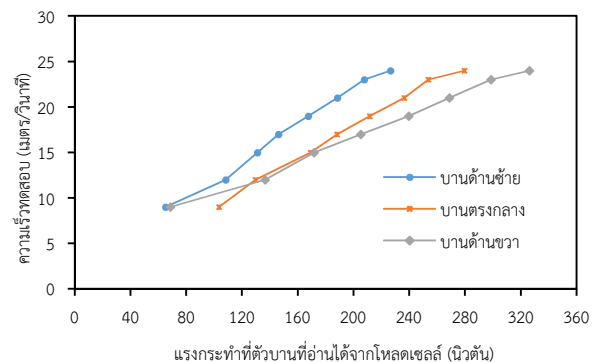
โดยผลการทดลองสามารถแสดงค่าความเร็วลมและแรงดันที่กระทำบนผนังบานเกล็ด ที่ตำแหน่งต่างกันตามตารางที่ 4 ซึ่งเมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและแรงดันที่กระทำบนผนังบานเกล็ด ที่ตำแหน่งต่างกันสามารถแสดงตามรูปที่ 15 และรูปที่ 16

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบแรงดันบนผนังบานเกล็ด ที่ความเร็วลมต่าง ๆ ขณะปิดและเปิดใบผนังบานเกล็ด มุม 30 องศา

ความเร็วลม (เมตร/วินาที)	แรงที่รับผึ่งซ้าย (นิวตัน)		แรงที่รับตรงกลาง (นิวตัน)		แรงที่รับผึ่งขวา (นิวตัน)	
	0 องศา	30 องศา	0 องศา	30 องศา	0 องศา	30 องศา
9	9	73	34	118	12	77
12	31	122	41	147	25	154
15	53	148	62	186	55	193
17	80	165	88	216	79	232
19	103	189	110	235	107	270
21	134	213	137	265	131	303
23	163	234	162	284	159	336
24	188	255	187	314	189	368



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์แรงดันบนผนังบานเกล็ด ที่ความเร็วลมต่าง ๆ ขณะปิดใบ Louver



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์แรงดันบนผนังบานเกล็ด ที่ความเร็วลมต่าง ๆ ขณะเปิดใบ Louver เป็นมุม 30 องศา

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มมากขึ้นแรงที่กระทำกับใบผนังบานเกล็ด (ความเร็วลมที่กระทำกับใบผนังบานเกล็ด) จะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยแรงที่กระทำกับใบผนังบานเกล็ด ที่เปิดท่ามุม 30 องศา มากกว่าแรงที่กระทำกับใบของบานเกล็ดที่กำลังปิดอยู่ และพบว่าที่ความเร็วลมอยู่ที่ 9 เมตรต่อวินาที กระแสลมที่ปะทะกับใบของบานเกล็ดทำให้เกิดการขยับตัวของใบผนังบานเกล็ดทำให้ปิดตัวลง ไม่สามารถทนรับแรงจากลมที่มากกระทบในขณะที่เปิดใบผนังบานเกล็ดได้ ทำให้ทราบว่ากลไกระบบเฟืองดอจอกไม่สามารถต้านแรงลมที่สูงได้ และจากการทดลองหมุนใบผนังบานเกล็ดด้วยกลไกเฟืองดอจอกนั้นเนื่องจากมีกลไกชิ้นต่อโยง ซึ่งจะทำให้ใบหมุนได้ไม่เกิน 180 องศา การปรับแสงให้เข้ามาในอาคารจึงมีความจำกัดทิศทางทำให้ไม่สามารถเปิดแสงได้สำหรับบางทิศทาง เช่น ถ้าติดตั้งเพื่อปรับรับแสงทิศตะวันออกและด้านเหนือ จะไม่สามารถเปิดใบผนังบานเกล็ดเพื่อรับแสงจากทิศตะวันตกและทิศใต้ได้โดยตรง

มาตรฐานสำหรับบานเกล็ดชนิดติดตายที่มี สามารถนำมาใช้ในการทดสอบผนังบานเกล็ดชนิดปรับได้ในส่วนของความเร็วลมที่ใช้ทดสอบ ซึ่งต้องออกแบบกลไกให้แข็งแรงพอเพื่อรับลมที่ความเร็วลมดังกล่าว โดยผนังบานเกล็ดที่ใช้ทดสอบสามารถทนรับแรงลมได้สูงสุด 9 เมตรต่อวินาทีที่มุมใบผนังบานเกล็ดเปิด 30 องศา ซึ่งไม่เพียงพอต่อการต้านลมพายุธรรมดา (12.96 เมตรต่อวินาที) และพายุหนัก (20.30 เมตรต่อวินาที) ตามมาตรฐานสำหรับการทดสอบบานเกล็ด AMCA-500L ของสมาคม AMCA จึงต้องมีการศึกษาและปรับปรุงกลไกการเปิดใบผนังบานเกล็ดให้สามารถทำงานได้ขณะต้านพายุธรรมดาหรือพายุหนักได้ต่อไป

7. สรุป

จากการทดสอบผนังบานเกล็ดอลูมิเนียมชนิดปรับได้ขนาดสูง 2900 มม. กว้าง 2660 มม. ใบผนังบานเกล็ดเป็นชนิดวงรี (ellipse) ความกว้าง 300 มม. ซึ่งมีกลไกส่งกำลังชนิดเฟืองดอจอก เมื่อความเร็วลมมากขึ้นแรงที่กระทำกับใบผนังบานเกล็ดจะแปรผันตามกัน พบว่าแรงที่กระทำกับใบผนังบานเกล็ดที่เปิด 30 องศา จะมากกว่าแรงที่กระทำกับใบผนังบานเกล็ดที่กำลังปิดอยู่เมื่อความเร็วลมประมาณ 9 เมตรต่อวินาที กระแสลมที่ปะทะ

Louver กลไกจะเริ่มขยับตัว และไม่สามารถที่จะควบคุมมุมเปิดของใบผนังบานเกล็ดให้นิ่งอยู่ได้

8. ข้อเสนอแนะ

แผงผนังบานเกล็ด (Louver) ที่มีกลไกควบคุมการปรับมุมใบผนังบานเกล็ดยังมีขีดจำกัดคือไม่สามารถทำงานปรับมุมและต้านทานความเร็วลมที่มากกระทบได้ในระดับที่สูงได้ ดังนั้นการออกแบบระบบส่งกำลังของใบผนังบานเกล็ดควรมีการออกแบบและปรับปรุงให้สามารถรับแรงและต้านแรงลมได้มาก ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษา และไม่ควรมีส่งกำลังด้วยระบบชิ้นต่อโยง (linkage) เพราะจะไม่สามารถปรับมุมได้เกิน 180 องศา ซึ่งการปรับมุมใบผนังบานเกล็ดเพื่อให้ได้ปริมาณแสงตามต้องการจำเป็นต้องปรับใบผนังบานเกล็ดได้ครบรอบหรือ 360 องศา

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์ทดสอบประตู หน้าต่าง และระบบผนังกระจกสำหรับงานอาคาร (TDWCB) คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่สำหรับทำงานวิจัย และ บริษัทเอ็ม.วี.พี. โพรสตาโรส จำกัด ในการทำวิจัยเรื่อง “โครงการ การพัฒนาและทดสอบ ระบบ Aluminum Louvers แบบ Ellipse” โดยการสนับสนุนโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (ITAP), สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ช่วยตรวจสอบและให้คำแนะนำอย่างละเอียดเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศรีศักดิ์ พัฒนาศิน, พงศพร ลพเกิด. พัฒนาการและนวัตกรรมของอุปกรณ์แผงกันแดดภายนอกอาคาร เพื่อสถาปัตยกรรมที่สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศ. *JARS*, 2559, 13(1). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี:35-48
- [2] การออกแบบอาคารอนุรักษ์พลังงาน (อาคารประหยัดพลังงาน) เข้าถึงจาก <https://www.zeroenergy.co.th/design-zero-energy-building-article/> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 กรกฎาคม 2564]
- [3] Bird M. Testing The Weather Performance of Louvres and Reviewing BS EN 13030, By Maxim

Bird, เข้าถึงจาก <https://www.breathingbuildings.com/news/blog-posts/testing-weather-performance-louvres-reviewing-bs-en-13030/> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม 2564]

- [4] AMCA INTERNATIONAL, Understanding the ANSI/AMCA Standard 500-L Tests, 2560 เข้าถึงจาก https://www.amca.org/assets/resources/public/documents/Understanding_the_ANSI-AMCA_Standard_500-L_Tests.pdf, (วันที่ค้นข้อมูล 10 กรกฎาคม 2564)
- [5] เอ็ม.วี.พี. โฟร์สตาร์ส. สร้างสรรค์ดีไซน์แห่งอนาคตเพื่อโลกสีเขียว <http://www.mvpfourstars.com/product.php?ngrp=3>, [เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม 2563]
- [6] กรมอุตุนิยมวิทยา, ชื่อพายุโซนร้อนปี 2564, ดีเปรสชัน, โซนร้อน, ได้ฝุ่น. เข้าถึงจาก <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=28>, [เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2564]
- [7] The Engineering Toolbox, Dynamic Pressure. เข้าถึงจาก https://www.engineeringtoolbox.com/dynamic-pressure-d_1037.html, [เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2564]
- [8] The Engineering Toolbox, Air- Thermophysical Properties. เข้าถึงจาก https://www.Engineeringtoolbox.com/dynamic-pressure-d_156.html, [เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2564]