

การศึกษาและการทดสอบหน้าต่างอะลูมิเนียมตามมาตรฐาน มอก.

Studying and Testing of the Window with Aluminum Frames by Thai Industrial standards

วัชมา โพธิ์ทอง^{1,3,*} ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล² และพลากร จาดปลื้ม³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

² ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

³ ศูนย์ทดสอบประตู หน้าต่างและระบบผนังกระจกสำหรับงานอาคาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address: fengwmp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การผลิตประตูหน้าต่างโครงกรอบอะลูมิเนียมในปัจจุบัน ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ต้องออกแบบความแข็งแรงโครงสร้างให้ผ่านมาตรฐานการทดสอบที่ประกาศโดยสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม ทำให้การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องคำนึงถึงเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐาน เช่นมาตรฐานประตูอะลูมิเนียม หน้าต่างอะลูมิเนียม การโก่งตัวหรือการต้านทานแรงลมเป็นส่วนสำคัญในการบ่งบอกคุณภาพผลิตภัณฑ์ สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาผลิตภัณฑ์เรื่องการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างหน้าต่างบานเลื่อนโครงกรอบอะลูมิเนียม โดยเปรียบเทียบค่าจากการคำนวณด้วยสูตรพื้นฐานที่วิศวกรผู้ออกแบบใช้ทั่วไปและการจำลองการทดสอบการโก่งตัวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดสอบจริงที่ห้องปฏิบัติการ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าค่าการคำนวณโครงสร้างผลิตภัณฑ์ด้วยสูตรพื้นฐานสามารถทำนายการโก่งตัวได้เป็นนัยสำคัญ และโก่งตัวที่จำลองด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์มีผลใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากเช่นกันแต่มีข้อจำกัดในการทำ ผู้ผลิตจึงต้องเข้าใจเพื่อสามารถนำไปเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตได้ด้วยทั้งสองวิธี

คำสำคัญ: การโก่งตัวของประตูและหน้าต่าง, มาตรฐานการทดสอบประตูหน้าต่าง, การจำลองการโก่งตัว, การคำนวณการโก่งตัว

Abstract

The doors and windows with aluminum-frames, the product designers are required to design the structural strength of the product to pass the test standards that defined by The Thai Industrial Standards Institute Therefore, the design of those products must pass the testing criteria according to the standards, such as the doors and windows with aluminum frames standards. Deflection or wind resistance is an important part of the quality requirement. This research focuses on studying the deflection of aluminum-framed sliding window prototypes by comparing results from another methods: basic engineering calculation formulas commonly used by design engineers, computer simulation of deflection testing, and actual

testing by a pressure chamber in laboratory. The test results indicate that structural calculations using basic formulas can significantly predict deflection, and the deflection values obtained from computer simulation closely match those from actual testing. However, computer simulations have some limitations in practical applications. Therefore, manufacturers need to understand both approaches to apply them effectively to reduce production costs.

Keywords: Door and window deflection, Door and window test standards, Deflection simulation, Deflection calculation

1. คำนำ

ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ประตู หน้าต่างโครงกรอบอะลูมิเนียมมีความสำคัญในการรับหน้าที่ปกป้องอันตรายให้แก่ผู้พักอาศัยในบ้านเรือนทั่วไปและอาคารสูงจากภัยธรรมชาติ เช่น พายุ ลมแรง เป็นต้น ผลิตภัณฑ์จึงควรแข็งแรงเพียงพอ โดยเกณฑ์ความแข็งแรงถูกกำหนดโดยมาตรฐานต่างๆ ซึ่งสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ได้ประกาศใช้มาตรฐานสำหรับผลิตภัณฑ์ประตูและหน้าต่างเช่น มอก. 744-2563, มอก.829-2563 เป็นต้น โดยเป็นการวัดประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งชุดในหัวข้อการทดสอบ การรั่วซึมของน้ำ การรั่วของอากาศ การต้านทานแรงลม ฯลฯ [1-4] ซึ่งการทดสอบสามารถทำได้โดยห้องทดสอบที่เป็นห้องหรือตู้สร้างความดัน ที่สามารถจำลองการเกิดสภาวะต่างๆ เช่น น้ำฝนปะทะหรือแรงดันจากลมที่ปะทะกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งปัจจุบันผู้ผลิตสามารถเข้าขอรับการทดสอบได้ด้วยห้องทดสอบของหน่วยงานของรัฐหรือเอกชนที่ได้มาตรฐานหลายแห่ง

การต้านทานแรงลมของผลิตภัณฑ์ประตูหรือหน้าต่าง เป็นหัวข้อที่สำคัญที่สุดในมาตรฐานการทดสอบ เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการไม่ได้มาตรฐานของผลิตภัณฑ์มีสูงที่สุดในหัวข้อทดสอบทั้งหมด ซึ่งเป็นอันตรายต่อการบาดเจ็บและชีวิตผู้พักอาศัยได้ ดังนั้นมาตรฐานการทดสอบความต้านทานแรงลมจึงกำหนดวิธีการและเกณฑ์การทดสอบเพื่อเป็นตัวกำหนดคุณภาพผลิตภัณฑ์ ทำให้ผู้ผลิตต้องสร้างชิ้นงานที่ผ่านมาตรฐานและขณะเดียวกันจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการผลิตด้วย จึงต้องมีการคำนวณการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์ประตูหรือหน้าต่าง ซึ่งวิศวกร

ผู้ออกแบบสามารถคำนวณได้จากการประยุกต์สูตรพื้นฐานการโก่งตัวในคานเมื่อรับแรง ซึ่งต้องเข้าใจในการประยุกต์ใช้กับแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์และผลการคำนวณอาจผิดพลาดได้หากผู้ใช้สูตรดังกล่าวไม่เชี่ยวชาญหรือไม่เข้าใจหลักการที่แท้จริง ในการหารค่าตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็น ปัจจุบันมีการนำซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถในการคำนวณที่ซับซ้อนขึ้นมาช่วยผู้ออกแบบในการหาค่าระยะโก่งตัวของผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงหรือถูกต้องมากที่สุด แต่ผลการโก่งตัวจะต้องที่สุดเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปทดสอบกับห้องสร้างความดันและมีเครื่องมือวัดค่าการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้มาตรฐาน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการทดสอบผลิตภัณฑ์ตัวอย่างซึ่งเป็นหน้าต่างบานเลื่อนสลับทั่วไปซึ่งเป็นที่นิยมใช้สำหรับบ้านพักอาศัย โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณการโก่งตัวจากการใช้สูตรทั่วไปกับผู้ผลิตนิยมใช้, การจำลองด้วยซอฟต์แวร์และผลการโก่งตัวจากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการเพื่อสามารถวิเคราะห์ความแม่นยำและความปลอดภัยจากการคำนวณ และแนะนำแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยผลิตภัณฑ์ยังคงความแข็งแรงที่ผ่านมาตรฐาน

2. มาตรฐานการทดสอบหน้าต่างตามมาตรฐาน มอก.

มาตรฐานเป็นสิ่งจำเป็นต่อการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งทางสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) เป็นผู้กำหนดและประกาศใช้ทั่วไป โดยมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติผลิตภัณฑ์หน้าต่างสำหรับงานอาคาร คือ มอก.744-2563 [1] เกี่ยวกับหน้าต่างโครงกรอบอะลูมิเนียม และมอก.1043-2564 [3] เกี่ยวกับหน้าต่างโครงกรอบพีวีซี โดยมีหัวข้อการทดสอบ วิธีการทดสอบ เกณฑ์การทดสอบหน้าต่างเหมือนกันตามลำดับดังจะกล่าวต่อไป

คุณสมบัติผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทดสอบตามข้อกำหนดในมาตรฐานดังกล่าวของ สมอ. นั้นจะถูกแยกคุณลักษณะที่ต้องการเป็นชั้นคุณภาพและแยกหัวข้อการทดสอบเป็นเรื่องอิสระต่อกัน โดยมี 5 ชั้นคุณภาพ (ชั้นคุณภาพ 1-5) ซึ่งสอดคล้องกับข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องการควบคุมอาคาร [5] เรื่องกำลังวัสดุของส่วนต่างๆ ของอาคารที่ต้องคำนวณจากแรงลมตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แรงลมที่ใช้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างอาคาร

ความสูงของอาคารหรือส่วนของอาคาร	แรงลมอย่างน้อย (ปาสกาล)	ชั้นคุณภาพ
ไม่เกิน 10 เมตร	500	1
สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	800	2
สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1 200	3
สูงเกิน 40 เมตร แต่ไม่เกิน 80 เมตร	1 600	4
สูงเกิน 80 เมตร	2 000	5

** แปลงจากตารางเรื่องกำลังและน้ำหนักบรรทุกของข้อบัญญัติ กทม. (2544)

สำหรับค่าความดันที่ใช้ในการคำนวณการโก่งตัวของโครงสร้างหน้าต่างนั้น วิศวกรสามารถหาค่าความดันที่จะใช้คำนวณกับผลิตภัณฑ์ของตนโดยละเอียดได้จากการคำนวณจากปัจจัยต่างๆ ร่วมด้วยเช่น ตำแหน่งที่ตั้งและประเภทอาคาร สภาพพื้นที่ ฯลฯ โดยศึกษาและใช้ข้อมูลจากมาตรฐานการ

คำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร (มยผ. 1311-50) [6] และเมื่อปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติวัสดุที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิประเทศ หรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศของประเทศ ทำให้รัฐบาลคำนึงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างและส่วนประกอบของอาคาร โดยมีประกาศจากกระทรวงมหาดไทยเรื่อง การออกแบบโครงสร้างอาคารและลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร [7] ซึ่งมีผลใช้โดยทั่วกันทั้งประเทศ อย่างไรก็ตามหากไม่มีการคำนวณความดันอย่างละเอียดของวิศวกร ให้สามารถใช้ความแรงลมตามตารางที่ 1 ได้

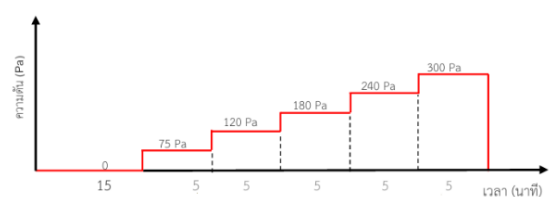
งานวิจัยนี้เน้นการเทียบผลการทดสอบการผลิตภัณฑ์ในเรื่องหัวข้อการโก่งตัว(การต้านทานแรงลม) ของผลิตภัณฑ์เท่านั้น เนื่องจากเป็นส่วนสำคัญที่สุดของคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ประตู หน้าต่าง แต่เพื่อเสริมข้อมูลแก่ผู้สนใจด้านการทดสอบผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ผู้วิจัยจึงของกล่าวเกี่ยวกับการทดสอบเรื่องต่างๆของคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านตามข้อกำหนดในมาตรฐาน มอก. 744-2563 หรือ 1043-2564 ของ สมอ. เพิ่มเติมด้วย โดยจะถูกแยกคุณลักษณะที่ต้องการเป็นชั้นคุณภาพและแยกหัวข้อการทดสอบเป็นดังนี้

2.1 การทดสอบการแรงเปิด (Opening force)

แรงที่ใช้เปิดหน้าต่าง จะใช้กำหนดตรวจสอบเฉพาะหน้าต่างแบบบานเปิด บานเลื่อน บานยก และบานกระทุ้งเท่านั้น โดยหลักการทดสอบคือมีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อออกแรงเปิดและเครื่องมือวัดขนาดแรงที่ใช้เปิด โดยแรงที่ใช้เปิดผลิตภัณฑ์ต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด เช่น หน้าต่างบานเลื่อนขนาดไม่เกิน 1 ตารางเมตร ต้องใช้แรงเปิดไม่เกิน 80 นิวตัน (ทั้งกรณีแรงที่ใช้เริ่มต้นการเปิดและแรงที่ใช้เคลื่อนตัวขณะเปิด)

2.2 การทดสอบการรั่วซึมของน้ำ (Water penetration)

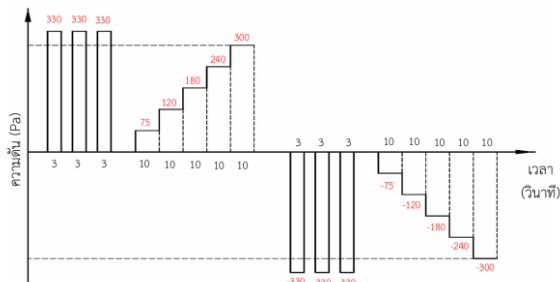
การทดสอบการรั่วซึมของน้ำของชุดผลิตภัณฑ์หน้าต่าง ทำโดยติดตั้งชุดทดสอบกับห้องสร้างความดัน เริ่มทดสอบโดยการฉีดน้ำผ่านหัวฉีด (Nozzle) ที่กระจายสม่ำเสมอทั่วบานทดสอบด้วยปริมาณน้ำ 3.0 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร เป็นเวลา 15 นาที หากยังไม่มีการรั่วซึมของน้ำผ่านผลิตภัณฑ์ ให้ทดสอบต่อโดยเพิ่มความดันเป็นขั้นลำดับ 75, 120, 180, 240 และ 300 ปาสกาล ตามลำดับ (15% ของแรงลมออกแบบ) โดยแต่ละระดับความดันให้ใช้เวลา 5 นาที ดังรูปที่ 1 หากมีการรั่วซึมของน้ำที่ลำดับความดันใด ให้ระบุเป็นขีดจำกัดการรั่วซึมของน้ำ



รูปที่ 1 ระดับขั้นการสร้างความดันการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ

2.3 การทดสอบการรั่วของอากาศ (Air infiltration)

การทดสอบการรั่วของอากาศของผลิตภัณฑ์หน้าต่าง สามารถวัดได้จากการหาการรั่วอากาศของหน้าต่างเทียบกับพื้นที่ (Q_{a1}) และความยาวรอยต่อเปิด (Q_{a2}) ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งความยาวรอยต่อเปิดเป็นระยะรวมของช่องว่างระหว่างบานหน้าต่างและวงกบ การรั่วอากาศดังกล่าวต้องมีค่าไม่เกิน 5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรและ 12 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อเมตร ตามลำดับ แบ่งคุณภาพผลิตภัณฑ์เป็น ชั้นคุณภาพ 1 – 5 ขึ้นกับค่าความดันทดสอบที่ 75, 120, 180, 240 และ 300 ปาสกาล ตามลำดับ การทดสอบการรั่วของอากาศจะทดสอบที่ความดันด้านลบด้วยระดับความดันเท่ากัน คือ -75, -120, -180, -240 และ -300 ปาสกาล ตามลำดับ ซึ่งแต่ละลำดับขั้นความดันจะใช้เวลาในการทดสอบตามรูปที่ 2 การรั่วของอากาศที่วัดได้จะต้องเปลี่ยนค่าอากาศที่รั่วเป็นอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (อากาศที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความดัน 101 กิโลปาสกาล) ดังแสดงในสมการที่ (1)



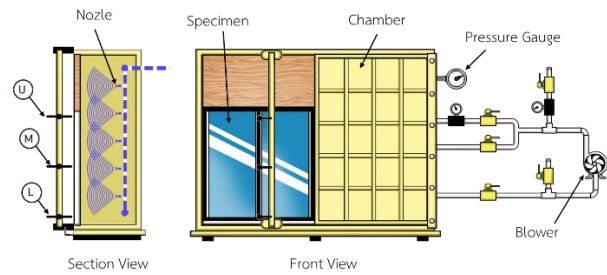
รูปที่ 2 ระดับขั้นการสร้างความดันการทดสอบการรั่วของอากาศ

$$Q_o = Q_L x \frac{293}{273+T_t} x \frac{P_t}{101} \quad (1)$$

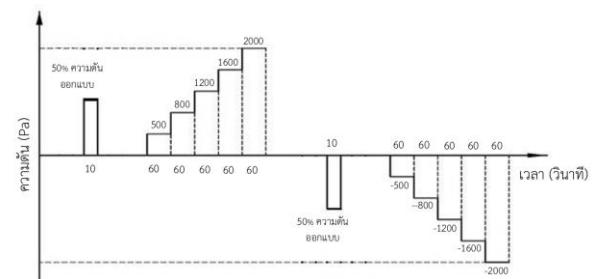
โดย Q_o หมายถึงผลต่างของอัตราการรั่วอากาศที่สภาวะมาตรฐาน เป็นลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง, Q_L หมายถึงผลต่างของอัตราการรั่วอากาศ เป็นลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง, T_t หมายถึงอุณหภูมิอากาศขณะทดสอบ เป็นองศาเซลเซียส และ P_t หมายถึงความดันอากาศขณะทดสอบ เป็นกิโลปาสกาล

2.4 การทดสอบการต้านทานแรงลม (Wind load resistance)

การทดสอบการต้านทานแรงลมสามารถวัดผลในรูปของการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์ หลังจากติดตั้งผลิตภัณฑ์หน้าต่างกับห้องสร้างความดันแล้ว ผู้ทดสอบต้องติดตั้งเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนตัว (เซนเซอร์วัดระยะ) ที่มีความละเอียดสูง ณ 3 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งบนสุด (U) ตำแหน่งกึ่งกลาง (M) และตำแหน่งล่างสุด (L) ดังรูปที่ 3 หลังจากนั้นอ่านค่าเริ่มต้นของเซนเซอร์วัดระยะทั้งสามเป็น U_1 , M_1 และ L_1 ตามลำดับ หลังจากเพิ่มความดันให้กับห้องทดสอบแล้วรักษาความดันคงที่ โครงสร้างหน้าต่างจะโก่งตัว ผู้ทดสอบต้องบันทึกค่าของเซนเซอร์วัดระยะทั้งสามอีกครั้งเป็น U_2 , M_2 และ L_2 ตามลำดับ โดยตามมาตรฐาน มอก. ได้กำหนดให้แบ่งชั้นคุณภาพผลิตภัณฑ์เป็น 5 ระดับซึ่งใช้ความดันทดสอบตามตารางที่ 1 ซึ่งแต่ละลำดับขั้นความดันจะใช้เวลาในการทดสอบตามรูปที่ 4



รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทั้ง 3 ตำแหน่งในการวัดการโก่งตัว



รูปที่ 4 ระดับขั้นการสร้างความดันการทดสอบความต้านทานแรงลม

การคำนวณการโก่งตัวสูงสุดของผลิตภัณฑ์ (F_D) จะใช้ค่าจากเซนเซอร์วัดระยะทั้ง 3 ตำแหน่ง แทนลงสมการที่ (2) หน่วยการโก่งตัวสูงสุดเป็นมิลลิเมตร

$$F_D = (M_2 - M_1) - \frac{(U_2 - U_1) + (L_2 - L_1)}{2} \quad (2)$$

โดย F_D หมายถึงการโก่งตัวสูงสุดในแต่ละระดับความดัน เป็นมิลลิเมตร, U_1 และ U_2 หมายถึงระยะการเคลื่อนตัวของเซนเซอร์ตำแหน่งบนสุดก่อนใช้ความดันและเมื่อใช้ความดัน ตามลำดับ เป็นมิลลิเมตร, M_1 และ M_2 หมายถึงระยะการเคลื่อนตัวของเซนเซอร์ตำแหน่งกึ่งกลางก่อนใช้ความดันและเมื่อใช้ความดัน ตามลำดับ เป็นมิลลิเมตร, L_1 และ L_2 หมายถึงระยะการเคลื่อนตัวของเซนเซอร์ตำแหน่งล่างสุดก่อนใช้ความดันและเมื่อใช้ความดัน ตามลำดับ เป็นมิลลิเมตร

เกณฑ์การทดสอบผลิตภัณฑ์หน้าต่างตาม มอก. จะใช้ค่าโก่งงอสัมพัทธ์ของผลิตภัณฑ์ ในการคำนวณด้วยสมการที่ (3) โดยค่าที่ได้ต้องน้อยกว่า 1/240 สำหรับหน้าต่างประเภท A หรือน้อยกว่า 1/180 สำหรับหน้าต่างประเภท B โดยการโก่งตัวสูงสุดต้องไม่เกิน 20 มิลลิเมตรในกรณีผลการคำนวณการโก่งตัวสูงสุมากกว่า 20 มิลลิเมตร

$$\text{การโก่งงอสัมพัทธ์} = \frac{F_D}{L_s} \quad (3)$$

ค่าการโก่งงอสัมพัทธ์ของผลิตภัณฑ์ ไม่มีหน่วย และ L_s หมายถึงความยาวช่วงทดสอบ (Span) เป็นมิลลิเมตร สำหรับการโก่งงอสัมพัทธ์นั้นเป็นสัดส่วนของการโก่งตัวเมื่อเทียบกับความยาวช่วงทดสอบ แต่ในทางปฏิบัติสามารถใช้เกณฑ์การโก่งตัวเป็นมิลลิเมตร ซึ่งสะดวกและเข้าใจง่ายในการใช้

โดยหาค่าเกณฑ์การโก่งตัวจาก ความยาวช่วงทดสอบหารด้วย 180 หรือ 240 จะได้เกณฑ์การโก่งตัวเป็นมิลลิเมตร เช่น ผลลัพธ์หน้าต่างประเภท A มีความยาวช่วงทดสอบ 1200 มิลลิเมตร ต้องมีการโก่งตัวไม่เกิน 1200/240 หรือเท่ากับ 5 มิลลิเมตร เป็นต้น

2.5 การทดสอบการรับแรงพิสูจน์ (Proof Load)

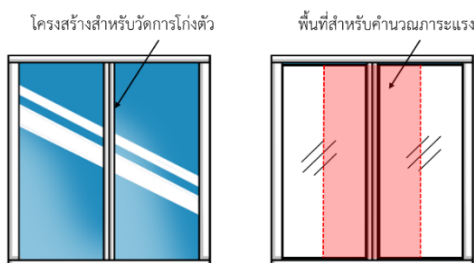
การทดสอบการรับแรงพิสูจน์ เป็นการตรวจสอบความทนแรงลม ขนาดเกินกว่าการทดสอบการโก่งตัวเป็น 1.5 เท่าทั้งความดันด้านบวกและด้านลบ โดยเกณฑ์การตัดสินคือการที่ผลิตภัณฑ์ยังสามารถใช้งานและไม่มีชิ้นส่วนหลุด ผิด ขาดเกิดขึ้น หลังผ่านความดันทดสอบดังกล่าว

การทดสอบผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน มอก.สำหรับผลิตภัณฑ์หน้าต่าง เป็นการตรวจสอบความสามารถของหน้าต่างในหัวข้อต่างๆ การออกแบบ และคำนวณการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์

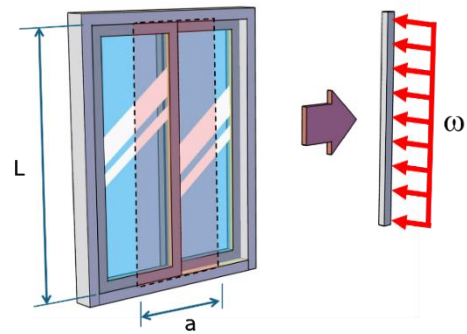
สำหรับการคำนวณการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์หน้าต่างนั้น วิศวกรหรือผู้ออกแบบสามารถคำนวณได้ โดยพิจารณาจากชิ้นส่วนโครงสร้างประกอบที่มีความยาวมากที่สุด เช่นตัวอย่างหน้าต่างบานเลื่อนดังรูปที่ 5 (ซ้าย) ซึ่งโครงสร้างของกรอบบานส่วนกลางจะโก่งตัวสูงสุด โดยสามารถคำนวณได้จากการแทนสูตรการโก่งตัวในคานที่รับแรงกระจายแบบ 2 มิติได้ โดยสามารถแทนค่าต่างๆ ในสมการ (4) ซึ่งเป็นการหาค่าการโก่งตัวสูงสุด [8] และใช้ความดันที่กระทำกับพื้นที่ดังรูปที่ 5 (ขวา) จากการพิจารณาให้แรงที่กระจายบนพื้นที่เปลี่ยนเป็นภาระแรงกระจายเชิงเส้น ดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นการดัดแปลงใช้สูตรจากการคำนวณการแบ่งน้ำหนักบรรทุกทุกลงคานภายในของโครงสร้างของแผ่นพื้น [9]

$$\delta_{max} = \frac{5\omega L_s^4}{384EI} \quad (4)$$

โดย δ_{max} หมายถึงระยะการโก่งตัวของคาน เป็นมิลลิเมตร, ω หมายถึงแรงกระจายเชิงเส้น เป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร, L_s หมายถึงความยาวช่วงคานที่คำนวณ เป็นมิลลิเมตร, E หมายถึงค่ามอดูลัส เป็นเมกะปาสกาล และ I หมายถึงโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ เป็นมิลลิเมตร⁴ (mm⁴)

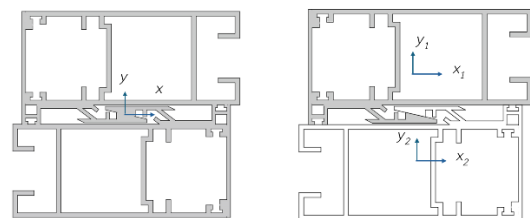


รูปที่ 5 แสดงการเลือกโครงสร้างภายในผลิตภัณฑ์สำหรับคำนวณการโก่งตัวและการพิจารณาพื้นที่สำหรับคำนวณภาระทำให้เกิดการโก่ง



รูปที่ 6 แสดงพื้นที่สำหรับใช้คำนวณการแปลงแรงกระจายบนพื้นที่ (N/m²) เป็นแรงกระจายเชิงเส้น ω (N/m)

การพิจารณาค่า I หรือโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่สำหรับการโก่งตัวของโครงสร้างนั้นมีความสำคัญต่อผลการโก่งตัวจริงของโครงสร้าง ถ้าโครงสร้างเป็นชิ้นส่วนสนิมที่มีเพียงชิ้นเดียว วิศวกรผู้คำนวณสามารถใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ชิ้นส่วนนั้นได้เลย ถ้าชิ้นส่วนมีการประกบกันแบบไม่ถาวรเช่นการยึด ล็อคเข้าด้วยกัน การใช้สกรูยึด เป็นต้น วิศวกรต้องเลือกค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่อย่างถูกต้อง โดยวิศวกรสามารถเลือกใช้ค่าดังกล่าวได้ 2 วิธีคือการพิจารณารวมเป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นส่วนแล้วหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (รูปที่ 7 ซ้าย) และวิธีรวมค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่จากชิ้นส่วนที่แยกกัน (รูปที่ 7 ขวา)



รูปที่ 7 แสดงการรวมชิ้นส่วนเพื่อหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่

การคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ที่แบบรวมจากชิ้นส่วนแยกกันสามารถหาได้จากสมการ (5) โดยที่ I_x หมายถึงโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รอบแกน x , I_{x1} หมายถึงโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รอบแกน x ของชิ้นส่วนที่ 1 และ I_{x2} หมายถึงโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รอบแกน x ของชิ้นส่วนที่ 2

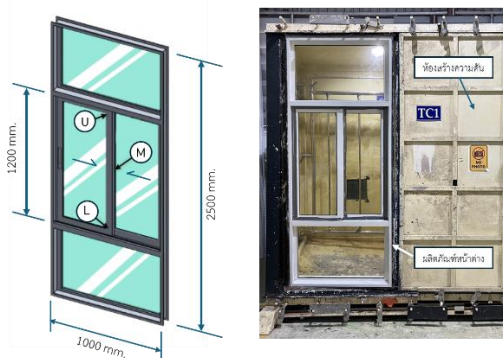
$$I_x = I_{x1} + I_{x2} \quad (5)$$

งานวิจัยนี้จะเน้นการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดสอบจริงจากห้องสร้างความดันของศูนย์ทดสอบประตู หน้าต่างและระบบผนังกระจกสำหรับงานอาคาร ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของการคำนวณและสามารถนำไปใช้ได้จริงเพื่อช่วยในการลดต้นทุนและได้ผลิตภัณฑ์ผ่านมาตรฐาน

3. วิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมผลิตภัณฑ์หน้าต่างสำหรับทดสอบ

ผู้วิจัยเลือกผลิตภัณฑ์ที่ส่งประกอบตามขนาดที่ต้องการ โดยใช้เส้นที่มีขายทั่วไป และได้มาตรฐาน มอก.284 [10] เลือกหน้าต่างบานเลื่อนแบบมีช่องแสงดังรูปที่ 8 โดยมีขนาด กว้าง 1000 มิลลิเมตร สูง 2500 มิลลิเมตร บานหน้าต่างมีความสูง 1200 มิลลิเมตร โดยมีระยะวัดการโก่งตัว (Span) ของโครงสร้างกึ่งกลางบาน $L_s = 1180$ มิลลิเมตร (ระยะจากจุดวัดตำแหน่ง U ถึงตำแหน่ง L) ค่ามอดูลัสของอะลูมิเนียมที่ใช้ในการคำนวณเป็น 69600 เมกาปาสกาล ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ของโครงสร้างที่วัดการโก่งตัวกรณีขึ้นเดียวและรวมสองชั้นเข้าด้วยกันเป็น 50271.4 และ 219321.7 มิลลิเมตร⁴ (mm⁴) ตามลำดับ



รูปที่ 8 แสดงผลิตภัณฑ์หน้าต่างบานเลื่อนสำหรับทดสอบ

3.2 การติดตั้งผลิตภัณฑ์หน้าต่างสำหรับการทดสอบ

หน้าต่างบานเลื่อนสำหรับทดสอบจะถูกติดตั้งเข้ากับห้องสร้างความดันของศูนย์ทดสอบฯ ซึ่งสามารถทดสอบตามขั้นตอนมาตรฐาน มอก.744-2563 [1] ทำการยึดติดผลิตภัณฑ์ให้แน่นหนาเข้ากับห้องด้วยซิลิโคนโดยรอบเพื่อไม่ให้ลมรั่วออกนอกห้องทดสอบได้ และเพื่อเตรียมทำการทดสอบการโก่งตัวจึงต้องติดตั้งเซนเซอร์วัดการเคลื่อนตัว (Displacement sensors) ตำแหน่ง U, M และ L ดังรูปที่ 8 เมื่อสร้างความดันในห้องสร้างความดันแล้วการโก่งตัวผลิตภัณฑ์จะเกิดขึ้น เซนเซอร์ทั้งสามจะแสดงค่าการเคลื่อนตัว บันทึกค่าก่อนและหลังเคลื่อนตัวทั้งหมดเพื่อนำไปคำนวณหาค่าการโก่งตัว (F_D) ตามสมการ (2) โดยการอ่านค่าดังกล่าวสามารถทำได้กับความดันด้านบวกและด้านลบซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบของ มอก.

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ก่อนการทดสอบการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์หน้าต่าง ให้จดค่าเริ่มต้นของเซนเซอร์วัดการเคลื่อนตัวทั้งสามเป็น U_1 , M_1 และ L_1 แล้วใช้ความดันทดสอบตามมาตรฐานโดยเพิ่มความดันในห้องทดสอบตามตารางที่ 1 และลำดับการเพิ่มและลดความดันห้องทดสอบเป็น 5 ระดับดังรูปที่ 4 โดยบันทึกค่าการเคลื่อนตัวของเซนเซอร์ทั้ง 3 เป็น U_2 , M_2 และ L_2 ทุกระดับความดันทดสอบ หาค่าการโก่งตัว และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.4 การหาค่าการโก่งตัวโดยการคำนวณ

การโก่งตัวของผลิตภัณฑ์หน้าต่างที่ได้จากการทดสอบจะถูกเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณแบบต่างๆ ดังนี้

3.4.1 การคำนวณแบบที่ 1 เป็นการคำนวณการโก่งตัวโดยสมการ (4) และใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รวม

3.4.2 การคำนวณแบบที่ 2 เป็นการคำนวณการโก่งตัวโดยสมการ (4) และใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่แบบแยกโดยสมการ (5)

3.4.3 การคำนวณแบบที่ 3 เป็นการคำนวณการโก่งตัวโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ด้วยชิ้นส่วนที่วัดการโก่งตัวเท่านั้น (กึ่งกลางโครงสร้างบาน)

3.4.4 การคำนวณแบบที่ 4 เป็นการคำนวณการโก่งตัวด้วยค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งผลิตภัณฑ์

3.5 ประมวลผลการทดลอง

ผู้วิจัยประเมินผลการทดสอบโดยเปรียบเทียบให้เห็น เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแต่ละวิธีและเสนอแนะแนวทางการลดต้นทุนการผลิต โดยใช้เกณฑ์การทดสอบของ มอก.

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การโก่งตัวที่คำนวณด้วยวิธีใช้สมการพื้นฐาน

การคำนวณด้วยสมการ (4) ซึ่งเป็นพื้นฐานการโก่งตัวของคานรับแรงกระจาย สามารถหาค่าแรงกระจายเชิงเส้นจาก $\omega = P \cdot a$ หน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร (N/mm) โดย P หมายถึงความดันทดสอบ เป็นเมกาปาสกาล (MPa) และ a เป็นระยะความกว้างพื้นที่รับแรงรวมดังรูปที่ 6 ทำให้สามารถได้ค่าแรงกระจายเชิงเส้นเท่ากับ 0.25, 0.40, 0.60, 0.80 และ 1.0 นิวตันต่อมิลลิเมตร (N/mm) ตามลำดับของความดัน 5 ระดับ และการใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (I_x) เป็นดังนี้

5.1.1 การคำนวณแบบที่ 1 ใช้ค่า $I_x = 219321.7$ มิลลิเมตร⁴

5.1.2 การคำนวณแบบที่ 2 ใช้ค่า $I_x = 100542.7$ มิลลิเมตร⁴

ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณแบบที่ 1 และแบบที่ 2

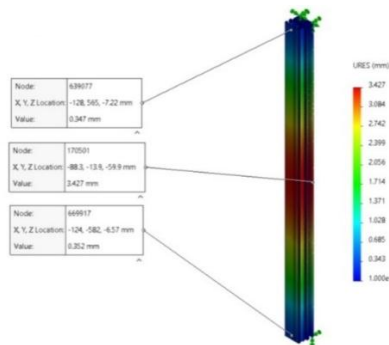
ความดันคำนวณ (ปาสกาล)	การโก่งตัวสูงสุด F_D (มม.) จากการคำนวณแบบที่ 1	การโก่งตัวสูงสุด F_D (มม.) จากการคำนวณแบบที่ 2
±500	0.41	0.90
±800	0.66	1.44
±1200	0.99	2.16
±1600	1.32	2.89
±2000	1.65	3.61

4.2 การโค้งตัวของคานด้วยวิธีใช้การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ต้องกำหนดเงื่อนไขให้ตรงกับสภาวะทดสอบจริงมากที่สุด กำหนดคุณสมบัติให้กับวัสดุที่ต้องการ และใส่ค่าภาระที่ถูกต้องให้กับระบบที่จำลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังตารางที่ 3 แบ่งเป็นการคำนวณดังนี้

4.2.1 การคำนวณแบบที่ 3 ได้จากการคำนวณการโค้งตัวจากการจำลองเฉพาะชิ้นส่วนคานกลางที่ต้องการวัดการโค้งตัว ดังตัวอย่างรูปที่ 9

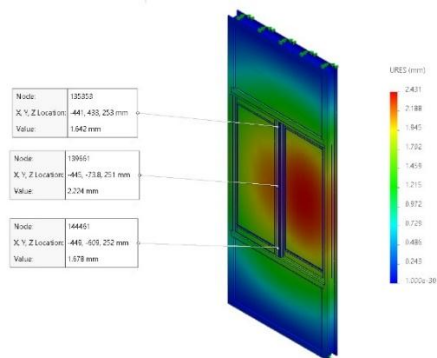
4.2.2 การคำนวณแบบที่ 4 ได้จากการคำนวณการโค้งตัวจากผลการจำลองทั้งผลิตภัณฑ์ ดังตัวอย่างรูปที่ 10



รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างผลจากการจำลองของการคำนวณแบบที่ 3

4.3 ผลการทดสอบจริงผลิตภัณฑ์หน้าต่าง

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบผลิตภัณฑ์หน้าต่างที่ได้จากการวัดการเคลื่อนตัวของจุดกึ่งกลางโครงกรอบบานดังรูปที่ 8 และการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแต่ละวิธีเป็นเปอร์เซ็นต์



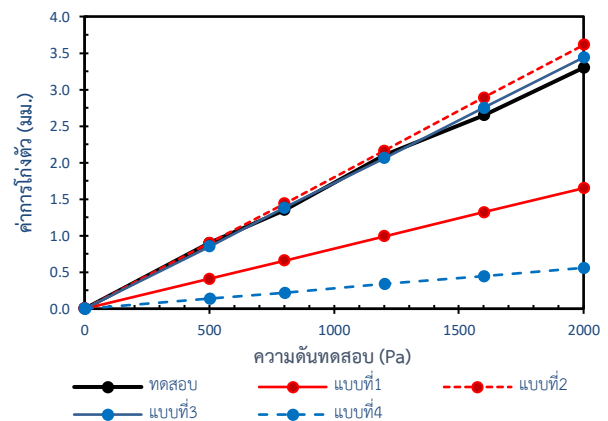
รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างผลจากการจำลองของการคำนวณแบบที่ 4

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณแบบที่ 3 และแบบที่ 4

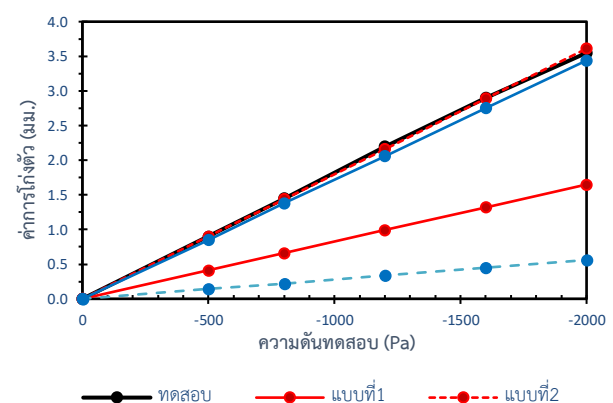
ความดันคาน (ปาสกาล)	การโก่งตัวสูงสุด (มม.) จากการคำนวณแบบที่ 3	การโก่งตัวสูงสุด (มม.) จากการคำนวณแบบที่ 4
±500	0.85	0.14
±800	1.38	0.22
±1200	2.06	0.34
±1600	2.75	0.45
±2000	3.44	0.56

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการโค้งตัวจากการทดสอบและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลเมื่อเทียบกับการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ

ความดันคาน (ปาสกาล)	ค่าการโก่งตัวจากการทดสอบ (มม.)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%) จากการคำนวณแบบต่างๆ			
		แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4
500	0.90	119.5	0.0	5.9	542.9
800	1.35	104.5	6.2	2.2	513.6
1200	2.10	112.1	2.8	1.9	517.6
1600	2.65	100.8	8.3	3.6	488.9
2000	3.30	100.0	8.6	4.1	489.3
-500	0.90	119.5	0.0	5.9	542.9
-800	1.45	119.7	0.7	5.1	559.1
-1200	2.20	122.2	1.9	6.8	547.1
-1600	2.90	119.7	0.3	5.5	544.4
-2000	3.55	115.2	1.7	3.2	533.9
ค่าเฉลี่ย%ความคลาดเคลื่อน		113.32	3.05	4.41	527.97



รูปที่ 10 เปรียบเทียบการโก่งตัวระหว่างผลทดสอบและการคำนวณที่ความดันทดสอบด้านบวก



รูปที่ 11 เปรียบเทียบการโก่งตัวระหว่างผลทดสอบและการคำนวณที่ความดันทดสอบด้านลบ

จากผลการทดสอบสามารถแสดงผลการโก่งตัวจากการคำนวณทั้ง 4 แบบเทียบกับผลการทดสอบจริง ในความดันทดสอบด้านบวกและด้านลบ ตามรูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบและการคำนวณการโก่งตัวทั้ง 4 แบบดังนี้

แบบที่ 1 คำนวณการโก่งตัวจากสูตรพื้นฐานโดยใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคำนวณจากการรวมเป็นชิ้นเดียวกัน

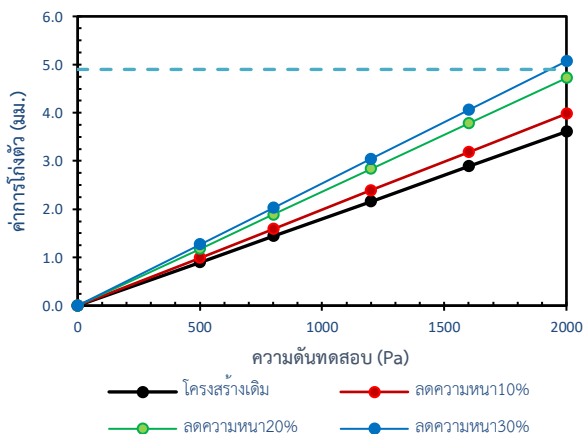
แบบที่ 2 คำนวณการโก่งตัวจากสูตรพื้นฐานโดยใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคำนวณจากการแยกชิ้นโครงสร้างตามสมการ (5)

แบบที่ 3 การโก่งตัวจากการคำนวณจากผลการจำลองเฉพาะชิ้นส่วนคานกลางที่ต้องการวัดการโก่งตัวเท่านั้น

แบบที่ 4 การโก่งตัวจากการคำนวณจากผลการจำลองทั้งผลิตภัณฑ์จากการทดสอบและการเปรียบเทียบผลการคำนวณแบบต่างๆนั้น การคำนวณการโก่งตัวแบบที่ 2 (ใช้สูตรพื้นฐานและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่แบบแยกส่วน) จะมีค่าความคลาดเคลื่อนกับผลการทดสอบจริงน้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงสนใจวิเคราะห์โครงสร้างผลิตภัณฑ์เดิมด้วยการคำนวณวิธีดังกล่าว โดยปรับความหนาของอะลูมิเนียมลงแล้วทำการคำนวณเพื่อทำนายการโก่งตัว โดยเกณฑ์ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์นั้นตามมาตรฐาน มอก. ชนิดหน้าต่างประเภท A คือ $L_s / 240$ เมื่อ L_s มีค่า 1180 มิลลิเมตร จะได้เกณฑ์การโก่งตัวต้องไม่เกิน 4.91 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5 การคำนวณการโก่งตัวเมื่อลดความหนาผลิตภัณฑ์

ความดันคำนวณ (ปาสกาล)	ค่าการโก่งตัวจากการคำนวณ (มม.)			
	โครงสร้างเดิม	ลดความหนา 10%	ลดความหนา 20%	ลดความหนา 30%
500	0.9	0.99	1.18	1.27
800	1.44	1.59	1.89	2.03
1 200	2.16	2.39	2.84	3.04
1 600	2.89	3.18	3.78	4.06
2 000	3.61	3.98	4.72	5.07
ความหนา A/	1.3 มม.	1.17 มม.	1.04 มม.	0.91 มม.



รูปที่ 12 เปรียบเทียบการโก่งตัวจากการคำนวณเมื่อลดความหนาอะลูมิเนียม

ความหนาของอะลูมิเนียมทั้งโครงสร้างเป็น 1.3 มิลลิเมตร การลดความหนาทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ลดลง ส่งผลให้การโก่งตัวเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงทดสอบโดยการลดความหนาอะลูมิเนียมลงเป็นลำดับละ 10 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 5 และรูปที่ 12

5. สรุป

5.1 การคำนวณโก่งตัวของผลิตภัณฑ์หน้าต่าง

การคำนวณด้วยสูตรพื้นฐานการโก่งตัวของคานแบบที่ 2 นั้น มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับการโก่งตัวจริงเมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับความดัน โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 3.05 เปอร์เซ็นต์ แต่ผู้ออกแบบต้องพิจารณาค่าของตัวแปรต่างๆ ในสูตรให้ถูกต้อง โดย 2 ตัวแปรสำคัญคือ

- 1) ค่าแรงกระจาย (Q) ที่ต้องหามาจากความดันทดสอบนั้น ต้องคำนวณด้วยขนาดพื้นที่รับความดันที่ถูกต้อง ขึ้นกับชนิดผลิตภัณฑ์
- 2) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (I_x) นั้น หากชิ้นส่วนที่คำนวณมีการประกบกันชั่วคราว หรือล็อกเข้าหากันโดยไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน ต้องหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ แยกกันแล้วจึงนำมาค่าที่ได้มารวมกัน โดยไม่ควรวาดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่จากการรวมเป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นส่วนดังกล่าว เพราะจะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงถึง 113.32 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับการทดสอบ)

5.2 การจำลองการรับภาระของผลิตภัณฑ์หน้าต่าง

การจำลองการรับภาระของผลิตภัณฑ์หน้าต่าง ด้วยคอมพิวเตอร์นั้น ความคลาดเคลื่อนการหาค่าการโก่งตัวจะสูงมากเมื่อจำลองการรับความดันของผลิตภัณฑ์ทั้งชิ้น เนื่องจากมีหลายเงื่อนไขที่ยากต่อการกำหนดให้เหมือนจริง เช่น การสัมผัสกันของชิ้นงาน การใส่คุณสมบัติวัสดุประกอบ เช่น สลักพลาสติก ยาง ซีลโคน เป็นต้น ทำให้ผลการจำลองมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงถึง 527.97 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่ไม่สามารถนำไปใช้ได้เนื่องจากน้อยกว่าค่าจริงอย่างมาก

หากต้องการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์หน้าต่างต้องทำกับชิ้นส่วนที่วัดการโก่งตัวเท่านั้นซึ่งอาจเป็นชิ้นเดียวหรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับชนิดหน้าต่าง ซึ่งหากใส่เงื่อนไข คุณสมบัติให้เหมือนจริงมากจะทำให้ได้ค่าการโก่งตัวใกล้เคียงกับการทดสอบ โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 4.41 เปอร์เซ็นต์

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 การคำนวณการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์หน้าต่างหรือประตูต้องพิจารณา

ชนิดการรับแรงให้ถูกต้อง เพราะส่งผลต่อพื้นที่รับความดันในการคำนวณ

6.2 การคำนวณให้ได้ค่าที่ปลอดภัยอาจทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มค่าความดันในการคำนวณ หรือเพิ่มความแข็งแรงโครงสร้างง่าย ๆ เช่น เสริมโลหะเส้นด้านในโครงสร้าง หรือโลหะเส้นประกบด้านนอก เพื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่

6.3 การจำลองการรับภาระความดันของผลิตภัณฑ์หน้าต่างหรือประตู มีข้อดีในการใช้งานคือโปรแกรมจะคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าต่างรับภาระให้ ถ้ามีการใส่ค่าขนาดต่างๆ อย่างถูกต้อง

6.4 ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างนี้ สามารถลดความหนาผลิตภัณฑ์ลงได้อีก ไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ทดสอบประตู หน้าต่างและระบบผนังกระจกสำหรับงานอาคาร ซึ่งเป็นศูนย์ทดสอบฯ ของหน่วยงานรัฐแห่งเดียวในประเทศ ที่อำนวยความสะดวกในการทดสอบผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2564). มอก. 744-2563 วงกบและกรอบบานโลหะสำหรับประตูและหน้าต่าง : หน้าต่างอะลูมิเนียม. *มาตรฐานอุตสาหกรรม*, ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 138, ตอนพิเศษ 18 ง.
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2564). มอก. 829-2563 วงกบและกรอบบานโลหะสำหรับประตูและหน้าต่าง : ประตูอะลูมิเนียม. *มาตรฐานอุตสาหกรรม*, ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 138, ตอนพิเศษ 95 ง.
- [3] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2564). มอก. 1043-2564 วงกบและกรอบบานพีวีซีสำหรับประตู

และหน้าต่าง : หน้าต่าง. *มาตรฐานอุตสาหกรรม*, ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 139, ตอนพิเศษ 78 ง.

- [4] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2564). มอก. 3332-2564 วงกบและกรอบบานพีวีซีสำหรับประตูและหน้าต่าง : ประตู. *มาตรฐานอุตสาหกรรม*, ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 139, ตอนพิเศษ 102 ง.
- [5] กรุงเทพมหานคร. (2544). ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544. ราชกิจจานุเบกษา, เล่ม 118, ตอนพิเศษ 37 ง, หน้า 37.
- [6] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. (2550). มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร (มยผ. 1311-50).
- [7] กระทรวงมหาดไทย. (2567). ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง การออกแบบโครงสร้างอาคารและลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร. ราชกิจจานุเบกษา, เล่ม 141, ตอนพิเศษ 237 ง, หมวด 4 แรงลม, หน้า 48.
- [8] Hibbeler R.C. (2014). *Mechanics of Materials*. 9th ed. Pearson, pp.812.
- [9] มงคล จิรวีระเดช (2561). *การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง SDM*. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 22-27.
- [10] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2562). มอก. 284-2560 อะลูมิเนียมเจืออัดรีดขึ้นรูป. *มาตรฐานอุตสาหกรรม*, ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 136, ตอนพิเศษ 316 ง.