

พฤติกรรมกระจกเทมเปอร์ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อชนิดรูเจาะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Behavior of tempered glass with drilled type connector



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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

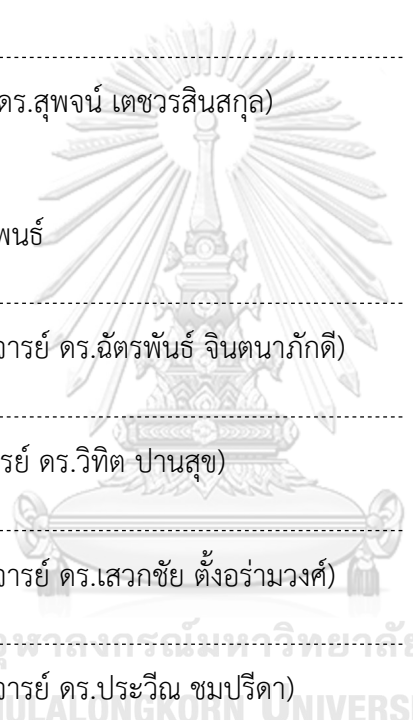
Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมกระจกเทมเปอร์ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อชนิดรูเจาะ
โดย	นายโสภณ ยศสาพงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประวีณ ชมปรีดา)	



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โสมณ ยศสาพงศ์ : พฤติกรรมกระจกเทมเปอร์ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อชนิดรูเจาะ. (Behavior of tempered glass with drilled type connector) อ.ที่ปรึกษาหลัก :
รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักคงที่ของกระจกเทมเปอร์ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกแบบเจาะรูโดยใช้ลมและน้ำในการทดสอบการบรรทุกน้ำหนักพร้อมทั้งทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method ,FEM) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 ในการสร้างแบบจำลอง โดยในการทดสอบใช้กระจกเทมเปอร์ มีความหนา 12 mm ขนาด 1200x1200 mm ที่เจาะรู 18 mm และ 38 mm อย่างละ 1 ตัวอย่าง และขนาด 1200x2400 mm ที่เจาะรู 38 mm 1 ตัวอย่าง เจาะรูที่กระจก 4 จุดต่อแผ่นสำหรับติดตั้งตัวยึดต่อกระจก 2 ผลิตภัณฑ์ เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรง ระยะโก่งตัว และการกระจายแรงในแผ่นกระจก โดยศึกษาเปรียบเทียบผลของผลิตภัณฑ์ตัวยึดต่อกระจกที่ต่างกัน ลักษณะการติดตั้งที่ต่างกัน ขนาดรูเจาะที่ต่างกันในตัวยึดต่อกระจกตัวเดียวกัน ขนาดกระจกที่ต่างกัน โดยรวม กระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200 mm สามารถรับแรงได้ในช่วง 16,000 Pa ถึง 19,400 Pa และมีการโก่งตัวที่ศูนย์กลางแผ่นกระจกที่ประมาณ 23 mm – 26 mm ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ และลักษณะการติดตั้งส่วน ขนาด 1200x2400 mm สามารถรับแรงได้ในช่วง 3,400 Pa ถึง 3,600 Pa และมีการโก่งตัวที่ศูนย์กลางแผ่นกระจกที่ประมาณ 93 mm – 98 mm ขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้งเช่นกัน ในด้านการโก่งตัวที่กึ่งกลางกระจก มีแปรผันตามความสามารถในการรับแรงของกระจกที่เพิ่มขึ้น หรือลดลง และพบว่ากระจกมีความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ ในทุกกรณีทดสอบ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5870266221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Tempered glass : drilled type connector : Finite element method :
Load resistance: Water test : Air pressure test : Deflection : Stress
distribution

Sopon Yossapong : Behavior of tempered glass with drilled type
connector. Advisor: Assoc. Prof. Withit Pansuk, Ph.D.

This paper present a behavior of tempered glass with drilled type connector by testing with air pressure and water pressure and compare test result by computation model Finite element method (FEM). Sample of tempered glass testing use 12 mm thickness sizing 1200x1200 mm and 1200x2400 mm with four points supported installation to study and compare result the connector type and sizing effect, the installation condition effect, the sizing of drilled hole effect and the glass ratio effect to the maximum load resistance ,defection and position of maximum stress of testing glass. The results show that load resistance and deflection depend on type of connector and installation conditions. Glass sizing 1200x1200 mm can carry load range between 16,000 Pa to 19,400 Pa and deflection 23 mm to 26 mm; in addition, glass sizing 1200x2400 mm can carry load range between 3,400 Pa to 3,600 Pa. Moreover, the position of maximum stress of glass is on middle edge of glass panel for all case.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. วิจิต ปานสุข ที่ช่วยแนะนำให้ความเห็น และให้การช่วยเหลือเป็นอย่างดี ตลอดการศึกษาที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณ ผศ.ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนา ภาคิต ที่เป็นประธาน และอาจารย์ดร.เสวกชัย ตังจ่อร่วมวงศ์ และ ผศ.ดร.ประวีณ ชมปรีดาที่เป็นกรรมการ ในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยตรวจสอบให้คำแนะนำที่ดีในการเขียนวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์ มากยิ่งขึ้นขอขอบคุณ อาจารย์ทุกท่านในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ ที่ได้ให้การสั่งสอน ให้ความรู้ การแนะนำที่มีค่ามีประโยชน์ให้ข้าพเจ้าในการศึกษาครั้งนี้ เพื่อจะนำความรู้ที่ได้ไปใช้ให้เกิด ประโยชน์ในการพัฒนาประเทศต่อไป ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การ ช่วยเหลือแนะนำ สนับสนุนตลอดการศึกษา ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆน้องๆ ที่ไม่ได้ออกนาม ที่ได้ร่วมเรียน มาพร้อมกัน และคอยช่วยเหลือให้คำแนะนำในด้านต่างๆ โดยเฉพาะที่อยู่ในกลุ่มของอาจารย์ที่ปรึกษาคน เดียวกันตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณพ่อประสงค์ ยศสาพงศ์ คุณแม่พวงเพชร ยศสาพงศ์ คุณนัฐยา ทาจิณะ รวมถึง ญาติๆ ที่ให้การสนับสนุนทั้งทางตรง และทางอ้อมเป็นอย่างดีจนสำเร็จการศึกษา ขอขอบคุณ เจ้าของ บริษัท ดับบลิว.พี.เอส.คอนซัลแทนส์ จำกัด คุณวินัย ประเสริฐยิ่งสุข คุณกานต์ สีห์โสภณ ที่ให้โอกาสได้ ศึกษาต่อ ตลอดจน พี่ๆ น้องๆ ในบริษัท โดยเฉพาะ คุณภูวนาท เวียงนิล,คุณภรณ์ณ อนุจร ที่ ช่วยเหลือ แบ่งเบา และแบกรับงานประจำบางส่วนไปทำ ตลอดที่ทำการศึกษาอยู่เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ผู้เกี่ยวข้องที่ให้การสนับสนุนทั้งในด้าน เครื่องมือ อุปกรณ์ และทีมงานสนับสนุน ของแต่ละบริษัทที่อาจไม่ได้กล่าวชื่อครบทุกท่าน ที่ช่วยเหลือทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ที่ อยู่ในบริษัทแคสแคล จำกัด โดย Mr Joenel ,คุณ ศิริรัตน์ เกี่ยวการค้า และคณะ ,บริษัท ไทย-เยอรมัน สเปเชียลตี้ กลาส จำกัด โดยคุณวินัย ทวีสกุลชัยม และคณะ บริษัท คินลอง ฮาร์ดแวร์ (ประเทศไทย) จำกัด โดย คุณธนพล และคณะ, บริษัท ยูนิซีโลท์ จำกัด โดยคุณณัฐวัฒน์ มงคลประดิษฐ์ ,คุณราเชนทร์ บุญนาค และคณะ , บริษัท อาร์ ดีไซน์ แอนด์ คอนสตรัคชั่นจำกัด โดยคุณวิโรจน์ โรจน์รัชดากร , คุณ สุวัจชัย ไหม่เพย และ คณะ , คุณสามารถ ภูวนิชย์พงษ์ชัย บริษัท อินทิเกรท ซิวิล กรุ๊ป จำกัด และหวัง เป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการก่อสร้าง และประเทศชาติต่อไปในอนาคต

โสภณ ยศสาพงศ์

สารบัญ

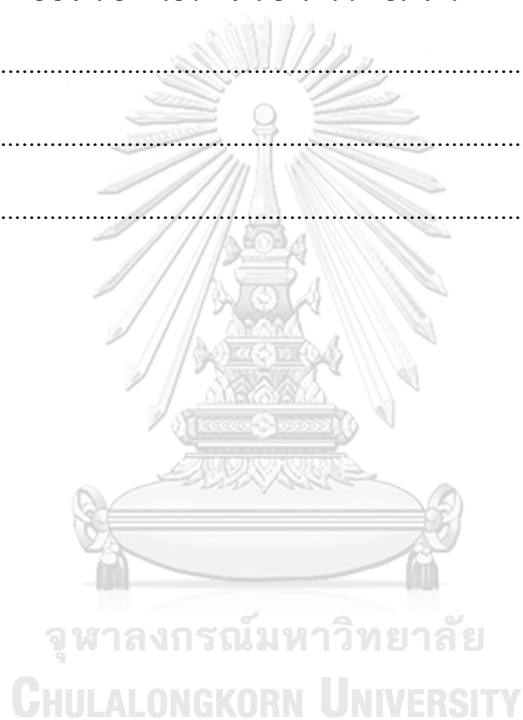
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ	1
สารบัญตาราง.....	9
บทที่ 1 บทนำ	11
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย	11
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	13
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	14
1.3.1 การทดสอบตัวอย่างกระจก.....	14
1. ทำการทดสอบเฉพาะกระจกเทมเปอร์ หน้า 12 มม. จำนวน 3 ชั้นตามแสดงใน รูปที่ 1-2	14
1.3.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	17
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.1 ชนิดของกระจก.....	20
2.1.1 กระจกโฟลตใส (Float glass) หรือ Anneal glass (AN).....	20
2.1.2 กระจกอบร้อน หรือกระจกกึ่งนิรภัย (Heat Strengthen (HS))	21
2.1.3 กระจกเทมเปอร์ (Full Temper Glass (FT)).....	21
2.1.4 กระจกนิรภัยหลายชั้น Laminare Glass (LG)	23

2.1.5 กระจกฉนวน (Insulating glass (IG))	24
2.2 ระบบผนังอาคาร วัสดุกระจก.....	25
2.2.1 ระบบผนังกระจก Curtain wall.....	26
2.2.2 ระบบโครงสร้างผนังกระจก (Structural glass wall / Spider wall).....	26
2.3 คุณสมบัติของกระจก	27
2.4 มาตรฐาน และข้อกำหนด ในปัจจุบัน	29
2.4.1 มาตรฐานแรงลม [4].....	29
2.4.2 มาตรฐาน ASTM E1300 [1].....	29
2.4.3 Guidance for European Structural Design of Glass Components [2].....	31
2.4.4 มาตรฐานการทดสอบกระจก EN 1288 [5].....	31
1. EN 1288-2: Coaxial double ring test on flat specimens with large surface areas	31
2. EN 1288-3: Test with specimen supported at two points (four point bending)	32
3. EN 1288-5: Coaxial double ring test on flat specimens with small test surface areas	32
2.4.5 มาตรฐาน มอก 965-2560 (กระจก เทมเปอร์) [8].....	33
2.5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	34
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.6.1 การวิจัย ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรม และคุณสมบัติเชิงกล ของกระจก	39
2.6.2 การวิจัย ศึกษาเกี่ยวกับ การทดสอบกระจก.....	40
2.6.3 การวิจัย ศึกษาเกี่ยวกับ การวิเคราะห์กระจกด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	45
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	50
3.1 แนวคิดหลักในการทดสอบ.....	50
3.1.1 การสร้างจำลองชิ้นส่วนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	50

3.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ	52
3.2.1 ขนาดของตัวอย่างกระจกทดสอบ	52
3.2.2 ตัวยึดต่อกระจกแบบรูเจาะที่ใช้ในการทดสอบ	53
3.2.3 โครงเหล็กฐานรับตัวยึดต่อกระจก	54
3.3 อุปกรณ์การทดสอบ	55
3.3.1 อุปกรณ์ทดสอบ	55
3.3.2 เครื่องมือวัด แสดงใน รูปที่ 3-9	56
3.4 รายละเอียด พฤติกรรมของตัวอย่างที่พิจารณาภายใต้การทดสอบ	57
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ	59
บทที่ 4 ผลการทดลอง	61
4.1 ผลของลักษณะการติดตั้งตัวยึดต่อกระจกที่ต่างกัน (Pin , Fixed) ของแต่ละผลิตภัณฑ์	61
4.1.1 ด้านการรับแรง เมื่อลักษณะการติดตั้งตัวยึดต่อกระจกที่ต่างกัน (Pin/Fixed)	62
4.1.2 ด้านระยะการโก่งตัวเมื่อลักษณะการติดตั้งตัวยึดจับกระจกที่ต่างกัน (Pin/Fixed).....	64
4.2 ผลของผลิตภัณฑ์ ตัวยึดต่อกระจกที่ต่างกัน (ใหญ่ / เล็ก).....	66
4.2.1 ด้านการรับแรง เมื่อชนิดตัวยึดจับกระจกที่ต่างผลิตภัณฑ์กัน.....	67
4.2.2 ด้านการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจก เมื่อใช้ตัวยึดต่อกระจกที่ต่างผลิตภัณฑ์กัน (A,B)	68
4.3 ผลของขนาดรูเจาะกระจกที่ต่างกัน (พอดี / หลวม) บนตัวยึดจับกระจกตัวเดียวกัน	70
4.3.1 ด้านการรับแรง เมื่อขนาดรูเจาะกระจกต่างกัน (พอดี/หลวม) บนตัวยึดจับกระจกตัวเดียวกัน 71	
4.3.2 ด้านการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจก เมื่อกระจกเจาะรูขนาด (พอดี/หลวม) ต่างกัน	72
4.4 ผลของขนาดกระจกต่างกัน	74
4.4.1 ด้านการรับแรง จากการที่ขนาดกระจกที่ต่างกัน	74
4.4.2 ด้านตำแหน่งและระยะการโก่งตัว ของขนาดกระจกที่ต่างกัน.....	75

4.5 การกระจายความเครียดที่ผิวกระจกเมื่อรับแรง ในลักษณะที่ต่างกัน	76
4.5.1 ผลการกระจายแรง เมื่อ ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin) เปรียบเทียบกับ แบบแกนยึดแน่น (Fixed).....	79
4.5.2 ผลการกระจายแรง บนตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) ที่ติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) และการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed).....	81
4.5.3 ผลการกระจายแรง เมื่อกระจกมีขนาดรูเจาะที่หลวมกว่าแกนของตัวยึดต่อกระจก (B) มาก.....	83
4.5.4 ผลการกระจายแรง เมื่อขนาดกระจกต่างกัน (อัตราส่วน กว้าง:ยาว = 1:2).....	86
บทที่ 5 การสร้างแบบจำลอง เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ	89
5.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์	89
5.1.1 แบบจำลองแบบที่ 1 สร้างแบบจำลองโดยกำหนดให้กระจกเป็นแผ่นเต็ม ไม่เจาะรู....	89
5.1.2 แบบจำลองแบบที่ 2 แบบเส้นโลหะรองรับ บนกระจกเจาะรู	91
5.1.3 แบบจำลองแบบที่ 3 แผ่นเหล็กและยางรองรับใต้กระจกที่เจาะรู.....	92
5.2 สมบัติเชิงกลที่ใช้เป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์.....	95
5.3 ผลการวิเคราะห์ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	98
5.3.1 สรุปผลการสร้างแบบจำลองแบบแกนหมุนได้ (Pin).....	108
1. ผลการวิเคราะห์ ความเค้นที่ตำแหน่ง กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ เมื่อติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin).....	109
2. ผลการวิเคราะห์ ความเค้นที่ตำแหน่งรอบจุดรองรับ เมื่อติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin).....	112
3. ผลการวิเคราะห์ การโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจก เมื่อติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin).....	115
5.3.2 สรุปแบบจำลองรูปแบบแกนยึดแน่น (Fixed)	116
1. ผลการวิเคราะห์ ความเค้นที่ตำแหน่ง กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ เมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed).....	117
2. ผลการวิเคราะห์ความเค้นบริเวณรอบจุดรองรับ เมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)	119

3. ผลการวิเคราะห์ การโค้งตัวที่กลางแผ่นกระจก เมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)	123
.....	123
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	125
6.1 สรุปผลการวิจัย	125
6.1.1 ผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรง และการโค้งตัว	125
6.1.2 การกระจายแรง	126
6.1.3 การสร้างแบบจำลองด้วยวิธี จำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	126
6.2 ข้อเสนอแนะ	127
บรรณานุกรม	128
ประวัติผู้เขียน	130



สารบัญภาพ

รูปที่ 1-1	ลักษณะทั่วไปของการติดตั้งกระจกด้วยตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ.....	12
รูปที่ 1-2	ตำแหน่งและขนาดรูเจาะบนกระจกทดสอบ 3 ชั้น.....	14
รูปที่ 1-3	รายละเอียดลักษณะตัวยึดต่อขนาดใหญ่ (A) และขนาดเล็ก (B).....	15
รูปที่ 1-4	การแบ่งกรณีทดสอบบนกระจกขนาด 1200x1200x12 mm รูเจาะ 38 mm.....	16
รูปที่ 1-5	การแบ่งกรณีทดสอบบนกระจกขนาด 1200x1200x12 mm รูเจาะ 18 mm.....	16
รูปที่ 1-6	การแบ่งกรณีทดสอบบนกระจกขนาด 1200x2400x12 mm รูเจาะ 38 mm.....	17
รูปที่ 1-7	แบบจำลองแบบที่ 1 กระจกเต็มไม่เจาะรู	17
รูปที่ 1-8	แบบจำลองแบบที่ 2 กระจกเจาะรูรองรับด้วยเส้นโลหะ และสปริง.....	18
รูปที่ 1-9	แบบจำลองแบบที่ 3 กระจกเจาะรูรองรับด้วยสปริง และแผ่นโลหะรองใต้สปริง ...	18
รูปที่ 2-1	การเปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าความเครียดที่ผิวระหว่างกระจก Heat Strength Glass (HG) , Full Temper Glass (FT) และ Chemically pre stressed glass [2]	22
รูปที่ 2-2	ลักษณะการแตกเป็นเม็ดข้าวโพด ของกระจกเทมเปอร์ [3].....	23
รูปที่ 2-3	ตัวอย่างของกระจกนิรภัยหลายชั้น (Laminated Safety Glass) รูปแบบต่างๆ [3]	24
รูปที่ 2-4	ส่วนประกอบของกระจกฉนวน (Insulation Glass) [3]	25
รูปที่ 2-5	การติดตั้งอุปกรณ์ยึดต่อกระจกแบบรูเจาะ.....	27
รูปที่ 2-6	กราฟเปรียบเทียบความเครียด และความเค้น ของเหล็ก และกระจก [2]	28
รูปที่ 2-7	ตัวอย่างกราฟแสดงการหาค่ากำลังรับน้ำหนัก ของกระจกโพลติใส หนา 6.0 mm ที่ติดตั้งแบบรับน้ำหนัก 4 ด้านโดยมีความยาว 1500 mm ความกว้าง 1200 mm [1]	30
รูปที่ 2-8	รายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบกระจกตามมาตรฐาน EN1288-2 [5].....	31
รูปที่ 2-9	รายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบกระจกตามมาตรฐาน EN1288-3 [5].....	32

รูปที่ 2-10	ตัวอย่างการทดสอบกระจกตามมาตรฐาน EN1288-3 [6]	32
รูปที่ 2-11	รายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบกระจกตามมาตรฐาน EN1288-5 [2, 7]	32
รูปที่ 2-12	รายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบกระจกแตกเนื่องจากแรงกระแทก ตามมาตรฐาน มอก 965-2560 (EN 12600) [2, 8, 9]	33
รูปที่ 2-13	รายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบกระจกทนการกระแทก ตามมาตรฐาน มอก 965-2560 [6, 8]	34
รูปที่ 2-14	รูปแบบชิ้นส่วนย่อยที่มีอันดับของจุดต่อ แบบต่างๆแบบ 1 มิติ , 2 มิติ และ 3 มิติ [10]	37
รูปที่ 2-15	การแปลงโคออร์ดิเนต (X,Y,Z) ไปสู่ โคออร์ดิเนต ธรรมชาติ (ξ,η,ζ)	38
รูปที่ 2-16	กำลังรับแรงดึงสูงสุดของกระจกโพลติสที่อุณหภูมิ 75- 400 °C [11]	39
รูปที่ 2-17	ตำแหน่งจุดยึดกระจก ในการทดสอบผลกระทบเมื่อได้รับความร้อน [12]	41
รูปที่ 2-18	อุปกรณ์ยึดกระจก ลักษณะการยึดกระจก และทิศของแรงที่ใช้ในการทดสอบทั้ง 3 แบบ [13]	42
รูปที่ 2-19	อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ สำหรับการทดสอบ [13]	43
รูปที่ 2-20	อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ สำหรับการทดสอบ [14]	44
รูปที่ 2-21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ต่อระยะการโก่งตัวของกระจกทดสอบ [14] ...	45
รูปที่ 2-22	ผลการวิเคราะห์ ด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ ของตัวอย่าง กรณีที่ 10 -15 [12]	46
รูปที่ 2-23	การจำลองการทดสอบการกระจกโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ANSYS) ให้สอดคล้องกับการทดสอบวิธี Coaxial double ring test [5, 15]	48
รูปที่ 2-24	ลักษณะรูปแบบกำหนดการจำลองชิ้นส่วน ชนิด Shell 181 ในโปรแกรม ANSYS	48
รูปที่ 2-25	ตัวอย่างกราฟช่วยออกแบบที่ได้จากการวิจัย (ซ้าย) เปรียบเทียบกับ มาตรฐาน ASTM E1300 ของกระจกหนา 6 mm (ขวา) [1, 15]	49
รูปที่ 2-26	ตัวอย่างกราฟช่วยออกแบบที่ได้จากการวิจัย (ซ้าย) เปรียบเทียบกับ มาตรฐาน ASTM E1300 ของกระจกหนา 12 mm (ขวา) [1, 15]	49
รูปที่ 3-1	ลักษณะของ 3-nodes และ 4-nodes Shell ในโปรแกรม SAP2000 [16]	51

รูปที่ 3-2	แบบจำลองรูปแบบต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 รูปแบบหลัก.....	51
รูปที่ 3-3	ขนาด และตำแหน่งรูเจาะของกระจกตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ	52
รูปที่ 3-4	ตัวอย่างตัวยึดต่อกระจกที่ใช้ในการทดสอบ	53
รูปที่ 3-5	การปรับแหวนรอง และน็อต ที่ตัวยึดต่อกระจกที่ใช้ในการทดสอบ	54
รูปที่ 3-6	การติดตั้งกระจกเข้ากับโครงเหล็กฐานรองรับ ด้วยตัวยึดต่อกระจกที่ใช้ในการทดสอบ (a) กระจก 1200x1200 mm ติดตั้งแนวนอน (b) กระจก 1200x2400 mm ติดตั้งแนวตั้ง	54
รูปที่ 3-7	การติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การรับแรงของกระจก ในแนวตั้ง.....	55
รูปที่ 3-8	การติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การรับแรงของกระจก ในแนวนอน	56
รูปที่ 3-9	การติดตั้งอุปกรณ์วัดที่ใช้ในการทดสอบ การรับแรงของกระจกทั้งในแนวตั้ง และแนวนอน	57
รูปที่ 3-10	ลักษณะการติดตั้งกระจก และจุดวัดการขยายตัว และการโก่งตัวของตัวอย่างกระจกขนาด 1200x2400 mm ขนาดรูเจาะกระจก 38mm.	58
รูปที่ 3-11	ลักษณะการติดตั้งกระจก และจุดวัดการขยายตัว และการโก่งตัวของตัวอย่างกระจกขนาด 1200x1200 mm ทั้งขนาดรูเจาะ 18 mm และ 38 mm	59
รูปที่ 4-1	เปรียบเทียบรายละเอียดการติดตั้งแบบหมุนได้ (Pin) และแบบยึดแน่น (Fixed)...	61
รูปที่ 4-2	เปรียบเทียบรายละเอียดการติดตั้งแบบหมุนได้ (Pin) และแบบยึดแน่น (Fixed)...	62
รูปที่ 4-3	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระจก 100 mm ของตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) ที่ติดตั้งลักษณะต่างกัน (Pin/Fixed)	63
รูปที่ 4-4	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระจก 100 mm ของตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) ที่ติดตั้งต่างกัน (Pin/Fixed).....	63
รูปที่ 4-5	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กึ่งกลางแผ่นกระจก ของตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) ที่ติดตั้งต่างกัน (Pin/Fixed).....	65

รูปที่ 4-6	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระຈก ตัวยึดต่อกระຈกขนาดเล็ก (B) ที่ติดตั้งต่างกัน (Pin/Fixed).....	66
รูปที่ 4-7	ลักษณะทั่วไปของตัวยึดต่อกระຈกขนาดใหญ่ (A).....	66
รูปที่ 4-8	ลักษณะทั่วไปของตัวยึดต่อกระຈกขนาดเล็ก (B).....	67
รูปที่ 4-9	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระຈก 100 mm ที่ใช้ตัวยึดต่อต่างชนิดกัน (A , B) ติดตั้งแบบแฉนหมุนได้ (Pin).....	67
รูปที่ 4-10	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระຈก 100 mm ที่ใช้ตัวยึดต่อต่างชนิดกัน (A ,B) ติดตั้งแบบแฉนยึดแฉน (Fixed).....	68
รูปที่ 4-11	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระຈก ของตัวยึดต่อกระຈกที่ต่างชนิดกัน (A ,B) ติดตั้งแบบแฉนหมุนได้ (Pin).....	69
รูปที่ 4-12	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระຈก ที่ใช้ตัวยึดต่อกระຈกต่างชนิดกัน (A ,B) ติดตั้งแบบแฉนยึดแฉน (Fixed).....	69
รูปที่ 4-13	แสดงการติดตั้งตัวยึดต่อกระຈกขนาดเล็ก (B) บนกระຈกเจาะรูขนาด.....	70
รูปที่ 4-14	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระຈก 100 mm ใช้ตัวยึดต่อกระຈกขนาดเล็ก (B) บนกระຈกเจาะรูขนาด 18 mm และ 38 mm ติดตั้งแบบแฉนหมุนได้ (Pin).....	71
รูปที่ 4-15	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระຈก 100 mm ใช้ตัวยึดต่อกระຈกขนาดเล็ก (B) บนกระຈกเจาะรูขนาด 18 mm และ 38 mm ติดตั้งแบบแฉนยึดแฉน (Fixed).....	72
รูปที่ 4-16	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระຈกที่ใช้ตัวยึดต่อกระຈกขนาดเล็ก (B) บนกระຈกเจาะรูขนาด 18 mm และ 38 mm และตัวยึดต่อกระຈกขนาดใหญ่ (A) บนกระຈกเจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งแบบแฉนหมุนได้ (Pin).....	73
รูปที่ 4-17	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระຈกที่ใช้ตัวยึดต่อกระຈกขนาดเล็ก (B) บนกระຈกเจาะรูขนาด 18 mm และ 38 mm ติดตั้งแบบแฉนยึดแฉน (Fixed).....	73

รูปที่ 4-18	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจาก ริมขอบกระจก 100 mm ของกระจกที่มีขนาด 1200x1200x12mm และ 1200x2400x12mm.....	75
รูปที่ 4-19	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัว ของกระจกที่มีขนาด 1200x1200x12mm และ 1200x2400x12mm ที่ติดตั้งแบบแแกนหมุนได้ (Pin) เปรียบเทียบกับแบบแแกนยึดแน่น (Fixed).....	76
รูปที่ 4-20	ตำแหน่งการติดตั้ง และการกำหนดชื่อของ Strain gauge แต่ละตำแหน่ง ที่ติดตั้งอยู่ ผิวกระจก 1200x1200x12mm ด้านหลังการรับแรง	77
รูปที่ 4-21	ตำแหน่งการติดตั้ง และการกำหนดชื่อของ Strain Gauge แต่ละตำแหน่ง ที่ติดตั้ง อยู่ผิวกระจก 1200x2400x12mm ด้านหลังการรับแรง.....	78
รูปที่ 4-22	กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด ณ ตำแหน่ง Strain gauge ต่างๆบนกระจก ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แบบแแกนหมุนได้ (Pin, Case 7).....	79
รูปที่ 4-23	กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด ของ Strain gauge ต่างๆบนกระจก ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แบบแแกนยึดแน่น (Fixed, Case 8).....	80
รูปที่ 4-24	กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด ของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระจก ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) แบบแแกนหมุนได้ (Pin, Case 1).....	81
รูปที่ 4-25	กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียดของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระจก ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) แบบแแกนยึดแน่น (Fixed, Case 2).....	82
รูปที่ 4-26	กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียด ของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระจกรูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) แบบแแกนหมุนได้ (Pin, Case 9)	84
รูปที่ 4-27	กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียดของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระจกรูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) แบบแแกนยึดแน่น (Fixed, Case 10)	85

รูปที่ 4-28	กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด ของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระจก 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 3).....	86
รูปที่ 4-29	กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด ของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระจก 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แบบแกนยึดแน่น (Fixed, Case 4).....	87
รูปที่ 5-1	การสร้างแบบจำลองแบบไม่เจาะรู.....	90
รูปที่ 5-2	การสร้างแบบจำลองแผ่นกระจกแบบเจาะรู ของแบบจำลองที่ 2 และ 3.....	91
รูปที่ 5-3	ภาพขยายแบบจำลองแบบเจาะรู บริเวณรอบรูเจาะ และการติดตั้ง เส้นโลหะ 2 แถวตามแนวขอบของฐานรองรับเหล็ก.....	92
รูปที่ 5-4	ภาพขยายแบบจำลองแบบเจาะรู บริเวณรอบรูเจาะ และการติดตั้ง เส้นโลหะ 2 แถวตามลักษณะของขนาดฐานรองรับกระจก ที่ใช้ทดสอบจริง.....	92
รูปที่ 5-5	ภาพขยายแบบจำลองแบบที่ 3 แบบ 3 มิติ ที่เชื่อมต่อกระจก และฐานรองรับกระจกด้วย คำสั่ง Link/Supported (Linear) แนวตั้ง ในโปรแกรม SAP2000.....	94
รูปที่ 5-6	ภาพขยายแบบจำลองแบบที่ 3 แบบ 3 มิติ ตามการติดตั้งตัวยึดต่อกระจกที่ใช้ทดสอบจริง เชื่อมต่อกระจก และฐานรองรับกระจกด้วย คำสั่ง Link/Supported (Linear) แนวตั้ง และแสดงจุดเชื่อมต่อที่จุดศูนย์กลางฐานรองรับกระจกด้วยคำสั่ง Link/Supported (Linear) ปรับค่าตัวแปรตามลักษณะการติดตั้ง (Pin/Fixed) ในโปรแกรม SAP2000.....	94
รูปที่ 5-7	ภาพขยายแบบจำลองแบบที่ 3 แบบ 3 มิติ ตามลักษณะของการเชื่อมต่อกระจก และฐานรองรับกระจกด้วย คำสั่ง Link/Supported (Linear) แนวตั้ง ในโปรแกรม SAP2000.....	95
รูปที่ 5-8	กราฟแสดงผลเฉลี่ยของความแม่นยำ ของแบบจำลอง แต่ละแบบ โดยแบ่งเป็นค่าเฉลี่ยรวม และค่าเฉลี่ยตามลักษณะการติดตั้งที่ต่างกัน (Pin/Fixed) ของการโค้งตัว และความเค้นสูงสุดตามลำดับ.....	108

รูปที่ 5-9	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบ แกนหมุนได้ (Pin) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ.....	110
รูปที่ 5-10	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 18mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบ แกนหมุนได้ (Pin) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ.....	110
รูปที่ 5-11	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบ แกนหมุนได้ (Pin) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ.....	111
รูปที่ 5-12	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบ แกนหมุนได้ (Pin) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ.....	111
รูปที่ 5-13	ตัวอย่างการกระจายแรงรอบจุดรองรับของแต่ละแบบจำลอง Case 7 (Pin).....	113
รูปที่ 5-14	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบ แกนหมุนได้ (Pin) บริเวณจุดรองรับ	113
รูปที่ 5-15	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 18mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบ แกนหมุนได้ (Pin) บริเวณจุดรองรับ	114
รูปที่ 5-16	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบ แกนหมุนได้ (Pin) บริเวณจุดรองรับ	114
รูปที่ 5-17	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบ แกนหมุนได้ (Pin) บริเวณจุดรองรับ	115
รูปที่ 5-18	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบ แกนยึดแน่น (Fixed) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ.....	118

รูปที่ 5-19	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 18mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบ แกนยึดแน่น (Fixed)บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ 118
รูปที่ 5-20	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบ แกนยึดแน่น (Fixed)บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ 119
รูปที่ 5-21	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบ แกนยึดแน่น (Fixed) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ..... 119
รูปที่ 5-22	ตัวอย่างการกระจายแรงรอบจุดรองรับของแต่ละแบบจำลอง Case 8 (Fixed)... 120
รูปที่ 5-23	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบ แกนยึดแน่น (Fixed) บริเวณจุดรองรับ..... 121
รูปที่ 5-24	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 18mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบ แกนยึดแน่น (Fixed) บริเวณจุดรองรับ..... 121
รูปที่ 5-25	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบ แกนยึดแน่น (Fixed) บริเวณจุดรองรับ..... 122
รูปที่ 5-26	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบ แกนยึดแน่น (Fixed) บริเวณจุดรองรับ..... 122

สารบัญตาราง

รายการ		หน้า
ตารางที่ 1-1	ลักษณะทางกายภาพของตัวยึดต่อกระจก 2 ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	15
ตารางที่ 2-1	เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่าง เหล็ก และ กระจก [1].....	28
ตารางที่ 2-2	มาตรฐานแรงลม(กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 , 2527) [4]	29
ตารางที่ 2-3	ตัวคูณปรับค่า Factor ตามชนิดของกระจก ASTM E1300 [1]	30
ตารางที่ 2-4	ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดของกระจก 3 ชนิด [11]	39
ตารางที่ 2-5	ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดของกระจกใสที่อุณหภูมิ 75 - 400 C° [11] ...	40
ตารางที่ 2-6	คุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของกระจกโพลตใส ที่ใช้สำหรับการทดสอบ [12].....	41
ตารางที่ 2-7	คุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของกระจกโพลตใส ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การทดสอบ [13] 43	
ตารางที่ 2-8	คุณสมบัติของการจกใสที่เลือกใช้ในการสร้างเครื่องมือใช้ออกแบบกระจก [15]....	48
ตารางที่ 3-1	เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของตัวยึดต่อกระจกที่ใช้ในการทดสอบ.....	53
ตารางที่ 5-1	สมบัติเชิงกลที่ใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์.....	95
ตารางที่ 5-2	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบจำลอง แสดงการกระจายแรงในแบบต่างๆ ของกระจก เจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่ (A)	98
ตารางที่ 5-3	ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm หนา 12 mm เจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin) CASE 7	100
ตารางที่ 5-4	ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm หนา 12 mm เจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่ (A) แบบแกนยึดแน่น (Fixed) CASE 8	101
ตารางที่ 5-5	ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm หนา 12 mm เจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกเล็ก (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin) CASE 9	102

ตารางที่ 5-6	ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm หนา 12 mm เจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกเล็ก (B) แบบแกนยึดแน่น (Fixed) CASE 10	103
ตารางที่ 5-7	ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm หนา 12 mm เจาะรูขนาด 18 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกเล็ก (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin) CASE 1	104
ตารางที่ 5-8	ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm หนา 12 mm เจาะรูขนาด 18 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกเล็ก (B) แบบแกนยึดแน่น (Fixed) CASE 2.....	105
ตารางที่ 5-9	ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x2400 mm หนา 12 mm เจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin) CASE 3.....	106
ตารางที่ 5-10	ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x2400 mm หนา 12 mm เจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่ (A) แบบแกนยึดแน่น (Fixed) CASE 4.....	107
ตารางที่ 5-11	ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ ในด้านความเค้น และการโก่งตัว เทียบกับการทดสอบในลักษณะแกนหมุนได้ (Pin).....	115
ตารางที่ 5-12	แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ ในด้านความเค้น และการโก่งตัว เทียบกับการทดสอบของ Model 3 ใน 4 ลักษณะย่อยในลักษณะแกนหมุนได้ (Pin)	116
ตารางที่ 5-13	ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ ในด้านความเค้น และการโก่งตัว เทียบกับการทดสอบในการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)	123
ตารางที่ 5-14	แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ เทียบกับการทดสอบ ในด้านความเค้น และการโก่งตัวของ Model 3 ใน 4 ลักษณะย่อยในลักษณะแกนยึดแน่น (Fixed).....	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย

กระจกเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมนำมาตกแต่งบ้าน และอาคาร ซึ่งสามารถพบเห็นในวงการก่อสร้างมาเป็นเวลานานแล้ว ทั้งในงานตกแต่ง งานเฟอร์นิเจอร์ รวมไปถึงส่วนประกอบของอาคาร เช่น ผนังกรอบอาคาร (façade) ผนังกระจก และหลังคากระจก เนื่องจากกระจกเป็นวัสดุที่มีความสวยงาม มีความเงา มองดูโล่ง โปร่งสบาย และสามารถรับแสงจากภายนอกเข้ามาสู่ตัวอาคารได้ดี ทำให้อาคารสว่างและไม่ดูมืดจนเกินไป อีกทั้งยังสะดวกต่อการดูแลรักษา เช่น สีไม่ซีดหรือจางลงเมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้น ไม่ต้องทาสีใหม่ ไม่ต้องอุดรอยแตกกร้าวเหมือนปูนหรือกระเบื้อง ไม่มีปัญหาเรื่องปลวก หรือเชื้อราต่างๆ เป็นต้น และไม่ติดไฟได้ง่ายเหมือนไม้ หรือผ้า รวมทั้งไม่เป็นสนิม และยังทนต่อรอยขีดข่วนได้เป็นอย่างดี

ด้วยเหตุนี้เองกระจกจึงเป็นที่นิยมของสถาปนิก ผู้ออกแบบ ที่จะนำกระจกมาใช้เป็นส่วนประกอบของอาคาร รวมไปถึงบางกรณี เจ้าของอาคาร ได้ระบุให้ใช้กระจกเป็นส่วนประกอบของอาคารเช่น โชว์รูม ห้าง ร้านต่างๆที่ต้องการ โชว์ สินค้า ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ให้ คนทั่วไปสามารถมองเห็นได้ แต่กระจกมีมูลค่าค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ จึงจำเป็นที่ผู้ออกแบบโครงสร้าง จะต้องคำนวณออกแบบ กระจก และส่วนประกอบงานติดตั้งกระจก ให้สามารถรองรับแรงต่างๆที่จะกระทำต่อกระจกได้ เช่น แรงลม แรงแผ่นดินไหว หรือแม้แต่น้ำหนักของตัวกระจกเอง แล้วถ่ายแรงดังกล่าวไปสู่โครงสร้างส่วนอื่นๆของอาคารได้อย่างปลอดภัย ต่อไป และยังคงจำเป็นต้องคำนึงถึงความประหยัดในการกำหนดใช้วัสดุกระจกในการออกแบบด้วย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาพฤติกรรม การรับแรงของกระจกโดยเฉพาะ กระจกเทมเปอร์ ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ (Tempered glass installed with Drilled type connector) ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1-1 ซึ่งหากอ้างอิงการออกแบบกระจกตาม มาตรฐาน ASTM E1300 [1] จะแนะนำเฉพาะ การออกแบบติดตั้งกระจก แบบจุดรองรับน้ำหนัก 1 ด้าน (One side-support) แบบจุดรองรับน้ำหนัก 2 ด้าน (Two side-supports) แบบจุดรองรับน้ำหนัก 3 ด้าน (Three side-supports) และแบบจุดรองรับน้ำหนัก 4 ด้าน (Four side-supports) ของกระจกชนิดต่างๆ ตามลำดับ แต่พบว่าในมาตรฐานดังกล่าวฯ ยังไม่มีแนะนำออกแบบติดตั้งกระจกด้วยตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ (Glass installed with drilled type connector) ไว้ในมาตรฐานดังกล่าวฯ จึงทำให้ผู้ต้องการออกแบบติดตั้งกระจกในลักษณะดังกล่าว ไม่มีข้อมูลที่เหมาะสมในการอ้างอิงสำหรับการออกแบบติดตั้งกระจกด้วยตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ (Glass installed with Drilled type connector) ได้



รูปที่ 1-1 ลักษณะทั่วไปของการติดตั้งกระจกด้วยตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ

จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรง ของกระจกเทมเปอร์ ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ (tempered glass installed with Drilled type connector) แบบใช้ตัวยึดต่อกระจกชนิด 4 จุดต่อแผ่น โดยทดสอบกับกระจกเทมเปอร์ หนา 12 mm ทำการเจาะรูกระจกและติดตั้งอุปกรณ์ตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะที่มีขายในท้องตลาด 2 ตัวอย่าง ที่มีลักษณะทางกายภาพต่างกันในส่วนของ ขนาดฐานรองรับกระจก และมีตำแหน่งศูนย์กลางของแกนหมุน เมื่อเทียบกับแนวกึ่งกลางแผ่นกระจกที่ต่างกัน โดยเลือกขนาดกระจกทดสอบให้มีขนาดใกล้เคียงกับกระจกที่สามารถใช้ในการติดตั้งในอาคารจริงทั่วไป 2 ขนาด คือ 1200x1200 mm และขนาด 1200x2400 mm ทำการบรรทุกน้ำหนักและวัดค่าการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจก พร้อมทั้งวัดความเครียด (Strain) ที่ผิวกระจก บริเวณจุดสำคัญๆ 2 จุดหลักคือ บริเวณรอบจุดรองรับ และจุดกึ่งกลางแผ่นกระจก ซึ่งคาดว่าจะเกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) สูงสุด จากแรงดัด และแรงเฉือน โดยศึกษาเปรียบเทียบ ความสามารถในการรับแรง การโก่งตัว และการกระจายแรงในแผ่นกระจกทดสอบ ใน 4 ลักษณะ คือ

1. เปรียบเทียบผลของลักษณะการติดตั้งตัวยึดจับกระจกที่ต่างกัน คือติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) และติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) ของแต่ละผลิตภัณฑ์
2. เปรียบเทียบผลของชนิดผลิตภัณฑ์ตัวยึดจับกระจกที่ต่างกัน 2 ผลิตภัณฑ์
3. เปรียบเทียบผลของขนาดรูเจาะกระจกที่ต่างกัน คือรูเจาะขนาดใกล้เคียงกับแกนเหล็กที่ร้อยผ่านกระจก (+2 mm) และรูเจาะที่มีขนาดใหญ่กว่าแกนเหล็กที่ร้อยผ่านกระจกมากๆ (+22 mm)
4. เปรียบเทียบผลของขนาดกระจกที่มีอัตราส่วนความกว้าง ต่อ ความยาวต่างกัน คือทดสอบกระจกขนาด 1200x1200 mm และ 1200x2400 mm

พร้อมทั้งนำข้อมูลจากการทดสอบกระจก มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยวิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) โดยการวิจัยนี้ ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

SAP2000 ในการสร้างแบบจำลอง โดยกำหนดรูปแบบ การสร้างแบบจำลอง ออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

แบบที่ 1 สร้างแบบจำลองโดยกำหนดให้กระจกเป็นแผ่นเต็ม ไม่เจาะรู

แบบที่ 2 แบบเส้นโลหะรองรับ บนกระจกเจาะรู

แบบที่ 3 แบบมีแผ่นเหล็กและยางรองรับใต้กระจกที่เจาะรู

และนำเสนอข้อมูลตัวแปรดังกล่าวแก่ผู้ที่สนใจนำข้อมูลเบื้องต้นไปใช้คำนวณออกแบบหาขนาดกระจกที่ต้องการติดตั้งได้อย่างประหยัด และปลอดภัยในระดับหนึ่ง หรือนำไปเป็นข้อมูลวิเคราะห์เปรียบเทียบ หรือนำไปพัฒนาสร้างแบบจำลองในรูปแบบอื่นๆ ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งกระจกด้วยตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ (Glass installed with drilled type connector) ต่อไป

และจากผลการทดสอบพบว่า กระจกทดสอบทั้งหมด ที่มีการติดตั้งตัวยึดต่อกระจกต่างกัน หรือลักษณะการติดตั้งที่ต่างกัน มีขนาดฐานรับกระจกของตัวยึดต่อกระจก ที่ต่างกัน มีความเครียดเกิดขึ้นที่กึ่งกลางด้านยาวกว่า ระหว่างจุดรองรับ (Middle span) ด้านขอบกระจก โดยจะเกิดความเครียดต่างกันไม่เกิน 10%-20% ตามลักษณะวิธีการติดตั้งตัวยึดต่อกระจก และพบว่าการติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่กว่า แบบแกนยึดแน่น (Fixed) จะสามารถรับแรงได้มากกว่ากรณีทดสอบอื่น และทั้งหมดมีแนวโน้มที่กระจกจะแตกเสียหายจากแรงคัตเป็นหลัก (จากการทดสอบจริงกระจกไม่แตกที่การบรรทุกน้ำหนักทดสอบสูงสุดสามารถทำได้) ยกเว้นในกรณีที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกที่มีตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแกนหมุน ห่างจากแนวกึ่งกลางแผ่นกระจกมากๆ การติดตั้งในลักษณะแบบแกนหมุนได้ (Pin) กลับสามารถรับแรงได้ดีกว่า การติดตั้งในลักษณะแกนยึดแน่น (Fixed)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของกระจกเทมเปอร์ ในด้านของความสามารถในการรับแรง การโก่งตัวเมื่อรับแรง และการกระจายตัวของแรงที่เกิดขึ้นในแผ่นกระจกทดสอบ ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ (Tempered Glass installed with drilled type connector) ที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน
2. สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างจริง เพื่อปรับค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้สอดคล้องเหมาะสมใกล้เคียง กับข้อมูลจากการทดสอบ เพื่อแนะนำแนวทางการคำนวณออกแบบเลือกใช้กระจก ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ (Glass

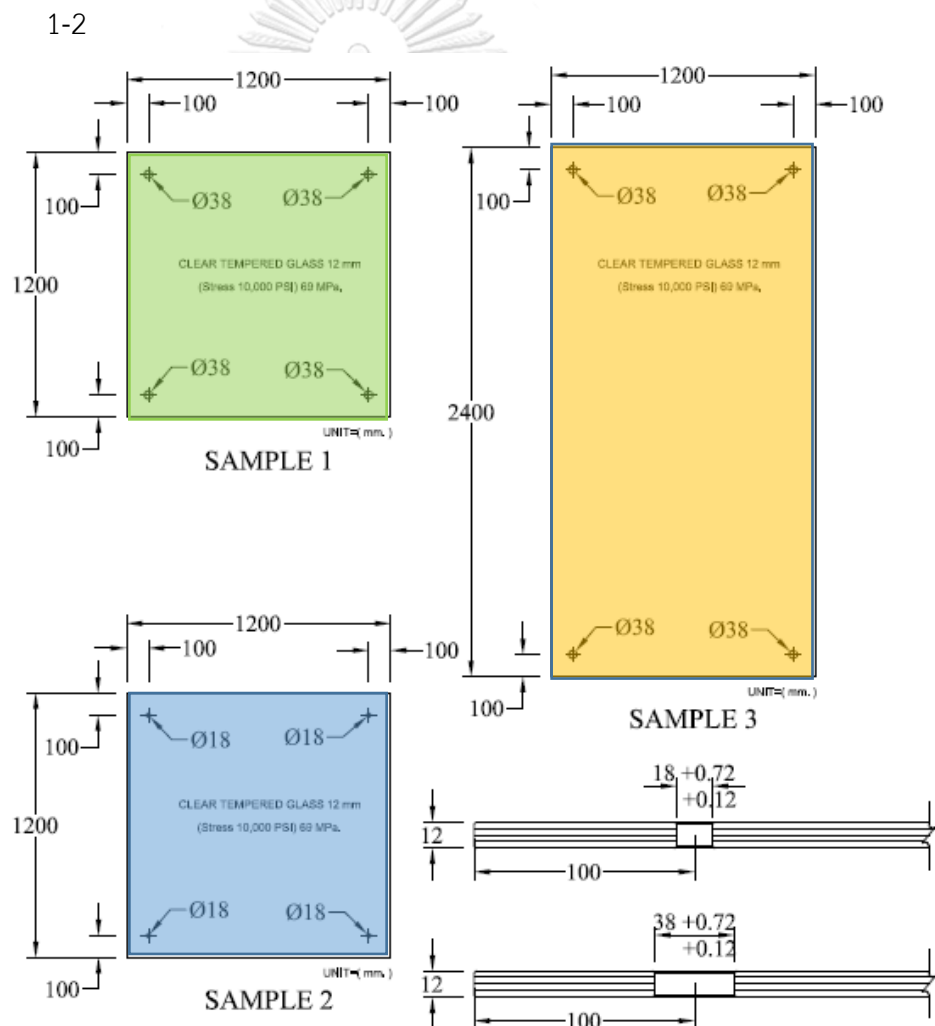
installed with drilled type connector) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้สามารถรับน้ำหนักได้อย่างประหยัด และปลอดภัยในการติดตั้งใช้งานกระจกในลักษณะดังกล่าวต่อไป

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตการวิจัยมีดังนี้

1.3.1 การทดสอบตัวอย่างกระจก

1. ทำการทดสอบเฉพาะกระจกเทมเปอร์ หนา 12 มม. จำนวน 3 ชั้นตามแสดงใน รูปที่

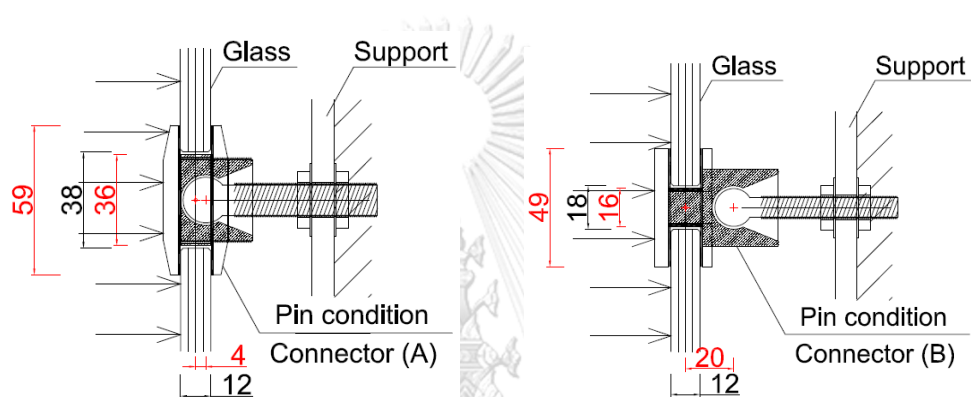


รูปที่ 1-2 ตำแหน่งและขนาดรูเจาะบนกระจกทดสอบ 3 ชั้น

2. ทำการทดสอบโดยติดตั้งตัวยึดต่อกระจก 2 ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะทางกายภาพต่างกันตามแสดงในตารางที่ 1-1 และ รูปที่ 1-3

ตารางที่ 1-1 ลักษณะทางกายภาพของตัวยึดต่อกระจก 2 ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดของตัวยึด จับกระจก	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก	เส้นผ่าน ศูนย์กลางภายใน	แกนเหล็กตัวยึด ต่อกระจก	ระยะจุดหมุนแกนยึดต่อ กระจก และแนวกึ่งกลาง แผ่นกระจก
ขนาดใหญ่ (A)	59 mm	36mm	30 mm	4 mm
ขนาดเล็ก (B)	49 mm	16 mm	13 mm	20 mm

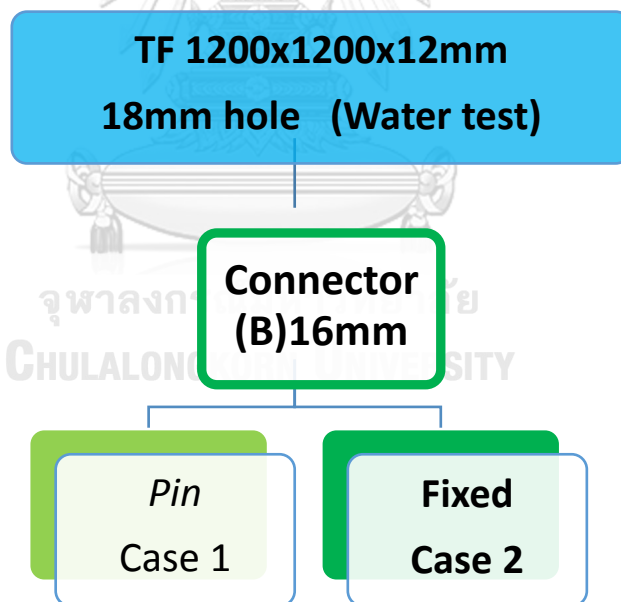
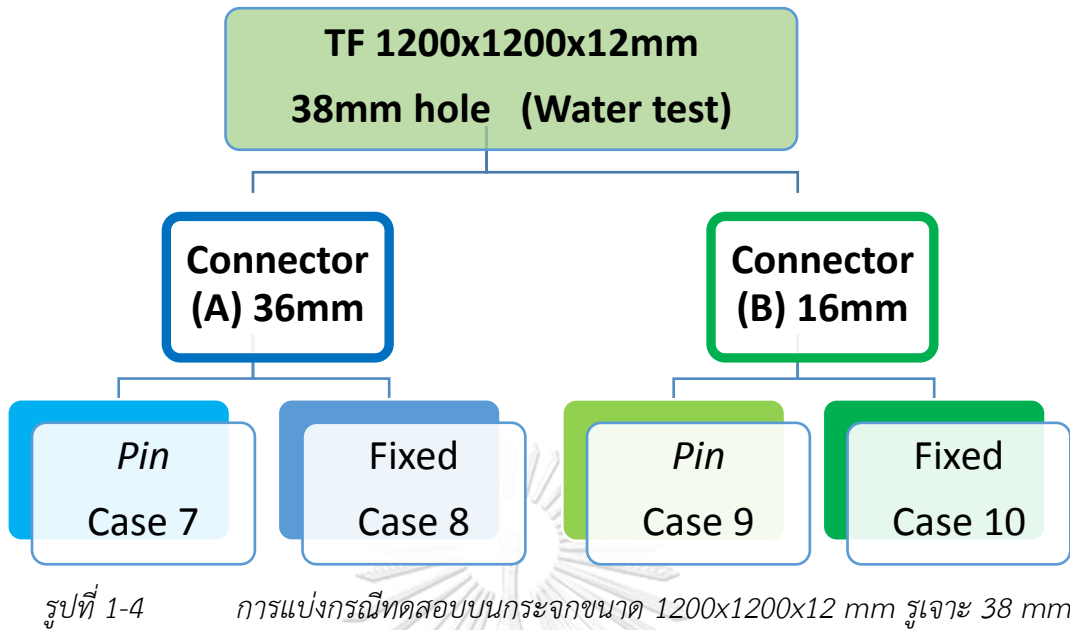


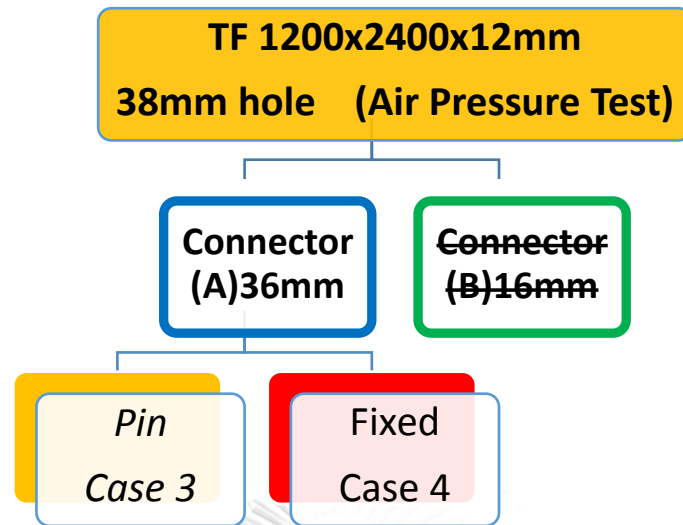
รูปที่ 1-3 รายละเอียดลักษณะตัวยึดต่อขนาดใหญ่ (A) และขนาดเล็ก (B)

3. ทำการทดสอบกระจกขนาด 1200x1200 mm เจาะรูขนาด 38 mm ทดสอบกับตัวยึดต่อกระจก 2 ผลิตภัณฑ์ (A, B) และติดตั้งในลักษณะ แกนหมุนได้ (Pin) และแกนยึดแน่น (Fixed) ตามแสดงใน รูปที่ 1-4

4. ทำการทดสอบกระจกขนาด 1200x1200 mm เจาะรูขนาด 18 mm ทดสอบกับตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) และติดตั้งในลักษณะ แกนหมุนได้ (Pin) และแกนยึดแน่น (Fixed) ตามแสดงในรูปที่ 1-5

5. ทำการทดสอบกระจกขนาด 1200x2400 mm เจาะรูขนาด 38 mm ทดสอบกับตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) และติดตั้งในลักษณะ แกนหมุนได้ (Pin) และแกนยึดแน่น (Fixed) ตามแสดงใน รูปที่ 1-6





รูปที่ 1-6 การแบ่งกรณีทดสอบบนกระจกขนาด 1200x2400x12 mm รูเจาะ 38 mm

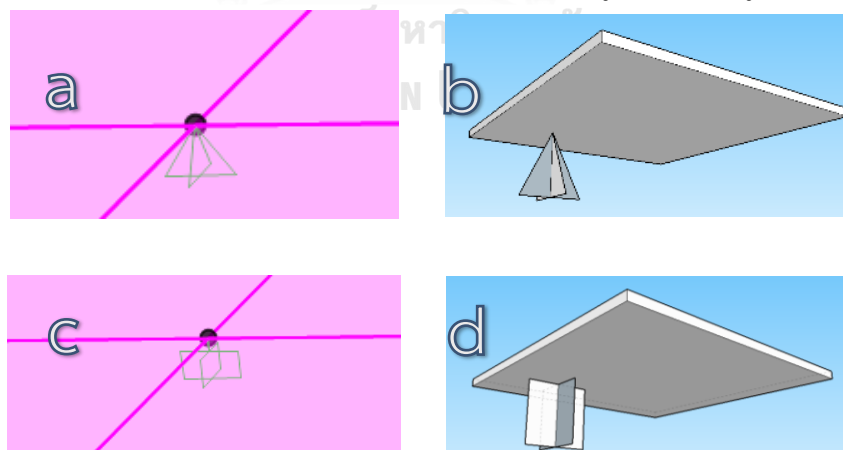
1.3.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบปรับค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้มีผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างจริง สร้างแบบจำลองโดยกำหนดรูปแบบ การสร้างแบบจำลอง ออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

แบบที่ 1 สร้างแบบจำลองโดยกำหนดให้กระจกเป็นแผ่นเต็ม ไม่เจาะรู ดังแสดงในรูปที่ 1-7

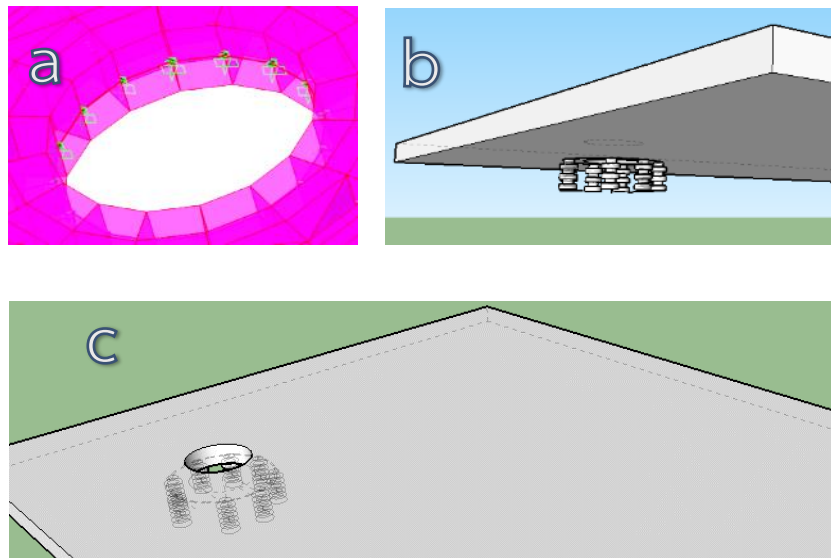
แบบที่ 2 แบบเส้นโลหะรองรับ บนกระจกเจาะรู ดังแสดงในรูปที่ 1-8

แบบที่ 3 แบบมีแผ่นเหล็กและยางรองรับใต้กระจกที่เจาะรู ดังแสดงในรูปที่ 1-9

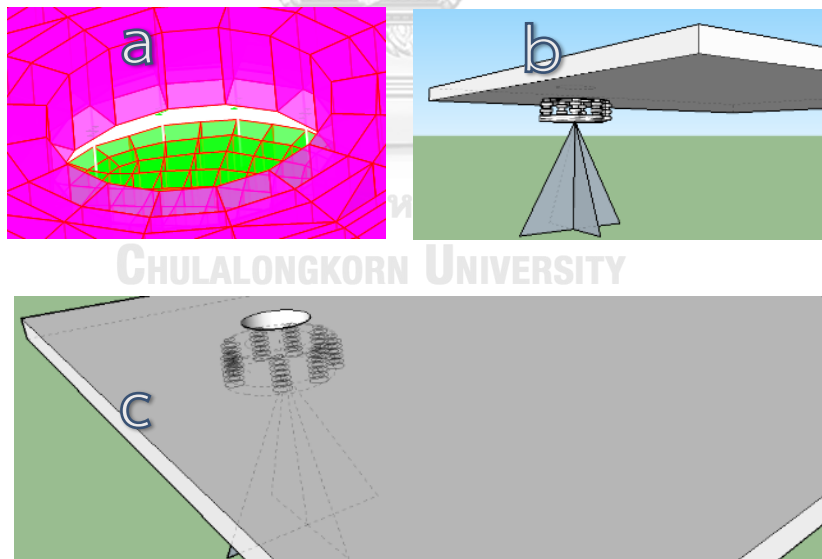


รูปที่ 1-7 แบบจำลองแบบที่ 1 กระจกเต็มไม่เจาะรู

(a) แบบจำลอง Pin ที่ปรากฏในโปรแกรม (b) รูปแบบ 3 มิติแสดงหลักการในการสร้างแบบจำลองแบบ Pin (c) แบบจำลอง Fixed ที่ปรากฏในโปรแกรม (d) รูปแบบ 3 มิติแสดงหลักการในการสร้างแบบจำลองแบบ Fixed



รูปที่ 1-8 แบบจำลองแบบที่ 2 กระจกเจาะรูรองรับด้วยเส้นโลหะ และสปริง
 (a) แบบจำลองที่ปรากฏในโปรแกรม (b), (c) รูปแบบ 3 มิติแสดงหลักการในการสร้างแบบจำลอง



รูปที่ 1-9 แบบจำลองแบบที่ 3 กระจกเจาะรูรองรับด้วยสปริง และแผ่นโลหะรองใต้สปริง
 (a) แบบจำลองที่ปรากฏในโปรแกรม (b), (c) รูปแบบ 3 มิติแสดงหลักการในการสร้างแบบจำลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้คาดว่าจะมีประโยชน์ดังต่อไปนี้

1. นำผลการทดสอบ ความสามารถในการรับแรง และการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจากการรับแรงของการทดสอบกระจกเทมเปอร์ หนา 12 mm ขนาด 1200x1200 mm และขนาด 1200x2400 mm ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกแบบรูเจาะ ไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ให้กับบุคคลทั่วไปที่เกี่ยวข้องในงานก่อสร้างงานติดตั้งกระจกในอาคารตั้งแต่ ผู้ลงทุน เจ้าของโครงการ สถาปนิก วิศวกร ผู้ควบคุมงาน ไปจนถึงผู้รับเหมาติดตั้งฯ ประกอบการเลือกใช้ขนาดกระจกที่เหมาะสม ในการติดตั้งกระจกในอาคารที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และอยู่ในช่วงขนาดกระจกทดสอบ ได้อย่างแข็งแรง ปลอดภัย ในอนาคต

2. สามารถเข้าใจพฤติกรรม ปัจจัยของขนาดฐานรองรับกระจก ลักษณะการติดตั้ง และตำแหน่งแกนหมุน ของตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ ที่มีผลต่อการรับน้ำหนัก และการโก่งตัว นำไปแก้ไขลักษณะด้อย และปรับปรุงลักษณะเด่นของตัวยึดต่อกระจกในอนาคต ให้สามารถเพิ่มความความสามารถในการรับแรงของกระจกได้ดีขึ้นปลอดภัยขึ้น เป็นการลดช่วยการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และพลังงานในการผลิต ทั้งกระจก และอุปกรณ์ยึดต่อ ลงอย่างยั่งยืนในอนาคต

3. นำข้อมูล ค่าตัวแปรต่างๆที่จะใช้ในการสร้างจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ครั้งนี้ สำหรับเป็นแนวทางการเลือกขนาดกระจกและประเมินความสามารถการรับแรงได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงได้ดีขึ้นโดยไม่ต้องทำการทดสอบ ซึ่งเป็นการประหยัด เวลา และค่าใช้จ่ายในการทดสอบ ช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างผนังกระจก

4. นำข้อมูล ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการสร้างจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงข้อผิดพลาด ในครั้งนี้ เป็นข้อมูลในการวิจัยพัฒนาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นในอนาคตต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดของกระจก

กระจกมีอยู่หลากหลายประเภท แต่ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และแบ่งตามวิธีการผลิต และความสามารถในการรับแรง แบ่งออกได้ 5 ประเภท คือ

กระจกโฟลตใส (Float glass) หรือ Anneal glass (AN)

กระจกอบร้อน หรือ กระจกกึ่งนิรภัย Heat strengthen (HS)

กระจกเทมเปอร์ Full temper glass (FT)

กระจกนิรภัยหลายชั้น Laminare glass (LG)

กระจกฉนวน Insulating glass (IG)

2.1.1 กระจกโฟลตใส (Float glass) หรือ Anneal glass (AN)

กระจกชนิดนี้เกิดจากการนำเอา ทราายแก้ว โซดาแอช หินปูน โซเดียมซิลเฟต หินฟีนมา แร่ โดโลไมต์ และเศษกระจก ที่เป็นวัตถุดิบหลัก ในการผลิตกระจก และหากต้องการผลิตกระจกสีก็ต้องเติม สารอื่นเข้าไป ซึ่งเป็นออกไซด์ของโลหะต่างๆ เช่น นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ โดยการนำวัตถุดิบดังกล่าว มาหลอมรวมกันที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียสในเตาหลอม ให้ละลายเข้าด้วยกันเป็นน้ำแก้ว เมื่ออุณหภูมิลดลง เหลือ 1100 องศา แล้วปล่อยให้ไหลลงสู่อ่างโลหะ (ดีบุกหลอมเหลว) ซึ่งมีคุณสมบัติหนักกว่าน้ำแก้ว น้ำแก้วจะลอยตัวอยู่บนโลหะหลอมเหลวซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำแก้ว จึงทำให้กระจกชนิดนี้ถูกเรียกว่า กระจกโฟลตใส (Float Glass) และเมื่อน้ำแก้วถูกดึงให้ไหลไปข้างหน้าภายใต้อุณหภูมิและภายใต้ความดันที่ได้มีการควบคุม ความหนักของโลหะหลอมเหลวรวมกับ ความหนักของน้ำแก้ว จะทำให้น้ำแก้วไหลไปเป็นสายเรียบ และมีความหนาสม่ำเสมอ ทั้ง 2 ด้านของ น้ำแก้ว ต่อจากนี้สายกระจกแผ่นจะค่อยๆ ถูกทำให้เย็นลงขณะที่ไหลมาทางปลายของอ่างโลหะและ เคลื่อนเข้าส่วนที่ลดอุณหภูมิ ขณะที่เคลื่อนตัวผ่านอ่างดีบุกเหลว และเมื่อกระจกแข็งตัวจะถูกนำไป ผ่านเตา annealing จึงถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Anneal glass ซึ่งจะทำให้กระจกเย็นตัวลงอย่างช้าๆ เพื่อขจัดความเครียดในเนื้อกระจก ในลำดับต่อไป และในขั้นตอนนี้ หากต้องการให้กระจกมีความ หนา เพิ่มขึ้น หรือลดลง ก็จะมีการ ยืดขยาย หรือ อัดตัวกระจกให้มีความหนาตามต้องการ ด้วย ลูกกลิ้งที่อยู่ด้านข้างทั้ง 2 ของรางสายส่งกระจก ให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ และกระจกจะผ่านไป ยังส่วนท้าย เป่าให้แห้ง และเข้าสู่เครื่องตัดให้ได้ตามขนาดที่ตลาดต้องการ

กระจกโฟลตใสปัจจุบันทางการค้า สามารถผลิตความหนาได้ตั้งแต่ 2 mm ถึง 19 mm ความกว้างผลิตได้กว้างถึง 144 นิ้ว ความยาวไม่จำกัด ทำได้ยาวตามความต้องการของตลาด

กระจกโพลติส เวลาแตกจะเป็นปากปลาฉลาม ซึ่งอันตราย แต่ที่รอยแตกจะวิ่งเข้าสู่กรอบ ทำให้ส่วนใหญ่ยังไม่หล่นลงมาโดยทันทีทันใด มองจากภายนอกไม่เป็นลอนดูเรียบสวยงาม

2.1.2 กระจกอบร้อน หรือกระจกกึ่งนิรภัย (Heat Strengthen (HS))

กระจกกึ่งนิรภัย Heat Strengthen จะนำกระจกโพลติส มาให้ความร้อน (แต่ไม่ถึงขนาด Tempered Glass) จึงมีความแข็งแรงมากขึ้น (ไม่เท่ากับ Tempered) ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดอ่อนตัวของกระจกเล็กน้อยที่ประมาณ $650^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$ และทำให้ผิวกระจกเย็นตัวอย่างช้าๆ เริ่มอ่อนตัว ก็จะลดอุณหภูมิเพื่อให้เย็นลงอย่างช้า ๆ จากกรรมวิธีการผลิตลักษณะนี้ส่งผลให้กระจกประเภทนี้สามารถรับแรงได้มากกว่ากระจกโพลติส ถึง 2-3 เท่า ในกระจกที่มีความหนาที่เท่ากัน ผิวของกระจกจะแข็งขึ้นประมาณ 10% ส่งผลให้ เมื่อ แตกจะมีลักษณะเป็นปากฉลามยึดติดอยู่กับกรอบ ไม่ร่วงหล่นเหมือนกระจกเทมเปอร์ (Tempered Safety Glass) การนำไปใช้งาน-เนื่องจากกระจกประเภทนี้มีความแข็งแรงที่มากกว่ากระจกธรรมดา ถึงแม้ว่าจะแข็งแรงน้อยกว่ากระจกเทมเปอร์ แต่จุดเด่นของกระจกประเภทนี้คือสามารถทนความร้อน ได้มากกว่า และเมื่อกระจกแตกจะไม่ร่วงหล่นเหมือนกระจกเทมเปอร์ (Tempered Safety Glass) จึงนิยมใช้ในการทำผนังภายนอก โดยเฉพาะในผนังกระจกระบบแขวน (Glass Curtain Wall) เวลาแตกจะแตกแบบ กระจกโพลติส

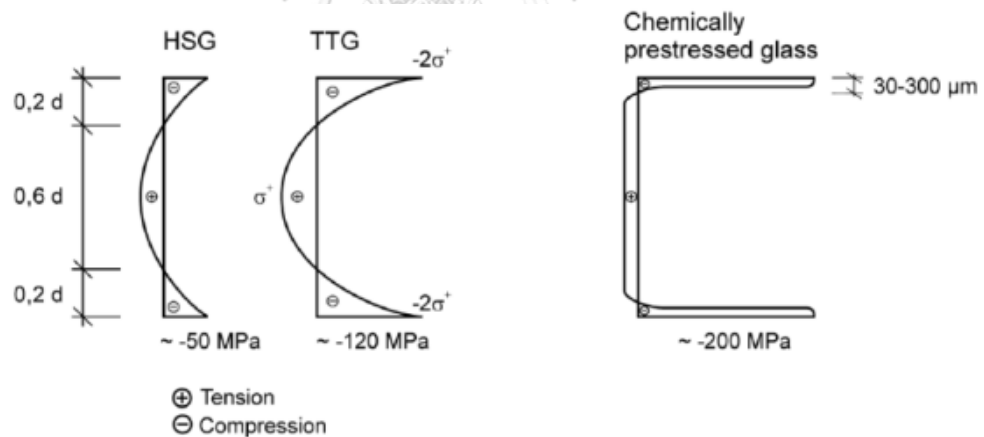
2.1.3 กระจกเทมเปอร์ (Full Tempered Glass (FT))

กระจก Tempered คือ การนำกระจกโพลติส มาทำให้ร้อนเกือบหลอมละลายใหม่ แล้วทำให้เย็น (กระบวนการทำเทมเปอร์) โดยการให้ความร้อนกับกระจก ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดอ่อนตัวของกระจกเล็กน้อยที่ประมาณ $650^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$ และทำให้ผิวกระจกเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยใช้หลักการเกี่ยวกับการทำคอนกรีตอัดแรง คือการสร้างให้เกิดชั้นของแรงอัดขึ้นที่ผิวกระจกเพื่อต้านแรงจากภายนอก โดยการใช้ลมเป่าให้เย็นที่กระจกทั้งสองด้าน ผลของความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวนอกกับส่วนกลางเนื้อในของแผ่นกระจก จะทำให้เกิดเป็นชั้นของแรงอัดขึ้นที่ผิวนอกของแผ่นกระจกทั้งสองด้าน โดยจะประกบขึ้นส่วนกลางเหมือนลักษณะแซนด์วิช ดังแสดงการกระจายกำลังในรูปที่ 2-1 และชั้นที่ผิวนี้จะช่วยต้านแรงจากภายนอก ทำให้เกิดแรงกระทำที่สมดุลกัน เวลาแตกจะแตกกระจายเป็นเม็ดเล็ก ๆ คล้ายเม็ดข้าวโพดและมีความคมน้อย ตามตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2-2 ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายมาก แต่จะไม่มีรอยแยกวิ่งเข้ากรอบ ทำให้เมื่อแตกแล้วจะร่วงหล่นลงมาทันที ดูจากภายนอกจะเป็นลอนเล็กน้อย จึงดูหลอกตา ในบางมุมมอง

กระจกเทมเปอร์ไม่สามารถนำมาเจาะ เจียร บาก หรือแปรสภาพได้อีก เพราะกระจกจะแตก แต่หากต้องการเจาะเจียรบากจะต้องดำเนินการให้เรียบร้อยก่อนขึ้นตอนการอบให้ความร้อน

กระจกเทมเปอร์ มีความทนทานของกระจกต่อแรงกระแทกที่วัตถุ หรือร่างกายกระแทกลงบนกระจก เนื่องจากการชน โดยทั่วไปกระจกเทมเปอร์ สามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่ากระจกโฟลตใส ที่ความหนาเดียวกันประมาณ 4 เท่า ในกระจกที่มีความหนาที่เท่ากัน และทนทานต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบฉับพลัน

แต่กระจกเทมเปอร์ มีปรากฏการณ์ที่กระจกแตกด้วยตัวเอง โดยที่ไม่มีแรงกระทำจากภายนอก ซึ่งโอกาสที่จะเกิดอยู่ที่ประมาณ 1-5 แผ่นในทุกๆ 1,000 แผ่น ซึ่งสาเหตุการแตกเองของกระจกเทมเปอร์ มีสาเหตุมาจากการปะปนของนิกเกิลซัลไฟด์ (Nickel Sulfide) ที่มีโอกาสปะปนอยู่ในเนื้อกระจกมาตั้งแต่กระบวนการหลอมกระจกโฟลตใส เป็นแผ่น นิกเกิลซัลไฟด์นี้จะมาในรูปแบบของเม็ดจุดปะปนในเนื้อกระจก ซึ่งมีขนาดเล็กมาก โดยนิกเกิลซัลไฟด์มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าซิลิกา (Si) จึงไม่หลอมละลายในขั้นตอนการหลอมกระจก และจะฝังตัวปะปนอยู่ในเนื้อกระจก และขยายตัวเมื่อโดนความร้อน และมีการสะสมตัวของอุณหภูมิภายในกระจกมากขึ้น ก็จะขยายตัวและดันกระจกให้แตกจากภายในกระจกได้เอง ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเฉพาะกรณีกระจกเทมเปอร์ เนื่องจากกระจกเทมเปอร์จะมีค่าความเครียดที่ผิวที่สูงมาก ระหว่างขบวนการให้ความร้อน และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ในการผลิตกระจกเทมเปอร์ ซึ่งหากเป็นกระจกโฟลตใส หรือกระจกกึ่งนิรภัย (HG) การขยายตัวของนิกเกิลซัลไฟด์นี้จะไม่สามารถทำให้กระจกแตกได้



รูปที่ 2-1 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าความเครียดที่ผิวระหว่างกระจก Heat Strength Glass (HG) , Full Temper Glass (FT) และ Chemically pre stressed glass [2]



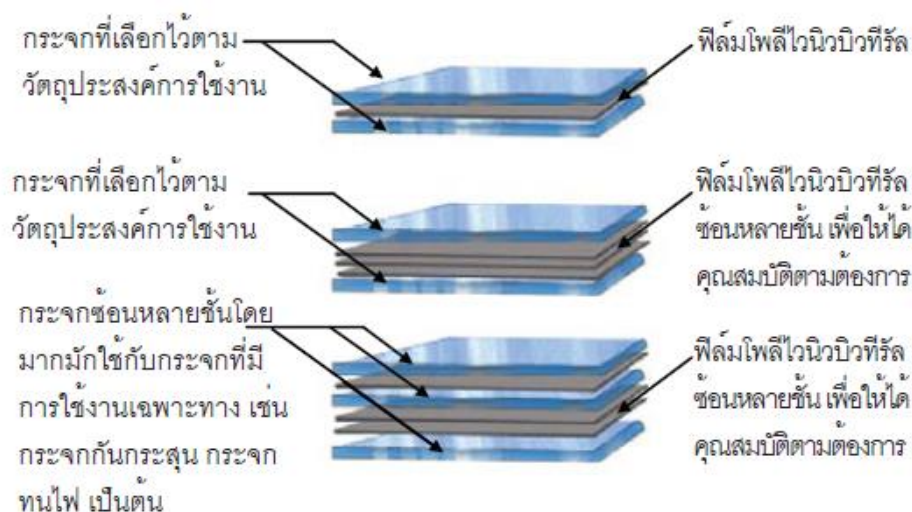
รูปที่ 2-2 ลักษณะการแตกเป็นเม็ดข้าวโพด ของกระจกเทมเปอร์ [3]

2.1.4 กระจกนิรภัยหลายชั้น Laminated Glass (LG)

กระจกนิรภัยหลายชั้น Laminated คือการเอากระจกประเภทต่างๆ เช่นกระจกโฟลตใส กระจกอบความร้อน Heat Strengthen (HS) หรือ กระจกเทมเปอร์ Full Temper Glass (FT) ตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไปติดกัน มารีด ประกบด้วยแผ่นฟิล์ม (PVB, EVA, SG) แล้วอบให้ความร้อนเพื่อให้ฟิล์ม ยึดติดกับกระจก [3] ตามตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2-3 และอบอีกครั้งในเตาอบ ที่ควบคุมอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมเพื่อไล่อากาศออกจนหมดอีกครั้ง เพื่อจุดประสงค์ในการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงมากขึ้น และตอบสนองการใช้งานในด้านความปลอดภัยในที่สูงเวลากระจกแตกแผ่นฟิล์มจะทำหน้าที่ยึดติด ไม่ให้ร่วงหล่นลงมาได้ และหากใช้กระจกเทมเปอร์ ทำเป็นกระจกลามิเนต เราเรียกว่า "กระจกเทมเปอร์ลามิเนต" ซึ่งกระจกเทมเปอร์ลามิเนตนี้ เป็นกระจกที่เวลาแตกก็จะจับตัวกันอยู่เป็นเม็ดข้าวโพด ไม่ร่วงหล่นลงมา กระจกชนิดนี้นิยมใช้กับอาคารสูง เพื่อความปลอดภัยในเวลาที่เกิดอุบัติเหตุ

การนำไปใช้งานเมื่อพิจารณากระบวนการผลิตที่กล่าวแล้วข้างต้น กระจกนิรภัยหลายชั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้งานที่ต้องการความปลอดภัยเป็นพิเศษ เช่น ผนังภายนอกอาคารที่เป็นอาคารสูง ราวกันตก ตู้ปลาขนาดใหญ่ เป็นต้น เนื่องจากเมื่อกระจกแตกจะไม่ร่วงหล่นอันอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้อาคารที่อยู่ด้านล่าง อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้งานในการออกแบบเชิงประหยัด

พลังงานได้ดีอีกด้วย เนื่องจากในการออกแบบสามารถเลือกชนิดของกระจกที่จะนำมาประกอบกัน เพื่อให้ได้คุณสมบัติในการลดความร้อนจากภายนอกอาคารที่จะเข้าสู่ภายในอาคารได้ตามต้องการ นอกจากนี้ฟิล์มโพลีไวนิลบิวทีรัล (PVB) บางชนิดยังมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ช่วยลดความร้อน และ กระจกลามิเนต ยังมีคุณสมบัติในด้านการป้องกันเสียง อีกทางหนึ่งด้วย



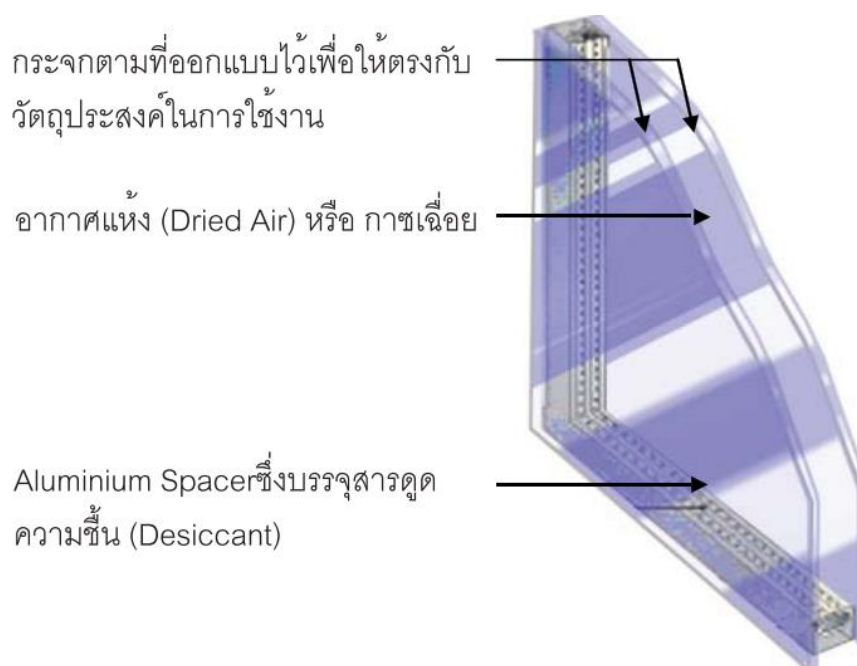
รูปที่ 2-3 ตัวอย่างของกระจกนิรภัยหลายชั้น (Laminated Safety Glass) รูปแบบต่างๆ [3]

2.1.5 กระจกฉนวน (Insulating glass (IG))

กระจกฉนวน (Insulation Glass) คือกระจกที่ ประกอบด้วยกระจกตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไป ตามตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2-4 มาประกบกัน โดยมีอลูมิเนียมสปะเซอร์ (Aluminium Spacer) ซึ่งบรรจุสารดูดความชื้น (Desiccant) แล้วใส่ฉนวน เช่น อากาศแห้ง (Dried Air) หรือ ก๊าซเฉื่อย ไว้ภายใน เพื่อให้มีคุณสมบัติในการเก็บรักษาอุณหภูมิภายในได้ดีมาก (สามารถสะท้อนความร้อนได้ประมาณ 95%-98%) ซึ่งแผ่นกระจกที่จะนำมาซ้อนกันได้สามารถเลือกชนิดของกระจกเพื่อให้เกิดคุณสมบัติที่ต้องการ ดังนั้นในการติดตั้งจึงควรพิจารณาการติดตั้งให้ถูกต้องตามชนิดของกระจกที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกันความร้อนสูงสุด และจากคุณสมบัติที่กล่าวข้างต้นแล้วว่ากระจกชนิดนี้มีจุดเด่นที่การบรรจุอากาศแห้ง หรือก๊าซเฉื่อยไว้ภายใน ดังนั้นกระจกประเภทนี้จึงไม่สามารถปรับแต่งรูปทรงกระจกในภายหลังได้ซึ่งกระจกชนิดนี้ที่นิยมใช้งานจะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. กระจกฮีตมิเรอร์ (Heat Mirror Glass) เป็นกระจกที่ประกอบด้วยกระจกตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไป โดยกระจกที่จะอยู่ด้านนอกของอาคารจะเคลือบสารที่ทำให้เกิดสภาพการแผ่รังสีที่ต่ำ มาประกบกัน โดยมีช่องว่างซึ่งบรรจุอากาศแห้งอยู่ระหว่างแผ่นกระจกส่งผลให้มีคุณสมบัติเป็นฉนวน ช่วยรักษาอุณหภูมิภายใน ซึ่งกระจกประเภทนี้จะสามารถสะท้อนความร้อนได้ 80% และสามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ประมาณ 95%-98%

2. กระจกฮีตสตอป (Heat Stop Glass) เป็นกระจกที่มีลักษณะเหมือนกระจกฮีตมิเรอร์ แต่จะแตกต่างที่มีก๊าซอาร์กอน ซึ่งบรรจุในช่องว่างแทน ส่งผลให้สามารถสะท้อนความร้อนออกไปจากกระจกได้มากกว่ากระจกฮีตมิเรอร์การนำไปใช้งานกระจกประเภทนี้จะมุ่งเน้นการใช้งานไปในแนวทางการประหยัดพลังงานภายในอาคารและการใช้งานสำหรับอาคารเฉพาะทาง เนื่องจากมีคุณสมบัติคือการยอมให้แสงผ่านเข้ามาภายในอาคารมาก แต่ความร้อนที่จะผ่านกระจกเข้ามาน้อยมากจึงมักนิยมใช้สำหรับอาคารที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา เช่น พิพิธภัณฑ์ อาคารเก็บอาหาร ห้องเก็บไวน์ เป็นต้น



รูปที่ 2-4 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนประกอบของกระจกฉนวน (Insulation Glass) [3]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

นอกจากนี้ยังกระจกสำหรับการใช้งานเฉพาะทาง อื่นๆ ที่การดัดแปลงเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะอย่าง หรือเพื่อก่อให้เกิดความสวยงาม โดยการผลิตกระจกประเภทนี้จะเป็นการรวมเอากระจกและวิธีการต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้แล้วมาผสม หรือดัดแปลงเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ผู้ใช้งานต้อง เช่น กระจกทนไฟ กระจกเสริมลวด (Wired Glass) ,กระจกลาย (Pattern Glass) หรือ กระจกกันกระสุน [3] เป็นต้น

2.2 ระบบผนังอาคาร วัสดุกระจก

ปัจจุบันการก่อสร้างผนังอาคารที่ทำจากวัสดุกระจกเป็นกรอบอาคารถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่มระบบใหญ่ คือ ระบบผนังกระจก (Curtain wall) และ ระบบโครงสร้างผนังกระจก (Structural glass wall)

2.2.1 ระบบผนังกระจก Curtain wall

ระบบผนังกระจก Curtain wall เป็นระบบผนังที่ต้องอาศัยแขวนเข้ากับโครงสร้างของอาคาร ซึ่งส่วนใหญ่มักจะแขวนเข้ากับ หน้าคาน หรือ ฝั้วหน้าของแผ่นพื้นในแต่ละชั้น Curtain wall นั้นมักจะถูกใช้ในอาคารที่มีผนังต่อเนื่องขึ้นไปหลายๆชั้น ซึ่งไม่ได้ออกแบบให้รับน้ำหนักในแนวตั้ง ระบบผนังเปลือกนอกโดยทั่วไปจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ดังนี้

ระบบโครงกรอบ (Framing System),

แผ่นลูกฟัก (Infill Panel),

ระบบรอยต่อ (Joint System) และ

กระจก (Glazed)

2.2.2 ระบบโครงสร้างผนังกระจก (Structural glass wall / Spider wall)

ระบบโครงสร้างผนังกระจก (Structural glass wall) หรือที่มักเรียกกันสั้น ๆ ว่า Glass wall คือระบบที่ประกอบด้วยระบบกระจกและระบบโครงสร้างที่เปิดเผย ซึ่งระบบโครงสร้างนี้ทำหน้าที่ด้านความแข็งแรงให้ทั้งกระจกและโครงสร้างทนต่อแรงต่าง ๆ ให้สมดุลอยู่ได้ ต่างจาก Curtain wall ซึ่งเป็นระบบผนังที่ต้องอาศัยแขวนเข้ากับโครงสร้างของอาคารแบบชั้นต่อชั้น ส่วนระบบโครงสร้างผนังกระจกมักใช้ในส่วนโถงเปิดโล่งของด้านหน้าของอาคารในหลาย ๆ ที่ มักมีการแสดงศักยภาพกันที่ความสูงต่อเนื่องโดยไม่ต้องมีคานโครงสร้างตามแนวนอนให้เกะกะสายตา และระบบโครงสร้างนั่นเองก็มักถูกออกแบบให้เป็นเครื่องประดับที่เปิดเผยอย่างหนึ่งของอาคาร

ลักษณะที่โดดเด่นอีกประการของระบบ Glass wall ก็คือภาพรวมที่ความโปร่งใสของแผงกระจก อันเกิดจากการที่ระบบโครงสร้างของระบบ Glass wall อยู่ถอยออกไปจากแนวระนาบของ Glass wall ต่างจาก Curtain wall ที่ต้องมีเฟรมอลูมิเนียมปะติดอยู่ด้านหลังให้เกะกะสายตาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และระบบโครงสร้างของระบบ Glass wall นี้สามารถออกแบบให้มีรูปแบบที่หลากหลาย Glass wall บางระบบถูกคิดออกมาเพื่อทำให้แผงกระจกดูโปร่งและมีสิ่งอื่นประกอบอยู่ด้วยน้อยที่สุด (High level of transparency) นี่ก็เป็นการแสดงศักยภาพอีกแบบหนึ่งของการออกแบบ Glass wall

รูปแบบอุปกรณ์ fitting จะส่งผลถึงลักษณะรูปร่างด้านของงานนั้น ๆ อุปกรณ์ที่ใช้ยึดจับกระจกในระบบ Glass wall คือ แขน spider และตัวยึดต่อกระจก , glass bolt หรือ rotule หรือ Point fixing ดังแสดงใน รูปที่ 2-5 ซึ่งมีใช้กันมากจนหลายคนอาจเรียกระบบ Glass wall ว่างานกระจก Spider แต่ที่จริงแล้วยังมีอุปกรณ์ fitting รูปแบบอื่นให้เลือกใช้อีกเช่น ตัวหนีบกระจก (Glass clamp) ซึ่งก็มีทั้งแบบหนีบที่มุมกระจก และหนีบที่ขอบของกระจก บางงานอาจมีการใช้อุปกรณ์ต่างชนิดผสมกันได้

คุณสมบัติที่ดีเยี่ยมอีกประการของ Glass wall ก็คือ คุณสมบัติเรื่องการกันน้ำ เนื่องจากรอยต่อกระจกแต่ละแผ่นของระบบโครงสร้างผนังกระจก มักจะเป็นซิลิโคนยึดยุทธระหว่างช่องว่างของกระจกแต่ละแผ่น ซึ่งซิลิโคนเป็นวัสดุที่บดตัน 100 เปอร์เซ็นต์ การเชื่อมต่อแบบนี้เป็นรูปแบบที่เรียบง่ายและมองเห็นได้โปร่งโดยตลอดแนว หากมีการยึดยุทธซิลิโคนครบถ้วนก็จะมีปัญหาเรื่องการรั่วซึมของน้ำ หรือหากมีการยึดยุทธซิลิโคนขาดตก ก็จะเกิดการรั่วที่เห็นจุดกำเนิดได้อย่างชัดเจน สามารถแก้ไขได้ง่าย แตกต่างจากงานกระจกเฟรมอลูมิเนียมหากมีการรั่วซึมของน้ำ เราจะหาจุดเริ่มต้นของการรั่วได้ยาก เพราะมีรอยต่อที่ถูกปิดบังโดยเฟรมอลูมิเนียม การซ่อมแซมเรื่องการรั่วของน้ำจึงทำได้ลำบาก



รูปที่ 2-5

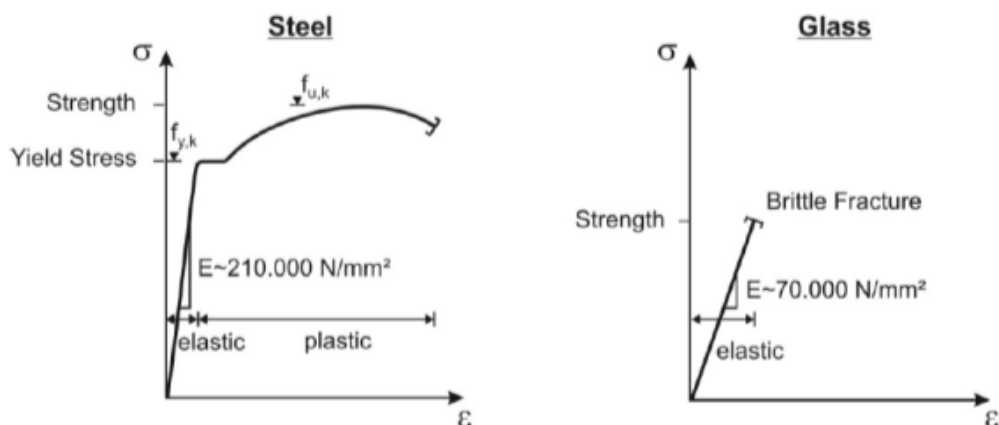
การติดตั้งอุปกรณ์ยึดต่อกระจกแบบบูรณาการ

ประเภทของระบบโครงสร้างผนังกระจก สามารถแบ่งตามวัสดุโครงสร้างได้ 4 ประเภท

- 1 โครงสร้างเหล็ก (Steel structure system)
- 2 โครงสร้างเหล็กรับแรงดึง (Tension rod system)
- 3 โครงสร้างเคเบิลซิง (Cable net system)
- 4 โครงสร้างสันกระจก (Glass rib system)

2.3 คุณสมบัติของกระจก

กระจกมีคุณสมบัติ เป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น (Perfectly linear) เป็นเส้นตรง จนกระทั่งแตก กระจกเป็นวัสดุเปราะ โดยคุณสมบัติดังกล่าว สามารถอธิบายได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดและ ความเค้น ตามกฎของฮุก (Hooke's law) เปรียบเทียบระหว่าง เหล็ก และกระจก ดังแสดงใน รูปที่ 2-6 และ ตารางที่ 2-1



รูปที่ 2-6 กราฟเปรียบเทียบความเครียด และความเค้น ของเหล็ก และกระจก [2]

ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่าง เหล็ก และ กระจก [1]

รายการ	เหล็ก	กระจก
โมดูลัสความยืดหยุ่น (E)	210,000 N/mm ²	71,700 N/mm ²
อัตราส่วนของปัวซอง (μ)	0.27 – 0.30	0.22
ความหนาแน่น (ρ)	7,850 kg/m ³	2,500 kg/m ³
Strength (σ)	Yield strength 240 MPa (Mild steel)	Surface strength ~20 MPa (AN) ~36.5 MPa (HG) ~73 MPa (FT)

จากการศึกษาคุณสมบัติจากการคำนวณทางฟิสิกส์ พบว่ากระจกจะมีกำลังรับแรงดึงสูงถึง 5000-8000 MPa แต่เนื่องจากคุณสมบัติ แตกเปราะง่าย และไม่ยืดหยุ่นของกระจก จึงทำให้กำลังรับแรงดัด ของกระจกโพลติส ลดลงเหลืออยู่ที่ประมาณ 30-80 MPa [2] โดยมีการสันนิษฐาน ปัจจัยหลักที่ทำให้กำลังของกระจกลดลง 5 ประการ คือ

1. ขนาดของรอยแตกเริ่มต้น (Flaw)
2. ด้านของกระจกที่รับแรงดัด (Tin side – Gas side)
3. ขนาดของกระจกใช้งาน (glass panel size)
4. ระยะเวลาที่แรงกระทำบนผิวกระจก (Load duration) และระยะเวลาการใช้งาน (Service life)
5. การสัมผัสน้ำ และความชื้นในอากาศ, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

2.4 มาตรฐาน และข้อกำหนด ในปัจจุบัน

2.4.1 มาตรฐานแรงลม [4]

กฎกระทรวงฉบับที่ 6 พ.ศ. 2527 ออกตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ในข้อที่ 17 ได้กำหนดให้การคำนวณออกแบบโครงสร้าง (รวมไปถึงผนังกระจก ที่ต้องรับแรงลม) ให้คำนึงถึงแรงลม และหากไม่มีเอกสารที่รับรองโดยสถาบันที่เชื่อถือได้ ให้ใช้หน่วยแรง(น้ำหนักกระทำ) ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 มาตรฐานแรงลม(กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 , 2527) [4]

ความสูงของอาคาร หรือส่วนอาคาร	หน่วยแรงลมอย่างน้อย (kPa)
ส่วนของอาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	0.5
ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	0.8
ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.2
ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 40 เมตร	1.6

2.4.2 มาตรฐาน ASTM E1300 [1]

มาตรฐาน ASTM E1300 เป็นมาตรฐานสำหรับ หลักการออกแบบ คำนวณหาแรงต้านทานของกระจกสำหรับอาคาร (Determining Load Resistance of Glass in Building) สำหรับรับแรงลม น้ำหนักหิมะ น้ำหนักของกระจกเอง และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ การติดตั้งกระจก ในแนวตั้ง และแนวเฉียง(Slope) ในอาคาร ,ราวกันตก, ผนังกันตก ,พื้นกระจก , ตู้ปลาขนาดใหญ่ (Aquariums) ,ชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งมาตรฐาน ASTM E1300 ได้ครอบคลุมขอบเขต ดังนี้

ชนิดกระจก

กระจกโฟลตใส Float Glass /Anneal glass (AN)

กระจกอบร้อน หรือ กระจกกึ่งนิรภัย Heat Strengthen (HS)

กระจกเต็มเปอร์ Full Temper Glass (FT)

กระจกนิรภัยหลายชั้น Laminated Glass (LG)

กระจกฉนวน Insulating Glass (IG)

ลักษณะการติดตั้งกระจก

One side support (Cantilever)

Two side support (Simply beam)

Three side support

Four side support (Slab support)

และ ASTM E1300 ได้กำหนดให้ปรับค่าตัวคูณเพิ่ม-ลด (Factor) ต่างๆ สำหรับกระจกชนิดต่างๆ และที่มีระยะเวลาที่แรงกระทำต่อกระจกเป็นเวลาต่างๆกัน ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ตัวคูณปรับค่า Factor ตามชนิดของกระจก ASTM E1300 [1]

Glass Type	Short Duration Load	Long Duration Load
AN	1.0	0.5
HS	2.0	1.3
FT	4.0	3.0

ASTM E1300 ยังได้แนะนำน้ำหนักสูงสุดที่กระจกโพลตใส, กระจกนิรภัยหลายชั้น สามารถต้านทานได้ ที่มีความหนากระจก ขนาดกระจกต่างๆ ตามลักษณะการติดตั้งกระจก ซึ่งค่าที่ได้จากตาราง ตัวอย่างรูปที่ 2-7 ให้นำไปคูณกับ Factor ระยะเวลาที่แรงกระทำ, คูณกับ Factor ชนิดของกระจกที่ใช้ติดตั้ง ตัวอย่างตารางการหาน้ำหนักสูงสุด สำหรับแรงกระทำต่อกระจกไม่เกิน 3 วินาทีของกระจกโพลตใส หนา 6.0 mm ขนาด กว้าง 1.20 m ยาว 1.50 m จะสามารถรับน้ำหนักได้ไม่เกิน 2.5 kPa. (รูปที่ 2-7 ตารางประกอบ) และสามารถหาค่ากำลังต้านทานสูงสุด ของกระจกในรูปแบบอื่นๆได้จากตารางในเอกสารมาตรฐาน ASTM E1300 เพิ่มเติม

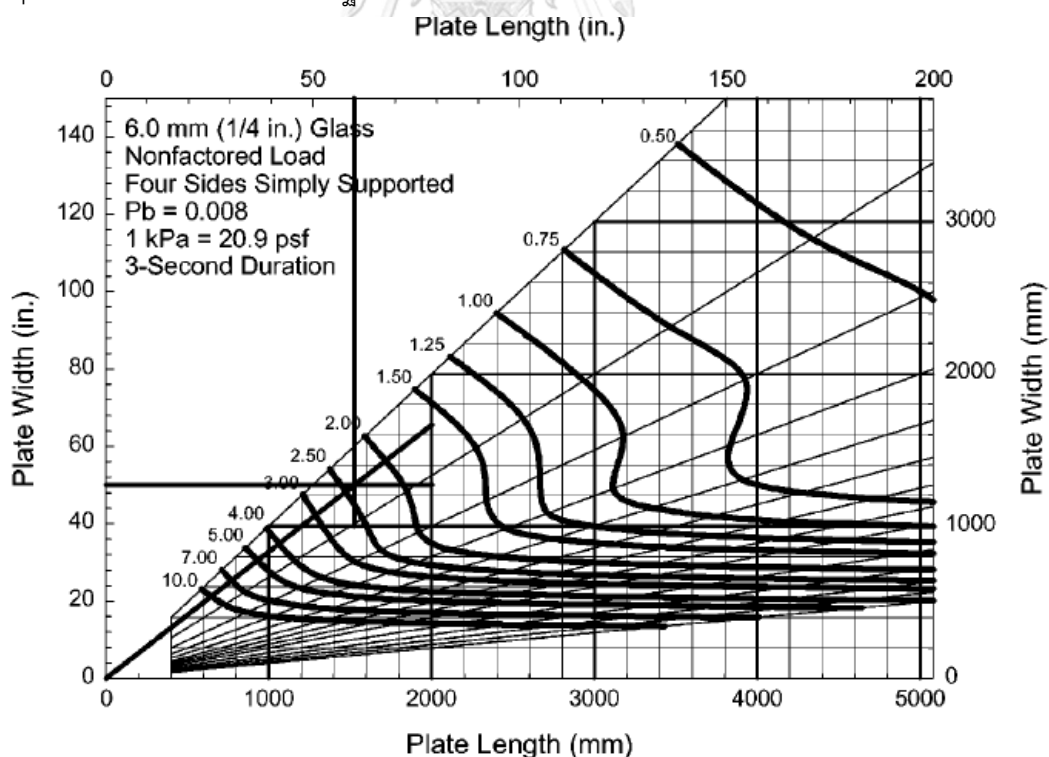


FIG. A2.2 Nonfactored Load Chart for 6.0 mm (1/4 in.) Glass

รูปที่ 2-7 ตัวอย่างกราฟแสดงการหาค่ากำลังรับน้ำหนัก ของกระจกโพลตใส หนา 6.0 mm ที่ติดตั้งแบบรับน้ำหนัก 4 ด้านโดยมีความยาว 1500 mm ความกว้าง 1200 mm [1]

แต่จากตารางกำหนดค่ากำลังต้านทานสูงสุดที่กระจก แต่ละชนิด แต่ละความหนาจะสามารถต้านทานได้ ในมาตรฐาน ASTM E1300 ได้กล่าวไว้เฉพาะ กระจกที่มีลักษณะการติดตั้ง 4 แบบ คือ One side support (Cantilever), Two side support (Simply beam), Three side support, Four side support (Slab support) แต่ไม่ได้แนะนำการออกแบบกำลังต้านทานสูงสุด ของการติดตั้งกระจกที่ใช้ตัวยึดต่อกระจกแบบรูเจาะ ไว้ในมาตรฐานดังกล่าว ซึ่งติดตั้งด้วยวิธีดังกล่าวกำลังเป็นที่นิยม ในปัจจุบัน

2.4.3 Guidance for European Structural Design of Glass Components [2]

สหภาพยุโรป ได้จัดทำหนังสือสรุปแนะนำการออกแบบโครงสร้างกระจก ในปี 2014 กล่าวถึงการติดตั้งการกระจกแบบ Point fixed glazing โดยมีวิธีการยึดกระจกแบบต่างๆ (Clamping system)

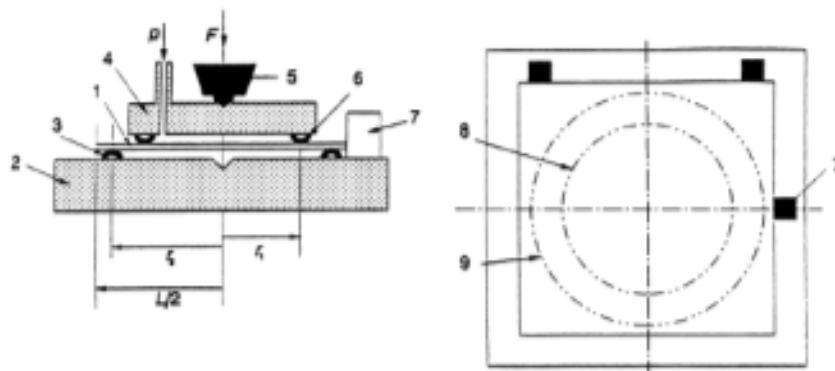
โดยทั้งหมดมุ่งความสนใจไปที่ กำลังของกระจกกรอบของอุปกรณ์จับยึดจำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบโดยละเอียด และได้แนะนำว่า Euro code ควรคำนึงถึงการออกแบบติดตั้งกระจกระบบ Point fixed glazing และให้ ตรวจสอบ กำลังรอบๆ จุดจับยึด โดยต้องได้รับการประเมินด้วยวิธีที่เหมาะสม เช่น ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือวิธีการอื่นที่เทียบเท่า ในการยืนยันความถูกต้องของกำลังต้านทานต้านกระจกที่มีการติดตั้ง แบบ Point fixed glazing

2.4.4 มาตรฐานการทดสอบกระจก EN 1288 [5]

มาตรฐาน EN 1288 สำหรับทดสอบหากล้างรับแรงดัดของกระจก

1. EN 1288-2: Coaxial double ring test on flat specimens with large surface areas

วิธีการทดสอบนี้ใช้ได้เฉพาะกระจก flat glass เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องความคลาดเคลื่อนของความหนากระจกที่จะทดสอบ ซึ่งตัวอย่างรูปแบบการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-8

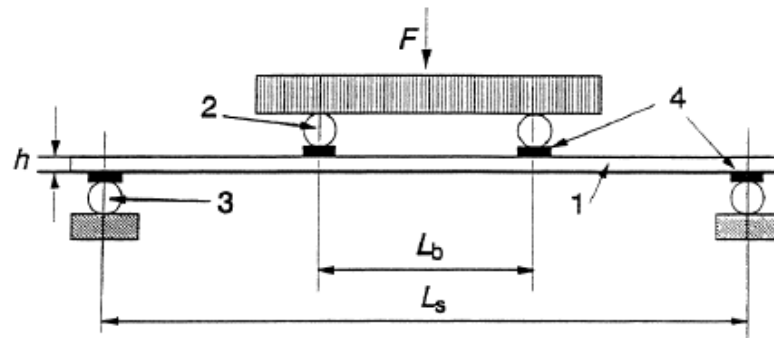


รูปที่ 2-8

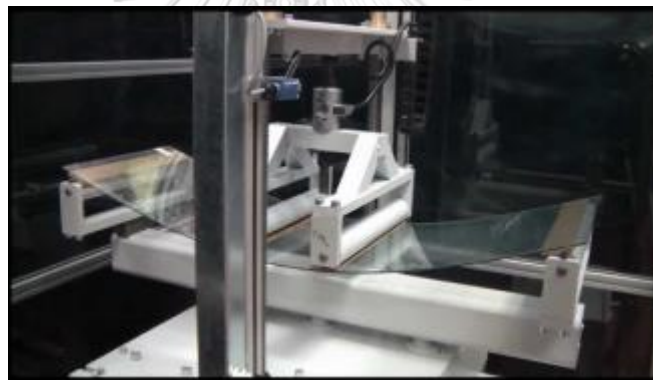
รายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบกระจกตามมาตรฐาน EN1288-2 [5]

2. EN 1288-3: Test with specimen supported at two points (four point bending)

ซึ่งเป็นการทดสอบกระຈกแบบ 2 จุดรองรับ และ 2 จุดที่ให้น้ำหนักกระทำต่อกระຈกทดสอบ ดังตัวอย่างรูปแบบการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-9 และรูปที่ 2-10



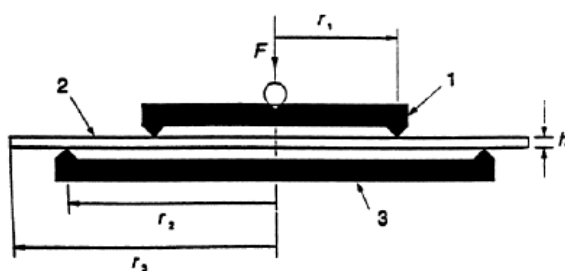
รูปที่ 2-9 รายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบกระຈกตามมาตรฐาน EN1288-3 [5]
 $L_b = 200 \text{ mm}$, $L_s = 1000 \text{ mm}$



รูปที่ 2-10 ตัวอย่างการทดสอบกระຈกตามมาตรฐาน EN1288-3 [6]

3. EN 1288-5: Coaxial double ring test on flat specimens with small test surface areas

สำหรับใช้ทดสอบกับกระຈกเรียบขึ้นเล็ก ซึ่งตัวอย่างรูปแบบการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 รายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบกระຈกตามมาตรฐาน EN1288-5 [2, 7]

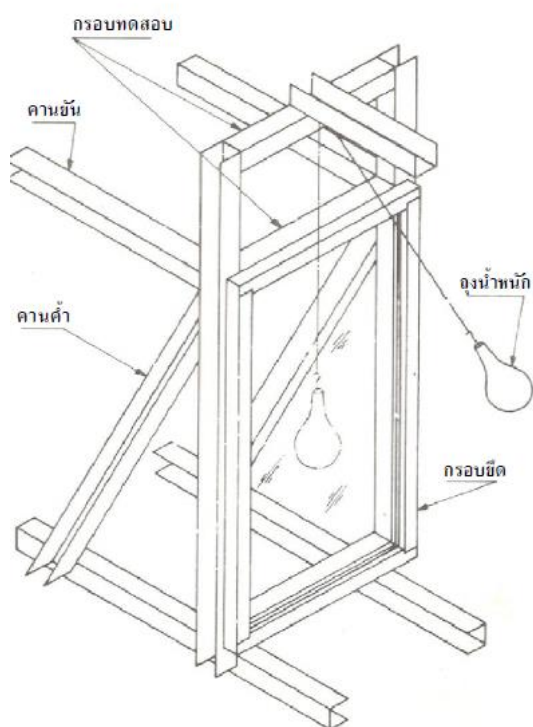
2.4.5 มาตรฐาน มอก 965-2560 (กระจก เทมเปอร์) [8]

มาตรฐาน มอก 965-2560 ได้กล่าวถึงการทดสอบกระจกเทมเปอร์ ในด้านต่างๆดังนี้

- การตรวจสอบขนาด
- การตรวจสอบรอยเส้น และรอยคลื่น
- การตรวจสอบความโค้ง
- การทดสอบกระจกแตกเนื่องจากการกระแทกจากถุงน้ำหนัก อ้างอิงตามมาตรฐาน EN

12600 ตามแสดงในรูปที่ 2-12

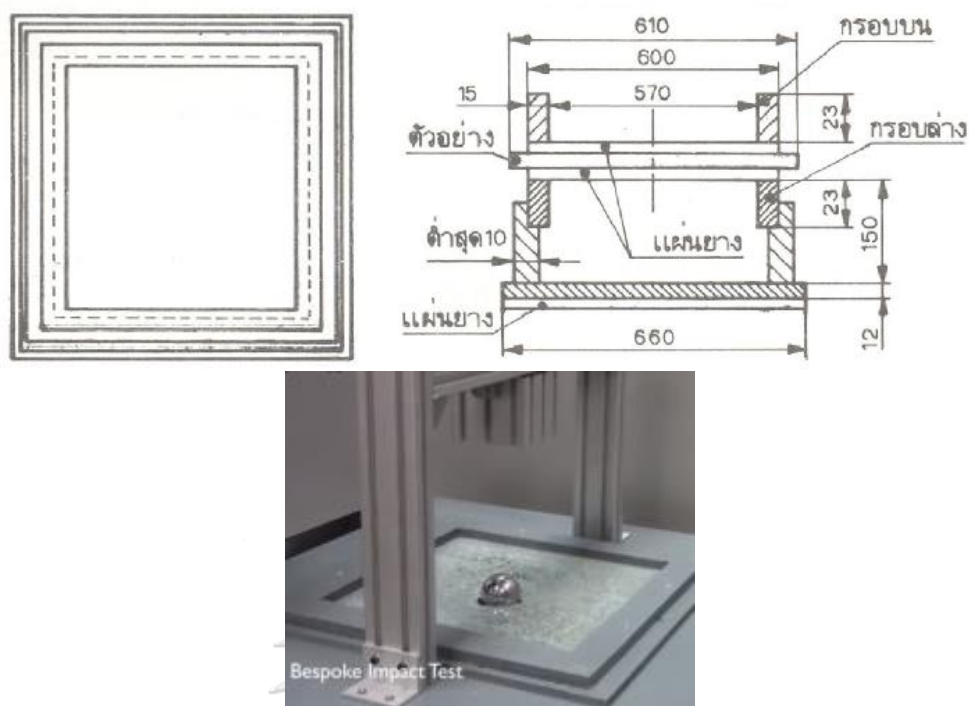
โดยการยกลูกตุ้มหนัก (ภายในบรรจุด้วยเม็ดตะกั่วน้ำหนักรวม 4,500 g \pm 100g) ที่แขวนบนลวดเหล็กขึ้น ตามความสูงที่กำหนดในมาตรฐาน และปล่อยลูกตุ้มให้เหวี่ยงลงมาอย่างอิสระ ตูผลว่ากระจกจะแตกหรือไม่ เปรียบเทียบตามข้อกำหนด แล้วชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนใหญ่ที่สุด 10 ชิ้น



รูปที่ 2-12 รายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบกระจกแตกเนื่องจากแรงกระแทก ตามมาตรฐาน มอก 965-2560 (EN 12600) [2, 8, 9]

- การทดสอบความทนแรงกระแทก

โดยใช้ลูกเหล็กน้ำหนัก 1040 g ปล่อยตกอิสระสูง 1.00 ม และเพิ่มความสูงขึ้นทุก 0.50 ม จนกว่ากระจกจะแตก แล้วชั่งน้ำหนักกระจกชิ้นใหญ่ที่สุด ที่แตก ตามแสดงในรูปที่ 2-13



รูปที่ 2-13 รายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบกระจุกชนการกระแทก ตามมาตรฐาน มอก 965-2560 [6, 8]

2.5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือที่เรียกย่อๆว่า FEM คือเทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาค่าตอบโดยการหาค่าที่จุดต่อ (node) และประมาณค่าระหว่างจุดต่อโดยใช้สมการพหุนาม (Polynomial) อันดับต่างๆในการช่วยหาค่าตอบ ระเบียบวิธีนี้มีพื้นฐานมาจากการกำจัดสมการเชิงอนุพันธ์อย่างสมบูรณ์ (สำหรับปัญหาที่อยู่ในสถานะคงที่) หรือการปรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ให้กลายเป็นระบบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญซึ่งเป็นปริพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยการใช้เทคนิคมาตรฐานทางคณิตศาสตร์ เริ่มจากการนำวัตถุ หรือระบบใหญ่ มาแบ่งวัตถุออกเป็นชิ้นส่วนย่อย และทำการคำนวณประมาณค่าต่างๆในชิ้นส่วนย่อยดังกล่าว และนำค่าของชิ้นส่วนย่อยที่ได้ นั้น นำกลับมารวมกัน เพื่อให้ได้คำตอบ วัตถุ หรือระบบใหญ่ เช่นการคำนวณพื้นที่ของ วงกลม โดยการแบ่งชิ้นส่วนของวงกลมออกเป็น 10 ส่วน และใช้การหาพื้นที่ของ สามเหลี่ยม ในการหาขนาดพื้นที่ของชิ้นส่วนย่อยของวงกลมแต่ละชิ้นที่แบ่งไว้ 10 ชิ้น แทนการหาพื้นที่ส่วนของวงกลม ซึ่งจะได้คำตอบที่ใกล้เคียงแต่ไม่ตรง มีความคลาดเคลื่อนของคำตอบโดยสามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนของคำตอบโดยประมาณนี้ สามารถทำได้ 2 วิธีหลักๆ คือ 1) แบ่งชิ้นส่วนย่อย (Number) ให้มากขึ้นเท่าไร ความคลาดเคลื่อน จะน้อยลงตามไปด้วย และ 2) กำหนดจำนวนจุดต่อที่มีอันดับ (Order) ประมาณค่าในแต่ละด้านของชิ้นส่วนย่อยให้เพิ่มขึ้น ความคลาดเคลื่อนก็จะน้อยลง เช่น กำหนดให้เป็น เอลิเมนต์อันดับหนึ่ง (Linear), เอลิเมนต์อันดับสอง(Quadratic), เอลิเมนต์อันดับสาม (Cubic)

และ เอลิเมนต์อันดับสี่ (Quartic) จะมีสมการทั่วไปเพื่อหาคำตอบเป็น $f(x)_1 = a_1 + a_2 \cdot x$, $f(x)_2 = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot x^2$, $f(x)_3 = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot x^2 + a_4 \cdot x^3$ และ $f(x)_4 = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot x^2 + a_4 \cdot x^3 + a_5 \cdot x^4$ ตามลำดับเป็นต้น และกำหนดให้ u มีค่าประมาณ $u = N_1 \hat{u}_1 + N_2 \hat{u}_2 + N_3 \hat{u}_3 + \dots + N_n \hat{u}_n$ ตามจำนวนจุดต่อ node ใน element ที่ใช้กำหนดในการคำนวณ

การแบ่งชิ้นส่วนย่อยโดยมีการแบ่ง 3 แบบ คือ (1) 1 มิติ (2) 2 มิติ และ (3) 3 มิติ โดยวัตถุ 1 มิติ หมายถึงการแบ่งส่วนวัตถุที่มีความแปรผัน ใน 1 ทิศทางเช่น การดึง เชือกให้ยืดออก และหาระยะที่เชือกยืดออก หรือการให้ความร้อนที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งเหล็กให้แผ่ไปยังปลายอีกด้านหนึ่งของแท่งเหล็ก โดยจะแบ่งมีหน้าตัดเท่ากัน คำนวณแรงต่างๆที่ต้องการในชิ้นส่วนย่อย และนำค่าของชิ้นส่วนย่อยนั้นมารวมกัน ตามคุณสมบัติและความสัมพันธ์ของวัสดุ เช่น กฎของฮุก (HOOK'S LAW) และค่าที่คำนวณได้ที่จุดต่อของแต่ละชิ้นส่วนย่อยของวัตถุนั้นๆ มาคำนวณหาความสัมพันธ์กับชิ้นส่วนย่อยอื่นๆ และประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต ลงสู่ระบบสมการใหญ่ของระบบ เพื่อให้ได้คำตอบของวัตถุ และแสดงตัวอย่างจุดต่อเชื่อมชิ้นส่วนต่างๆในรูปแบบ 1 มิติ ในรูปที่ 2-14

การแบ่งชิ้นส่วนย่อยของวัตถุ 2 มิติ หมายถึงการแบ่งส่วนวัตถุที่มีความแปรผัน ใน 2 ทิศทางเช่น การดึง แผ่นเหล็กให้ยืดออก 1 หรือ 2 ทิศทาง และหาระยะที่แผ่นเหล็กยืดออก หรือการให้ความร้อนที่มุมด้านหนึ่งของแผ่นเหล็กให้แผ่ไปยังจุดอื่นๆของแผ่นเหล็ก โดยการแบ่งชิ้นส่วน สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ

1) แบบสามเหลี่ยม (Triangular) เช่น เอลิเมนต์อันดับหนึ่ง (Linear) 3-node Triangular, เอลิเมนต์อันดับสอง (Quadratic) 6-node Triangular

2) แบบ สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Quadrilaterals) เช่น เอลิเมนต์อันดับหนึ่ง (Linear) 4-node Quadrilaterals, เอลิเมนต์อันดับสอง (Quadratic) 8-node Quadrilaterals

ดังแสดงตัวอย่างจุดต่อเชื่อมชิ้นส่วนต่างๆในรูปแบบ 2 มิติ ในรูปที่ 2-14 และตัวอย่างความสัมพันธ์ของวัสดุที่สามารถใช้กับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรง กับการเปลี่ยนรูป โดยความสัมพันธ์ของ 2 มิติจะมีสมมุติฐาน 2 แบบ คือ

1) Plane Stress (แรงกระทำ 2 ทิศทาง, $\sigma_3=0$) ได้แก่ แรงกระทำกับแผ่นเหล็กบาง

2) Plane strain (การเคลื่อนที่ 2 ทิศทาง, $U_3=0$) ได้แก่ แรงกระทำที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในผนังอุโมงค์ใต้ดิน โดยวัสดุที่มีลักษณะ Isotropic linear elastic mater จะมีสมการ ดังนี้

$$[F] = [K] \cdot [U] \quad (2.5.1)$$

โดยที่ stiffness $[K]$ จะมีรูปแบบสมการทั่วไปเป็น

$$[K] = \int_V [B^T] [D] [B] dV \quad (2.5.2)$$

และหากใช้ระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการคำนวณจะได้รูปแบบสมการดังนี้

$$[K] = t A [B]^T [D] [B] \quad (2.5.3)$$

โดยที่ t = ความหนาของวัสดุ

A = พื้นที่ของวัสดุ

$$[B] = [\varepsilon][\hat{u}]^{-1} \quad (2.5.4)$$

โดยที่ $[\hat{u}]$ = การเคลื่อนที่ ที่จุดต่อ (node) ของ element ย่อย m

$$[D] = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \text{ สำหรับ Plane stress} \quad (2.5.5)$$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & 0 \\ \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \text{ สำหรับ Plane strain} \quad (2.5.6)$$

การแบ่งชิ้นส่วนย่อยของวัตถุ 3 มิติ หมายถึงการแบ่งส่วนวัตถุที่มีความแปรผัน ใน 3 ทิศทาง เช่นการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของ แผ่นพื้น คสล. กำแพงกันดิน หรือ คาน-เสา เพื่อหาหน่วยแรงภายใน ณ ตำแหน่งต่างๆภายในชิ้นส่วนตามที่ต้องการ โดยการแบ่งชิ้นส่วน สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ

- 1) แบบ สามเหลี่ยม Tetrahedrals เช่น เอลิเมนต์อันดับหนึ่ง (Linear) 4-node Tetrahedrals , เอลิเมนต์อันดับสอง (Quadratic) 10-node Tetrahedrals
- 2) แบบ สี่เหลี่ยม Quadrilaterals , Brick เช่น เอลิเมนต์อันดับหนึ่ง (Linear) 8-node Brick , เอลิเมนต์อันดับสอง (Quadratic) 20-node Brick

และแสดงตัวอย่างจุดต่อเชื่อมชิ้นส่วนต่างๆในรูปแบบ 3 มิติ ในรูปที่ 2-14 โดยวัสดุที่มีลักษณะ Isotropic linear elastic mater จะมีสมการทั่วไป $[K]$ ในพิกัดธรรมชาติเป็น

$$[K] = \iiint_{-1}^1 [B]^t [D] [B] [J] d\xi d\eta d\zeta \quad (2.5.7)$$

และหากใช้ระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการคำนวณจะได้รูปแบบสมการของ Stiffness ดังนี้

$$[K] = \sum_j \sum_k \sum_l W_j W_k W_l [B_m(\xi, \eta, \zeta)]^T [D] [B_m(\xi, \eta, \zeta)] [J(\xi, \eta, \zeta)] \quad (2.5.8)$$

โดยที่ W = weight at Gauss point

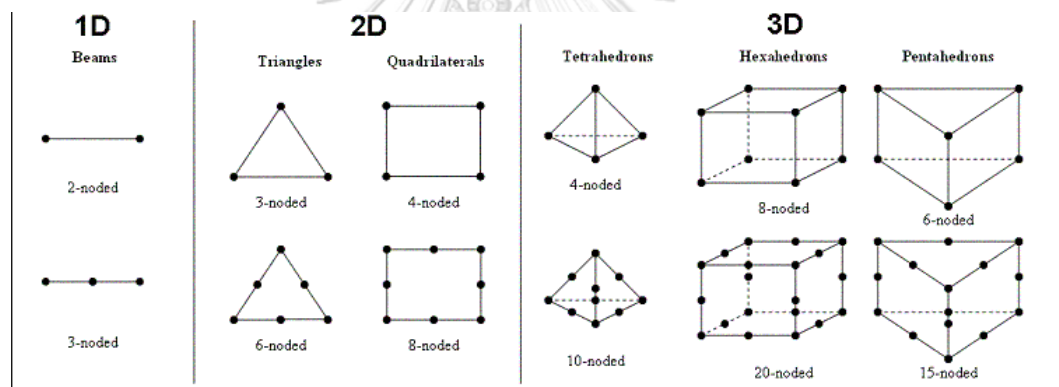
[J] = Jacobean Matrix

$$[B] = [\epsilon][\hat{u}]^{-1} \tag{2.5.9}$$

โดยที่ $[\hat{u}]$ = การเคลื่อนที่ ที่จุดต่อ (node) ของ element ย่อย m

$$[D] = \begin{bmatrix} (1-\nu)c & \nu c & \nu c & & & \\ \nu c & (1-\nu)c & \nu c & & & \\ \nu c & \nu c & (1-\nu)c & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & G & \\ & & & & & G \\ & & & & & & G \end{bmatrix} \tag{2.5.10}$$

ν = Poisson's ratio, $c = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$



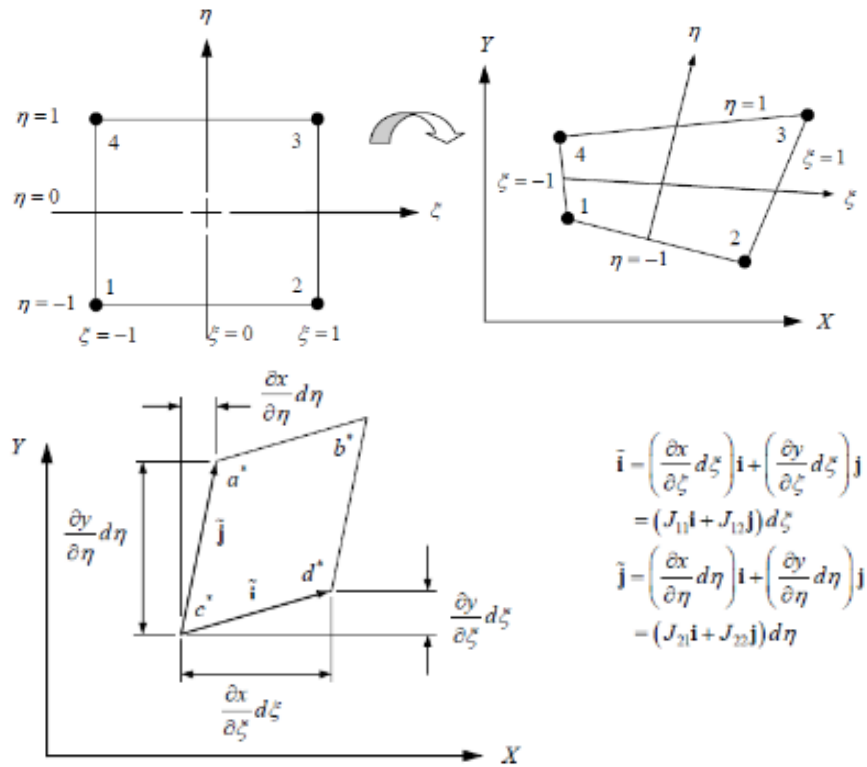
รูปที่ 2-14

รูปแบบชิ้นส่วนย่อยที่มีอันดับของจุดต่อ แบบต่างๆแบบ 1 มิติ , 2 มิติ และ 3 มิติ

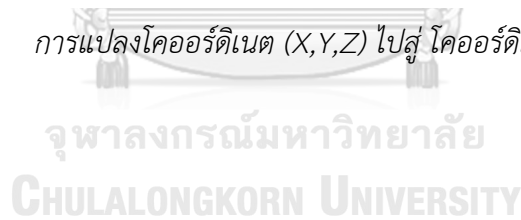
CHULALONGKORN UNIVERSITY [10]

แต่ในความเป็นจริงการแบ่งชิ้นส่วนย่อย เพื่อให้มีขนาดใกล้เคียงกับ วัตถุจริงมากที่สุด จึงอาจมีด้านที่มีระยะไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้การคำนวณจะซับซ้อนมาก จึงได้มีการเสนอแนวทางปรับรูปด้านที่ไม่เท่ากันนั้นให้มีขนาดเท่ากันโดยเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า หรือ สี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณในคอมพิวเตอร์ โดยการหาค่าความสัมพันธ์ของ โคออร์ดิเนต คาร์ทีเซียน (X,Y,Z) และ โคออร์ดิเนต ธรรมชาติ (ξ, η, ζ) โดยใช้ Jacobian Matrix ในการแปรค่าความสัมพันธ์ดังกล่าว ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2-15 ร่วมกับการใช้ วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขในการคำนวณค่าต่างๆ ของ สมการที่ต้องการทราบ แทนการอินทิเกรตตรง ซึ่งในบางกรณีสมการ การอินทิเกรตตรง อาจจะไม่สามารถดำเนินการหาค่าได้ โดยวิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลข ที่เป็นที่นิยมให้กันทั่วไปได้แก่ วิธี Gauss-

Legendre intergration ซึ่ง มีการถ่วงน้ำหนัก (weight) ของจุดที่ใช้คำนวณค่าของฟังก์ชัน y เรียกว่าจุดเกาส์ (Gauss point location) โดยมีลิมิตตั้งแต่ -1 ถึง +1 ในระบบโคออร์ดิเนตธรรมชาติ (ξ, η, ζ) ดังแสดงในรูปที่ 2-15



รูปที่ 2-15 การแปลงโคออร์ดิเนต (X, Y, Z) ไปสู่ โคออร์ดิเนต ธรรมชาติ (ξ, η, ζ)



2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การวิจัย ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรม และคุณสมบัติเชิงกล ของกระจก

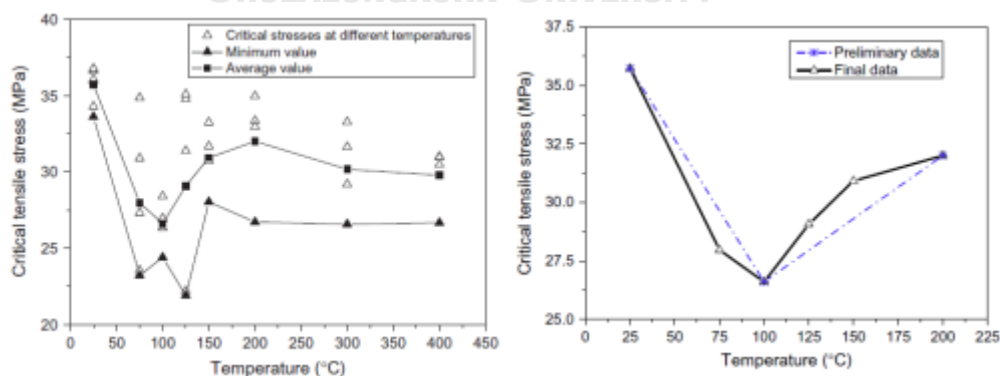
Yu Wang และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อหน่วยแรงต้านทานการแตกของกระจก 3 ชนิด คือ 1) กระจกใส 2) กระจกเคลือบ และ 3) กระจกฝ้า ที่อุณหภูมิห้อง หน่วยแรงดึงสูงสุด เฉลี่ยของ กระจกใส กระจกเคลือบ และกระจกฝ้ามีกำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยที่ 36 MPa , 33 MPa และ 31 MPa ตามลำดับ ซึ่งจากการวิจัยพบว่า กระจกใส มีค่าหน่วยแรงดึงสูง กว่า กระจกเคลือบ และกระจกฝ้า 8.5% และ 15.3% ตามลำดับ โดยกำลังของกระจกทั้ง 3 ชนิด แสดงผลทดสอบในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดของกระจก 3 ชนิด [11]

Type of Sample	Critical Breaking Stress (MPa)							Min (MPa)	Average (MPa)
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7		
Clear	36.75	33.61	34.30	36.61	35.96	36.76	36.07	33.61	35.72
Coated	32.36	33.59	-	31.59	32.81	-	34.20	31.59	32.91
Ground	-	31.30	29.58	33.89	28.76	-	31.42	28.76	30.99

หลังจากทดสอบกำลังรับแรงดึงของกระจกทั้ง 3 ชนิดแล้ว ได้นำเอากระจกโพลติใส มาทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ กันช่วง ตั้งแต่ 25 °C ถึง 400 °C ซึ่งจากผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2-16

และ ตารางที่ 2-5 พบว่า กำลังรับแรงดึง ของกระจกจะลดลง เมื่ออุณหภูมิ สูงขึ้น โดยกำลัง จะลดลงต่ำที่สุดอยู่ที่ อุณหภูมิ 100 °C โดยมีกำลังเฉลี่ยที่ 26 MPa และจะมีกำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นจน คงที่ตั้งแต่อุณหภูมิ 200 °C โดยมีกำลังเฉลี่ยที่ 30 MPa



รูปที่ 2-16 กำลังรับแรงดึงสูงสุดของกระจกโพลติใสที่อุณหภูมิ 75- 400 °C [11]

ตารางที่ 2-5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดของกระจกใสที่อุณหภูมิ 75 - 400 C° [11]

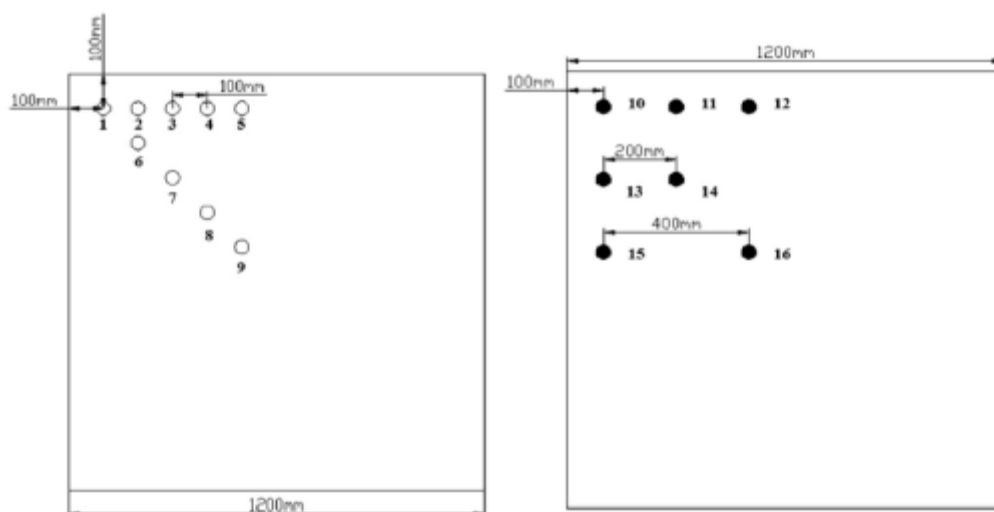
Temperature of Glass (C°)	Critical breaking stress (MPa)					Min (MPa)	Average (MPa)
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5		
75	23.21	30.89	34.86	23.54	27.32	23.21	27.96
100	28.40	26.91	26.33	24.39	26.95	24.39	26.60
125	22.19	34.79	21.89	31.39	35.09	21.89	29.07
150	28.02	31.68	33.25	30.72	-	28.02	30.92
200	26.71	34.97	33.35	32.96	-	26.71	32.00
300	31.63	33.27	29.19	26.56	-	26.56	30.16
400	31.00	26.66	30.48	30.97	-	26.66	29.78

ซึ่งจากการวิจัย พบว่า ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงสูงสุดของกระจกโพลติสอยู่ที่ประมาณ 35.7 MPa (อุณหภูมิห้อง) และมีกำลังลดลงตามการเพิ่มของอุณหภูมิ จนมีกำลังต่ำสุดที่อุณหภูมิ 100 C° อยู่ที่ 26.6 MPa แล้วค่อยๆกลับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จนเริ่มคงที่หลังจากอุณหภูมิ 200 C° ที่ 30.6 MPa สรุปได้ว่ากระจกใสมีกำลังรับแรงดึงแปรผันตามอุณหภูมิต่างๆ อยู่ในช่วงระหว่าง 26.6 MPa - 35.7 MPa และ ASTM E1300 ได้แนะนำให้ใช้ค่าที่ 16.6 MPa ถึง 20.0 MPa ตามลักษณะการตัดขอบกระจก หากไม่มีการทดสอบ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า และครอบคลุมตลอดทุกช่วงอุณหภูมิใช้งาน กว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในครั้งนี้

2.6.2 การวิจัย ศึกษาเกี่ยวกับ การทดสอบกระจก

Yu Wang และคณะ [12] ตำแหน่งติดตั้งกระจกระบบ Four Point supported เพื่อศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการติดตั้ง จุดยึดกระจก ในระบบ Fixed Point supported ต่อการเกิดเพลิงไหม้ โดยได้ทดสอบกระจกโพลติส ขนาด 1200x1200 mm หนา 6 mm ตำแหน่งจุดยึดทั้งหมด 16 ตำแหน่ง และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ FEM ร่วมประเมินซึ่งค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2-6 โดยแบ่งเป็น 2 กรณีหลัก

- 1) กรณีที่ ออกแบบภายใต้ อุณหภูมิกระจายคงที่ ทั้งหมด 9 ตำแหน่ง
- 2) กรณีที่ ออกแบบภายใต้ อุณหภูมิกระจายไม่คงที่ 7 ตำแหน่ง โดยให้ความร้อนที่ กลางแผ่น และให้กระจายความร้อนไปยังด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 2-17



รูปที่ 2-17 ตำแหน่งจุดยึดกระจก ในการทดสอบผลกระทบเมื่อได้รับความร้อน [12]
 (ซ้าย)ตำแหน่งจุดยึดกระจกกรณีให้ความร้อนทั่วกระจก (ขวา)กรณีให้ความร้อนจากกลางแผ่นแล้วให้แผ่ความร้อน ไปด้านข้าง

ตารางที่ 2-6 คุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของกระจกโพลีไธส ที่ใช้สำหรับการทดสอบ [12]

Properties	Unit	Symbol	Values
Modulus of elasticity	Pa	E	6.7×10^{10}
Poisson's ratio	-	ν	0.22
Density	kg/m ³	ρ	2500
Thermal expansion co efficient	/C ^o	β	85×10^{-7}
Reference temperature	K	T_R	283
Tensile strength	Pa	σ_b	4.0×10^7
Compressive strength	Pa	σ_{bc}	4.0×10^8

การทดลองแบบที่ 1 ตัวอย่างที่ 1 ถึง 9 โดยการให้ความร้อนคงที่เท่ากันตลอดทั้งแผ่นกระจก โดยให้ความร้อนเริ่มต้นที่ 283 K^o และเพิ่มในอัตราเร็วประมาณ 1.5 K^o / min จนถึงอุณหภูมิ 470 K^o ในเวลา 120 นาทีทั่วทั้งแผ่น และทดสอบโดยปรับตำแหน่งของจุดยึดกระจก ห่างกันทุกๆ 10 cm ทั้งหมดจำนวน 9 ตำแหน่ง ทำให้ได้ค่าการกระจายตัวของหน่วยแรงดึง (Tensile strength) ในแต่ละตำแหน่ง และพบว่า กระจกจะแตกเกือบจะคงที่ ที่หน่วยแรงดึงสูงสุดประมาณ (principal stress of Tensile strength) ~ 40 MPa โดยตำแหน่งเจาะยึดกระจก (Support point glass façade) จะมีผลอย่างมากกับ ระยะเวลาที่กระจกเริ่มแตก ซึ่งกระจกที่มีระยะห่างจากขอบมากจะใช้เวลาในการแตกเพิ่มมากขึ้น ตาม และจุดที่จะเริ่มแตกก่อนส่วนมากเกิดที่บริเวณโดยรอบจุดเจาะยึดกระจก

การทดลองแบบที่ 2 (ตัวอย่างที่ 10 ถึง 16) โดยการให้ความร้อนจากกลางแผ่นกระจก และปรับตำแหน่งของจุดยึดกระจก ห่างกันทุกๆ 10 cm จำนวน 7 ตำแหน่ง ซึ่งจะใกล้เคียงกับ สภาพการเกิดเพลิงไหม้จริง ทำให้ได้ค่าการกระจายตัวของหน่วยแรงดึง (Tensile strength) ในแต่ละแบบ และพบว่า กระจกจะแตกเกือบจะคงที่ ที่หน่วยแรงดึงสูงสุดประมาณ (principal stress of Tensile strength) ~ 40 MPa โดยกระจกที่มีระยะห่างของจุดยึด ที่ห่างกันน้อยกว่า (Case 12 และ Case 16) จะมีผลทำให้เวลาในการแตกลดลง(สั้น) ตามไปด้วย เนื่องการความแตกต่างของอุณหภูมิ และการขยายตัวของกระจก

ซึ่งจากการวิจัยพบว่าตำแหน่งเจาะยึดกระจก (Support point glass façade) มีผลอย่างมากกับ ระยะเวลาที่กระจกเริ่มแตก

Zongyi Wang และคณะ [13] ได้วิจัย ศึกษา กำลังต้านทานแรงแนวระนาบของกระจกเทมเปอร์ (FT) ในระบบ Point supported เพื่อศึกษาผลกระทบจากแรงกระทำในระนาบกระจกที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของกระจกเทมเปอร์ (FT) ที่ติดตั้งในระบบ Point supported โดยใช้ Support ที่มีการติดตั้ง Support เป็นรุ่นที่ Plate ด้านนอก และด้านในของ Support มีพื้นที่รับแรงไม่เท่ากัน โดยการศึกษาครั้งนี้ ใช้การทดลอง 3 แบบ และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ FEM ร่วมประเมินซึ่งค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2-7 รูปแบบการรับแรง และรูปแบบการแตกของกระจก โดยการทดลอง 3 แบบมีรายละเอียดดังนี้ คือ

แบบ (a) ให้แรงกระทำต่อกระจก ในแนวระนาบเดียวกันกับกระจกเพียงอย่างเดียว

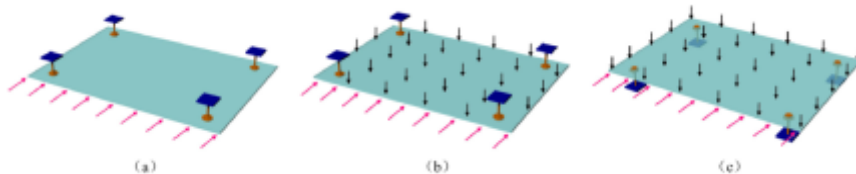
แบบ (b) ให้แรงกระทำต่อกระจกในแนวระนาบ และแนวตั้งฉากกับกระจก โดยใช้ Support แบบแฉวน

แบบ (c) ให้แรงกระทำต่อกระจกในแนวระนาบ และแนวตั้งฉากกับกระจก โดยใช้ Support แบบยึดกับฐานรองรับ

ซึ่งลักษณะการติดตั้งและทดสอบได้แสดงรายละเอียดตามรูปที่ 2-18 และการทดสอบจริง แสดงในรูปที่ 2-19



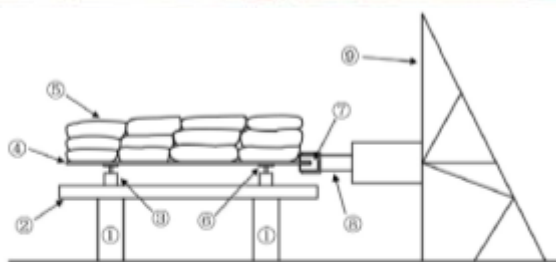
รูปที่ 2-18



อุปกรณ์ยึดกระจก ลักษณะการยึดกระจก และทิศของแรงที่ใช้ในการทดสอบทั้ง 3 แบบ [13]

ตารางที่ 2-7 คุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของกระจกโฟลตใส ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การทดสอบ [13]

Properties	Tempered glass	Stainless steel	Rubber blanket
Modulus of elasticity (GPa)	72	193	10
Poisson's ratio	0.21	0.3	0.45

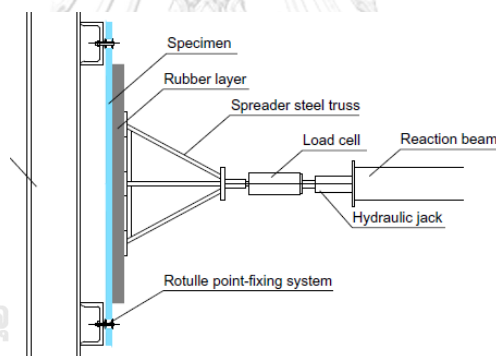
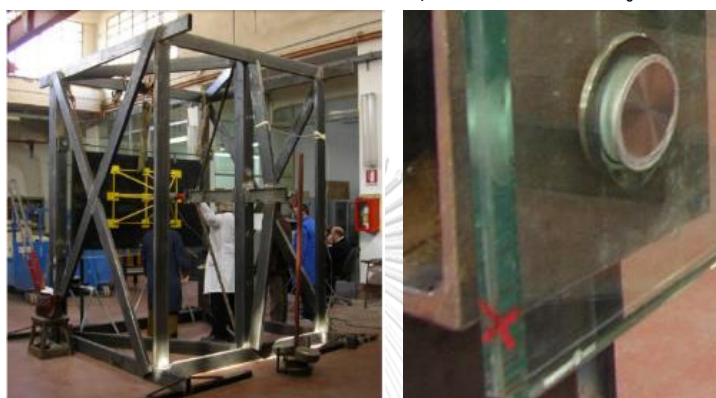


① Column; ② Parallel beam; ③ Vertical beam; ④ Tempered glass;
⑤ Sandbags; ⑥ Bolt fitting; ⑦ Batten; ⑧ Jack; ⑨ Reaction frame

รูปที่ 2-19 อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ สำหรับการทดสอบ [13]

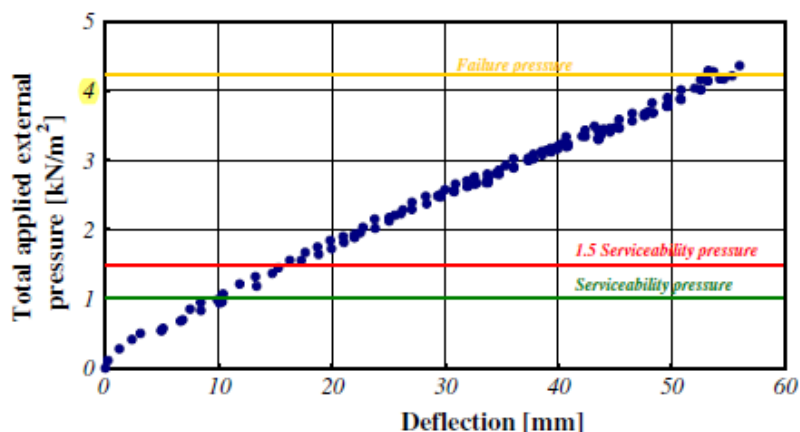
จากการวิจัยพบว่า Maximum principal stress ทั้งหมดเกิดขึ้นที่ รอบรูจุดยึดกระจก ในกรณี (a) ไม่มีแรง in-plane load, (b) มีแรง in-plane load โดย support ยึดแบบแขวน และ (c) มีแรง in-plane load โดย support ยึดแบบแบกทาน มีค่า 100 MPa 82.4 MPa และ 119.2 MPa ตามลำดับซึ่งมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงที่จุดกึ่งกลางด้านล่างของกระจกมาก และจากการทดสอบพบว่า การติดตั้งกระจกแบบ Point support นั้น จำเป็นต้องพิจารณา วิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นรอบรูเจาะยึดกระจก เป็นพิเศษ ซึ่งตรงกับคำแนะนำจาก Guidance for European Structural Design of Glass Components [2] และมีข้อสังเกตว่าการให้แรงกับกระจกทดสอบโดยการเพิ่มตุ้มน้ำหนักจะมีความสม่ำเสมอในการกระจายแรงมาก น้อยเพียงใด จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของกระจกทดสอบหรือไม่ และการวางตุ้มน้ำหนักแต่ละครั้งจะส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้ในการทดสอบรับแรงของกระจกหรือไม่

Giuseppe Campione และคณะ[14] ได้ทำการทดสอบกระจกลามิเนต 2 ชั้น ขนาด 1500x2500 mm ที่ประกอบจากกระจกเทมเปอร์ (FT) และ กระจกกึ่งนิรภัย Heat Strengthen (HS) หนา 6 mm และ 12 mm of ยึดด้วยฟิล์ม polyvinylbutirral (PVB) หนา 1.52 mm ติดตั้งกระจกในแนวตั้งด้วยต่อยึดต่อกระจก แบบ 4 จุด ทำการเพิ่มแรงโดยใช้แม่แรง อัดแรงที่แนวกึ่งกลางแผ่นกระจก โดยใช้โครงเหล็กช่วยถ่ายแรงไปยังจุดต่างๆของกระจกและใช้แผ่นยางรองระหว่างกระจกและโครงเหล็กถ่ายแรง ดังแสดงรายละเอียด การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ ในรูปที่ 2-20



รูปที่ 2-20 อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ สำหรับการทดสอบ [14]

จากการวิจัยพบว่า กระจกแตกที่แรงดันประมาณ 4.2 kPa และมีระยะการโก่งตัวประมาณ 52-55 mm ที่แรงดันดังกล่าว ซึ่งแรงดันทดสอบมีค่าสูงกว่าแรงดันใช้งานที่ 1.5 kPa ถึง 2.8 เท่า โดยรายละเอียดแสดงในรูปที่ 2-21



รูปที่ 2-21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ต่อระยะการโก่งตัวของกระจกทดสอบ [14]

จากผลการวิจัยพบว่ากระจกลามิเนต ขนาด 1500x2500 mm ที่ประกอบจากกระจกเทมเปอร์ (FT) และ กระจกกึ่งนิรภัย Heat Strengthen (HS) หนา 6+1.54+9 = 16.54 mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจก สามารถรับแรงได้สูงสุด 4.2 kPa ก่อนแตกเสียหาย แต่จากการทดสอบมีข้อสังเกตว่าการให้แรงกับกระจก และการกระจายแรงจากแม่แรงให้กระจก ที่สัมผัสกระจกเพียงบางส่วนในพื้นที่ โดยเฉพาะเมื่อกระจกรับแรงจนโก่งตัว โครงเหล็กกระจายแรงจะยังสัมผัสกระจกทดสอบน้อยลง การกระจายแรงจะยังคงสามารถกระจายแรงได้อย่างทั่วถึง เหมือนการใช้งานจริงหรือไม่ และจะส่งกระทบให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่างไปจากสภาพใช้งานจริงหรือไม่ จึงเห็นว่าการควรมีการทดสอบที่พิจารณาการกระจายแรงทดสอบให้มีสภาพให้เหมือนการใช้งานจริงมากที่สุด ในการหาความสามารถในการรับแรงของกระจกทดสอบต่อไป

2.6.3 การวิจัย ศึกษาเกี่ยวกับ การวิเคราะห์กระจกด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

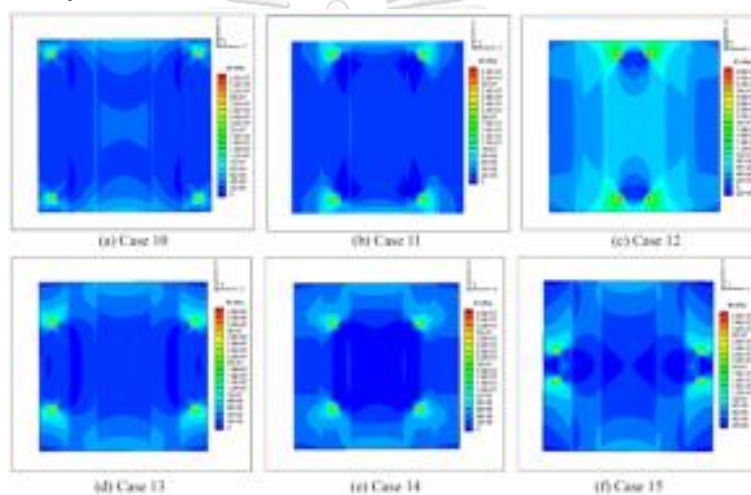
Yu Wang และคณะ [12] ตำแหน่งติดตั้งกระจกระบบ Four Point supported เพื่อศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการติดตั้ง จุดยึดกระจก ในระบบ Fixed Point supported ต่อการเกิดเพลิงไหม้ โดยได้ทดสอบกระจกโพลตใส ขนาด 1200x1200 mm หนา 6 mm ตำแหน่งจุดยึดทั้งหมด 16 ตำแหน่ง และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ร่วมประเมิน โดยใช้คุณสมบัติ ของกระจก ตารางที่ 2-6 โดยได้จำลองกลไกพฤติกรรม ไว้ 2 รูปแบบ คือ

- 1) แบบ Thermal stress model
- 2) แบบ Stress dynamic response model

โดยแบ่งชิ้นส่วนกระจกขนาด 1200x1200 mm หนา 6 mm เป็น 7200 ชิ้น 3D (2 x 60 x 60) แต่ละชิ้นมีขนาด 20 x 20 x 3 mm พบว่า

กรณีที่ 1) การให้ความร้อนคงที่ทั่วทั้งแผ่นกระจก หน่วยแรงดึงสูงสุดจากวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง แต่ ระยะเวลาการแตก มีตรงกับการทดสอบจริงเฉพาะ ตำแหน่งที่ 1 และ 2 เท่านั้น โดยผู้วิจัยตั้งข้อสังเกตว่าอาจมาจากการควบคุมการให้ปริมาณความร้อนที่ควบคุมได้ยาก โดยที่บริเวณกลางแผ่นกระจกน่าจะมีความร้อนสูงกว่าที่ขอบของกระจก จึงทำให้ผลที่ได้ ระหว่าง การทดสอบ และ การวิเคราะห์ด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ผลไม่เท่ากัน ในด้านของเวลาการเริ่มเกิดรอยแตก

กรณีที่ 2) การให้ความร้อนที่กลางแผ่นกระจก แล้วให้แผ่นกระจายไปด้านข้าง ให้ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในด้านของระยะเวลาเริ่มแตกของกระจกใกล้เคียงกว่า กรณีที่ 1) ซึ่ง น่าจะมาจากการควบคุมการให้ความร้อนในการทดสอบจริง ใกล้เคียงกับการกำหนดข้อมูลในการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 2-22



รูปที่ 2-22 ผลการวิเคราะห์ ด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ ของตัวอย่าง กรณีที่ 10 -15 [12]

ซึ่งจากการวิจัย พบว่าความแม่นยำในการควบคุมการทดสอบมีนัยสำคัญอย่างมากต่อผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Zongyi Wang และคณะ [13] ได้วิจัย ศึกษา กำลังต้านทานแรงแนวระนาบของกระจกเทมเปอเร (FT) ในระบบ Point supported เพื่อศึกษาผลกระทบจากแรงกระทำในระนาบกระจกที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของกระจกเทมเปอเร (FT) ที่ติดตั้งในระบบ Point supported โดยใช้คุณสมบัติของกระจก ตามตารางที่ 2-7 และกำหนด ชิ้นส่วนย่อย (element) ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็น 3 รูปแบบ (model) คือ

- 1) C3D20R (20-node quadratic hexahedron brick element with reduced integration)
- 2) C3D10M (10-node modified tetrahedron element with 4 integration point)
- 3) C3D4 (4-node linear tetrahedron element with 1 integration point)

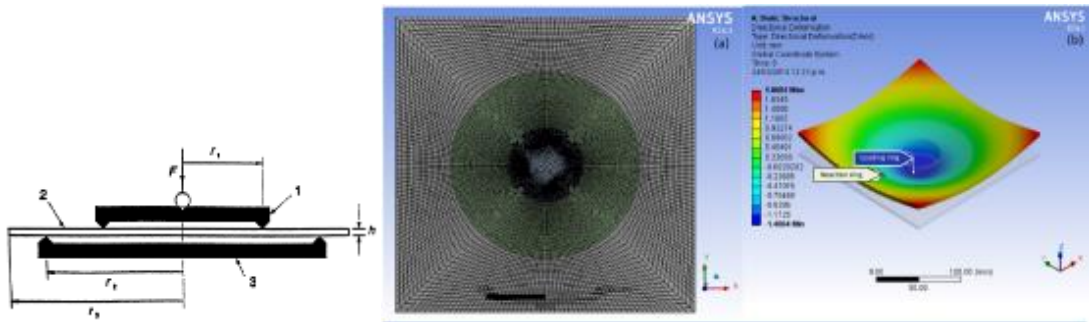
ซึ่งจากการวิจัยพบว่า ข้อมูลจากการทดสอบ และจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ บริเวณศูนย์กลางของกระจก มีค่าใกล้เคียงกัน คือต่างกันประมาณ 10%-35% แต่บริเวณรอบ จุดยึด จับ Support ยังมีความคาดเคลื่อนสูง คือ 150% และ 1,200% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความคาดเคลื่อนในจุดอื่นๆของตัวอย่างกระจก และผู้วิจัยได้ให้ข้อคิดเห็นในส่วนนี้ว่า

1) กำลังสูงสุดที่ทำให้กระจกแตก จะอยู่ที่รอบๆจุดเจาะยึด (Support) มากกว่าที่กลางแผ่น และขอบกระจกส่วนอื่น

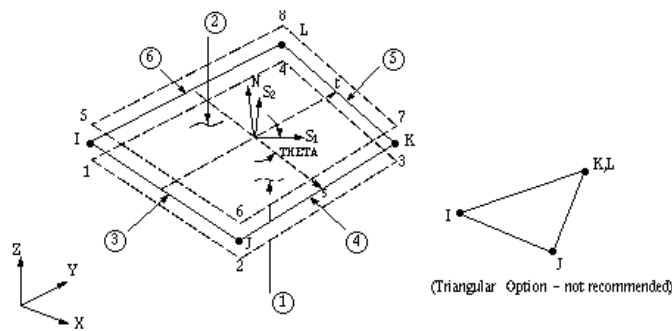
2) สาเหตุที่ข้อมูลจากการวิเคราะห์ มีความคาดเคลื่อน สูงที่รอบจุดยึด Support

- มีการใช้ข้อมูลที่ ระหว่างจุดต่อ (จุดสัมผัสถ่ายแรง) กระจก และ อุปกรณ์จับยึดที่ไม่ตรงกับพฤติกรรมจริงจากการทดลอง
- มีการใช้ข้อมูลรูปร่างของจุดจับยึด ยังไม่ตรงกับข้อมูลจริง
- อาจมีการกำหนดวิธีการทดสอบที่เก็บข้อมูลไม่ครบถ้วนจึงทำการข้อมูลการทดสอบ และการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ค่าที่ไม่เท่ากัน

B.A. Olmos และคณะ [15] ศึกษาความสามารถในการรับแรงของกระจก โดยใช้กระจกจากโรงงานในการทำการทดสอบกระจกใหม่ ขนาด 200 x 200 mm โดยใช้วิธี Coaxial double ring test และแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ในรูปที่ 2-23 จำนวน 8 ความหนา ความหนาละ 10 ชั้นตัวอย่าง (3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 และ 19 mm) รวมทั้งหมด 80 ชั้นโดยใช้อัตราการกดน้ำหนักทดสอบคงที่โดยเครื่อง Instron-5500R ที่ความอัตราเร็ว 79 KN/min หาความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่กระทำต่อกระจก กับระยะโก่งตัวของกระจก (deflection) และนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ ANSYS ซึ่งจำลองชิ้นส่วนย่อยในการคำนวณ (model element type) เป็น Shell 181 สำหรับโปรแกรม ANSYS ดังแสดงตัวอย่างรูปแบบในรูปที่ 2-24 และเลือกใช้ค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณต่อ หาค่าตัวแปรต่างๆในโปรแกรม ANSYS ในการคำนวณหาค่ากำลังรับแรง ดังแสดงในตารางที่ 2-8



รูปที่ 2-23 การจำลองการทดสอบการกระຈกโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ANSYS) ให้สอดคล้องกับการทดสอบวิธี Coaxial double ring test [5, 15]

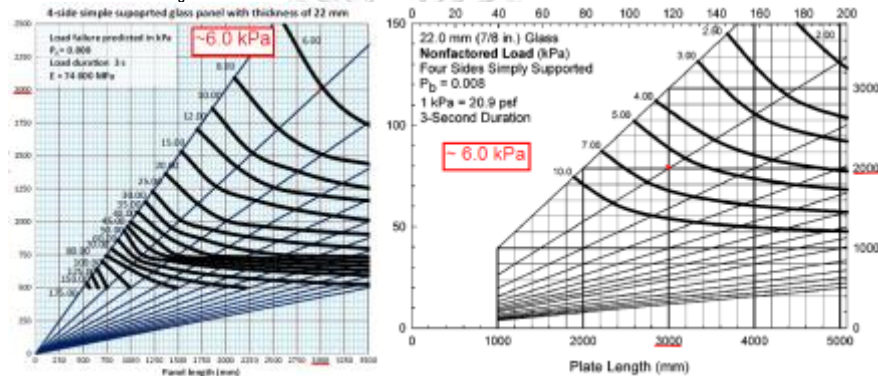


รูปที่ 2-24 ลักษณะรูปแบบกำหนดการจำลองชิ้นส่วน ชนิด Shell 181 ในโปรแกรม ANSYS

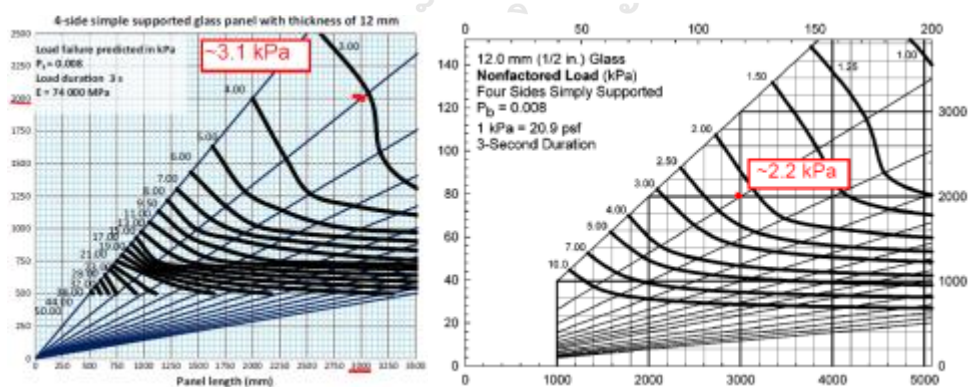
ตารางที่ 2-8 คุณสมบัติของการจากไลที่เลือกใช้ในการสร้างเครื่องมือใช้อยกแบบกระຈก [15]

Parameter	Value
Critical stress intensity factor or fracture toughness (K_{IC})	23.7172 MPa mm ^{0.5}
Geometry factor (Y)	1.12
The linear crack velocity parameter (v_0)	6 mm/s
Crack velocity parameter (n)	16
Surface condition parameter (θ_0)	59.10 MPa
Surface condition parameter (m_0)	5.77
Elastic modulus (E)	74,000 MPa
Load duration (t)	3 (s)
Sub-area S1 and S2	Function of finite element size (mm ²)
Principal stresses S1 and S2	Estimated from finite element analysis(MPa)

จากการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และกราฟช่วยออกแบบของ ASTM E1300 ของกระจกหนา 6 mm และ 12 mm ดังแสดงในรูปที่ 2-25 และรูปที่ 2-26 พบว่ารูปแบบของกราฟ มีความคล้ายคลึงกัน จะแตกต่างกันในส่วน กำลังที่กระจกสามารถรับแรงได้ โดยจากการวิจัย พบว่าจะมีกำลังต้านทานการแตกของกระจกที่สูงกว่าของมาตรฐาน ASTM E1300 โดยเฉพาะกระจกที่มีความหนาน้อย และเริ่มใกล้เคียงกัน เมื่อกระจกมีความหนาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้จากการที่การวิจัยเลือกใช้ค่า E ต่างออกไปจากมาตรฐาน ASTM E1300 โดยใช้ค่า $E = 71,700 \text{ MPa}$ และในการวิเคราะห์ใช้ค่า $E = 74,000 \text{ MPa}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ค่า Elastic modulus (E) ที่ต่างกันจะมีผลกระทบต่อกระจกที่มีความหนาน้อยๆ มากกว่ากระจกที่มีความหนาหลายๆ และค่า E ของกระจกในช่วง $71,700 \text{ MPa}$ ถึง $74,000 \text{ MPa}$ ยังมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อยู่



รูปที่ 2-25 ตัวอย่างกราฟช่วยออกแบบที่ได้จากการวิจัย (ซ้าย) เปรียบเทียบกับ มาตรฐาน ASTM E1300 ของกระจกหนา 6 mm (ขวา) [1, 15]



รูปที่ 2-26 ตัวอย่างกราฟช่วยออกแบบที่ได้จากการวิจัย (ซ้าย) เปรียบเทียบกับ มาตรฐาน ASTM E1300 ของกระจกหนา 12 mm (ขวา) [1, 15]

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบชิ้นตัวอย่างกระจก ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกแบบรูเจาะโดยการเพิ่มน้ำหนักลงบนกระจก และวัดค่าการโก่งตัวของกระจก ในแต่ละจุดของแผ่นกระจกตัวอย่าง เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบ มาเปรียบเทียบกับ ค่าที่ได้จากการจำลองชิ้นตัวอย่าง ด้วยวิธีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะใช้ค่าตัวแปรเริ่มต้น ต่างๆจากมาตรฐาน ASTM E1300 [1] และค่าตัวแปรจากงานวิจัยในอดีต นำมาปรับใช้ให้ผลลัพธ์ ใกล้เคียงกับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1 แนวคิดหลักในการทดสอบ

3.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

3.3 อุปกรณ์การทดสอบ

3.4 รายละเอียด พฤติกรรมของตัวอย่างที่พิจารณาภายใต้การทดสอบ

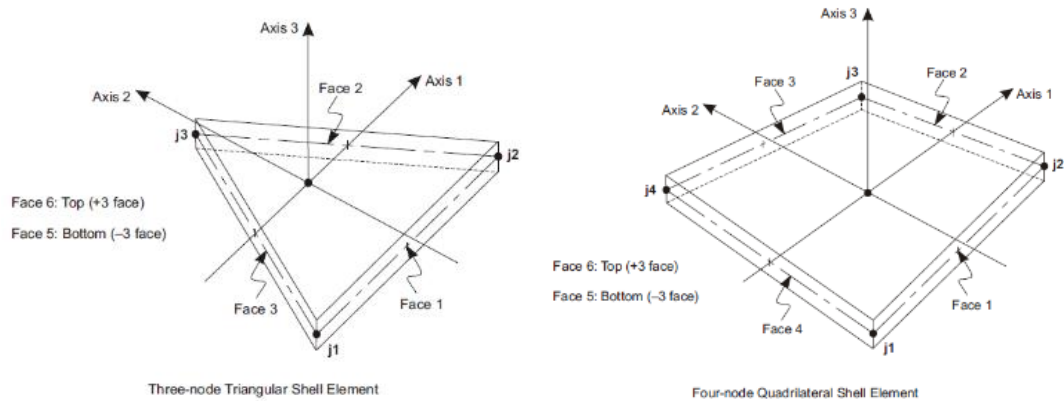
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

3.1 แนวคิดหลักในการทดสอบ

การวิจัยนี้ทำการทดสอบ และศึกษาพฤติกรรม การโก่งตัวของกระจก และ ความเครียด ที่ผิวกระจก ในตำแหน่งต่างๆ เพื่อแปลงข้อมูลมาเป็น ค่าความเค้น โดยเฉพาะบริเวณ รอบขอบรองรับเปรียบเทียบกับช่วงกลางแผ่นกระจก จากการรับน้ำหนักแบบกระจายตัวคงที่ (Uniform load) ที่อาจเกิดจากการใช้งานทั่วไปของกระจกที่ติดตั้งแนวตั้ง เช่น แรงลม น้ำฝน และกระจกที่ติดตั้งแนวนอน เช่น การน้ำหนักสัญญาณ การบรรจุทุกน้ำหนักต่างๆ บนกระจก ที่ติดตั้งด้วยตัวตัวยึดกระจกแบบรูเจาะ และนำข้อมูลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับ ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์กระจก โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อปรับปรุง รูปแบบการจำลอง และคุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดในการวิเคราะห์ ให้มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบจริง สำหรับนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของ กระจกที่มีการติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกแบบรูเจาะ ขนาดอื่นๆหลังจากนี้ต่อไป

3.1.1 การสร้างจำลองชิ้นส่วนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ SAP2000 ในการจำลองชิ้นส่วนของกระจกทรงแปดเหลี่ยมในรูปแบบ 3 มิติ โดยเลือกใช้ Thin-Shell Element ทั้งแบบ 3-nodes และแบบ 4-nodes โดยใช้รูปแบบ 3-nodes ขนาดเล็ก ในบริเวณโดยรอบจุดยึดต่อกระจก และใช้รูปแบบ 4-nodes ขนาดใหญ่ ในบริเวณอื่นๆ ดังแสดงใน รูปที่ 3-1

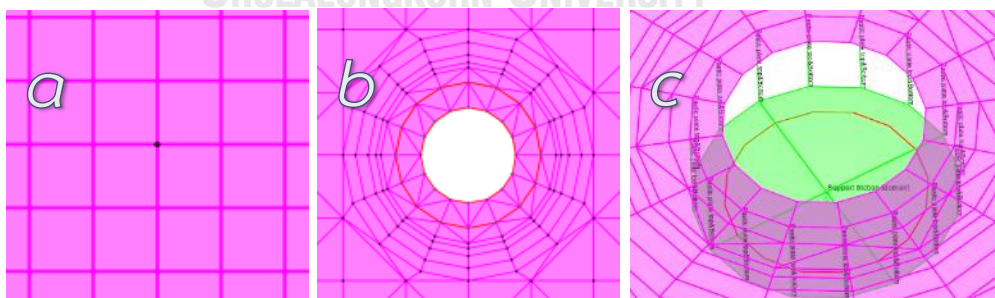


รูปที่ 3-1 ลักษณะของ 3-nodes และ 4-nodes Shell ในโปรแกรม SAP2000 [16]

และการวิจัยนี้จะกำหนดแบ่งพื้นที่ตามความละเอียดของชิ้นส่วน เป็น 2 Zone คือ

1) Zone 1 รอบฐานรองรับกระจกของตัวยึดต่อกระจก ห่างประมาณ 3-5 เท่า (Saint Venant's Principles) จากเส้นผ่านศูนย์กลางของ ตัวยึดต่อกระจกเนื่องจากผลการวิจัยที่ผ่านมาในอดีต พบว่าหลายครั้งที่การแตกของกระจกที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจก จะแตกเสียหายที่รอบๆ จุดจับยึดกระจก จึงต้องทำการตรวจสอบโดยรอบจุดจับยึดเป็นพิเศษ โดยได้ใช้แบบจำลองแบบ 3-nodes ใน Zone นี้

2) Zone 2 ทั่วไป คือส่วนที่อยู่นอกเหนือจาก Zone 1 และใช้ข้อมูลจากการวิจัยในอดีต แนะนำ ค่าที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของกระจก มาจำลอง อาจมีการปรับขนาด Mesh ให้ใหญ่-เล็กลงตามความเหมาะสมระหว่างการศึกษา สำหรับเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของกระจกโดยได้ใช้แบบจำลองแบบ 4-nodes ใน Zone 2 นี้ รายละเอียดจะอธิบายเพิ่มเติมในบทที่ 5 และงานการวิจัยนี้สร้างแบบจำลอง ออกเป็น 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แบบจำลองรูปแบบต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 รูปแบบหลัก

(a) สร้างแบบจำลองโดยกำหนดให้กระจกเป็นแผ่นเต็ม ไม่เจาะรู (b) แบบเส้นโลหะรองรับ บนกระจกเจาะรู (c) แบบมีแผ่นเหล็กและยางรองรับใต้กระจกที่เจาะรู

3.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบในงานวิจัยนี้ จะใช้กระจกเทมเปอร์ ความหนา 12 mm ทั้งหมดในการทดสอบ โดยใช้กระจกทดสอบทั้งหมดจำนวน 3 ตัวอย่าง ใช้ตัวยึดจับกระจก 2 ขนาด ติดตั้งกระจก 2 รูปแบบ

แบบที่ 1 ติดตั้งกระจกขนาด 1200x2400 mm ในแนวตั้ง ใช้ลมเป็นตัวกลางในการเพิ่มแรงกระทำต่อกระจก

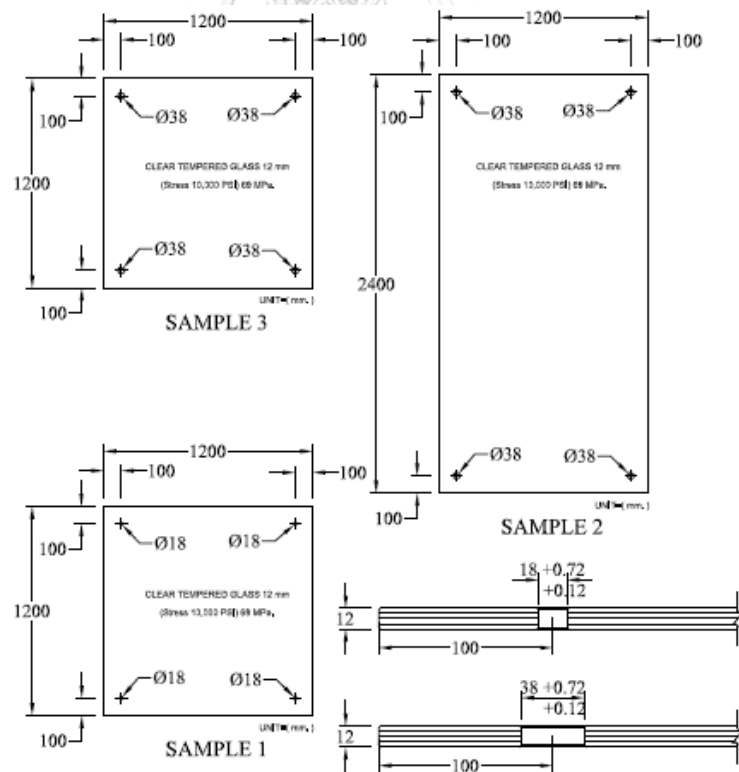
แบบที่ 2 ติดตั้งกระจกขนาด 1200x1200 mm ในแนวนอน ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการเพิ่มแรงกระทำต่อกระจก

3.2.1 ขนาดของตัวอย่างกระจกทดสอบ

ในการทดสอบใช้ตัวอย่างกระจกทั้งหมด 3 ตัวอย่าง และแสดงรายละเอียด รูปที่ 3-3 ตัวอย่างที่ 1) กระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200 mm เจาะรูขนาด 18 mm ระยะจากมุมขอบกระจกทั้ง 4 ด้านเป็นระยะ 100mm

ตัวอย่างที่ 2) กระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x2400 mm เจาะรูขนาด 38 mm ระยะจากมุมขอบกระจกทั้ง 4 ด้านเป็นระยะ 100mm

ตัวอย่างที่ 3) กระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200 mm เจาะรูขนาด 38 mm ระยะจากมุมขอบกระจกทั้ง 4 ด้านเป็นระยะ 100mm



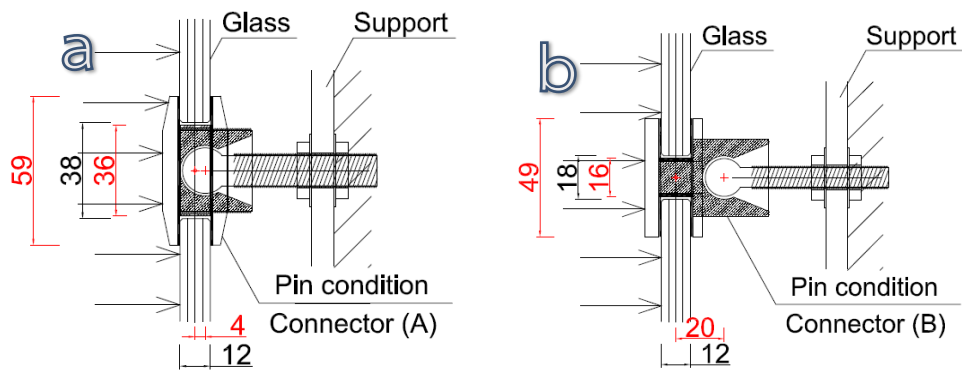
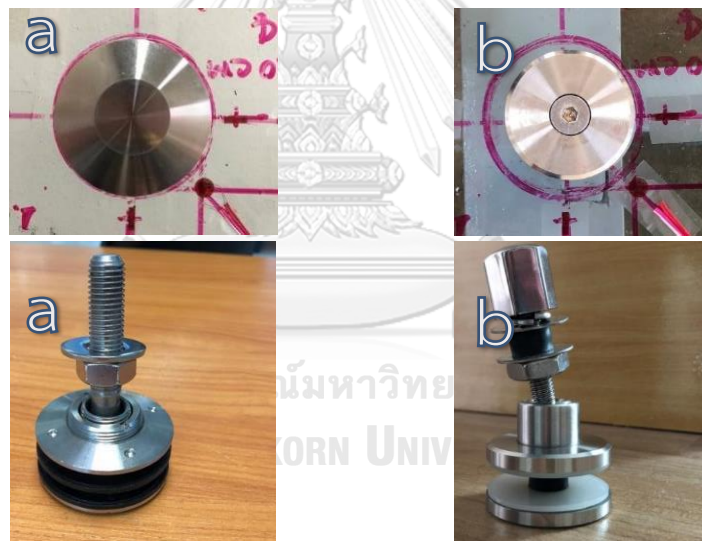
รูปที่ 3-3 ขนาด และตำแหน่งรูเจาะของกระจกตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ

3.2.2 ตัวยึดต่อกระจกแบบรูเจาะที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบใช้ตัวยึดต่อกระจก 2 ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะทางกายภาพต่างกัน ได้ตามแสดงใน ตารางที่ 3-1 และ รูปที่ 3-4 แบบแกนหมุนได้ (Pin) เพื่อศึกษาผลกระทบต่างๆจากการรับแรงของกระจก โดยตัวยึดต่อกระจก แต่ละผลิตภัณฑ์ จะติดตั้งแหวนรอง และน็อตเพิ่มเติม เพื่อปรับลักษณะการติดตั้ง ระหว่างการทดสอบ ให้เป็นแบบแกนหมุนได้อิสระ (Pin) และ แบบแกนยึดแน่น (Fixed) ดังแสดงใน รูปที่ 3-5

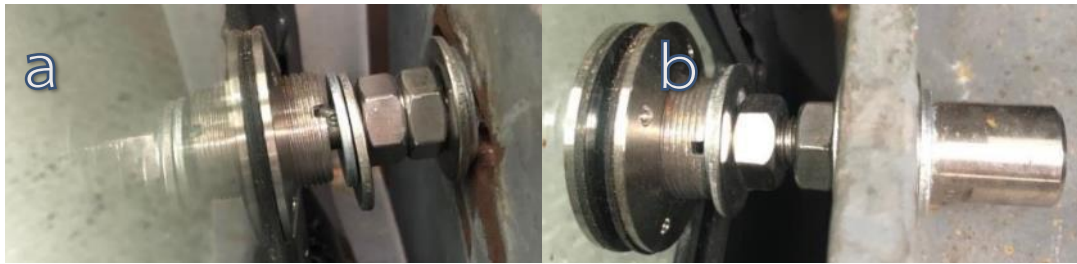
ตารางที่ 3-1 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของตัวยึดต่อกระจกที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดของตัวยึดจับกระจก	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	แกนเหล็กตัวยึดต่อกระจก	ระยะจุดหมุนแกนยึดต่อกระจก และแนวกึ่งกลางแผ่นกระจก
ขนาดใหญ่ (A)	59 mm	36 mm	16 mm	4 mm
ขนาดเล็ก (B)	49 mm	16 mm	13 mm	20 mm



รูปที่ 3-4 ตัวอย่างตัวยึดต่อกระจกที่ใช้ในการทดสอบ

(a) ตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A), (b) ตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B)



รูปที่ 3-5 การปรับแหวนรอง และน็อต ที่ตัวยึดต่อกระจกที่ใช้ในการทดสอบ
(a) รูปตัวยึดต่อกระจกแบบ หมุนได้อิสระ (Pin), (b) รูปตัวยึดต่อกระจกแบบ ยึดแน่น (Fixed)

3.2.3 โครงเหล็กฐานรับตัวยึดต่อกระจก

ใช้โครงเหล็กฐานรับตัวยึดต่อกระจก 2 ขนาด ดังแสดงใน รูปที่ 3-6

- ฐานรองรับทำจากเหล็กรูปพรรณ เจาะรูสำหรับติดตั้ง กระจกขนาด 1200x1200 mm
แนวนอน
- ฐานรองรับทำจากเหล็กรูปพรรณ เจาะรูสำหรับติดตั้ง กระจกขนาด 1200x2400 mm
แนวตั้ง



รูปที่ 3-6 การติดตั้งกระจกเข้ากับโครงเหล็กฐานรองรับ ด้วยตัวยึดต่อกระจกที่ใช้ในการ
ทดสอบ (a) กระจก 1200x1200 mm ติดตั้งแนวนอน (b) กระจก 1200x2400 mm ติดตั้งแนวตั้ง

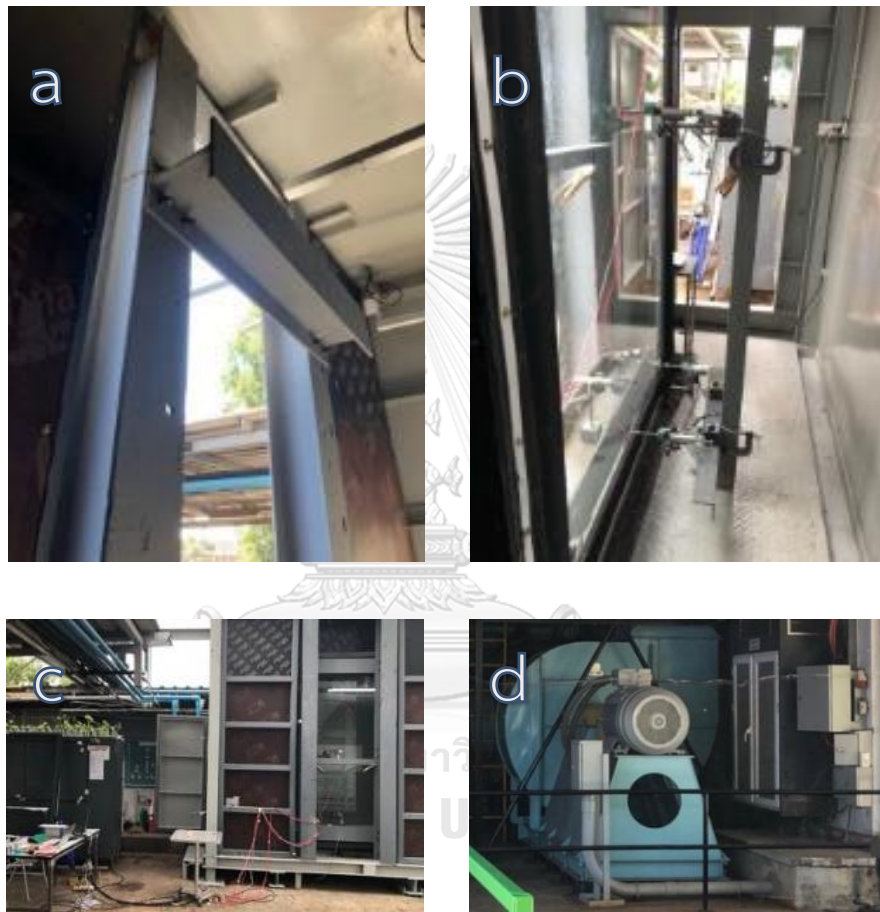
3.3 อุปกรณ์การทดสอบ

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบไปด้วย

3.3.1 อุปกรณ์ทดสอบ

การเพิ่มแรงกระทำให้กระจก มี 2 แบบ คือ

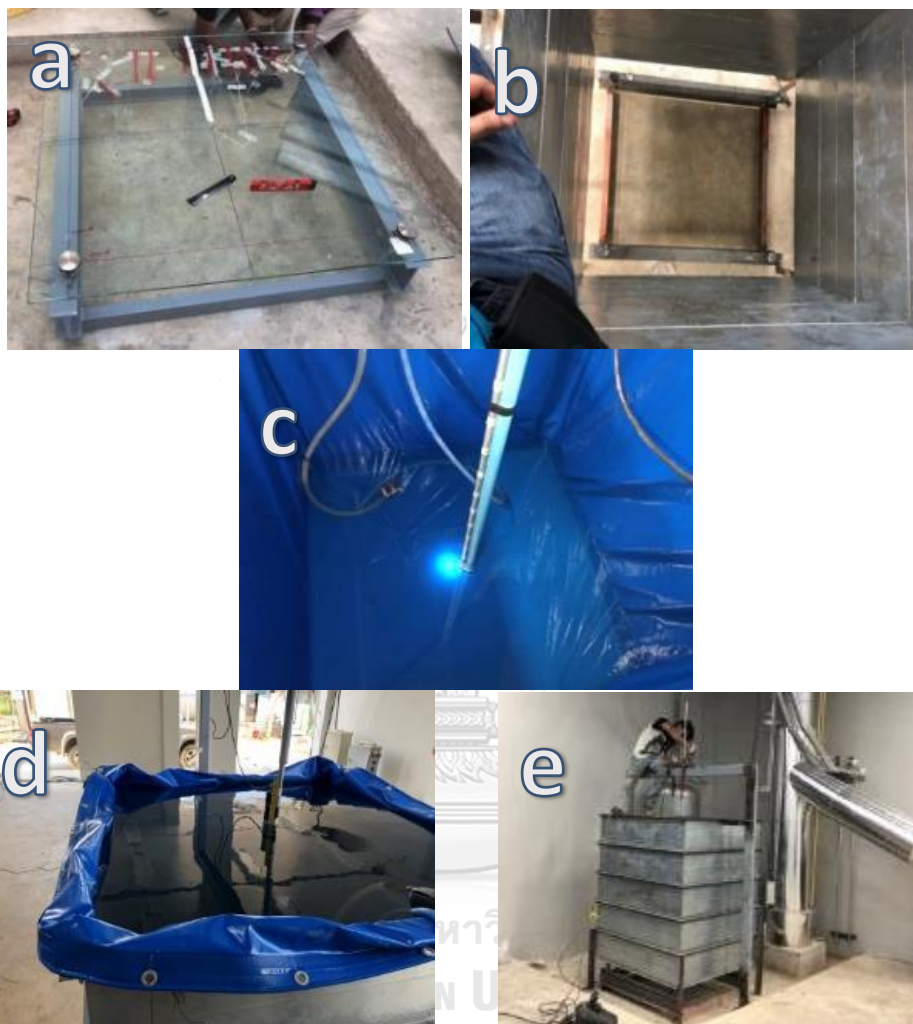
- 1) อัดลมในห้องปิดสนิท (Air chamber) ด้วยพัดลมอัดอากาศ ที่ติดตั้งกระจกขนาด 1200x2400 mm ในแนวตั้ง ไว้ในห้องดังกล่าว ดังแสดงใน รูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 การติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การรับแรงของกระจก ในแนวตั้ง

- (a) โครงเหล็กรับกระจก และตัวยึดต่อกระจก (b) การติดตั้งแผ่นยางยึดระหว่างกระจก กรอบตู้อัดอากาศ การติดตั้งเครื่องมือวัดความดัน วัดการโก่งตัวของกระจก
- (c) รูปโดยรวมการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ (d) พัดลมที่ใช้อัดอากาศในการทดสอบ

2) ชั่งน้ำในถุงผ้าใบในกรอบโลหะควบคุมรูปทรงทางด้านข้างขนาด 1250x1250 mm โดยสูงจากผิวกระจก 1600 mm ที่ติดตั้งกระจกทดสอบขนาด 1200x1200 mm ไว้ในแนวนอน ด้านล่างดังแสดงใน รูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 การติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การรับแรงของกระจก ในแนวนอน
 (a) โครงเหล็กรับกระจก และตัวยึดต่อกระจก (b) กล่องสังกะสีขนาดเท่าถุงผ้าใบ เพื่อควบคุมถุงผ้าระหว่างการทดสอบ (c) การติดตั้งเครื่องมือวัดความดัน และวัดการโก่งตัวของกระจก (d) รูปการเติมน้ำระหว่างการทดสอบ (e) รูปโดยรวมการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

3.3.2 เครื่องมือวัด แสดงใน รูปที่ 3-9

1. Data Logger ยี่ห้อ Kyowa รุ่น DCS-100A ต่อเชื่อมกับอุปกรณ์วัด
2. Strain gauge แบบ 1 ทิศทาง รุ่น KFGS-5-120-C1-11L5M2R
3. Strain gauge แบบ 2 ทิศทางตั้งฉากกัน รุ่น KFG-2-120-D16-11L5M2S
4. Linear Variable Displacement Transducers (LVDT) รุ่น DTH-A-50

5. Pressure Transducers (PT) รุ่น PGM 02KG

6. เทปวัดระยะ พร้อมเสาเหล็ก บอกระยะทุก 100 mm สำหรับ การทดสอบการรับแรงใน
แนวนอน

7. เครื่องวัดแรงดัน โดยวัดระยะต่างของระดับน้ำ



Data Logger (DCS-100A)



Strain gauge



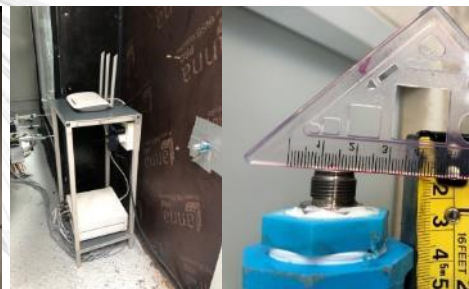
Strain gauge



LVDT



LVDT



Pressure Transducers



เครื่องวัดแรงดันแบบดูความแตกต่างจากระดับน้ำ



เทปวัดระยะติดตั้งบนท่อเหล็ก

รูปที่ 3-9

การติดตั้งอุปกรณ์วัดที่ใช้ในการทดสอบ การรับแรงของกระจกทั้งในแนวตั้ง และ

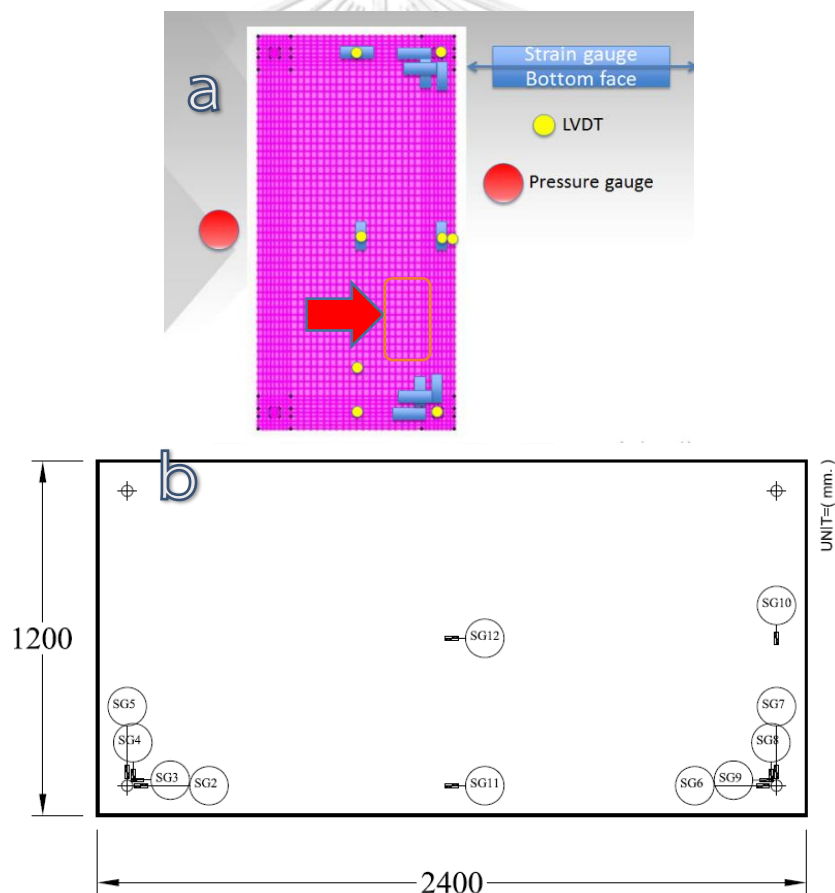
แนวนอน

3.4 รายละเอียด พฤติกรรมของตัวอย่างที่พิจารณาภายใต้การทดสอบ

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 แบบจากตัวกลางที่ใช้เพิ่มแรงที่กระทำต่อกระจก คือ ลม และน้ำ โดยกระจกขนาด 1200x1200x12mm ติดตั้งอุปกรณ์วัดต่างๆตามแสดงใน รูปที่ 3-11 จะใช้น้ำใน

การทดสอบ และขนาด 1200x2400x12mm ติดตั้งอุปกรณ์วัดต่างๆตามแสดงใน รูปที่ 3-10 จะใช้ลม ในการทดสอบ เนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ การติดตั้งอุปกรณ์ และแรงดันที่ต้องการใช้ทดสอบ แต่ การเพิ่มแรงทั้งสองตัวกลาง จะทำการศึกษา 3 ตัวแปรหลัก คือ

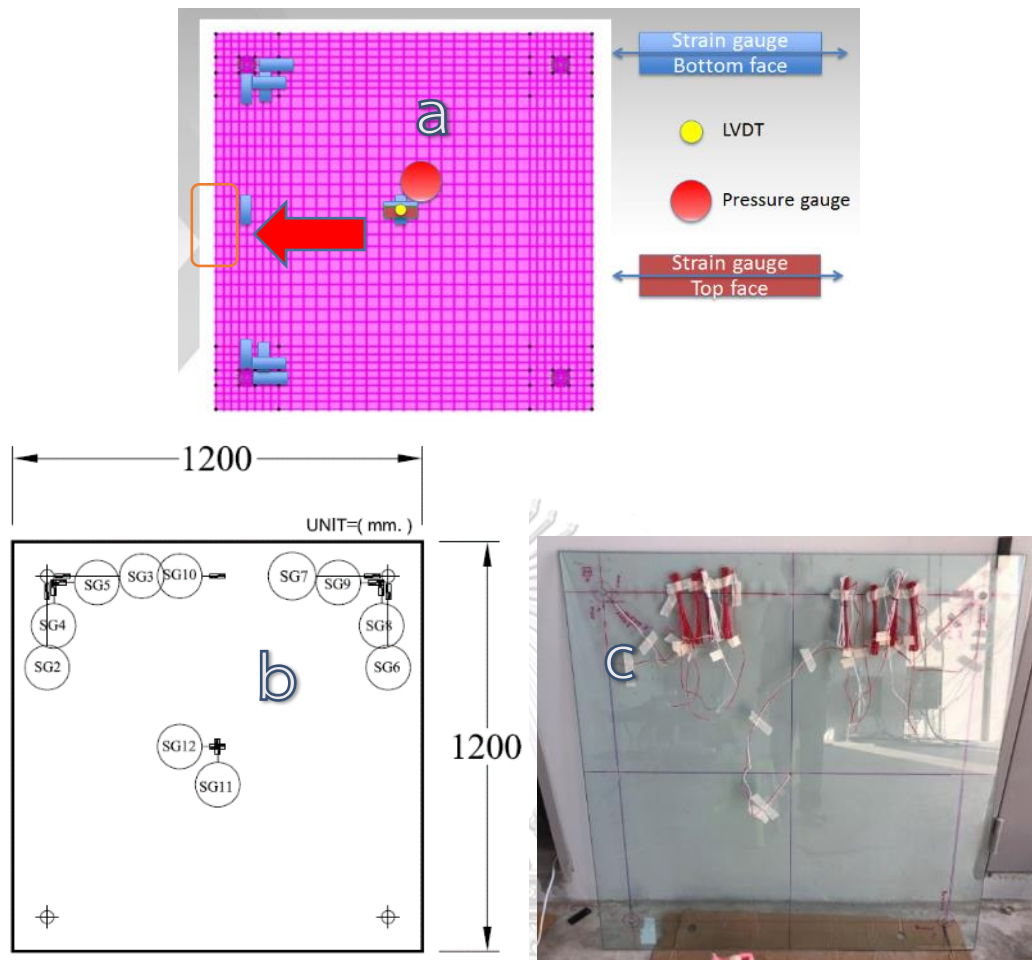
1. หน่วยแรงดันที่กระทำต่อผิวกระจก จากการเพิ่มแรงกระทำ ทั้งจากลม และน้ำ
2. ระยะการขยายตัวในแต่ละทิศทางของกระจก (X, Y) เทียบกับหน่วยแรงดันที่กระทำ โดยใช้เครื่องมือวัด Strain gages ติดตั้ง ณ ตำแหน่งต่างๆบนผิวกระจก วัดค่าที่ได้นำมา เพื่อแปลงข้อมูล ที่ได้จากการทดสอบไปเป็นความเค้น ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งตรวจวัด แล้วนำค่าที่วัดได้ มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ระยะการโก่งตัวของกระจก ในตำแหน่งต่างๆ เทียบกับหน่วยแรงดันที่กระทำ โดยเฉพาะ จุดศูนย์กลางแผ่นกระจก โดยใช้เครื่องมือวัด LVDT วัดค่าการทรุดตัวของกระจกนำค่าที่วัดได้ มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3-10 ลักษณะการติดตั้งกระจก และจุดวัดการขยายตัว และการโก่งตัวของตัวอย่างกระจก ขนาด 1200x2400 mm ขนาดรูเจาะกระจก 38mm.

(a) ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด ความดัน และ การโก่งตัว

(b) การกำหนดชื่อของตัววัดความเครียดที่ติดตั้งบนกระจกขนาด 1200x2400 mm



รูปที่ 3-11 ลักษณะการติดตั้งกระจก และจุดวัดการขยายตัว และการโค้งตัวของตัวอย่างกระจก ขนาด 1200x1200 mm ทั้งขนาดรูเจาะ 18 mm และ 38 mm
 (a) ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดการความเครียด ความดัน และการโค้งตัว
 (b) การกำหนดชื่อของตัววัดความเครียดที่ติดตั้งบนกระจกขนาด 1200x1200 mm
 (c) การติดตั้งตัววัดความเครียดที่ติดตั้งบนกระจกทดสอบ

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) สร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมิน การรับแรง และระยะโค้งตัว ที่กระจกจะรับได้โดยไม่แตกเสียหาย
- 2) ทดสอบกระจก โดยแบ่งการทดสอบเป็น 8 รูปแบบการทดสอบ จากตัวอย่างกระจก 3 ชั้น
 - 2.1) การทดลองเริ่มการทดสอบกับกระจกขนาด 1200x2400 mm ใช้แรงลมในการทดสอบ โดยได้ปรับการทดสอบเป็นการเพิ่มแรงเป็นช่วงๆทำการเพิ่มแรงกระทำ จาก 25%, 0% ,50% ,0% ,75% และ 90% ของหน่วยความเค้นสูงสุดที่ มาตรฐาน ASTM E1300 ยอม

ให้สำหรับกระจกเทมเปอร์ซึ่งมีค่าที่ 73 MPa โดยในขั้นตอนการเพิ่มแรงเป็น 25% ของหน่วยความเค้นสูงสุด แล้วปรับลดแรงต้นลมลงเหลือ 0% เพื่อการตรวจสอบข้อมูลจากการทดสอบ เทียบกับข้อมูล การวิเคราะห์ในแบบจำลองฯ หากพบข้อมูลขัดแย้ง จะทำการปรับค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง ให้สอดคล้องกับผลการทดสอบ เพื่อประเมินกำลังสูงสุดที่กระจกสามารถทนได้โดยไม่แตก หลังจากนั้นทำการเพิ่มแรงกระทำในรอบที่ 2 ที่แรง 50% ของหน่วยความเค้นสูงสุด แล้วทำการตรวจสอบค่าที่ได้จากการทดสอบ เทียบกับการวิเคราะห์เพื่อประเมินกำลังสูงสุด ก่อนจะเพิ่มแรงกระทำต่อกระจก เป็น 75% และ 90% ของหน่วยความเค้นสูงสุด ตามลำดับ ทำการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ โดยละเอียดต่อไป

2.2) การทดสอบกระจกขนาด 1200x1200 mm ทั้ง 2 แผ่น ทำการทดสอบโดยใช้แรงต้นน้ำ ได้เพิ่มแรงกระทำเป็นช่วงๆ โดยการเพิ่มความสูงของระดับน้ำที่ละ 200 mm ในช่วงแรก และเพิ่มความสูงของระดับน้ำที่ละ 100 mm ในช่วงที่กระจกมีกำลังใกล้เคียงกับกำลังสูงสุดที่กระจกสามารถรับได้ และทำการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ โดยละเอียดต่อไป

2.3) ทำการเปลี่ยนตัวยึดต่อตามเงื่อนไขต่างที่กำหนดให้และทดสอบตามขั้นตอนที่ 2.2 จนครบทุกกรณีทดสอบ

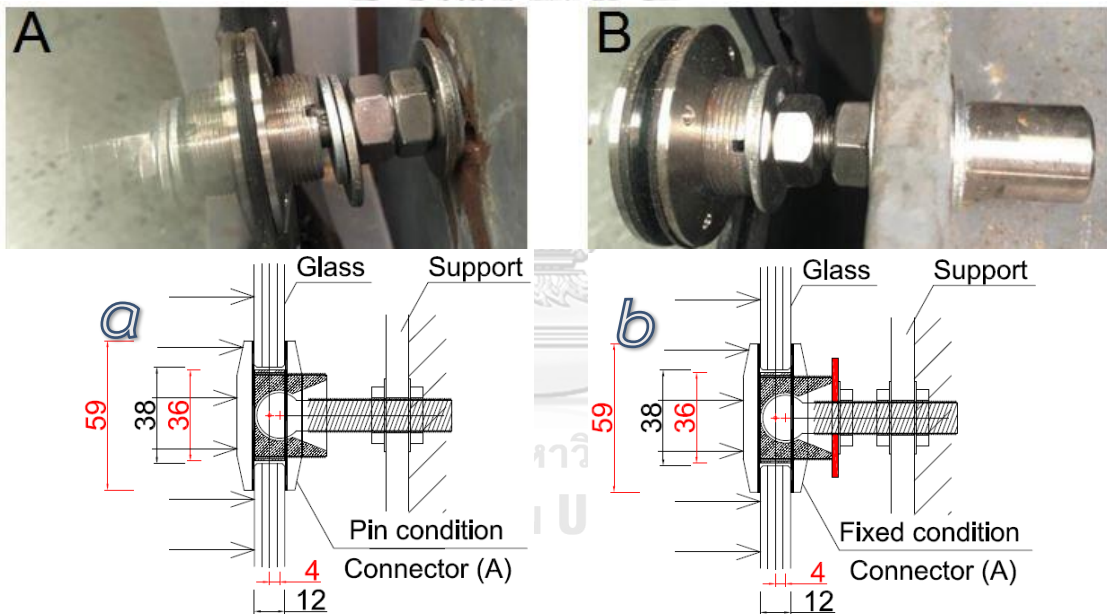
บทที่ 4

ผลการทดลอง

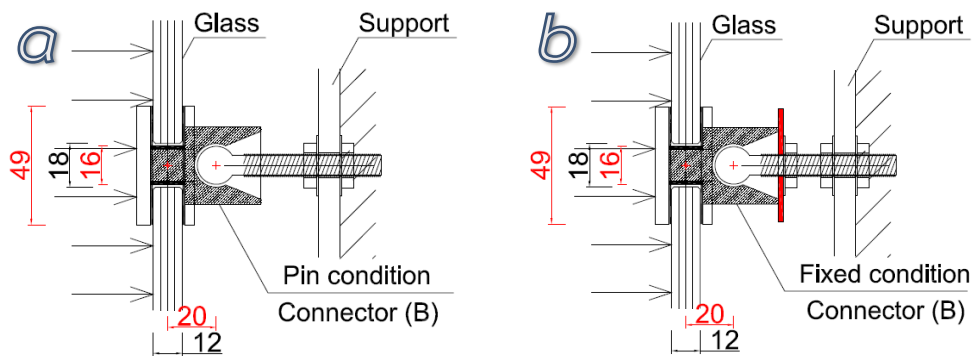
จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบได้ 5 หัวข้อดังนี้

4.1 ผลของลักษณะการติดตั้งตัวยึดต่อกระจกที่ต่างกัน (Pin , Fixed) ของแต่ละผลิตภัณฑ์

การทดลองได้ทำการทดสอบกระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200x12mm จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยแผ่นที่ 1 เจาะรูขนาด 38 mm 4 รูต่อแผ่น ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แผ่นที่ 2 ที่เจาะรูขนาด 18 mm 4 รูต่อแผ่น ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) ติดตั้งในแนวนอนใช้น้ำในการเพิ่มแรงดันทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่าง ทำการเปรียบเทียบระหว่าง การติดตั้งแบบ แกนหมุนได้อิสระ (Pin) และ แบบแกนยึดแน่น หมุนไม่ได้ (Fixed) ในด้านการรับแรง และการโก่งตัว ดังแสดงรูปที่ 4-1 และรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 เปรียบเทียบรายละเอียดการติดตั้งแบบหมุนได้ (Pin) และแบบยึดแน่น (Fixed)
(a) แบบแกนหมุนได้อิสระ (Pin) (b)แบบแกนยึดแน่น (Fixed) ของตัวยึดต่อขนาดใหญ่ (A)



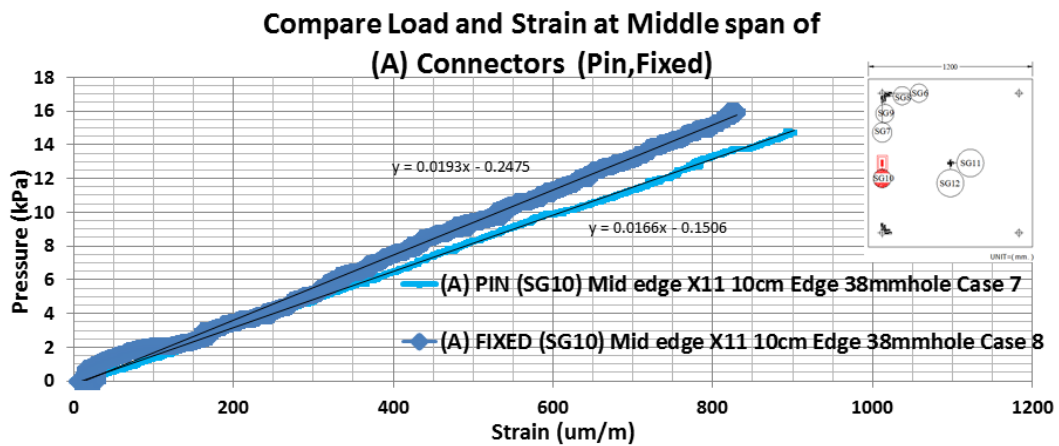
รูปที่ 4-2 เปรียบเทียบรายละเอียดการติดตั้งแบบหมุนได้ (Pin) และแบบยึดแน่น (Fixed)
(a) แบบแกนหมุนได้อิสระ (Pin) (b)แบบแกนยึดแน่น (Fixed) ของตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B)

4.1.1 ด้านการรับแรง เมื่อลักษณะการติดตั้งตัวยึดต่อกระจกที่ต่างกัน (Pin/Fixed)

การเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานแรงที่กระทำตั้งฉากต่อกระจก (P) ต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียด (E) ที่จุดทดสอบ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ จากขอบกระจกเข้าไป 100 mm

สำหรับผลิตภัณฑ์ ตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) พบว่าการติดตั้งแบบหมุนได้ (Pin) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อความเครียด ที่ 16.60 Pa/(um/m) และเมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) มีค่าที่ 19.30 Pa/(um/m) ซึ่งจะเห็นว่าการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) ต้องใช้แรงกระทำที่มากกว่าการติดตั้งแบบแกนหมุนได้ อยู่ 2.7 Pa/(um/m) หรือต่างกัน 16 % เพื่อให้เกิดความเครียดที่เท่ากัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบ ในรูปที่ 4-3

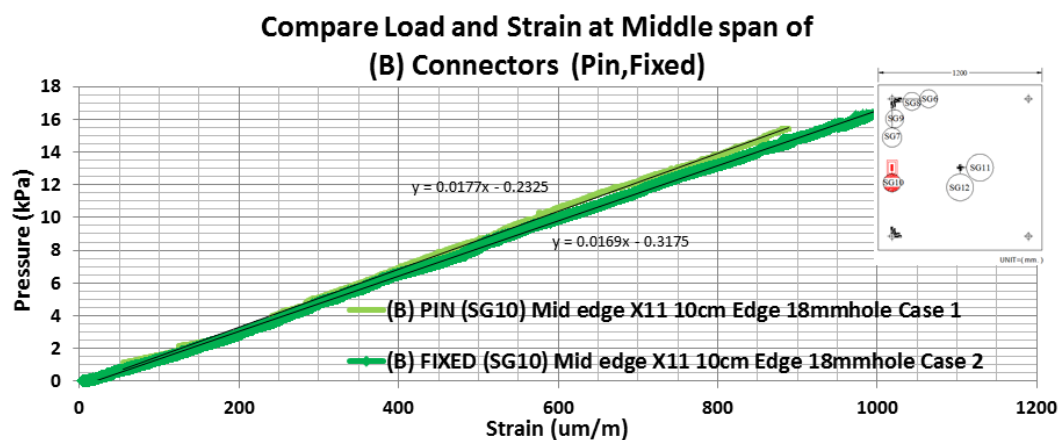
กระจก 1200x1200x12mm ที่ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) สามารถรับแรงจากการทดสอบได้มากกว่า 16,000 Pa และคาดว่าเมื่อต้องการทำให้กระจก มีความเค้นที่ผิวกระจกมีค่าเท่ากับ 73 MPa ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ ASTM E1300 ยอมให้ใช้ สำหรับกระจกเทมเปอร์ จะต้องใช้แรงประมาณ 16,700 Pa และ 19,300 Pa สำหรับการติดตั้ง แบบแกนหมุนได้อิสระ (Pin) และแบบแกนยึดแน่น (Fixed) ตามลำดับ



รูปที่ 4-3 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระจก 100 mm ของตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) ที่ติดตั้งลักษณะต่างกัน (Pin/Fixed)

และสำหรับตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) พบว่าการติดตั้งแบบหมุนได้ (Pin) ของตัวยึดต่อ (B) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อความเครียด ที่ 17.70 Pa/(um/m) และเมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) มีค่าที่ 16.90 Pa/(um/m) ซึ่งจะเห็นว่าการติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) ใช้แรงกระทำที่มากกว่าการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) อยู่ 0.8 Pa/(um/m) หรือต่างกัน 5 % เพื่อให้เกิดความเครียดที่เท่ากัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบ ในรูปที่ 4-4

กระจก 1200x1200x12mm ที่ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) สามารถรับแรงได้มากกว่า 16,000 Pa และคาดว่าเมื่อต้องการทำให้กระจก มีความเค้นที่ผิวกระจกมีค่าเท่ากับ 73 MPa. ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ ASTM E1300 ยอมให้ใช้ สำหรับกระจกเทมเปอร์ จะต้องใช้แรงประมาณ 17,700 Pa และ 16,800 Pa สำหรับการติดตั้ง แบบแกนหมุนได้อิสระ (Pin) และแบบแกนยึดแน่น (Fixed) ตามลำดับ



รูปที่ 4-4 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระจก 100 mm ของตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) ที่ติดตั้งต่างกัน (Pin/Fixed)

ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ตัวยึดต่อกระจกตัวเดียวกัน แต่มีลักษณะการติดตั้งตัวยึดต่อที่ต่างกัน ทำให้รับแรงได้ต่างกัน ประมาณ 5-15 %

โดยการติดตั้งแบบแแกนหมุนได้อิสระ (Pin) ตำแหน่งจุดหมุนของแแกนยึดจับกระจกที่ห่างมากกว่า มีผลให้รับแรงได้มากกว่า ตัวยึดต่อที่จุดหมุนอยู่ใกล้แนวกึ่งกลางแผ่นกระจกมากกว่า เกิดจากการที่ตัวจับยึดกระจกไม่สามารถหมุนตัวได้อิสระสอดคล้องตามการเอียงตัวของกระจก จึงเกิดแรงดัดกลับที่บริเวณรอบของตัวยึดต่อกระจก มีลักษณะคล้ายกับคานต่อเนื่องที่มีแรงดัดกลับรอบจุดรองรับ ทำให้แรงดัดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับมีค่าน้อยกว่าคานช่วงเดียวที่ไม่มีแรงดัดรอบจุดรองรับ

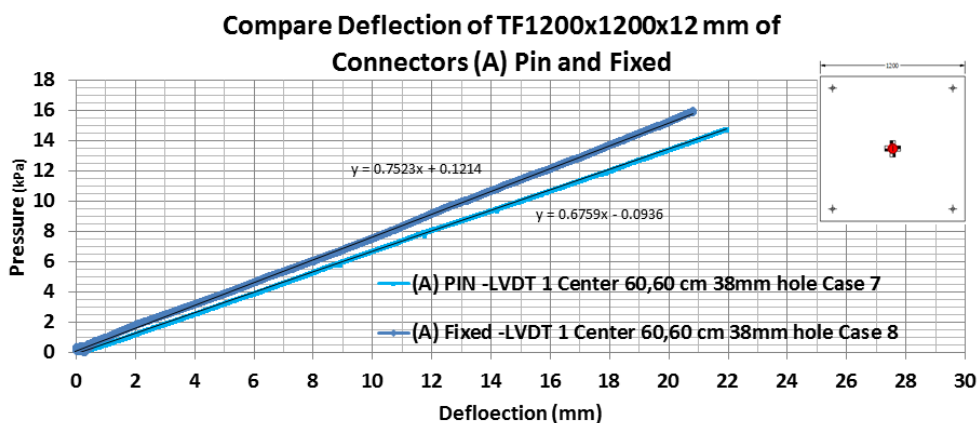
และสำหรับการติดตั้งแบบแแกนยึดแน่น (Fixed) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นโลหะรองรับกระจกของตัวยึดต่อที่ใหญ่กว่า จะทำให้รับแรงได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อแแกนยึดแน่น (Fixed) ที่บริเวณขอบฐานรองรับจะทำหน้าที่เป็นขอบของจุดรองรับไปด้วย ทำให้กระจกมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (Clear span) ลดลง ร่วมกับการที่ตัวจับยึดกระจกไม่สามารถหมุนได้ จึงเกิดแรงดัดที่บริเวณรอบของตัวยึดต่อกระจก

4.1.2 ด้านระยะการโก่งตัวเมื่อลักษณะการติดตั้งตัวยึดจับกระจกที่ต่างกัน (Pin/Fixed)

ผลการทดสอบการโก่งตัวของกระจกเมื่อรับแรง เปรียบเทียบตามลักษณะการติดตั้ง ในแบบแแกนหมุนได้อิสระ (Pin) และแบบแแกนยึดแน่น (Fixed) โดยเปรียบเทียบในรูปแบบความสามารถในการต้านทานการโก่งตัว พิจารณาจาก แรงที่กระทำตั้งฉากต่อกระจก (P) ต่อการเปลี่ยนแปลงการโก่งตัว (δ) ที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจก

สำหรับตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) พบว่าการติดตั้งแบบหมุนได้ (Pin) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำต่อการโก่งตัว (δ) ที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจกอยู่ที่ 675.90 Pa/mm และการติดตั้งแบบแแกนยึดแน่น (Fixed) มีค่าที่ 752.30 Pa/mm จะเห็นว่าการติดตั้งแบบแแกนยึดแน่น (Fixed) ต้องใช้แรงกระทำที่มากกว่าการติดตั้งแบบแแกนหมุนได้ อยู่ 76.40 Pa/mm หรือต่างกัน 11 % เพื่อให้เกิดการโก่งตัวที่เท่ากัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบ ในรูปที่ 4-5

และคาดว่าจะเกิดการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจก เมื่อให้แรงกระทำให้กระจกมีความเค้นที่ผิวกระจกมีค่าเท่ากับ 73 MPa ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ ASTM E1300 ยอมให้ สำหรับกระจกเทมเปอร์ เมื่อติดตั้งตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แบบแแกนหมุนได้ (Pin) จะโก่งตัวประมาณ 24.8 mm (16,700 Pa) และการติดตั้งแบบแแกนยึดแน่น (Fixed) จะโก่งตัวประมาณ 25.5 mm (19,300 Pa)

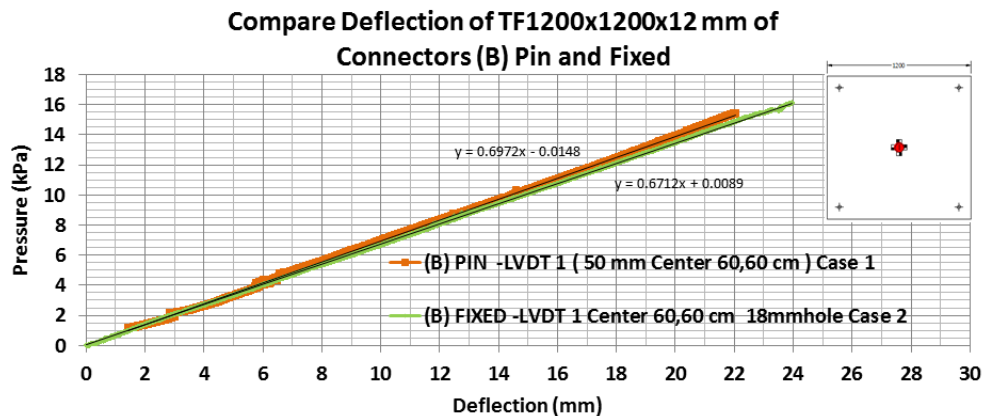


รูปที่ 4-5 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจก ของตัวยึดต่อกระจก ขนาดใหญ่ (A) ที่ติดตั้งต่างกัน (Pin/Fixed)

สำหรับตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) ที่ติดตั้งแบบหมุนได้ (Pin) มีค่าการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำ ต่อการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจกอยู่ที่ 697.20 Pa/mm และการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) มีค่าอยู่ที่ 671.20 Pa/mm จะเห็นว่าการติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) ใช้แรงกระทำที่มากกว่าการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) อยู่ 26 Pa/mm หรือต่างกัน 4 % เพื่อให้เกิดการโก่งตัวที่เท่ากัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบ ในรูปที่ 4-6

และคาดว่าจะเกิดการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจก เมื่อให้แรงกระทำให้กระจกมีความเค้นที่ผิวกระจกมีค่าเท่ากับ 73 MPa ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ ASTM E1300 ยอมให้ สำหรับกระจกเทมเปอร์ ที่ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin) จะโก่งตัวประมาณ 25.4 mm (17,700 Pa) และการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) จะโก่งตัวประมาณ 25.0 mm (16,800 Pa)

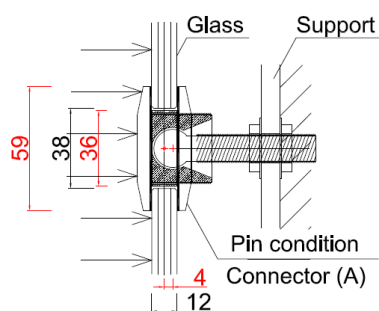
จากการทดสอบพบว่า ตัวยึดต่อกระจกตัวเดียวกัน แต่มีลักษณะการติดตั้งที่ต่างกัน จะทำให้เกิดการโก่งตัวต่างกัน ประมาณ 4-11 % และปัจจัยที่ทำให้การโก่งตัว เพิ่มขึ้น หรือลด เป็นตามเหตุผลเดียวกันกับการรับแรงที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.1 แล้ว



รูปที่ 4-6 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจก ตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) ที่ติดตั้งต่างกัน (Pin/Fixed)

4.2 ผลของผลิตภัณฑ์ ตัวยึดต่อกระจกที่ต่างกัน (ใหญ่ / เล็ก)

การทดลองในหัวข้อนี้ ได้ทำการทดสอบกระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200x12mm จำนวน 2 ตัวอย่าง แผ่นที่ 1 รูเจาะมีขนาด 38 mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แผ่นที่ 2 รูเจาะมีขนาด 18 mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) และทั้ง 2 แผ่นเจาะรูห่างจากขอบกระจกถึงศูนย์กลางรูเจาะเท่ากันทุกด้านที่ระยะ 100 mm ติดตั้งในแนวนอน การทดสอบใช้น้ำเป็นตัวกลางในการเพิ่มแรงทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่าง ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการรับแรง และการโก่งตัวเมื่อใช้ตัวยึดต่อกระจก ต่างผลิตภัณฑ์กัน (A , B) ซึ่งมีความแตกต่างกันในส่วนของคุณสมบัติผ่านศูนย์กลางภายนอกของแผ่นเคลือบกรองรับกระจก ,ขนาดรูเจาะกระจก ที่มีขนาดต่างกัน และลักษณะแกนที่มีตำแหน่งจุดหมุนในลักษณะต่างกัน โดยรายละเอียดของผลิตภัณฑ์โดยละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 1 และ 3 ไว้แล้ว และลักษณะของอุปกรณ์ยึดจับกระจกทั้ง 2 ที่แตกต่างกันโดยรวมแสดงในรูปที่ 4-7 และรูปที่ 4-8 ได้ผลการทดสอบในด้านต่างๆดังนี้



รูปที่ 4-7



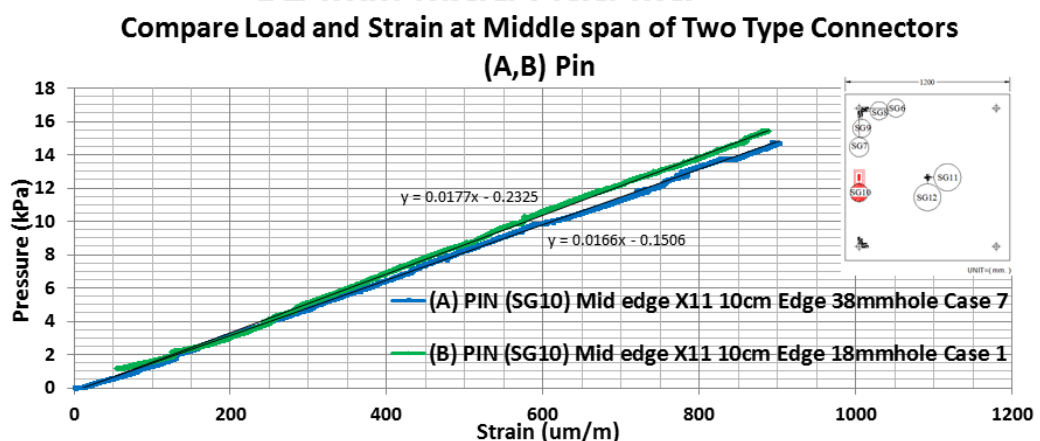
ลักษณะทั่วไปของตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A)



4.2.1 ด้านการรับแรง เมื่อชนิดตัวยึดจับกระจกที่ต่างผลิตกัน

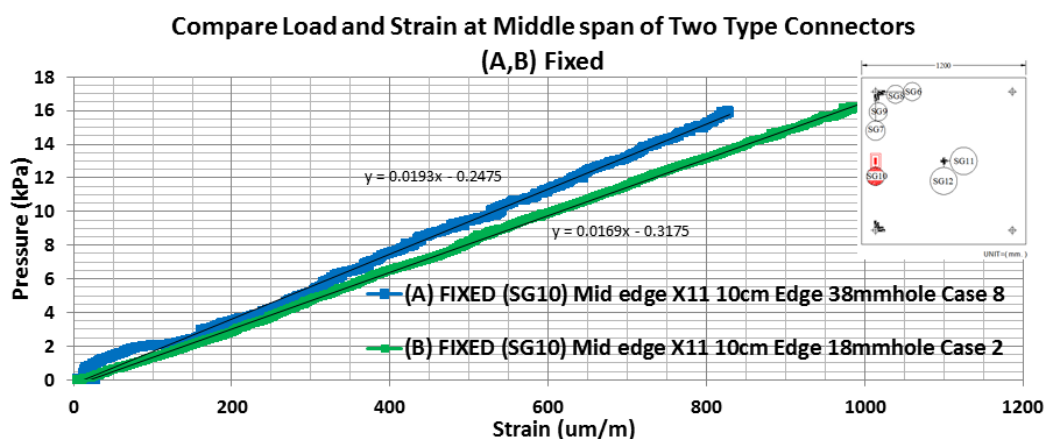
จากการทดสอบตัวอย่างกระจกเทมเปอร์ โดยการติดตั้งตัวยึดจับกระจก 2 ผลิตภัณฑ์ ที่เจาะกระจกขนาดตามที่บริษัทฯ แนะนำ (38 mm และ 18 mm) นำมาเปรียบเทียบผลการทดสอบ แรงที่กระทำตั้งฉากต่อกระจก (P) ต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียด (E) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ จากขอบกระจกเข้าไป 100 mm แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือแบบแแกนหมุนได้ (Pin) และแบบแแกนยึดแน่น (Fixed)

สำหรับการติดตั้งแบบหมุนได้ (Pin) ของตัวยึดต่อ (A) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำต่อความเครียด ที่ 16.60 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) และตัวยึดต่อ (B) มีค่าที่ 17.70 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) ซึ่งจะเห็นว่าตัวยึดต่อ (B) ใช้แรงกระทำที่มากกว่าตัวยึดต่อ (A) อยู่ 1.1 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือต่างกัน 7 % เพื่อให้เกิดความเครียดที่เท่ากัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบ ในรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระจก 100 mm ที่ใช้ตัวยึดต่อต่างชนิดกัน (A , B) ติดตั้งแบบแแกนหมุนได้ (Pin)

สำหรับการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) ของตัวยึดต่อ (A) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อความเครียดที่ 19.30 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) และของตัวยึดต่อ (B) มีค่าที่ 16.90 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) จะเห็นว่าตัวยึดต่อ (A) ใช้แรงกระทำที่มากกว่าตัวยึดต่อ (B) อยู่ 2.40 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือต่างกัน 14 % เพื่อให้เกิดความเครียดที่เท่ากัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบใน รูปที่ 4-10



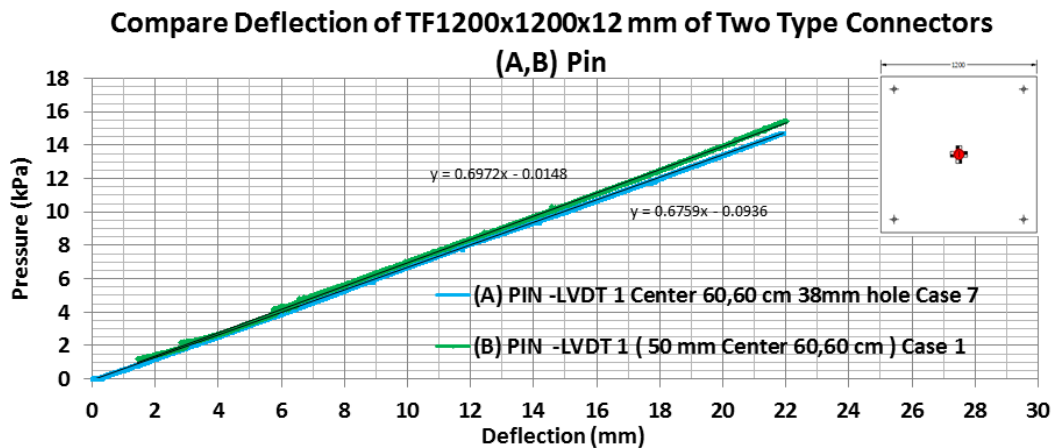
รูปที่ 4-10 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระจาก 100 mm ที่ใช้ตัวยึดต่อต่างชนิดกัน (A ,B) ติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

จากการทดสอบพบว่า ตัวยึดต่อกระจากต่างกัน มีลักษณะการติดตั้งตัวยึดต่อเหมือนกัน ทำให้รับแรงได้ต่างกัน ประมาณ 7-14 % ตามลักษณะทางกายภาพที่ต่างกันตามที่ได้อธิบายในเรื่องการรับแรงในหัวข้อ 4.1.1 แล้ว

4.2.2 ด้านการโค้งตัวที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจาก เมื่อใช้ตัวยึดต่อกระจากที่ต่างผลิตภัณฑ์กัน (A,B)

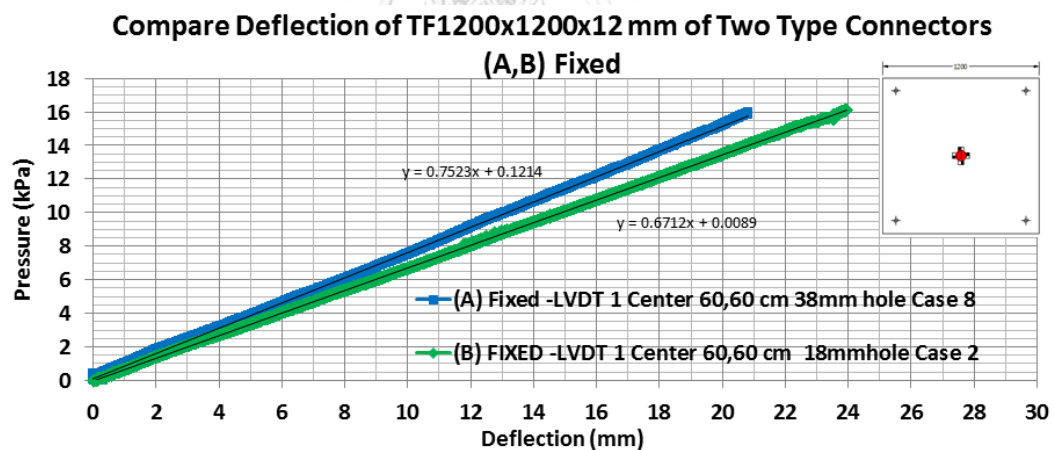
ผลการทดสอบการโค้งตัวของกระจากเมื่อรับแรง เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน โดยเปรียบเทียบในรูปของ แรงที่กระทำตั้งฉากต่อกระจาก (P) ต่อการโค้งตัว (δ) ที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจาก

สำหรับการติดตั้งแบบหมุนได้ (Pin) พบว่าตัวยึดต่อ (A) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อการโค้งตัวที่กลางแผ่นอยู่ที่ 675.90 Pa/mm และตัวยึดต่อ (B) มีค่าอยู่ที่ 697.20 Pa/mm ซึ่งจะเห็นว่าตัวยึดต่อ (B) ใช้แรงกระทำที่มากกว่าตัวยึดต่อ (A) อยู่ 21.30 Pa/mm หรือต่างกัน 3 % เพื่อให้เกิดการโค้งตัวที่เท่ากัน ซึ่งถือว่าไม่แตกต่างกัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบให้โค้งตัวเท่ากัน รูปที่ 4-11



รูปที่ 4-11 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระຈก ของตัวยึดต่อกระຈกที่ต่างชนิดกัน (A ,B) ติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin)

สำหรับการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) พบว่า ตัวยึดต่อ (A) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อการโก่งตัวที่กลางแผ่นอยู่ที่ 752.30 Pa/mm และตัวยึดต่อ (B) มีค่าอยู่ที่ 671.20 Pa/mm จะเห็นว่าตัวยึดต่อ (A) ใช้แรงกระทำที่มากกว่าตัวยึดต่อ (B) อยู่ 81.10 Pa/mm หรือต่างกัน 12% เพื่อให้เกิดการโก่งตัวที่เท่ากัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบให้โก่งตัวเท่ากัน ในรูปที่ 4-12



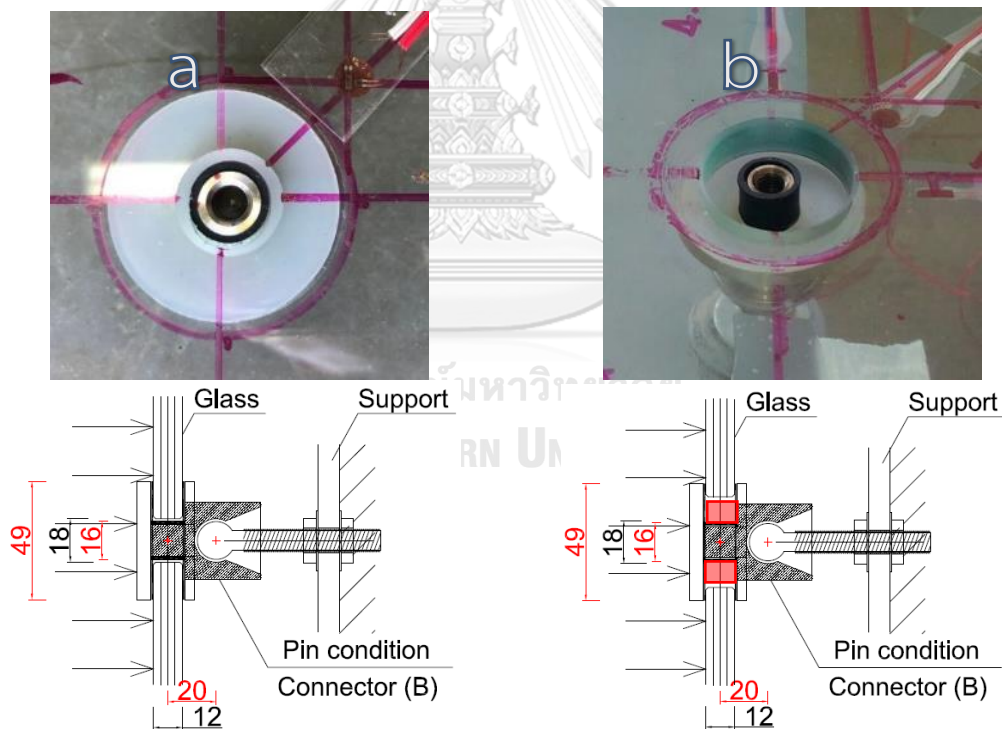
รูปที่ 4-12 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระຈก ที่ใช้ตัวยึดต่อกระຈกต่างชนิดกัน (A ,B) ติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

จะสังเกตเห็นว่า ตัวยึดจับกระຈกที่รูปร่างต่างกัน มีผลทำให้การโก่งตัวของกระຈก ต่างกันอยู่ที่ประมาณ 3% - 12% โดยการติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) มีความแตกต่างกันไม่มาก แต่จะพบว่าเมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) จะให้ผลการโก่งตัวต่างกันเพิ่มมากขึ้น

4.3 ผลของขนาดรูเจาะกระจกที่ต่างกัน (พอดี / หลวม) บนตัวยึดจับกระจกตัวเดียวกัน

การทดลองในหัวข้อนี้ ทำการทดสอบกระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200x12mm จำนวน 2 ตัวอย่าง ที่เจาะรู 4 รูต่อแผ่น โดยแผ่นที่ 1 รูเจาะขนาด 18 mm และแผ่นที่ 2 รูเจาะขนาด 38 mm ดังแสดงในรูปที่ 4-13 และทำการเจาะรูห่างจากขอบกระจกถึงศูนย์กลางรูเจาะเท่ากันทุกด้านที่ระยะ 100 mm โดยกระจกทั้ง 2 แผ่นทำการติดตั้งบนตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) ที่มีขนาดแกนเหล็กช่วงผ่านกระจก 13 mm และมียางรองรอบแกนเหล็กหนา 1.5 mm ทำให้มีความหนารวม 16 mm และมีลักษณะแกนจุดหมุนอยู่ด้านหลังแผ่นกระจก ติดตั้งในแนวนอน ใช้น้ำหนักของน้ำเป็นตัวกลางในการเพิ่มแรงทดสอบ ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านการรับแรง และการโก่งตัว

และในการเปรียบเทียบหัวข้อนี้ เพื่อหาข้อมูลปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การรับแรงของกระจก เปรียบเทียบกับหัวข้ออื่นก่อนหน้านี้นี้เท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงไม่สามารถนำกระจกที่มีรูเจาะขนาดใหญ่กว่าแกนยึดต่อกระจกมากกว่า + 3 mm ได้ เพราะจะมีปัญหาในการติดตั้ง การจัดวางตำแหน่ง การป้องกันน้ำ และอากาศเข้าภายในอาคารได้ โดยเฉพาะหากติดตั้งกระจกในแนวตั้ง (ผนังกระจก) ที่น้ำหนักตัวของกระจกมีผลต่อการติดตั้ง



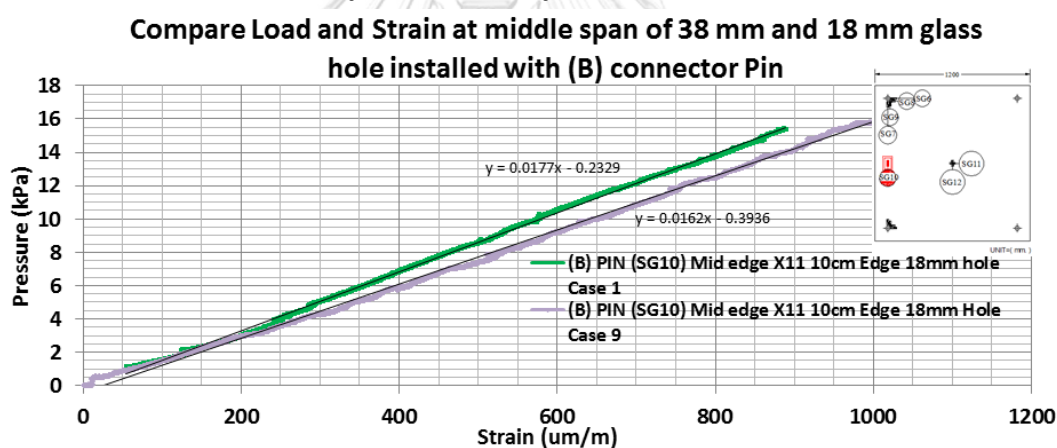
รูปที่ 4-13 แสดงการติดตั้งตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) บนกระจกเจาะรูขนาด

(a) 18 mm (b) 38 mm

4.3.1 ด้านการรับแรง เมื่อขนาดรูเจาะกระจกต่างกัน (พอดี/หลวม) บนตัวยึดจับกระจกตัวเดียวกัน

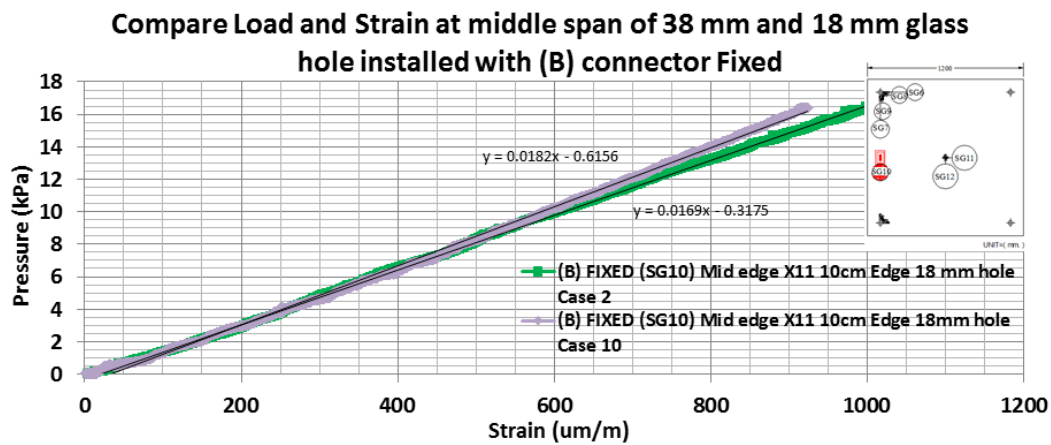
จากการทดสอบตัวอย่างกระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200x12mm ที่มีรูเจาะกระจก 2 ขนาด คือขนาดพอดี (Fit ,+2 mm) และขนาดใหญ่กว่าแกนยึดต่อกระจกมาก (Loose ,+22 mm) โดยทั้งคู่ติดตั้งบนตัวยึดต่อแบบเล็ก (B) นำมาเปรียบเทียบผลการทดสอบบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือแบบแกนหมุนได้อิสระ (Pin) และแบบแกนยึดแน่น (Fixed) ทำการเปรียบเทียบในรูปของ แรงที่กระทำตั้งฉากต่อกระจก (P) ต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียด (ϵ) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ จากขอบกระจกเข้าไป 100 mm

สำหรับการติดตั้งในลักษณะหมุนได้ (Pin) พบว่ากระจกที่เจาะรูพอดี (Fit) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อความเครียดอยู่ที่ 17.70 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) และกระจกที่เจาะรูหลวม (Loose) มีค่าที่ 16.20 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) จะเห็นว่าตัวยึดต่อ (B) ที่เจาะรูกระจกพอดี (Fit) ใช้แรงกระทำที่มากกว่าการติดตั้งกระจกเจาะรูหลวม (Loose) อยู่ 1.5 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือต่างกัน 9 % เพื่อให้เกิดความเครียดที่เท่ากัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบในรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-14 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระจก 100 mm ใช้ตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) บนกระจกเจาะรูขนาด 18 mm และ 38 mm ติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin)

และสำหรับการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) พบว่ากระจกที่เจาะรูพอดี (Fit) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อความเครียดที่ 16.90 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) และกระจกที่เจาะรูหลวม (Loose) มีค่า 18.20 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) จะเห็นว่าตัวยึดต่อ (B) ที่เจาะรูกระจกหลวม (Loose) ใช้แรงกระทำที่มากกว่ากระจกเจาะรูพอดี (Fit) อยู่ 1.3 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือต่างกัน 8 % เพื่อให้เกิดความเครียดที่เท่ากัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบใน รูปที่ 4-15



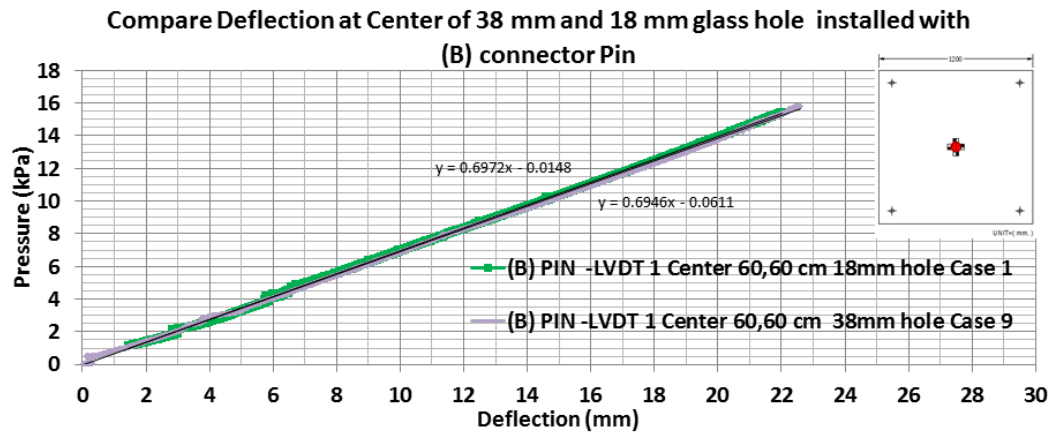
รูปที่ 4-15 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระจก 100 mm ใช้ตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) บนกระจกเงากระจกขนาด 18 mm และ 38 mm ติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า ขนาดของรูเจาะที่หลวม มีผลต่อการรับแรงของกระจกที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อที่มีจุดหมุนของแกนห่างจากแนวกึ่งกลางแผ่นกระจก เช่นตัวยึดต่อ (B) จะทำให้รับแรงได้ลดลง เมื่อติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) และรับแรงได้เพิ่มขึ้น เมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) แสดงให้เห็นว่าการที่แกนหลักของฐานรองรับกระจกแนบหรือชนกับ ขอบรูเจาะกระจกเมื่อรับแรง มีส่วนต่อ พฤติกรรมการรับแรงของกระจก ที่ติดตั้งตัวยึดต่อที่จุดหมุนของแกนยึด อยู่ห่างจากแนวกึ่งกลางแผ่นกระจกมากๆ ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 ด้านการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจก เมื่อกระจกเงากระจกขนาด (พอดี/หลวม) ต่างกัน

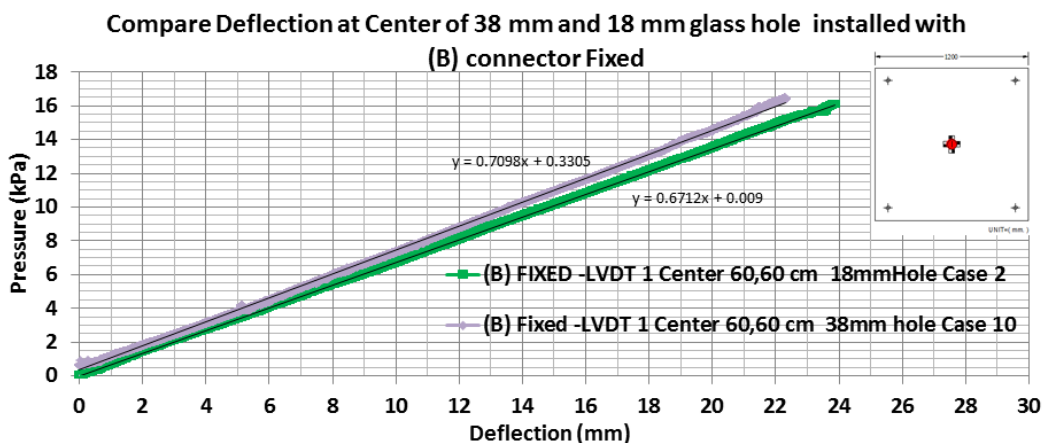
เมื่อเปรียบเทียบในรูปของ แรงที่กระทำตั้งฉากต่อกระจก (P) ต่อการโก่งตัว (δ) ที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจก สำหรับการติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบหมุนได้ (Pin) พบว่า กระจกที่เจาะรูพอดี (Fit) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจกอยู่ที่ 697.20 Pa/mm และกระจกที่เจาะรูหลวม (Loose) มีค่าอยู่ที่ 694.60 Pa/mm ซึ่งจะเห็นใช้แรงกระทำต่างกัน 2.60 Pa/mm หรือเพียง 0.4 % ซึ่งไม่ต่างกัน ในการให้เกิดการโก่งตัวที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4-16



รูปที่ 4-16 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจกที่ใช้ตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) บนกระจกเงาขนาด 18 mm และ 38 mm และตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) บนกระจกเงาขนาด 38 mm ติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin)

และเมื่อติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบแกนยึดแน่น (Fixed) พบว่า กระจกที่เงารูปอติ (Fit)) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจกอยู่ที่ 671.20 Pa/mm และกระจกที่เงารวม (Loose) มีค่าอยู่ที่ 709.80 Pa/mm จะเห็นว่าตัวยึดต่อ (B) ใช้แรงกระทำที่มากกว่าตัวยึดต่อ (A) อยู่ 38.60 Pa/mm หรือ 6 % เพื่อให้เกิดการโก่งตัวที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4-17

การที่รูเจาะกระจกมีขนาดต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อการโก่งตัวเมื่อติดตั้งตัวยึดต่อแบบแกนหมุนได้ (Pin) แต่จะแตกต่างกันเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)



รูปที่ 4-17 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจกที่ใช้ตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) บนกระจกเงาขนาด 18 mm และ 38 mm ติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

4.4 ผลของขนาดกระจกต่างกัน

การทดลองในหัวข้อนี้ ได้ทำการทดสอบกระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200x12mm และขนาด 1200x2400x12mm ขนาดละ 1 ตัวอย่าง ที่เจาะรูขนาด 38 mm จำนวน 4 รูต่อแผ่น รูห่างจากขอบกระจกถึงศูนย์กลางรูเจาะเท่ากันทุกด้านที่ระยะ 100 mm โดยกระจกทำการติดตั้งบนตัวยึดต่อกระจกผลิตภัณฑ์ตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) ทั้ง 2 แผ่น แต่กระจกขนาด 1200x1200x12 mm ติดตั้งในแนวนอน (พื้น หรือหลังคา) ใช้น้ำหนักของน้ำเป็นตัวกลางในการเพิ่มแรงทดสอบ และกระจกขนาด 1200x2400 mm ติดตั้งในแนวตั้ง (ผนังอาคาร) และใช้แรงดันของอากาศเป็นตัวกลางในการเพิ่มแรงทดสอบ ทำการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านการรับแรง และการโก่งตัว

สาเหตุที่ใช้ตัวกลางในการเพิ่มแรงที่แตกต่างกันเนื่องจากข้อจำกัดด้านเครื่องมือที่ใช้เพิ่มแรงที่ต้องการใช้ในการทดสอบ ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบที่แตกต่างกัน ทำการศึกษา

4.4.1 ด้านการรับแรง จากการที่ขนาดกระจกที่ต่างกัน

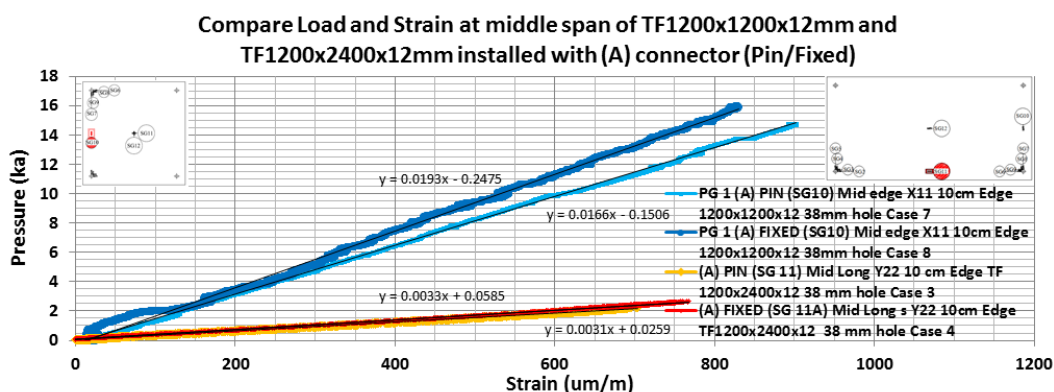
จากการทดสอบตัวอย่างกระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200x12mm และขนาด 1200x2400x12mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อ (A) นำมาเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงการรับแรงระหว่างการติดตั้งแบบแแกนหมุนได้ (Pin) และแบบแแกนยึดแน่น (Fixed) ของกระจกที่ขนาดต่างกัน โดยทำการเปรียบเทียบในรูปของ เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของ แรงที่กระทำต่อกระจก (P) ต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียด (ϵ) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านยาวกว่า จากขอบกระจกเข้าไป 100 mm

สำหรับ กระจกขนาด 1200x1200x12mm ติดตั้งแบบแแกนหมุนได้ (Pin) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อความเครียดอยู่ที่ 16.60 Pa/(um/m) และการติดตั้งแบบแแกนยึดแน่น (Fixed) มีค่าอยู่ที่ 19.30 Pa/(um/m) หรือต่างกัน 16 % เพื่อให้เกิดความเครียดที่เท่ากัน ส่วนกระจกขนาด 1200x2400x12mm ติดตั้งแบบแแกนหมุนได้ (Pin) มีค่า 3.10 Pa/(um/m) และการติดตั้งแบบแแกนยึดแน่น (Fixed) มีค่า 3.30 Pa/(um/m) หรือต่างกัน 6.5 % เพื่อให้เกิดความเครียดที่เท่ากัน ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบในดังแสดงในรูปที่ 4-18

การรับแรงได้เพิ่มขึ้น จากการเปลี่ยนการติดตั้งจากแแกนหมุนได้ (Pin) ไปเป็นแบบแแกนยึดแน่น (Fixed) เนื่องจากที่ขอบฐานรองรับไม่หมุนตามการเอียงของกระจก ทำให้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (Clear span) ลดลง แต่จากการที่กระจกมีความยาวเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนของความยาว

กระจกที่เพิ่มขึ้น ต่อระยะ Clear span จากขอบฐานที่ลดลง เปลี่ยนแปลงไปด้วย เป็นผลทำให้เปอร์เซ็นต์การรับแรงที่เพิ่มขึ้น จะลดลงตามขนาดของกระจกที่ยาวขึ้น

จากการทดสอบพบว่ากระจกสามารถรับแรงได้มากกว่า 4,600 Pa ซึ่งสูงกว่าค่าที่ ASTM E1300 กำหนดไว้ และพบว่ากระจกขนาด 1200x2400x1200 ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อ (A) เมื่อต้องการทำให้กระจก มีความเค้นที่ผิวกระจกมีค่าเท่ากับ 73 MPa ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ ASTM E1300 ยอมให้ใช้สำหรับกระจกเทมเปอร์ ต้องใช้แรง 3,7000 Pa และประมาณ 4,000 Pa สำหรับการติดตั้ง แบบแกนหมุนได้อิสระ (Pin) และแบบแกนยึดแน่น (Fixed) ตามลำดับ

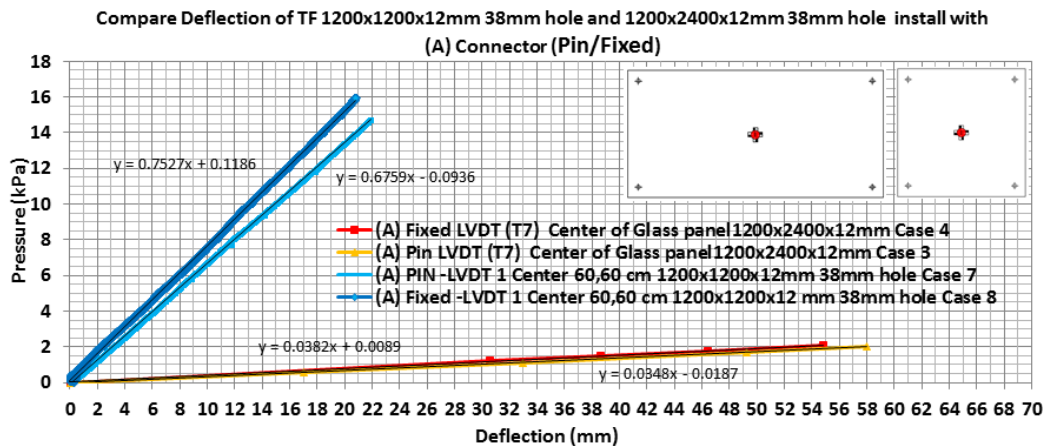


รูปที่ 4-18 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเครียดที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับด้านห่างจากริมขอบกระจก 100 mm ของกระจกที่มีขนาด 1200x1200x12mm และ 1200x2400x12mm ที่ติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) เปรียบเทียบกับการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

4.4.2 ด้านตำแหน่งและระยะการโก่งตัว ของขนาดกระจกที่ต่างกัน

จากการทดสอบตัวอย่างกระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200x12mm และขนาด 1200x2400x12mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อ (A) โดยเปรียบเทียบในรูปของ แรงที่กระทำตั้งฉากต่อกระจก (P) ต่อการโก่งตัว (δ) ที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจก สำหรับกระจกขนาด 1200x1200x12mm ติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ต่อการโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจก อยู่ที่ 675.90 Pa/mm และการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) มีค่าอยู่ที่ 752.30 Pa/mm หรือต่างกัน 11 % เพื่อให้เกิดการโก่งตัวที่เท่ากัน ส่วนกระจกขนาด 1200x2400 mm ติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) มีค่าอยู่ที่ 34.80 Pa/mm และการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) มีค่าอยู่ที่ 38.20 Pa/mm ต้องใช้แรงกระทำที่มากกว่า 10 % เพื่อให้เกิดการโก่งตัวที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4-19

จะเห็นได้ว่ากระจกที่มีขนาดต่างกัน ไม่กระทบต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงการโก่งตัว ที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีเปลี่ยนลักษณะติดตั้งจากแกนหมุนได้ (Pin) ไปเป็นแบบแกนยึดแน่น (Fixed)



รูปที่ 4-19 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัว ของกระจกที่มีขนาด 1200x1200x12mm และ 1200x2400x12mm ที่ติดตั้งแบบแแกนหมุนได้ (Pin) เปรียบเทียบกับแบบแแกนยึดแน่น (Fixed)

4.5 การกระจายความเครียดที่ผิวกระจกเมื่อรับแรง ในลักษณะที่ต่างกัน

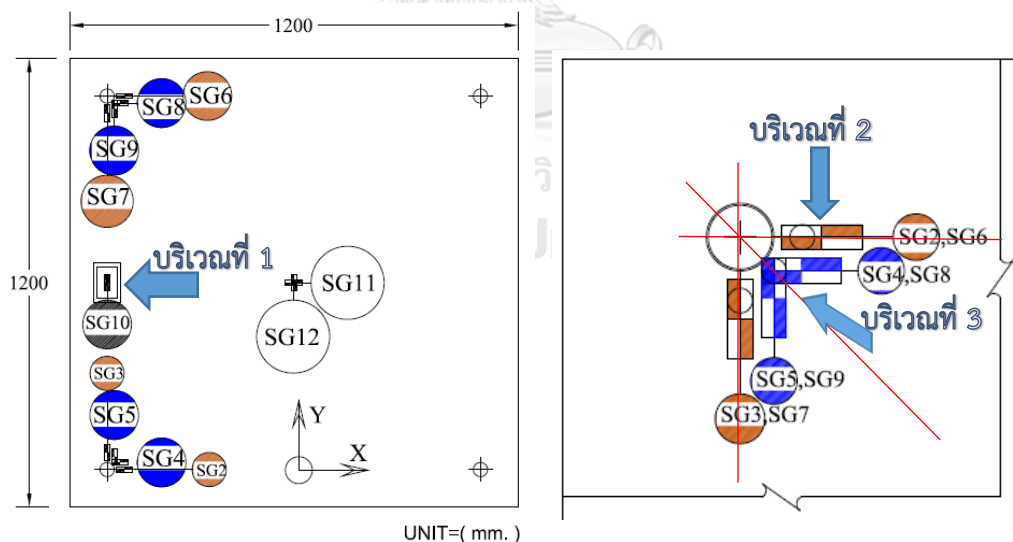
จากการทดสอบกระจกขนาด 1200x1200x12 mm. ใน 8 ลักษณะที่แตกต่างกัน ทำการเปรียบเทียบความเครียดที่เกิดบนกระจกจากการทดสอบ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามขนาดความเครียดที่เกิดขึ้นจากการรับแรง คือ

- 1) บริเวณที่ 1 กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับห่างจากขอบกระจกเข้าไป 100 mm (Middle span)
โดยติดตั้งเครื่องวัดความเครียด (Strain gauge,SG) แบบ 1 แแกนสำหรับกระจก 1200x1200x12 mm ติดตั้งไว้ตามแนวขนานกับขอบกระจก X=0 องศา (Mid Edge 10cm) ตัวอย่างกระจกละ 1 จุด ห่างจากขอบกระจก 100 mm (SG10) ตาม รูปที่ 4-20 และ สำหรับกระจก 1200x2400x12 mm ติดตั้งไว้ตามแนวขนานกับขอบกระจกด้านสั้น (SG10 X=0 องศา ,Mid Edge 10cm) 1 จุด ห่างจากขอบกระจก 100 mm และ ติดตั้งไว้ที่แนวขนานกับขอบกระจกด้านยาว (SG11 Y=90 องศา ,Mid Edge 10cm) 1 จุด ห่างจากขอบกระจก 100 mm ตามรูปที่ 4-21
- 2) บริเวณที่ 2 รอบจุดรองรับ ในตำแหน่งขนานแนวขอบกระจก (0 องศา และ 90 องศา)

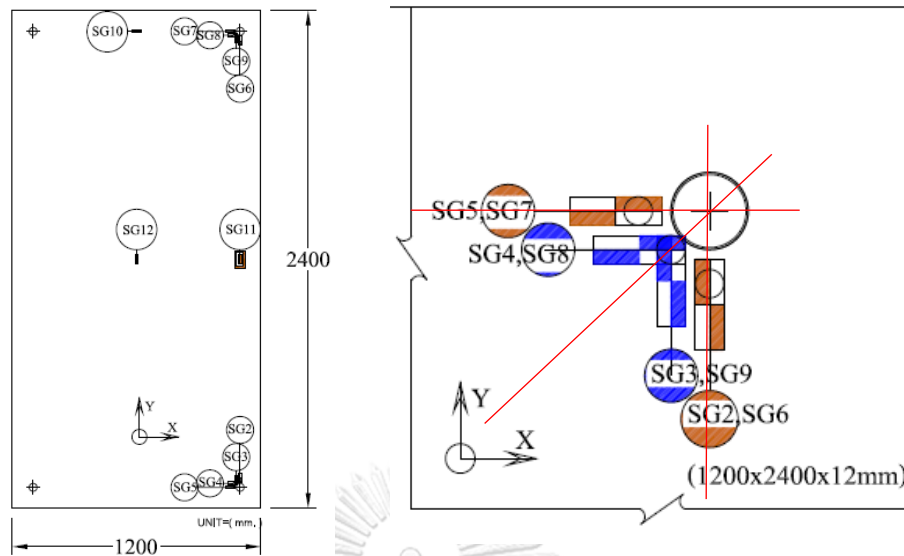
โดยติดตั้ง Strain gauge แบบ 1 แขนห่างจากศูนย์กลางรูเจาะกระจกประมาณ 30-40 mm ซึ่งจะระบุระยะจริงไว้ในชื่อเรียกของแต่ละ Strain gauge ไว้แล้ว ในแนวขนานกับแนวขอบกระจก (X=0 องศา , Y=90 องศา) เข้าไป 100 mm กระจกละ 4 ตัวโดยติดตั้งรอบรูเจาะ 2 รู รูเจาะละ 2 จุด ตามรูปที่ 4-20 และรูปที่ 4-21

- 3) บริเวณที่ 3 รอบจุดรองรับ ในตำแหน่งทำมุมทแยง (45 องศา และ 60 องศา) กับขอบกระจก

โดยสำหรับกระจกขนาด 1200x1200x12mm ติดตั้ง Strain gauge แบบวัดค่า 2 แขนที่ตั้งฉากกัน ในแนวแกน X,Y ตำแหน่งติดตั้งจากศูนย์กลางรูเจาะ 30-40 mm ที่ทำมุมกับขอบกระจก X=Y= 45 องศา 1 จุดต่อ 1 รูเจาะทั้งหมด 2 รูเจาะตามรูปที่ 4-20 และสำหรับกระจกขนาด 1200x2400x12mm ติดตั้ง Strain gauge แบบวัดค่า 2 แขนที่ตั้งฉากกัน ในแนวแกน X,Y โดยตำแหน่งติดตั้งจากศูนย์กลางรูเจาะ 30-40 mm ที่ทำมุมกับขอบกระจก X= 60 องศา, Y= 30 องศา 1 จุดและติดตั้ง Strain gauge ทำมุม กับขอบกระจก X=Y= 45 องศา 1 จุด ตามรูปที่ 4-21



รูปที่ 4-20 ตำแหน่งการติดตั้ง และการกำหนดชื่อของ Strain gauge แต่ละตำแหน่ง ที่ติดตั้ง อยู่ผิวกระจก 1200x1200x12mm ด้านหลังการรับแรง



รูปที่ 4-21 ตำแหน่งการติดตั้ง และการกำหนดชื่อของ Strain Gauge แต่ละตำแหน่ง ที่ติดตั้ง อยู่ผิวกระฉาก 1200x2400x12mm ด้านหลังการรับแรง

และการกำหนดรายละเอียดชื่อบน Strain Gauge แต่ละตัวในการทดสอบ ซึ่งปรากฏในกราฟ แสดงผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

SG10 (+)Sup11 00 X11 3.95cmCL.A

AAA (B)CCCC DD EEE F.FFcmGGG.H

AAA = ชื่อของ Strain Gauge แต่ละตัว เริ่มต้นจาก SG2-SG15

B = ลักษณะการยืด-หด ตัวของ Strain gauge เมื่อมีแรงกระทำ (+)=ยืด , (-) = หด

CCCC = ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain gauge ที่รอบรูเจาะแต่ละรูบนกระฉากทดสอบทั้งหมด 3 แผ่น 12 รู โดยเริ่มต้นจาก Sup 1 ถึง Sup12

DD = ตำแหน่งติดตั้ง Strain gauge ระบุตามองศาที่ขนานกับขอบกระฉาก โดยมีขนาด ตั้งแต่ 00 องศาถึง 90 องศา

EEE = ทิศทางการติดตั้ง Strain gauge เพื่อวัดค่าความเครียดในแนว X หรือ Y โดย X11=ติดตั้งตามแนวแกน X และ Y22=ติดตั้งตามแนวแกน Y (11, 22 ใช้ในการอ้างอิงแกนในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์)

F.FF = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางรูเจาะ หรือขอบกระฉาก ให้หน่วยเป็น เซนติเมตร (cm)

GG = จุดที่ใช้อ้างอิงระยะติดตั้งโดย CL= ศูนย์กลางรูเจาะกระฉาก, Mid Edge = ขอบกระฉากที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ

.H = ชนิดของ Strain gauge ที่ใช้ติดตั้งโดย A = วัดค่าแกนเดียว, B= วัดค่า 2 แกน
(เพื่อการปรับแต่งค่าประกอบของอุปกรณ์ที่ต่างกัน ตามผู้ผลิตแนะนำ)

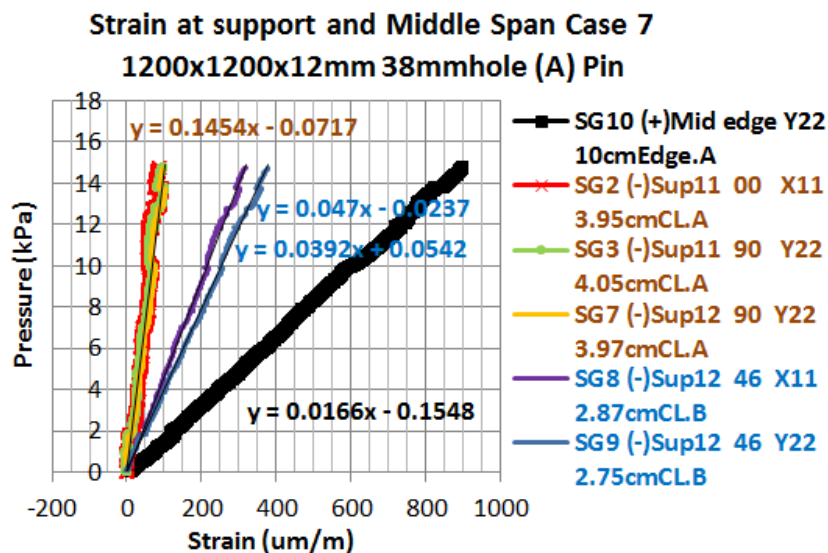
4.5.1 ผลการกระจายแรง เมื่อ ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin) เปรียบเทียบกับ แบบแกนยึดแน่น (Fixed)

จากผลการทดสอบกระจกทดสอบ 1200x1200x12mm ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 7) มีการกระจายค่าความเครียดใน 3 บริเวณแตกต่างกันตามแสดงในรูปที่ 4-22

บริเวณที่ 1 (กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ, Middle span) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดที่ 16.6 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$)

บริเวณที่ 2 (รอบจุดรองรับขนานแนวขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 145.4 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือคิดเป็น 11.4% ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน

บริเวณที่ 3 (รอบจุดรองรับ ทามุมทแยงกับขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 39.2-47.0 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรืออยู่ในช่วง 35.0% - 42.3% ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน



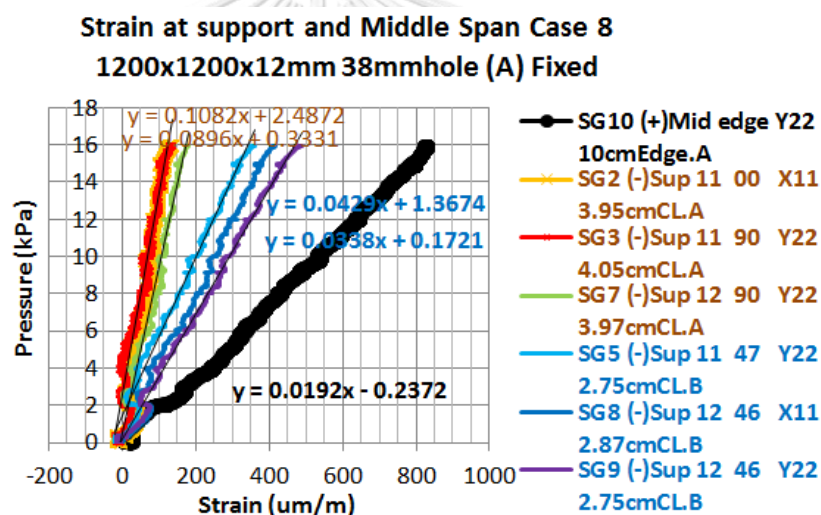
รูปที่ 4-22 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด ณ ตำแหน่ง Strain gauge ต่างๆบนกระจก ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 7)

แต่เมื่อเปลี่ยนการติดตั้งเป็นแบบแกนยึดแน่น (Fixed, Case 8) พบว่ามีการกระจายค่าความเครียดใน 3 บริเวณแตกต่างกันตามแสดงใน รูปที่ 4-23 โดย

บริเวณที่ 1 (กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ ด้านขอบกระຈก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดที่ 19.2 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) ด้านทานแรงเพิ่มขึ้นจากในกรณีติดตั้งแบบแแกนหมุนได้ (Pin) คิดเป็น 15.6%

บริเวณที่ 2 (รอบจุดรองรับขนานแนวขอบกระຈก) มีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 89.6–108.2 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือคิดเป็น 17.7% - 21.4% เมื่อเทียบกับบริเวณที่ 1 ในกรณีเดียวกัน และด้านทานแรงได้ลดลงจากบริเวณเดียวกันในกรณีติดตั้งแบบแแกนหมุนได้ (Pin) คิดเป็น 6.3% - 10%

บริเวณที่ 3 (รอบจุดรองรับ ทามุมทแยงกับขอบกระຈก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 33.8-42.9 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือคิดเป็น 44.8% - 56.8% เมื่อเทียบกับบริเวณที่ 1 ในกรณีเดียวกัน และด้านทานแรงได้ลดลงจากบริเวณเดียวกันในกรณีติดตั้งแบบแแกนหมุนได้ คิดเป็น 9.8% - 14.5%



รูปที่ 4-23 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด ของ Strain gauge ต่างๆบนกระຈก ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระຈกขนาดใหญ่ (A) แบบแแกนยึดแน่น (Fixed, Case 8)

เห็นได้ว่าการติดตั้งตัวยึดต่อ (A) มีการกระจายความเครียดตามแนวแแกน ใน 3 บริเวณจากมากไปหาน้อย เรียงลำดับดังนี้ บริเวณที่ 1 => บริเวณที่ 3 => บริเวณที่ 2 และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการติดตั้งจากแแกนหมุนได้ (Pin) ไปเป็น แบบแแกนยึดแน่น (Fixed) การเรียงลำดับยังคงเหมือนกรณีแบบแแกนหมุนได้ (Pin) และโดยรวมทำให้กระຈกสามารถด้านทานแรงในบริเวณที่ 1 ได้ดีขึ้น 15.6% แต่ทำให้มีความเครียดที่รอบจุดรองรับในบริเวณที่ 2 และ 3 เพิ่มขึ้นกว่าเดิม 6%-14% แต่อย่างน้อยกว่าที่บริเวณที่ 1 และค่าที่วัดได้เป็นค่าความเครียดตามแนวแแกน ไม่ใช่ค่า ความเครียดหลัก (Principle strain) ซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์เพิ่มเติมว่า จะมีค่าสูงสุดเท่าไร ที่บริเวณใดในแผ่นกระຈก

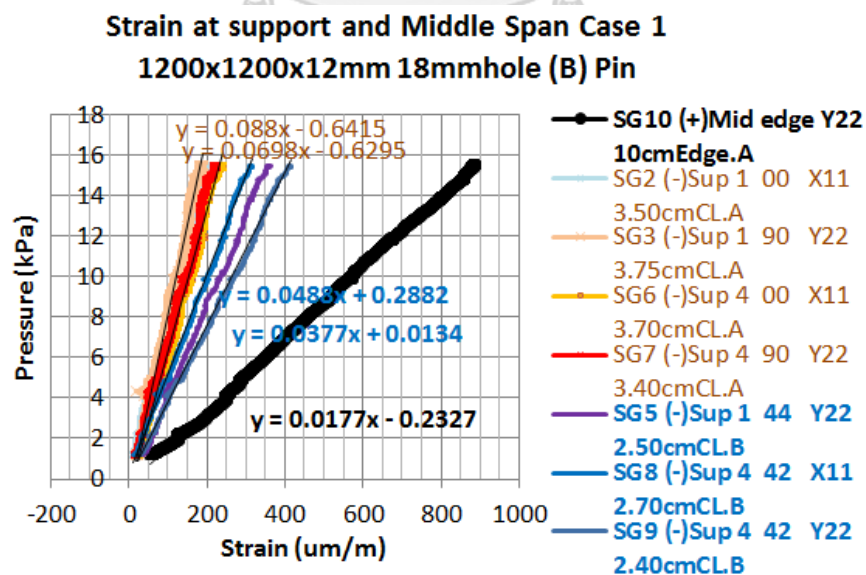
ทดสอบ โดยอาจใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการช่วยวิเคราะห์ต่อไป และพบว่าที่บริเวณรอบจุดรองรับ ณ ตำแหน่ง บริเวณที่ 3 (แนวทแยงมุม) จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด น้อยกว่าบริเวณที่ 2 (แนวขนานขอบกระจก) ทั้งในกรณี แกนหมุนได้ (Pin) และแกนยึดแน่น (Fixed) หมายถึงจะเกิดความเครียดรอบจุดรองรับสูงสุดที่บริเวณที่ 3 (แนวทแยงมุม)

4.5.2 ผลการกระจายแรง บนตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) ที่ติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) และการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

จากผลการทดสอบกระจกทดสอบ 1200x1200x12mm ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อ (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 1) พบว่ามีการกระจายค่าความเครียดใน 3 บริเวณตามแสดงใน รูปที่ 4-24 โดย บริเวณที่ 1 (กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับจากขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดที่ 17.7 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$)

บริเวณที่ 2 (รอบจุดรองรับขนานแนวขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 69.8 – 88.0 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) คิดเป็น 20.1%-25.4% ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน

บริเวณที่ 3 (รอบจุดรองรับ ทำมุมทแยงกับขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 33.7-48.8 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) คิดเป็น 36.3% - 52.5% ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน



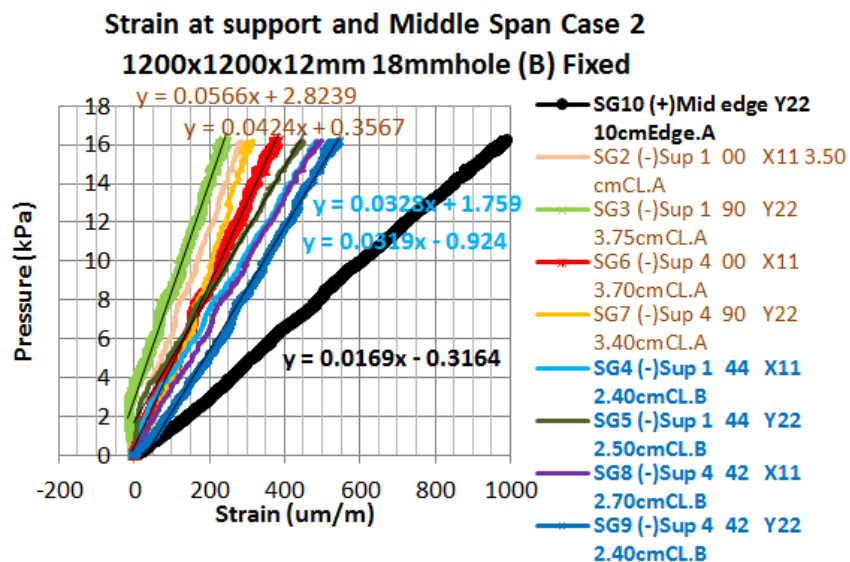
รูปที่ 4-24 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด ของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระจก ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดเล็ก (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 1)

แต่เมื่อเปลี่ยนการติดตั้งเป็นแบบแกนยึดแน่น (Fixed, Case 2) พบว่ามีการกระจายค่าความเครียดใน 3 บริเวณแตกต่างกันตามแสดงใน รูปที่ 4-25 โดย

บริเวณที่ 1 (กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ ด้านขอบกระຈก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดที่ 16.9 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) ด้านทานแรงลดลงจากการแบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 1) คิดเป็น 4.5% และน้อยกว่า Case 8 คิดเป็น 12%

บริเวณที่ 2 (รอบจุดรองรับขนานแนวขอบกระຈก) มีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 42.4–56.6 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือคิดเป็น 29.9% - 39.9% เมื่อเทียบกับบริเวณที่ 1 ในกรณีเดียวกัน และด้านทานแรงได้ลดลงจากบริเวณเดียวกันของแบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 1) คิดเป็น 9.8% - 14.5% แต่ทั้งนี้จาก รูปที่ 4-25 จะพบว่าบริเวณที่ 2 นี้ไม่มีการเพิ่มของความเครียดช่วงแรกจนถึงกระทั่งแรงกระทำถึงระดับประมาณ 2 kPa ขึ้นไปจึงจะมีการเพิ่มความเครียด ซึ่งอาจเกิดจากการเคลื่อนตัวของจุดรองรับในช่วงแรก

บริเวณที่ 3 (รอบจุดรองรับ ทำมุมทแยงกับขอบกระຈก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 31.9–32.8 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือคิดเป็น 51.5% - 53% เมื่อเทียบกับบริเวณที่ 1 ในกรณีเดียวกัน และด้านทานแรงได้ลดลงจากบริเวณเดียวกับของแบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 1) คิดเป็น 0.5% -15.2%



รูปที่ 4-25 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียดของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระຈก ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระຈกขนาดเล็ก (B) แบบแกนยึดแน่น (Fixed, Case 2)

จะเห็นได้ว่าการติดตั้งตัวยึดต่อ (B) มีการกระจายแรงตามแนวแกน ใน 3 บริเวณจากมากไปหาน้อยเรียงลำดับดังนี้ บริเวณที่ 1 => บริเวณที่ 3 => บริเวณที่ 2 และเมื่อมีการเปลี่ยนลักษณะการติดตั้งจากแกนหมุนได้ (Pin) ไปเป็น แบบแกนยึดแน่น (Fixed) ยังมีการเรียงลำดับที่เหมือนกัน และโดยรวมทำให้กระจกสามารถต้านทานแรงได้ลดลงทุกบริเวณ โดยบริเวณที่ 1 ลดลง 4.5% บริเวณที่ 2 ลดลง 10%-15% และบริเวณที่ 3 ลดลง 0.5%- 15% (แต่ค่าที่วัดได้เป็นค่าความเครียดตามแนวแกน ไม่ใช่ค่า ความเครียดหลัก (Principle strain))

จากข้อมูลที่ได้ทำให้เห็นได้ว่า ในกรณีตัวยึดต่อกระจกที่มีลักษณะแกนจุดหมุนของตัวยึดต่ออยู่ห่างจากแนวกึ่งกลางแผ่นกระจกมากๆ เมื่อติดตั้งแบบแกนหมุนได้จะทำให้กระจกรับแรงได้สูงกว่า โดยที่ไม่เพิ่มความเครียดที่รอบจุดรองรับ ซึ่งแตกต่างจากลักษณะแกนจุดหมุนของตัวยึดต่ออยู่ใกล้กับแนวกึ่งกลางแผ่นกระจกคล้ายกับตัวยึดต่อ (A) โดยสิ้นเชิง ฉะนั้นการประมาณรูปแบบการกระจายแรง ความเค้น และความเครียดบนแผ่นกระจก จำเป็นต้องพิจารณาลักษณะตัวยึดต่อว่ามีตำแหน่งของแกนจุดหมุนของตัวยึดต่อ เทียบกับแนวกึ่งกลางแผ่นกระจก เป็นอย่างไร และพิจารณาลักษณะการติดตั้งว่าแบบแกนหมุนได้ (Pin) หรือแบบแกนยึดแน่น (Fixed) เป็นปัจจัยประกอบในการพิจารณาการกระจายแรง และความเครียดบนแผ่นกระจก นั้นๆ

4.5.3 ผลการกระจายแรง เมื่อกระจกมีขนาดรูเจาะที่หลวมกว่าแกนของตัวยึดต่อกระจก (B) มาก

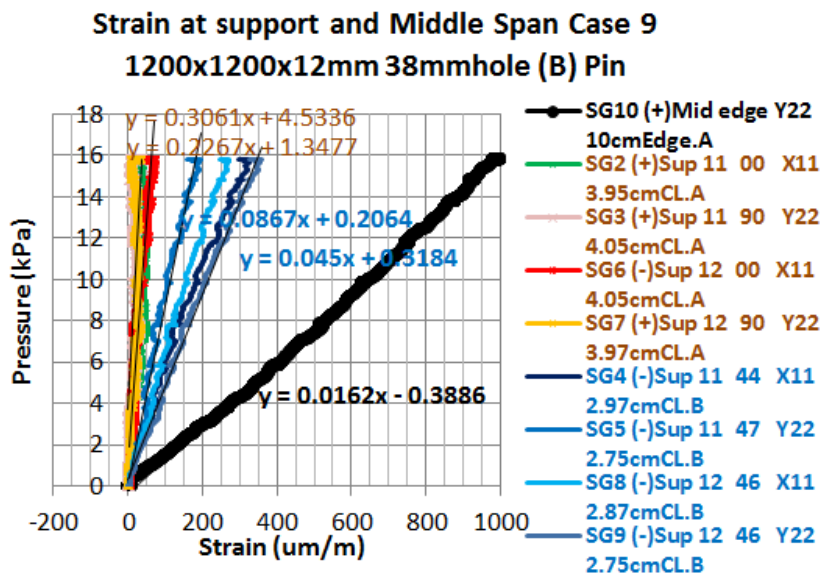
จากผลการทดสอบกระจกทดสอบ 1200x1200x12mm เจาะรูขนาด 38mm และติดตั้งด้วยตัวยึดต่อ (B) (หลวม) แบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 9) ซึ่งการทดสอบนี้เป็นเพียงการหาความสัมพันธ์ของการกระจายแรง เนื่องจากเงื่อนไขการติดตั้งที่ต่างกัน ไม่สามารถนำไปติดตั้งได้จริงเพราะจะเกิดการเคลื่อนตัวของแผ่นกระจกจนไม่สามารถรักษาตำแหน่งติดตั้งได้ และไม่สามารถป้องกันน้ำหรือลมลอดผ่านช่องว่างระหว่างรูเจาะได้ โดยการทดสอบพบว่ามีการกระจายค่าความเครียดใน 3 บริเวณแตกต่างกันตามแสดงใน รูปที่ 4-26 โดย

บริเวณที่ 1 (กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับจากขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดที่ 16.2 Pa/(um/m) ลดลงจากกรณี รูเจาะพอดี (Case 1) ที่บริเวณเดียวกัน 4%

บริเวณที่ 2 (รอบจุดรองรับขนานแนวขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 226.7 – 306.1 Pa/(um/m) หรือคิดเป็น 5.3% - 7.1% ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน และมีต้านทานแรงดีกว่ากรณีรูเจาะขนาดพอดี (Case 1) คิดเป็น 15% - 18% (มีความเครียดน้อยกว่า)

บริเวณที่ 3 (รอบจุดรองรับ ทามุมทแยงกับขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 45.0-86.7 Pa/(um/m) หรืออยู่ในช่วง 18.7% - 36% ของบริเวณที่ 1 กรณี

เดียวกัน และมีต้านทานแรงดีกว่ากรณีรูเจาะขนาดพอดี (Case 1) คิดเป็น 16% - 17% (มีความเครียดน้อยกว่า)



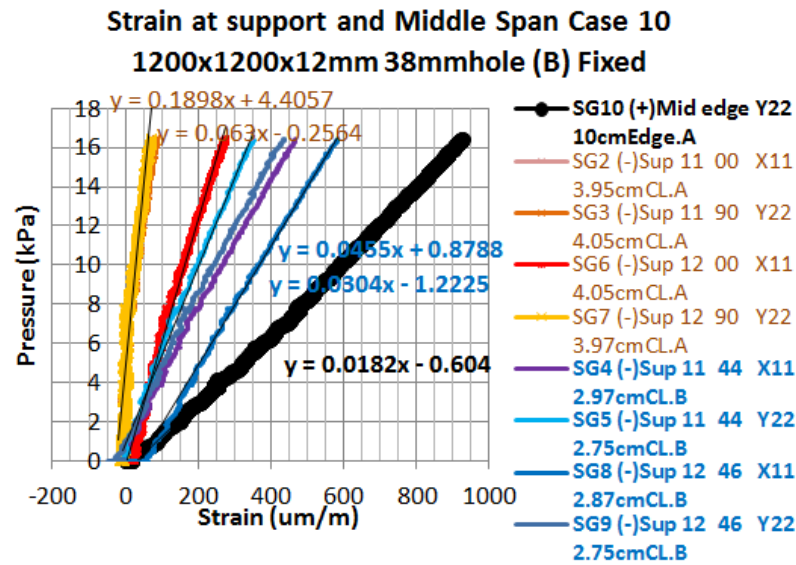
รูปที่ 4-26 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียด ของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระจุกรูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจุกขนาดเล็ก (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 9)

และเมื่อเปลี่ยนการติดตั้งเป็นแบบแกนยึดแน่น (Fixed, Case 10) พบว่าการกระจายค่าความเครียดใน 3 บริเวณแตกต่างกันตามแสดงใน รูปที่ 4-27 โดย

บริเวณที่ 1 (กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ ด้านขอบกระจุก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดที่ 18.2 Pa/(um/m) ต้านทานแรงเพิ่มขึ้นจากแบบแกนหมุนได้ (Case 9) คิดเป็น 12.3%

บริเวณที่ 2 (รอบจุดรองรับขนานแนวขอบกระจุก) มีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 63.0-189.8 Pa/(um/m) หรือคิดเป็น 9.6% - 28.9% เมื่อเทียบกับบริเวณที่ 1 ในกรณีเดียวกัน และต้านทานแรงได้เพิ่มขึ้นจากบริเวณเดียวกันในกรณีติดตั้งแบบแกนหมุนได้ คิดเป็น 11% -20.3%

บริเวณที่ 3 (รอบจุดรองรับ ทำมุมทแยงกับขอบกระจุก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 30.4-45.5 Pa/(um/m) หรือคิดเป็น 40% - 60% เมื่อเทียบกับบริเวณที่ 1 ในกรณีเดียวกัน และต้านทานแรงมีช่วงที่กว้างกว่า (เพิ่มขึ้น และลดลง) บริเวณเดียวกันในกรณีติดตั้งแบบแกนหมุนได้ คิดเป็น 20%



รูปที่ 4-27 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียดของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระจุกูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจุกขนาดเล็ก (B) แบบแกนยึดแน่น (Fixed, Case 10)

จากการทดสอบกระจุกที่มีรูเจาะหลวม เมื่อติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin) พบว่าที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับมีความสามารถต้านทานแรงลดลง 5% และที่รอบจุดรองรับมีความเครียดน้อยกว่า 15%-18% เมื่อเทียบกับกรณีที่กระจุกมีรูเจาะพอดี แสดงให้เห็นว่า แกนโลหะของตัวยึดต่อที่สัมผัสกับผิวของรูเจาะกระจุกมีส่วนในการเพิ่มความสามารถต้านทานแรงให้สูงขึ้น หากมีการสัมผัสกัน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจำเป็นต่อการพิจารณาเงื่อนไขในการสร้างแบบจำลองต่อไป

ในทางกลับกัน เมื่อติดตั้งในลักษณะแกนยึดแน่น (Fixed) กระจุกที่มีรูเจาะหลวม ก็ทำให้ความสามารถต้านทานเพิ่มขึ้น กว่ากรณีติดตั้งแบบแกนหมุนได้ โดยสามารถต้านทานแรงเพิ่มขึ้น 12.3% และต้านทานแรงได้มากกว่า การติดตั้งแบบแกนยึดแน่นในกระจุกที่รูเจาะขนาดพอดี 7.7% แสดงให้เห็น แกนโลหะของตัวยึดต่อสัมผัสผิวของรูเจาะกระจุกจะมีส่วนในการ ลดความสามารถต้านทานแรงให้ต่ำลง แต่ความสามารถต้านทานแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการไม่สัมผัสกันของผิววัสดุ ดังกล่าว ยังน้อยกว่าในกรณีของตัวยึดต่อ (A) ติดตั้งแบบแกนยึดแน่น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฐานรองรับที่ใหญ่กว่า อยู่ประมาณ 5% จึงคาดการณ์ได้ว่าเมื่อติดตั้งตัวยึดต่อแบบแกนยึดแน่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฐานรองรับ และการไม่สัมผัสกันของแกนโลหะกับผิวของรูเจาะกระจุก มีส่วนในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรง

4.5.4 ผลการกระจายแรง เมื่อขนาดกระจกต่างกัน (อัตราส่วน กว้าง:ยาว = 1:2)

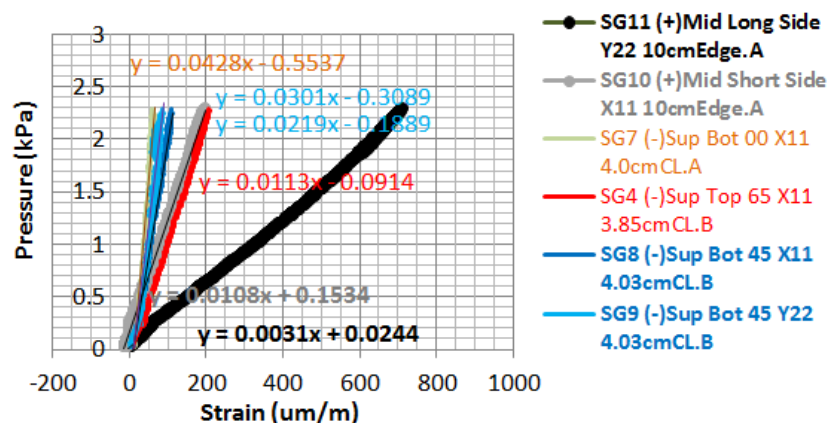
จากผลการทดสอบกระจกทดสอบ 1200x2400x12mm เจาะรูขนาด 38mm และติดตั้งด้วยตัวยึดต่อ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 3) พบว่ามีการกระจายค่าความเครียดใน 3 บริเวณแตกต่างกันตามแสดงใน รูปที่ 4-28 โดย

บริเวณที่ 1 (กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับจากขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียด สำหรับด้านยาวของแผ่นอยู่ที่ 3.1 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) และสำหรับด้านสั้นของแผ่นอยู่ที่ 10.8 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$)

บริเวณที่ 2 (รอบจุดรองรับขนานแนวขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 42.8 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือคิดเป็น 7.2% ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน (Strain gauge ตัวอื่นมีปัญหาในการอ่านค่าระหว่างการทดสอบ)

บริเวณที่ 3 (รอบจุดรองรับ ทำมุมทแยงกับขอบกระจก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียด ตำแหน่งติดตั้งทำมุม 45 องศา อยู่ในช่วง 21.9-30.1 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือ 10%-14% ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน และตำแหน่งติดตั้งทำมุม 65 องศา อยู่ในช่วง 11.3 Pa/($\mu\text{m}/\text{m}$) หรือ 18.7% - 36% ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน จะเห็นว่าความเครียดรอบจุดรองรับ เกิดสูงสุดที่ตำแหน่งติดตั้งที่บริเวณ 60 องศา

**Strain at support and Middle Span Case 3
1200x2400x12mm 38mmhole (A) Pin**



รูปที่ 4-28 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด ของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระจก 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจกขนาดใหญ่ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin, Case 3)

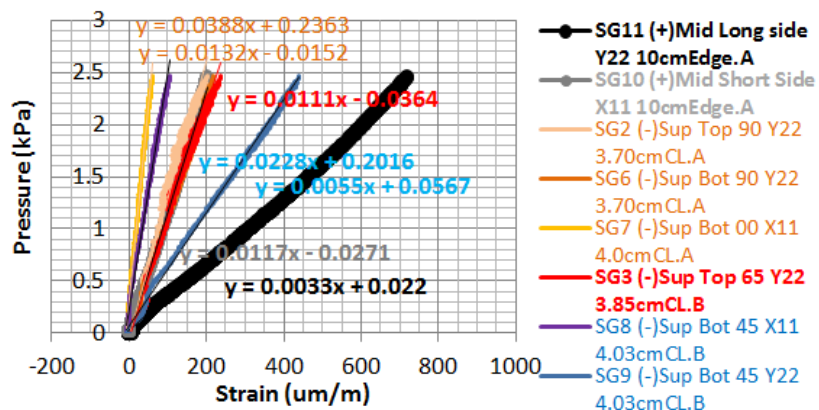
และเมื่อเปลี่ยนการติดตั้งเป็นแบบแกนยึดแน่น (Fixed, Case 4) พบว่ามีการกระจายค่าความเครียดใน 3 บริเวณแตกต่างกันตามแสดงใน รูปที่ 4-29 โดย

บริเวณที่ 1 (กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับจากขอบกระຈก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียด สำหรับด้านยาวของแผ่นอยู่ที่ 3.3 Pa/(um/m) เพิ่มขึ้นกว่ากรณีติดตั้งแบบแกนหมุนได้ 6% และสำหรับด้านสั้นของแผ่นอยู่ที่ 11.7 Pa/(um/m) เพิ่มขึ้นกว่ากรณีติดตั้งแบบแกนหมุนได้ 8%

บริเวณที่ 2 (รอบจุดรองรับขนานแนวขอบกระຈก) มีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อความเครียดอยู่ในช่วง 13.2-38.8 Pa/(um/m) หรือคิดเป็น 8.5%-25% ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน

บริเวณที่ 3 (รอบจุดรองรับ ทำมุมทแยงกับขอบกระຈก) มีการเปลี่ยนแปลง แรงกระทำต่อความเครียด ตำแหน่งติดตั้งทำมุม 45 องศา อยู่ในช่วง 5.5-22.8 Pa/(um/m) หรือ 10%-60 % ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน และที่ตำแหน่งติดตั้งทำมุม 65 องศา อยู่ในช่วง 11.1 Pa/(um/m) หรือ 30% ของบริเวณที่ 1 กรณีเดียวกัน

**Strain at support and Middle Span Case 4
1200x2400x12mm 38mmhole (A) Fixed**



รูปที่ 4-29 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ต่อความเครียด ของ Strain gauge ตำแหน่งต่างๆบนกระຈก 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ที่ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระຈกขนาดใหญ่ (A) แบบแกนยึดแน่น (Fixed, Case 4)

จะเห็นได้ว่ากระຈกขนาด 1200x2400x12mm เมื่อติดตั้งแบบแกนหมุนได้ด้วยตัวยึดต่อ (A) มีการกระจายแรงตามแนวแกน ใน 3 บริเวณจากมากไปหาน้อยเรียงลำดับดังนี้ บริเวณที่ 1 => บริเวณที่ 3 => บริเวณที่ 2 ซึ่งมีลำดับเหมือนกับ กระຈกขนาด 1200x1200x12mm แต่จะแตกต่างกันในเรื่องของอัตราส่วนของแรงในแต่ละบริเวณ ซึ่งที่บริเวณที่ 1 ของกระຈก 1200x2400x12mm จะสามารถต้านทานได้น้อยกว่า กรณีกระຈกทดสอบขนาด 1200x1200x12mm ,Case 7 อยู่มาก

ทั้งนี้เนื่องจากความยาวแผ่นกระจกที่ยาวกว่า 2 เทา และพบว่าที่บริเวณที่ 2 (รอบจุดรองรับขนานแนวขอบกระจก) มีกำลังต้านทานแรงลดลงกว่า 70% แต่ในบริเวณที่ 3 (รอบจุดรองรับ ทำมุมทแยงกับขอบกระจก) ก็มีกำลังต้านทานแรง ไม่ต่างกับ แสดงว่า ขนาดกระจกที่ใหญ่ขึ้น หรือมีอัตราส่วนความกว้าง ต่อความยาว ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้การกระจายตัวของความเค้น ความเครียด รอบจุดรองรับ กินพื้นที่มากกว่ากระจกขนาดเล็ก

และเมื่อมีการเปลี่ยนลักษณะการติดตั้งจากแกนหมุนได้ (Pin) ไปเป็น แบบแกนยึดแน่น (Fixed) โดยรวมทำให้กระจกสามารถต้านทานแรงในบริเวณที่ 1 เพิ่มขึ้นเพียง 6% ซึ่งถือว่าเปลี่ยนแปลงได้ไม่มาก แต่กับทำให้บริเวณรอบจุดรองรับมีกำลังต้านทานแรงลดลงมากโดยเฉพาะบริเวณที่ 3 (ทำมุมทแยงกับขอบกระจก) ที่ประมาณ 20% เมื่อเทียบกับกรณีติดตั้งแบบแกนหมุนได้



บทที่ 5

การสร้างแบบจำลอง เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

ในบทนี้ทำการศึกษาแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ กับผลการทดสอบจริง เพื่อแนะนำค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แรงต่างๆที่เกิดขึ้นในกระจกเทมเปอร์ที่ติดตั้งโดยใช้ตัวยึดต่อกระจกชนิดรูเจาะ แบบ 4 จุด ต่อ แผ่นในการหาขนาด และความหนากระจก เบื้องต้นโดยที่ยังไม่ต้องทดสอบกระจกจริง เพื่อลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบ โดยการสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ในครั้งนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม SAP2000 ในการวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่เป็นที่รู้จัก และใช้กันทั่วไปในวงการก่อสร้าง จึงทำให้ผู้สนใจและผู้ที่ต้องการเลือกขนาดกระจกในการติดตั้งในอาคาร สามารถทำความเข้าใจในรายละเอียดที่ได้นำเสนอได้รวดเร็ว และง่ายขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งหัวข้อการศึกษาออกเป็น ส่วนๆ 3 ส่วนดังนี้

1. แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์
2. สมบัติเชิงกลที่ใช้เป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์
3. ผลการวิเคราะห์ แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์

5.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

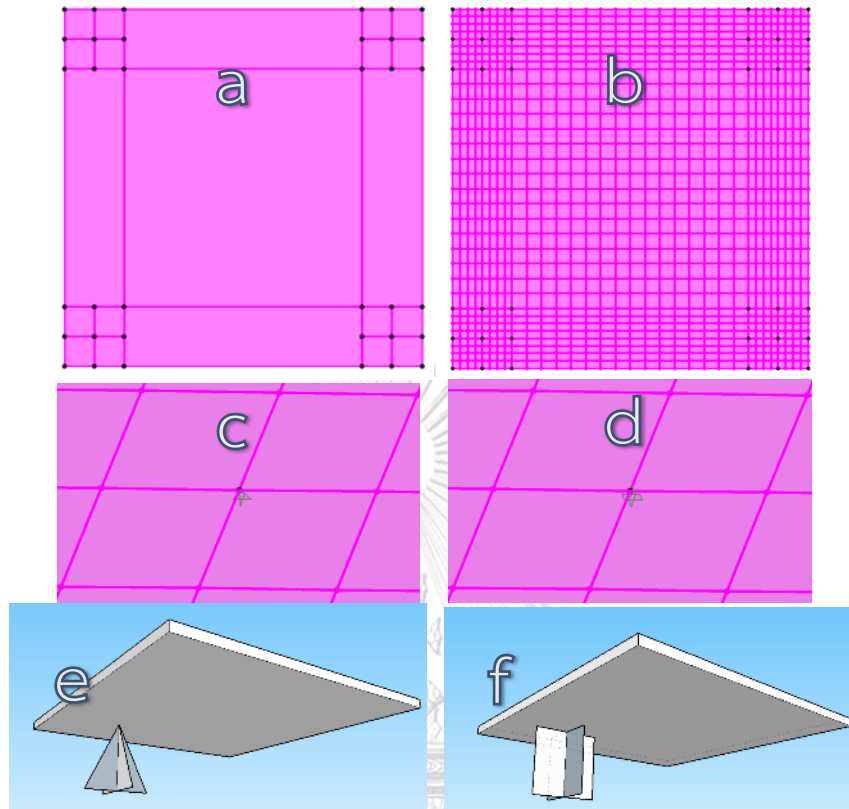
ในการสร้างแบบจำลอง จะทำการสร้างแบบจำลอง ออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

- แบบที่ 1 สร้างแบบจำลองโดยกำหนดให้กระจกเป็นแผ่นเต็ม ไม่เจาะรู
- แบบที่ 2 แบบเส้นโลหะรองรับ บนกระจกเจาะรู
- แบบที่ 3 แบบมีแผ่นเหล็กและยางรองรับใต้กระจกที่เจาะรู

5.1.1 แบบจำลองแบบที่ 1 สร้างแบบจำลองโดยกำหนดให้กระจกเป็นแผ่นเต็ม ไม่เจาะรู

แบบจำลองแบบที่ 1 กำหนดลักษณะของแผ่นกระจกเป็น Shell-Thin หนา 12 mm แผ่นเต็มตามขนาดติดตั้งจริง คือขนาด 1200x1200 mm และ 1200x2400 mm และทำการแบ่งชอยพื้นที่ย่อย ให้ตัดกันที่ตำแหน่งศูนย์กลางของการติดตั้งตัวยึดต่อกระจกในการทดสอบจริง เพื่อให้สามารถใช้คำสั่งที่จุดตัดกันของพื้นที่แบ่งชอยที่โปรแกรมที่สามารถกำหนดเป็น แบบหมุดได้ (Pin , $U_1, U_2, U_3 = 0$, ไม่เคลื่อนที่ทั้ง 3 ทิศทาง) และ ยึดแน่น (Fixed $U_1, U_2, U_3, R_1, R_2, R_3 = 0$, ไม่เคลื่อนที่ และไม่หมุนทั้ง 3 ทิศทาง) ดังแสดงในรูปที่ 5-1 เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่าย และ

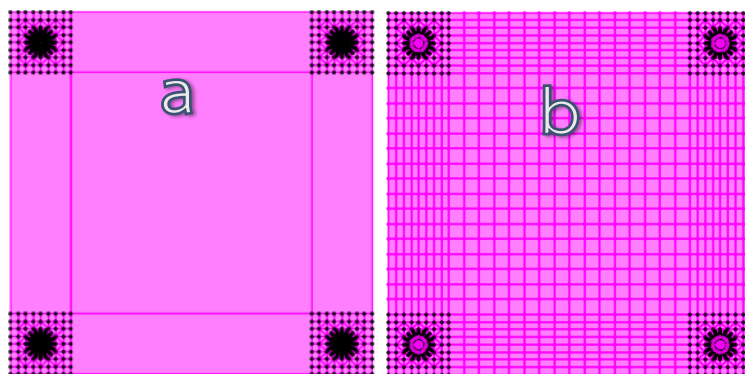
สะดวกรวดเร็วที่สุดในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ยังไม่มีการยืนยันความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ที่ได้อย่างเป็นทางการ



รูปที่ 5-1 การสร้างแบบจำลองแบบไม่เจาะรู

(a) ก่อนการแบ่งซอยพื้นที่ย่อย (b) หลังการแบ่งซอยพื้นที่ย่อย (c) แสดงลักษณะการรองรับด้วย จุดรองรับแบบจุดหมดทั่วไปในโปรแกรม (Pin) แบบ 3 มิติ (d) แสดงลักษณะการรองรับด้วย จุดรองรับแบบยึดแน่นทั่วไปในโปรแกรม (Fixed) แบบ 3 มิติ (e) รูปแบบ 3 มิติแสดงหลักการในการสร้างแบบจำลองแบบแกนหมุนได้ (Pin) (f) รูปแบบ 3 มิติแสดงหลักการในการสร้างแบบจำลองแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

แบบจำลองในแบบที่ 2 และแบบที่ 3 จะจำลองให้ตัวกระจกที่สร้าง เป็นแผ่นกระจกที่เจาะรู ตามขนาดจริงของกระจกทดสอบแต่ละชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 5-2 ทั้งหมด 3 ชิ้น โดยกำหนดลักษณะของแผ่นกระจกเป็น Shell-Thin หนา 12 mm ขนาด 1200x1200 mm มีรูเจาะขนาด 18 mm ที่มุมทั้ง 4 , กระจกขนาด 1200x2400 mm มีรูเจาะขนาด 38 mm ที่มุมทั้ง 4 และ กระจกขนาด 1200x1200 mm มีรูเจาะขนาด 38 mm ที่มุมทั้ง 4 ทำการแบ่งซอยพื้นที่เพื่อให้ผลการคำนวณมีความละเอียดสูงขึ้นในแต่ละจุด โดยเฉพาะรอบจุดรองรับที่มีความแปรปรวนของแรงสูง



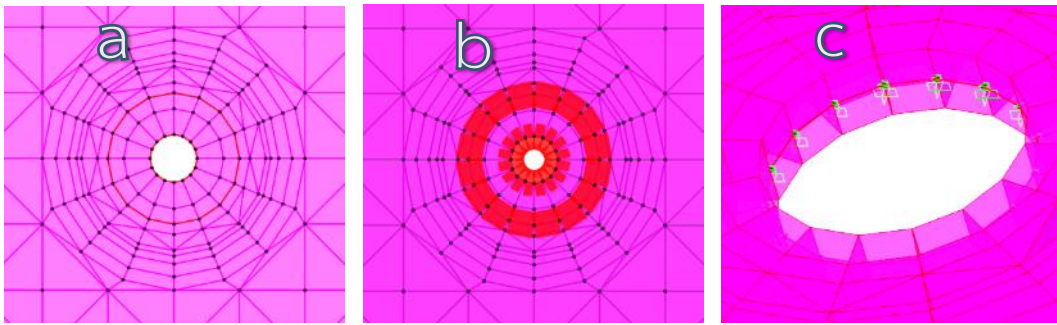
รูปที่ 5-2 การสร้างแบบจำลองแผ่นกระจกแบบเจาะรู ของแบบจำลองที่ 2 และ 3
(a) ก่อนการแบ่งซอยพื้นที่ย่อย (b) หลังการแบ่งซอยพื้นที่ย่อย

และจากการสังเกตลักษณะของตัวยึดต่อกระจกแบบรูเจาะของทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์ พบว่าจะมีชั้นของแผ่นพลาสติกหนาประมาณ 1.5-2 mm. ร่องระหว่างแผ่นกระจก กับฐานรองรับกระจกของตัวยึดต่อกระจก ทั้งด้านบน และด้านล่าง ซึ่งสามารถยึดหยุ่น ทนตึงตัวได้ และช่วยกระจายแรงที่เกิดขึ้นรอบๆ ฐานรองรับกระจกของตัวยึดต่อกระจก ในแบบจำลองที่ 2 และแบบจำลองที่ 3 พยายามสร้างแบบจำลองให้มีลักษณะใกล้เคียงกับความจริงของลักษณะฐานรองรับตัวยึดต่อกระจกให้มากขึ้นตามลำดับ แต่จะใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองเพิ่มขึ้นพอสมควร ตามเงื่อนไขที่ซับซ้อนขึ้น และต้องระวังเรื่องจุดต่อของพื้นที่ย่อย ที่อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในระหว่างการสร้างแบบจำลอง และการประมวลผล ของแบบจำลองได้เพิ่มขึ้น กว่าแบบที่ 1 โดยเฉพาะการสร้างพื้นที่ย่อยโดยการเลือกใช้คำสั่ง Automatic Area Mesh กับพื้นที่รอบๆรูเจาะกระจก

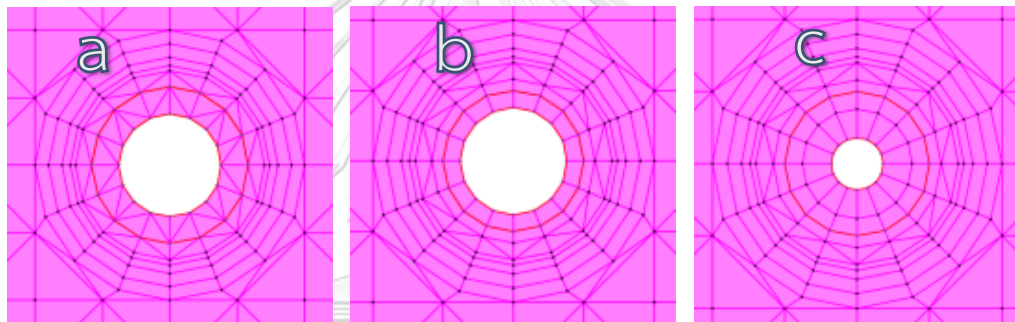
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2 แบบจำลองแบบที่ 2 แบบเส้นโลหะรองรับ บนกระจกเจาะรู

แบบจำลองแบบที่ 2 ได้นำแบบจำลองแผ่นกระจกแบบเจาะรู มาสร้างแบบจำลองของฐานรองรับกระจกของตัวยึดต่อกระจกเพิ่มเติม เป็นเส้นโลหะขนาด 10x10 mm (Frame 10x10 mm) เพื่อใช้เป็นตัวกลางในการกำหนดลักษณะติดตั้งสปริงใต้ฐานเส้นโลหะ (Line Spring) ที่ด้านทานทั้งแรงอัด และแรงดึง และสามารถกำหนด/ปรับค่าความแข็งของสปริงได้ (Stiffness / length) ทั้งที่ขอบด้านนอก และที่ขอบในรูกระจกที่เจาะไว้ ตามแสดงในรูปที่ 5-3 เพื่อให้สามารถปรับเงื่อนไข ให้แบบจำลองมีลักษณะแบบ แคนหมุนได้อิสระ (Pin) และแบบแคนยึดแน่น (Fixed) ได้ โดยรูปแบบการติดตั้งเส้นโลหะ ที่จำลองแทนฐานรองรับกระจกของตัวยึดต่อกระจก ที่ติดตั้งในกระจกที่มีขนาดรูเจาะต่างกันได้แสดงในรูปที่ 5-4



รูปที่ 5-3 ภาพขยายแบบจำลองแบบเจาะรู บริเวณรอบรูเจาะ และการติดตั้ง เส้นโลหะ 2 แถว ตามแนวขอบของฐานรองรับเหล็ก แสดงเส้นโลหะแบบทั่วไปแนวเส้นสีแดง (b) แสดงเส้นโลหะแบบกรอบ 3 มิติ (c) แสดงลักษณะการรองรับด้วย Line Spring แบบกรอบ 3 มิติ



รูปที่ 5-4 ภาพขยายแบบจำลองแบบเจาะรู บริเวณรอบรูเจาะ และการติดตั้ง เส้นโลหะ 2 แถว ตามลักษณะของขนาดฐานรองรับกระจก ที่ใช้ทดสอบจริง แบบจำลองเจาะรูกระจกขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกฐานรองรับกระจกขนาด 59 mm แบบจำลองเจาะรูกระจกขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกฐานรองรับกระจกขนาด 49 mm แบบจำลองเจาะรูกระจกขนาด 18 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกฐานรองรับกระจกขนาด 49 mm

5.1.3 แบบจำลองแบบที่ 3 แผ่นเหล็กและยางรองรับใต้กระจกที่เจาะรู

แบบจำลองแบบที่ 3 ทำการสร้างแบบจำลองบริเวณ โดยสร้างแบบจำลองฐานรองรับกระจกของตัวยึดต่อกระจก เป็นแผ่นเหล็กที่มีขนาดเท่ากับฐานรองรับกระจกของตัวยึดต่อกระจกจริง ที่กำหนดให้จุดหมุดอยู่ต่ำกว่าแผ่นกระจกลงไป ตามระยะที่เอียงศูนย์จริงของแต่ละผลิตภัณฑ์ (A,B) และยึดเชื่อมระหว่างกระจก และฐานเหล็กรับกระจกด้วย Function Link/Supported แบบ Linear ในโปรแกรม SAP2000 ที่สามารถกำหนดปรับค่า Stiffness ของการเคลื่อนที่ได้ 3 ทิศทาง (U1 ,U2 ,U3) โดยทำการติดตั้งจุดเชื่อมการระหว่างกระจกและแผ่นเหล็ก (Link) ในแบบจำลองทั้งหมด 16

จุด / แกว ที่รอบนอกของแผ่นเหล็กฐานรับกระจกของตัวยึดต่อกระจก และกำหนดจุดศูนย์กลางของฐานเหล็กรับกระจก ให้เป็นฐานรองรับ (Link) แบบปรับได้ทั้งแบบ แกนหมุนได้ (Pin = $U_1, U_2, U_3 = 0$) และแบบแกนยึดแน่น (Fixed = $U_1, U_2, U_3, R_1, R_2, R_3 = 0$) ตามลักษณะการติดตั้งทดสอบจริงดังแสดงในรูปที่ 5-5 แต่กำหนดความหนาฐานรองรับมากกว่าของจริง 2 เท่า เนื่องจากเหตุผลของการชดเชย ระยะโก่งตัว ที่ระยะยื่นของขอบนอกฐานรองรับจริง ถึงขอบแกนยึดจุดหมุนที่มีความหนาหลายเท่าตัวมีระยะน้อยกว่าในแบบจำลอง ที่มีความหนาคงที่จากขอบฐาน ถึงจุดศูนย์กลางแกนหมุน และขนาดแบบจำลองฐานรองรับกระจกของตัวยึดต่อกระจกที่ติดตั้งบนกระจกที่มีรูเจาะขนาดต่างๆกัน ได้แสดงรายละเอียดในรูปที่ 5-6 โดยในการสร้างแบบจำลองในลักษณะนี้ยังได้แบ่งย่อยในรายละเอียดการกำหนดคุณสมบัติออกไปอีก 4 ลักษณะเพื่อเปรียบเทียบการกระจกแรงที่เกิดขึ้นตามที่แสดงในรูปที่ 5-7 มีรายละเอียดดังนี้

1. แบบ 1 แกว (วง) ด้านขอบนอก 100% (เชื่อมต่อ 16 จุด)

ทำการสร้างแบบจำลองให้จุดเชื่อมต่อทั้ง 16 จุดระหว่าง กระจก และฐานรองรับกระจกที่ตำแหน่งขอบนอกสุดของฐานรองรับกระจก 1 แกว ให้รับแรงทั้ง 3 แกน (U_1, U_2, U_3) โดยมีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุกจุด

2. แบบ 2 แกว (วง) ด้านขอบนอก 100% และขอบใน 100% (เชื่อมต่อ 32 จุด)

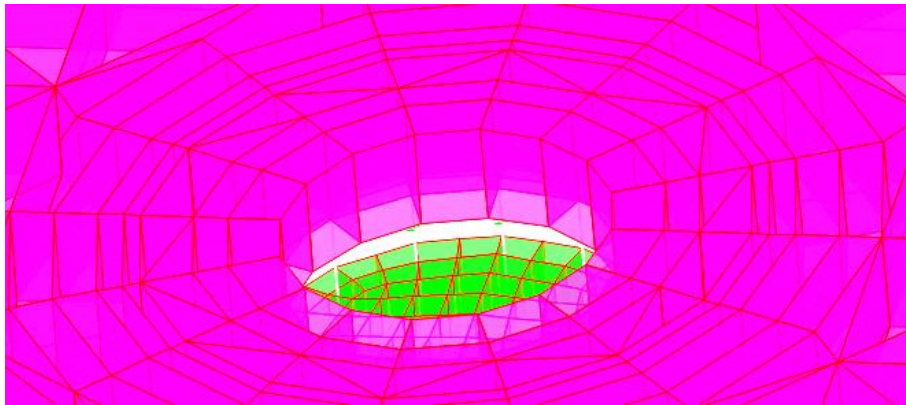
ทำการสร้างแบบจำลองให้จุดเชื่อมต่อ ระหว่าง กระจก และฐานรองรับกระจก ที่ตำแหน่งขอบนอกสุดของฐานรองรับกระจก 1 แกว 16 จุดต่อเชื่อม และด้านขอบในรูกระจก อีก 1 แกว 16 จุดต่อเชื่อม ให้รับแรงทั้ง 3 แกน (U_1, U_2, U_3) โดยมีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุกจุด

3. แบบ 2 แกว (วง) ด้านขอบนอก 100% และขอบใน 50% (เชื่อมต่อ 24 จุด)

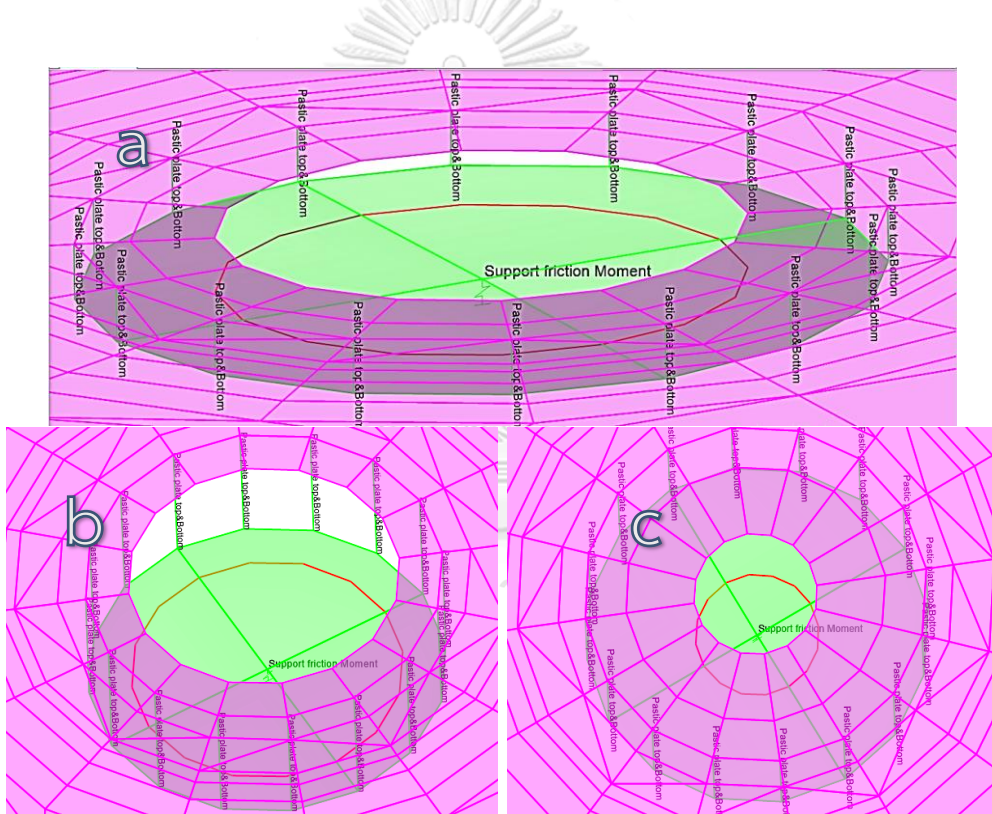
ทำการสร้างแบบจำลองให้จุดเชื่อมต่อ ระหว่าง กระจก และฐานรองรับกระจก ที่ตำแหน่งขอบนอกสุดของฐานรองรับกระจก 1 แกว 16 จุดต่อเชื่อม และด้านขอบในรูกระจก อีก 1 แกว 8 จุดต่อเชื่อม ให้รับแรงทั้ง 3 แกน (U_1, U_2, U_3) โดยมีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุกจุด

4. แบบ 2 แกว (วง) ด้านขอบนอก 50% และขอบใน 50% (เชื่อมต่อ 16 จุด)

ทำการสร้างแบบจำลองให้จุดเชื่อมต่อ ระหว่าง กระจก และฐานรองรับกระจก ที่ตำแหน่งขอบนอกสุดของฐานรองรับกระจก 1 แกว 8 จุดต่อเชื่อม และด้านขอบในรูกระจก อีก 1 แกว 8 จุดต่อเชื่อม ที่สลับฟันปลากันระหว่างจุดเชื่อมต่อ ด้านขอบนอก และขอบใน ให้รับแรงทั้ง 3 แกน (U_1, U_2, U_3) โดยมีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุกจุด

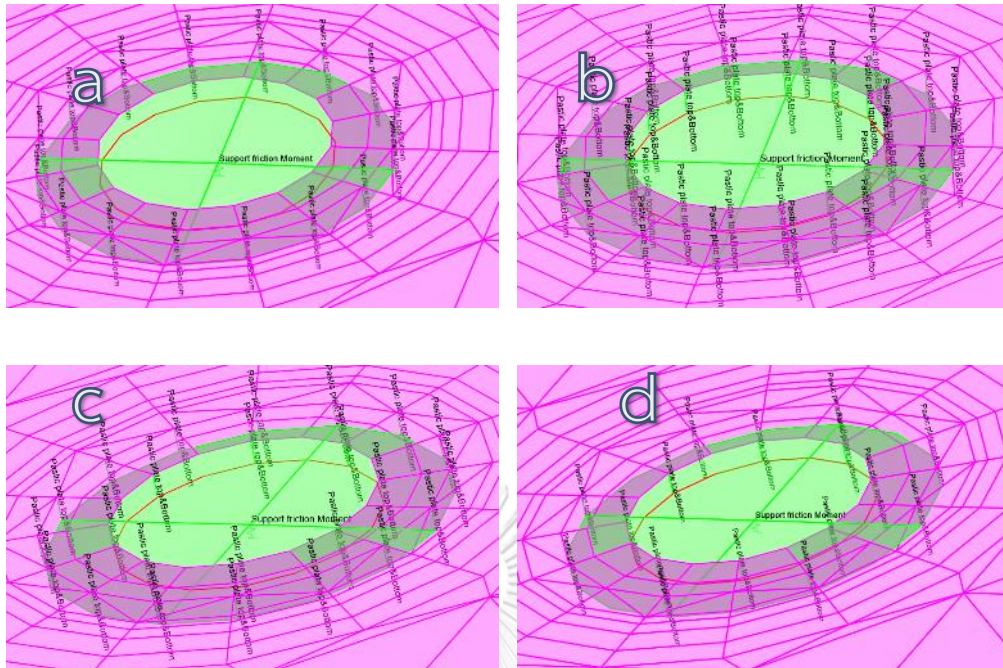


รูปที่ 5-5 ภาพขยายแบบจำลองแบบที่ 3 แบบ 3 มิติ ที่เชื่อมต่อกระจก และฐานรองรับกระจกด้วย คำสั่ง Link/Supported (Linear) แนวตั้ง ในโปรแกรม SAP2000



รูปที่ 5-6 ภาพขยายแบบจำลองแบบที่ 3 แบบ 3 มิติ ตามการติดตั้งตัวยึดต่อกระจกที่ใช้ทดสอบจริง เชื่อมต่อกระจก และฐานรองรับกระจกด้วย คำสั่ง Link/Supported (Linear) แนวตั้ง และแสดงจุดเชื่อมต่อที่จุดศูนย์กลางฐานรองรับกระจกด้วยคำสั่ง Link/Supported (Linear) ปรับค่าตัวแปรตามลักษณะการติดตั้ง (Pin/Fixed) ในโปรแกรม SAP2000

แบบจำลองเจาะรูกระจกขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกฐานรองรับกระจกขนาด 59 mm
 แบบจำลองเจาะรูกระจกขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกฐานรองรับกระจกขนาด 49 mm
 แบบจำลองเจาะรูกระจกขนาด 18 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจกฐานรองรับกระจกขนาด 49 mm



รูปที่ 5-7 ภาพขยายแบบจำลองแบบที่ 3 แบบ 3 มิติ ตามลักษณะของการเชื่อมต่อกระจก และฐานรองรับกระจกด้วย คำสั่ง Link/Supported (Linear) แนวตั้ง ในโปรแกรม SAP2000

แบบ 1 แถว (วง) ด้านขอบนอก 100% (เชื่อมต่อ 16 จุด)

แบบ 2 แถว (วง) ด้านขอบนอก 100% และขอบใน 100% (เชื่อมต่อ 32 จุด)

แบบ 2 แถว (วง) ด้านขอบนอก 100% และขอบใน 50% (เชื่อมต่อ 24 จุด)

แบบ 2 แถว (วง) ด้านขอบนอก 50% และขอบใน 50% (เชื่อมต่อ 16 จุด)

5.2 สมบัติเชิงกลที่ใช้เป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์

สมบัติเชิงกลที่ใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แสดงในรูปแบบตารางที่ 5-1 ดังนี้

ตารางที่ 5-1 สมบัติเชิงกลที่ใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ลำดับ	คุณสมบัติ	ค่าที่ใช้ ในการวิเคราะห์	หน่วย
1.1	กระจก (Glass) Modulus of Elasticity (E) of glass ของกระจก	7.20×10^{10}	N/m^2
1.2	Weight of Unit Volume	25,105	N/m^3
1.3	Mass of Unit Volume	2,560	Kg/m^3
1.4	Poisson ratio	0.22	
1.5	Coefficient of Thermal Expansion(A)	8.500×10^{-6}	/c

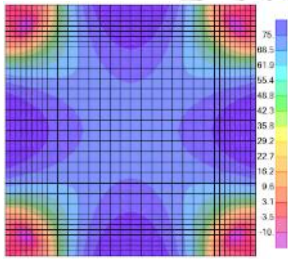
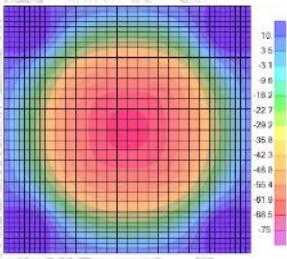
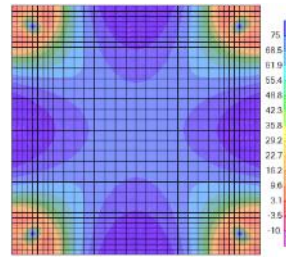
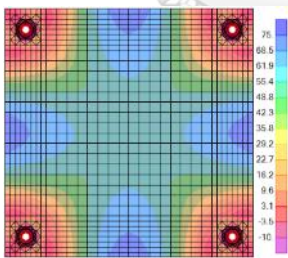
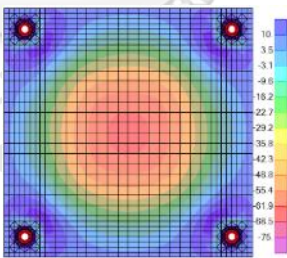
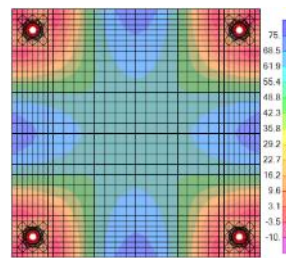
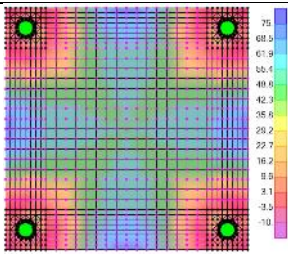
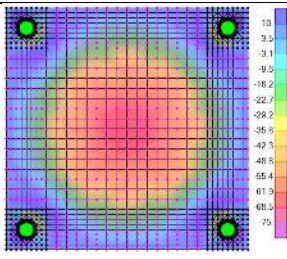
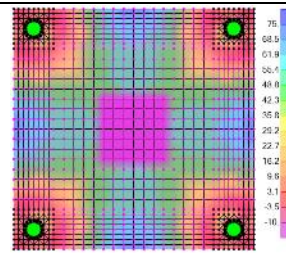
1.6	Shear Modulus (G)	2.951×10^{10}	N/m^2
1.7	กระจกหนา (Membrane, Bending)	12.0 (Shell-Thin)	mm
1.8	Maximum Stress of Tempered Glass	73	MPa.
	<u>แบบจำลองที่ 1</u>		
2.1	จุดรองรับแบบแกนหมุนได้ (Pin)	$U1=U2=U3=0$	-
2.2	จุดรองรับแบบแกนยึดแน่น (Fixed)	$U1=U2=U3=R1=R2=R3=0$	-
	<u>แบบจำลองที่ 2</u> เส้นโลหะ (Frame 10x10 mm.)		
3.1	Modulus of Elasticity (E)	1.999×10^{11}	N/m^2
3.2	Weight of Unit Volume	76,972.86	N/m^3
3.3	Mass of Unit Volume	7,849.05	Kg/m^3
3.4	Poisson ratio	0.3	-
3.5	Coefficient of Thermal Expansion (A)	1.170×10^{-5}	/c
3.6	Shear Modulus (G)	7.690×10^{10}	N/m^2
	ค่าความแข็งของสปริง ของ (Stiffness / length)		
3.7	การติดตั้งแบบแกนหมุนได้ Pin	2 Ring IN-OUT - 7×10^7	$N/m/m$
3.8	การติดตั้งแบบแกนยึดแน่น Fixed	2 Ring IN-OUT - 14×10^7	$N/m/m$
	<u>แบบจำลองที่ 3</u> แผ่นเหล็กฐานรับกระจกของตัวยึดต่อ		
	Modulus of Elasticity (E)	1.999×10^{11}	N/m^2
	Weight of Unit Volume	76,972.86	N/m^3
	Mass of Unit Volume	7,849.05	Kg/m^3
	Poisson ratio	0.3	-
	Coefficient of Thermal Expansion (A)	1.170×10^{-5}	/c

Shear Modulus (G)	7.690 x10 ¹⁰	N/m ²
ความหนา (Membrane, Bending)	15 (Shell-Thin)	mm
ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางแผ่นกระจก กับแกนหมุนตัวยึดต่อกระจก ผลิตภัณฑ์ ที่ มีฐานรองรับกระจกใหญ่ (A)	4	mm
ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางแผ่นกระจก กับแกนหมุนตัวยึดต่อกระจก ของ ผลิตภัณฑ์ ที่มีฐานรองรับกระจกเล็ก (B)	20	mm
Link for Plastic and steel Plate (Linear)- 2 Joint Link		
U1	2,000	N/mm
U2	FIX	N/mm
U3	FIX	N/mm
R1	NULL	
R2	NULL	
R3	NULL	
Factor for Line Spring	1,000	-
Factor for Area Spring	1,000,000	-
Link for Center Steel Plate Support friction Moment (Linear) -1 Joint Link		
จุดรองรับแบบแกนหมุนได้ (Pin)	U1=U2=U3= FIX	-
จุดรองรับแบบแกนยึดแน่น (Fixed)	U1=U2=U3=R1=R2=R3=FIX	-

5.3 ผลการวิเคราะห์ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

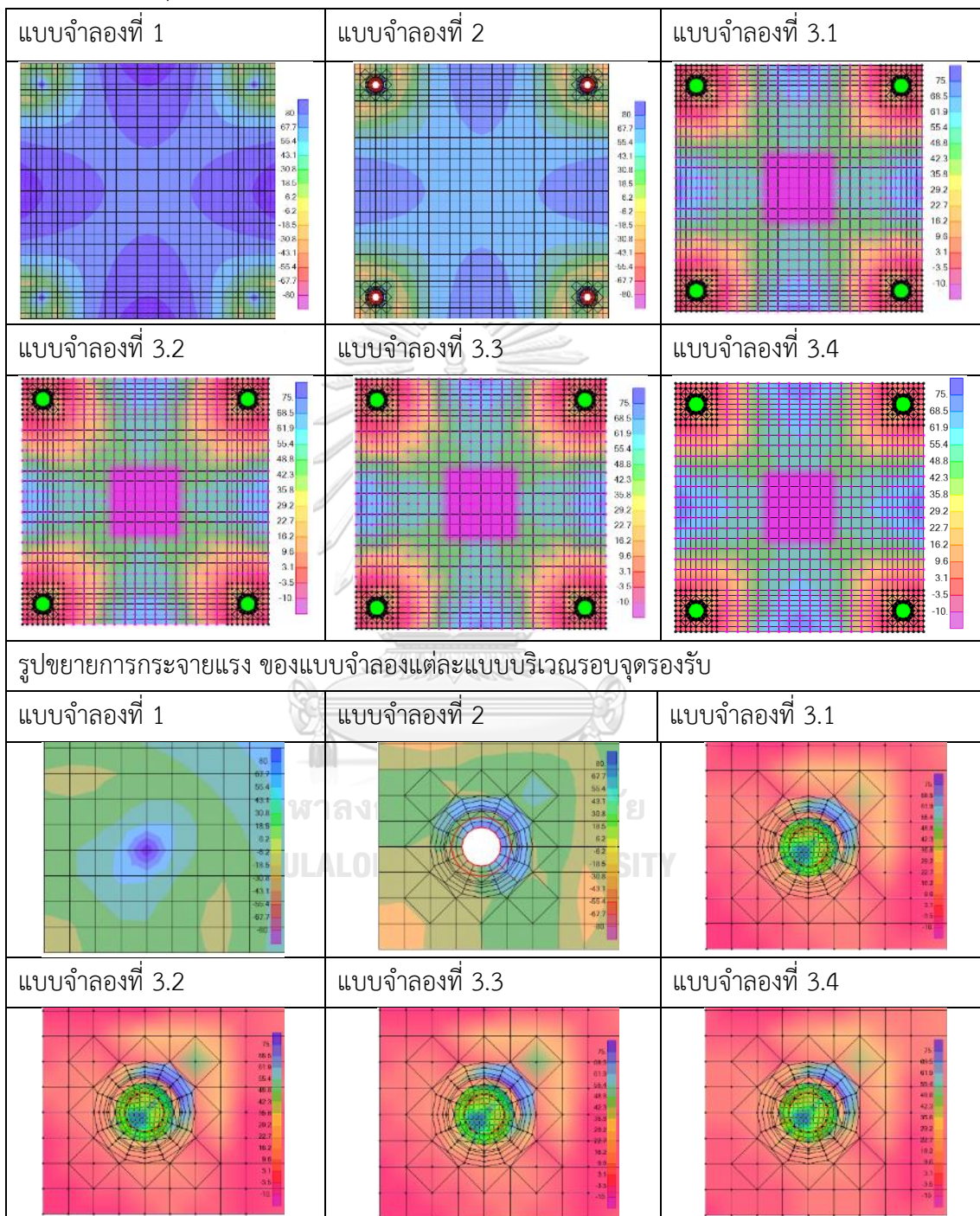
จากการวิเคราะห์แรง และการโก่งตัวที่เกิดขึ้นในแบบจำลองแต่ละแบบ โดยปรับค่าตัวแปรในแต่ละแบบจำลองเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับจากทดสอบจริงมากที่สุด ตามรายละเอียดแสดงในหัวข้อ 5.2 โดยแบ่งผลการแสดงเป็นตารางที่ 5-2 ถึง ตารางที่ 5-10 ดังนี้

ตารางที่ 5-2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบจำลอง แสดงการกระจายแรงในแบบต่างๆ ของกระจก เจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งด้วยตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่ (A)

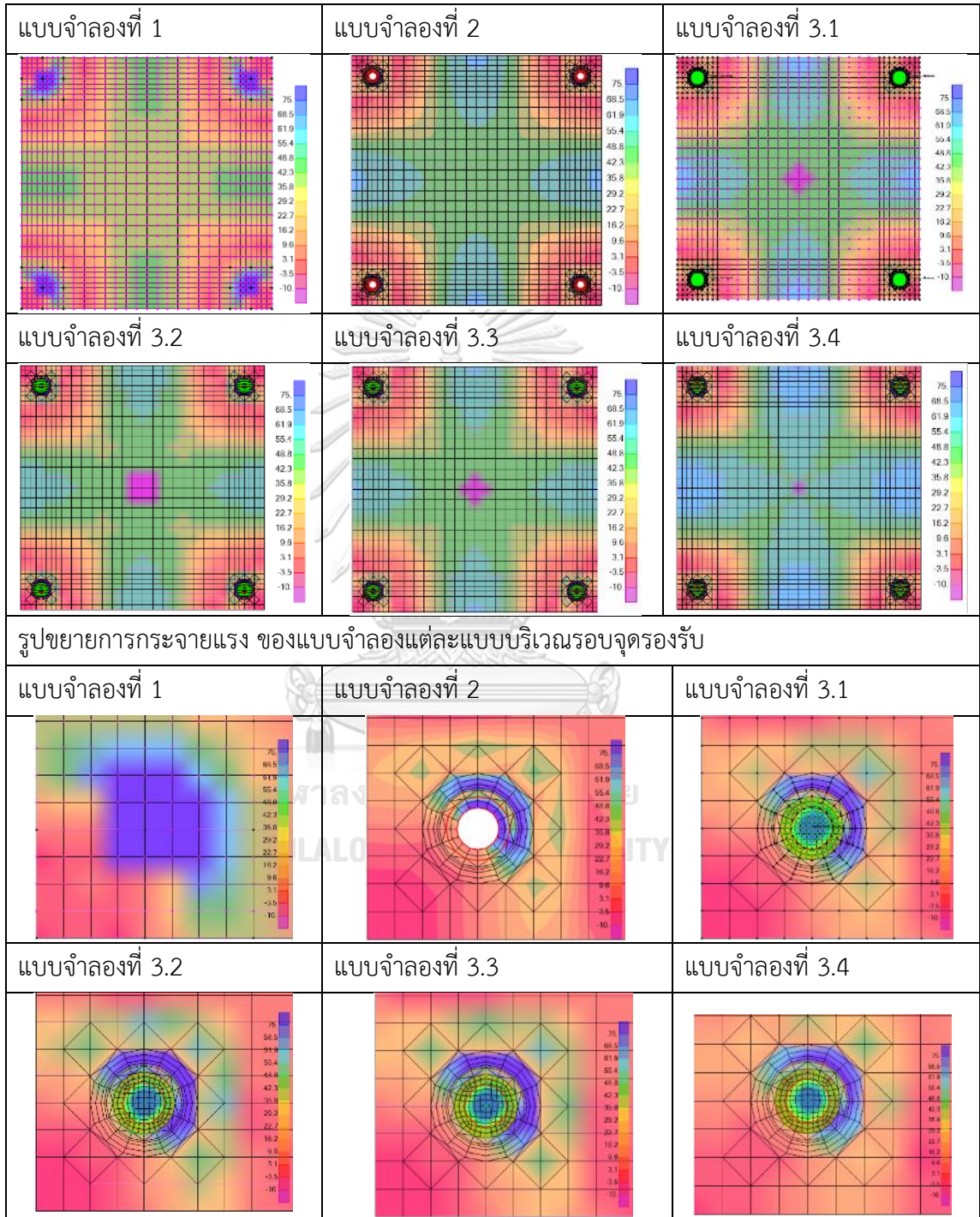
กระจก 1200x1200	Stress Maximum (MPa) กระจกเจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งตัวยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่ (A)		
	Top Face	Bottom Face	Absolute Maximum
แบบจำลอง ที่ 1 Pin			
แบบจำลอง ที่ 2 Pin			
แบบจำลอง ที่ 3.1 Pin			

รูปขยายการกระจายแรง ของแบบจำลองแต่ละแบบบริเวณรอบจุดรองรับ			
1200x1200	Top Face	Bottom Face	Absolute Maximum
ที่จุดรองรับ Model 1			
ที่จุดรองรับ Model 2			
ที่จุดรองรับ Model 3			

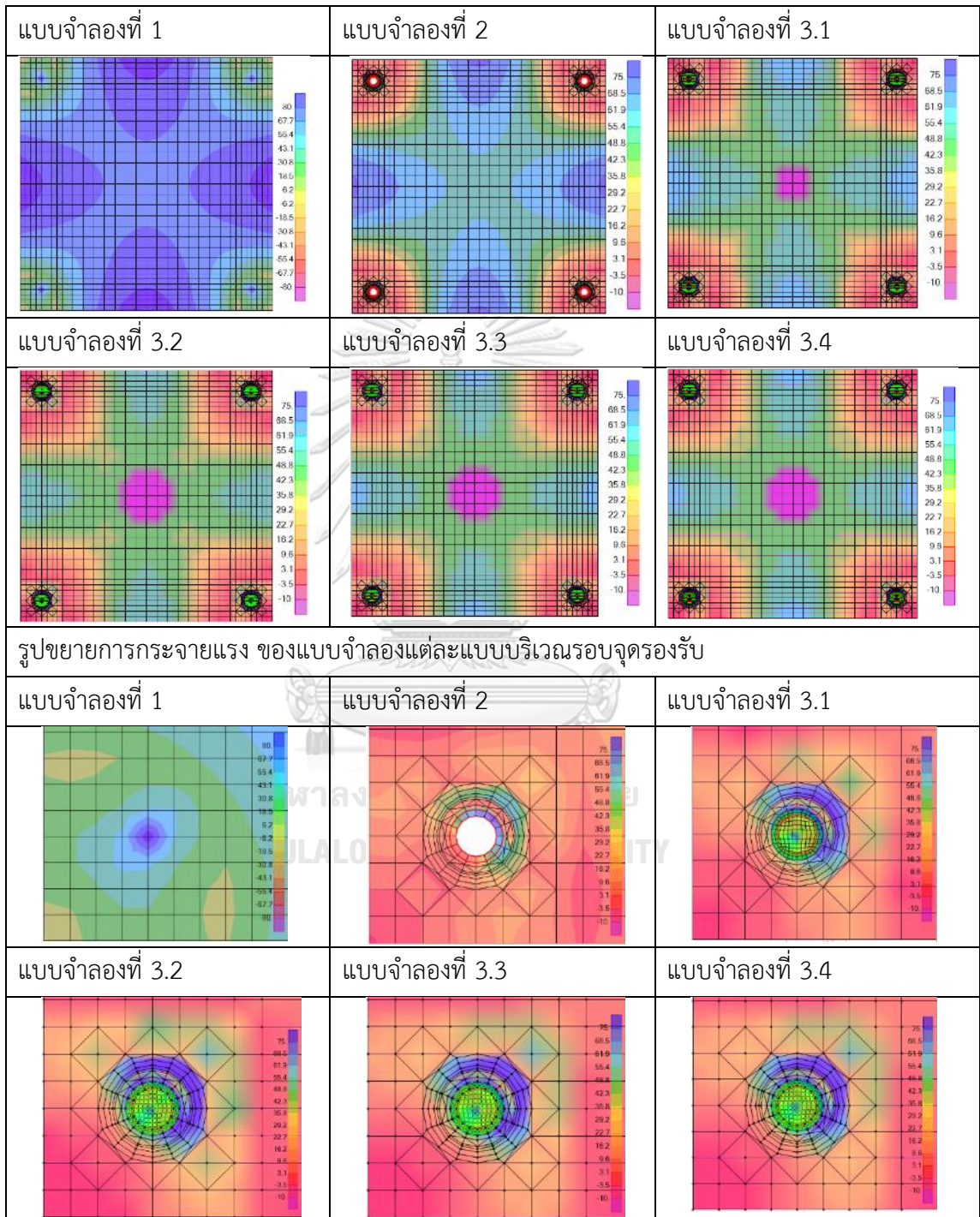
ตารางที่ 5-3 ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm หนา 12 mm เจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งด้วยยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin) CASE 7



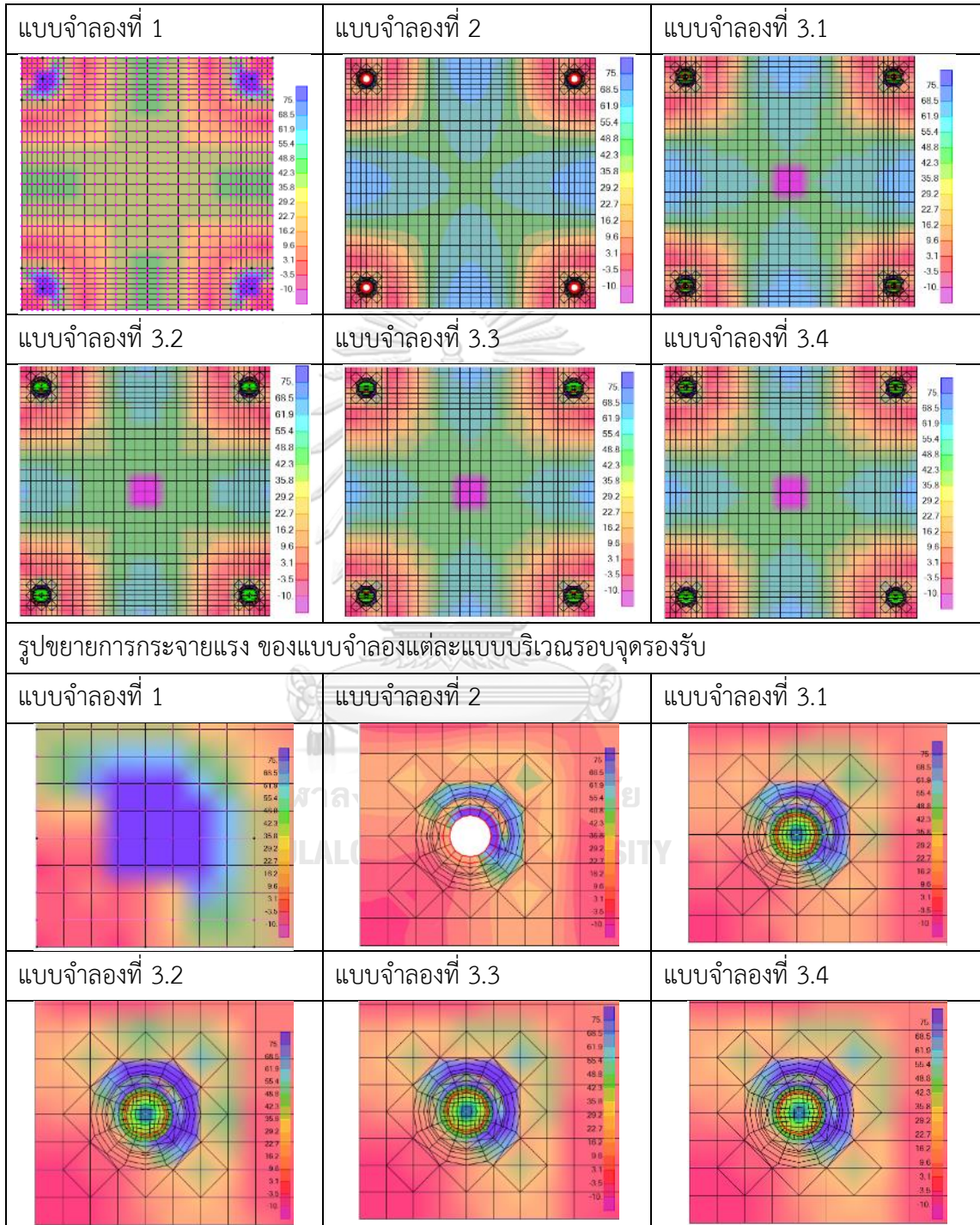
ตารางที่ 5-4 ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm ทน 12 mm เจาะรขนาด 38 mm ติดตั้งด้วยยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่ (A) แบบแกนยึดแน่น (Fixed) CASE 8



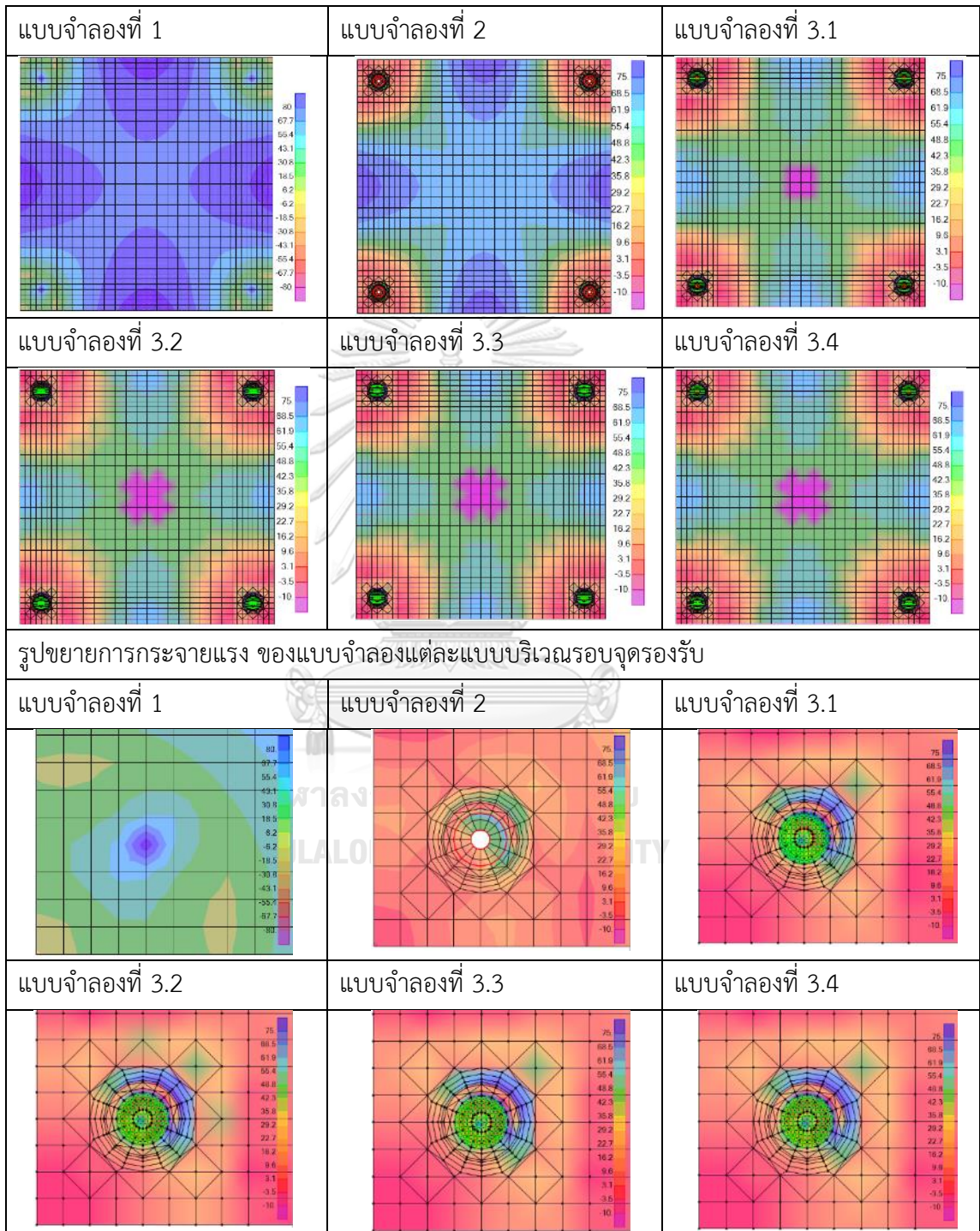
ตารางที่ 5-5 ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm ทน 12 mm เจาะรขนาด 38 mm ติดตั้งด้วยยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกเล็ก (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin) CASE 9



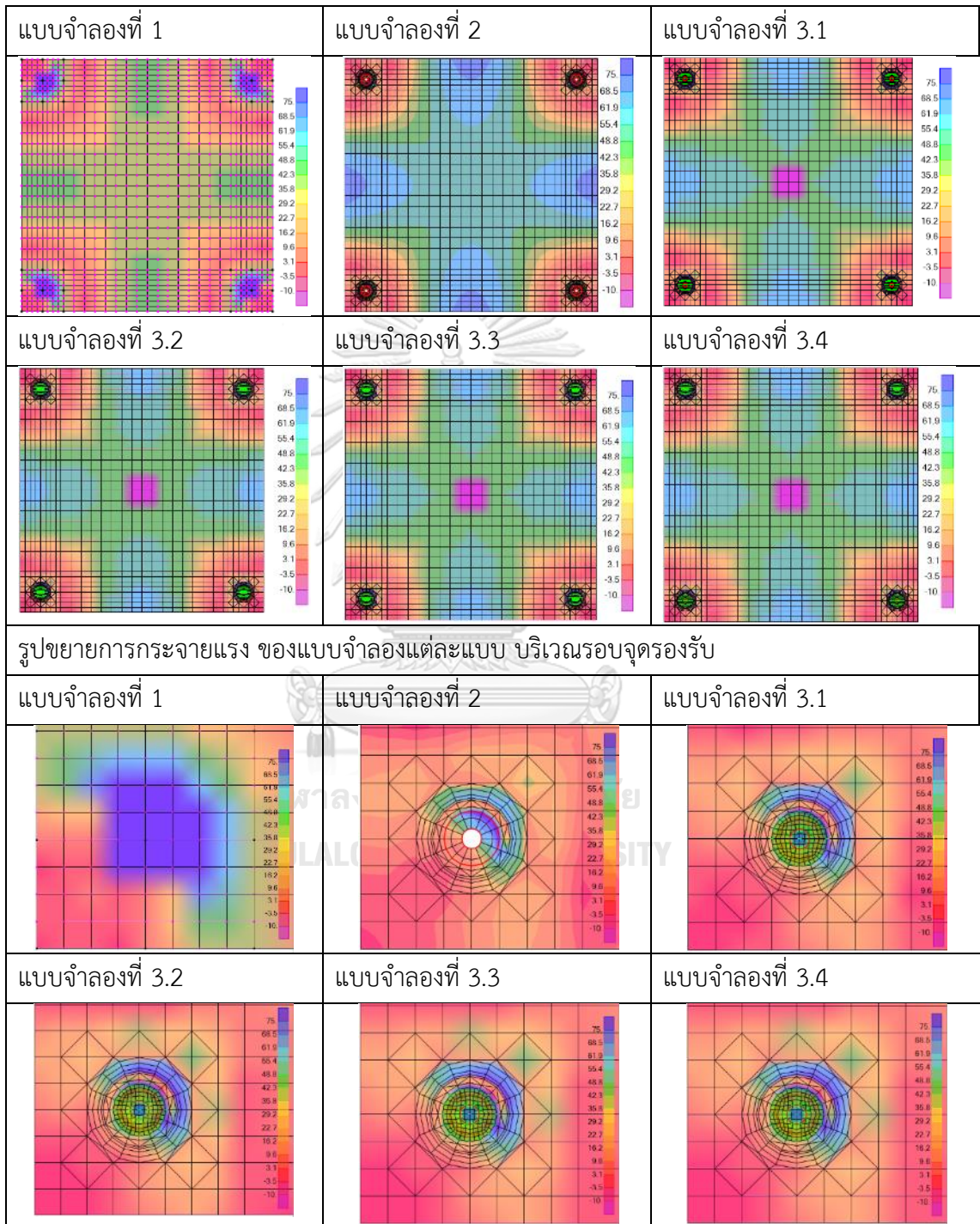
ตารางที่ 5-6 ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm ทน 12 mm เจาะรูขนาด 38 mm ติดตั้งด้วยยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกเล็ก (B) แบบแกนยึดแน่น (Fixed) CASE 10



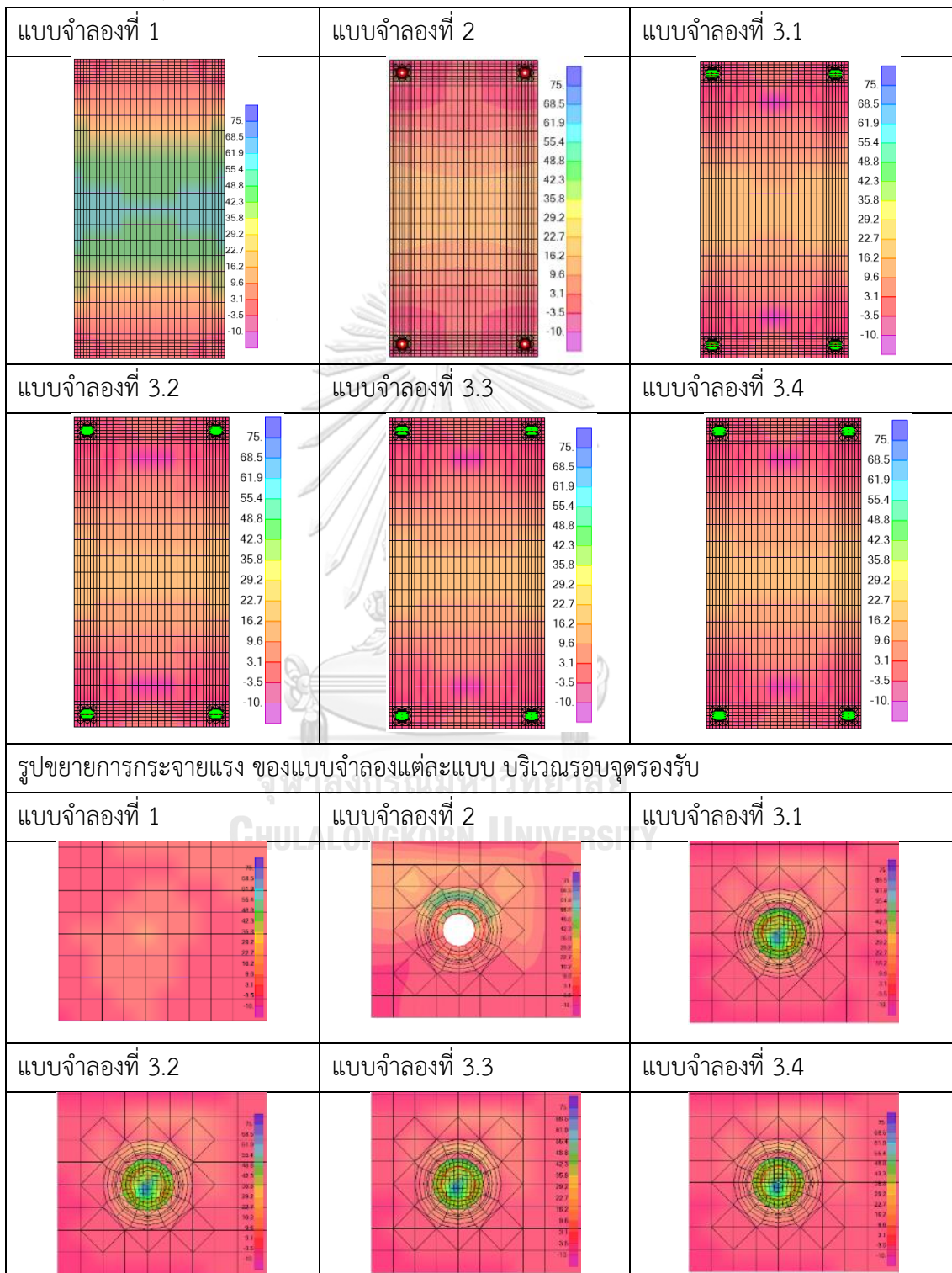
ตารางที่ 5-7 ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm ทน 12 mm เจาะรขนาด 18 mm ติดตั้งด้วยยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกเล็ก (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin) CASE 1



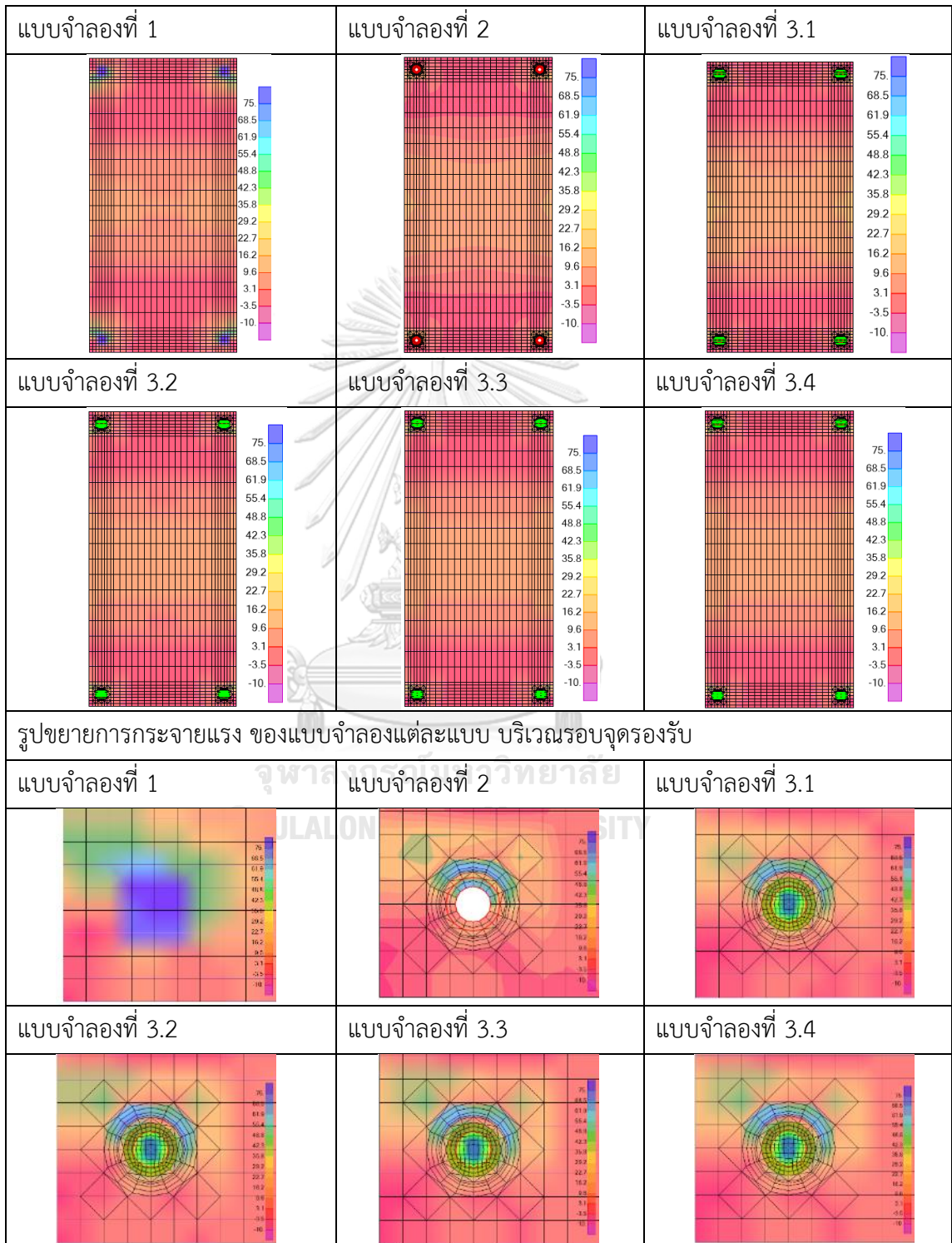
ตารางที่ 5-8 ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x1200 mm ทน 12 mm เจาะรูขนาด 18 mm ติดตั้งด้วยยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกเล็ก (B) แบบแกนยึดแน่น (Fixed) CASE 2



ตารางที่ 5-9 ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก
 1200x2400 mm ทน 12 mm เจาะรขนาด 38 mm ติดตั้งด้วยยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่
 (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin) CASE 3

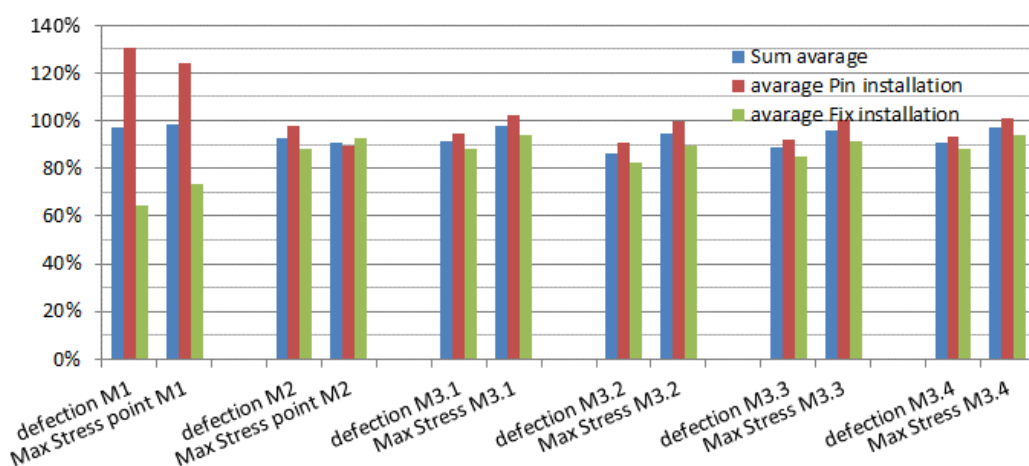


ตารางที่ 5-10 ผลการวิเคราะห์ แสดงการกระจายแรงแบบ Absolute Maximum ของกระจก 1200x2400 mm ทน 12 mm เจาะรขนาด 38 mm ติดตั้งด้วยยึดต่อกระจก ฐานรองรับกระจกใหญ่ (A) แบบแกนยึดแน่น (Fixed) CASE 4



ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลตามค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามที่แสดงในหัวข้อ 5.2 และผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 5-2 ถึงตารางที่ 5-10 สามารถสรุปเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของแต่ละแบบจำลองในรูปแบบของกราฟแท่ง โดยรวมได้ดัง รูปที่ 5-8 ดังนี้

Accurately Compare of FEM Model



รูปที่ 5-8 กราฟแสดงผลเฉลี่ยของความแม่นยำ ของแบบจำลอง แต่ละแบบ โดยแบ่งเป็นค่าเฉลี่ยรวม และค่าเฉลี่ยตามลักษณะการติดตั้งที่ต่างกัน (Pin/Fixed) ของการโก่งตัว และความเค้นสูงสุดตามลำดับ

และจากการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมิน ความเค้น-ความเครียด และระยะโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกทดสอบ ที่ทำแบบจำลอง 3 แบบหลัก พบว่ามีค่าความแม่นยำของแต่ละแบบจำลองต่างกันไป โดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.3.1 สรุปผลการสร้างแบบจำลองแบบแกนหมุนได้ (Pin)

จากการวิเคราะห์ผลการจำลอง ในลักษณะการติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) โดยมีการกำหนดเงื่อนไขหลัก ในแบบจำลองดังนี้

- Model 1 กำหนดจุดรองรับเป็น Pin ($U_1=U_2=U_3=0$)
- Model 2 กำหนดค่า stiffness ของ Line spring (k) รอบฐานรองรับทั้งด้านนอกและด้านในคองที่ $= 7 \times 10^7$ N/m/m
- Model 3 กำหนดค่า stiffness ของ Link (k) ที่รอบฐานรองรับด้านนอกคองที่ $U_1 = 2,000$ N/mm, $U_2=Fix$, $U_3=Fix$, $R_1=Null$, $R_2=Null$, $R_3=Null$ และ กำหนดค่าจุดรองรับแผ่นโลหะเป็น Pin ($U_1=U_2=U_3= 0$)

(กำหนดให้ทิศของ U1,U2,U3 เป็น Local Axis ของวัสดุนั้นๆ)

1. ผลการวิเคราะห์ ความเค้นที่ตำแหน่ง กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ เมื่อติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin)

จากข้อมูลการเปลี่ยนเทียบผลการวิเคราะห์ที่แสดงใน รูปที่ 5-9 ถึง รูปที่ 5-12 พบว่า Model 1 ผลการวิเคราะห์จะให้ค่า ความเค้น สูงกว่าการทดสอบ 26%-35% สำหรับกระจกขนาด TF1200x1200x12mm ในทุกกรณีตัวยึดต่อกระจก และให้ค่าความเค้น ใกล้เคียงกับการทดสอบเมื่อกระจกมีขนาด 1200x2400x12mm คือต่างกันไม่เกิน 1%

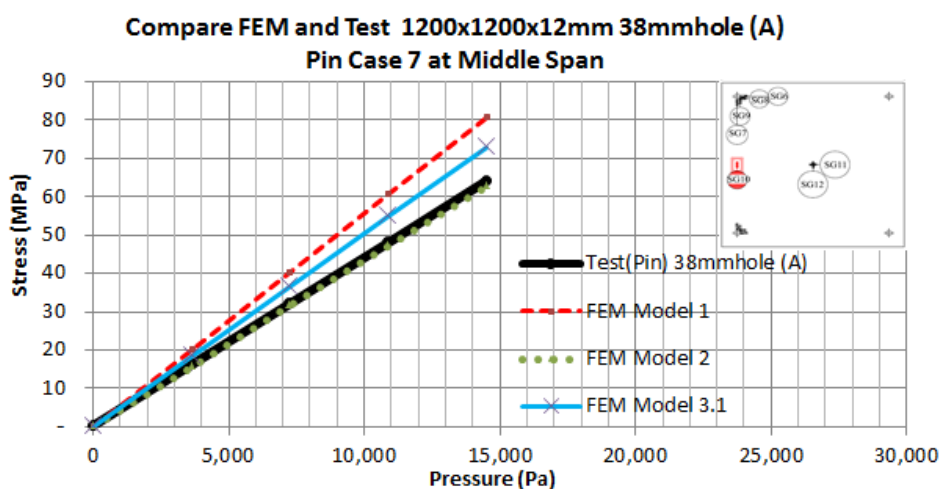
ส่วน Model 2 ผลการวิเคราะห์จะให้ค่า ความเค้น ใกล้เคียงกับการทดสอบ เฉพาะเมื่อใช้กับตัวยึดต่อ (A) ที่แกนหมุนอยู่ใกล้แนวกึ่งกลางแผ่นกระจก แต่สำหรับตัวต่อ (B) ให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความผิดพลาดสูงในระดับ +15% -25% เมื่อใช้กับกระจกขนาด 1200x2400x12mm และติดตั้งด้วยตัวยึดต่อ (A) ยังมีความผิดพลาดในระดับ 35% อยู่

Model 3 มีผลการวิเคราะห์ กับกระจกขนาด 1200x1200x12mm จะให้ค่า ความเค้น ใกล้เคียงกับการทดสอบ เมื่อใช้กับตัวยึดต่อ (B) และสูงกว่า 14% เมื่อใช้กับตัวยึดต่อ (A) และเมื่อใช้กับกระจกขนาด 1200x2400x12mm และติดตั้งด้วยตัวยึดต่อ (A) ให้ค่าต่ำกว่า 11%

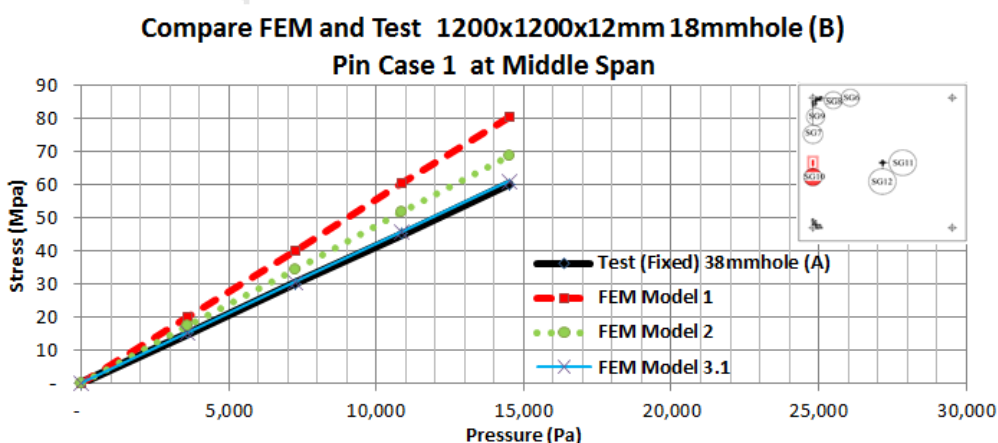
ซึ่งจะเห็นว่าแบบจำลอง Model 1 สร้างแบบจำลองได้ง่ายและรวดเร็วที่สุด แต่ให้ผลการวิเคราะห์ ความเค้นที่สูงกว่าความเป็นจริงอยู่ 35% ซึ่งจะทำให้ไม่ประหยัด แต่ยังปลอดภัยต่อการใช้งาน ส่วนแบบจำลอง Model 2 มีขั้นตอนการสร้างยุ่งยากกว่าแบบจำลอง Model 1 และยังให้ผลการวิเคราะห์ความเค้น ทั้งมากกว่า และน้อยกว่าในระดับ 25% ซึ่งอาจทำให้มีปัญหาในการนำใช้งาน ได้หากวิเคราะห์กระจกด้วยรูปแบบนี้ และแบบจำลอง Model 3 มีความยุ่งยากในการสร้างมากที่สุด แต่ให้ผลการวิเคราะห์ ได้ใกล้เคียง ทั้งตัวยึดต่อที่ลักษณะทางกายภาพต่างกัน ในระดับผิดพลาดสูงกว่าการทดสอบไม่เกิน 14% สำหรับกระจกขนาด 1200x1200x12mm ซึ่งถือว่าปลอดภัย และประหยัดกว่าการวิเคราะห์ด้วย Model 1 แต่ให้ค่าความเค้นที่ต่ำกว่าการทดสอบ 11% สำหรับกระจกขนาด 1200x2400x12mm ซึ่งต้องระวังในการใช้วิเคราะห์กับกระจกที่มีขนาดใหญ่ อาจเป็นไปได้ว่าค่า stiffness ของ spring (k) ไม่ได้เป็นค่าคงที่ตลอดช่วงการทดสอบ ดังแสดงข้อมูลใน ตารางที่ 5-11 แต่หากมีการปรับค่าแรงดันทดสอบของกระจกขนาด 1200x2400x12mm ลงตามพื้นที่ของแผ่นยาง ขอบรอบกระจกทดสอบกว้างประมาณ 50mm -70 mm ที่ผู้วิจัยคาดว่าจะมีส่วนทำให้กระจกต้องรับแรงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5-12 (เส้นประขนาดเล็กสีดำ) และจะเห็นว่าแบบจำลอง Model 3.1 มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบที่ทำการปรับค่าแล้ว ซึ่งอาจต้องตรวจสอบผลการทดสอบอย่างละเอียด

สำหรับวิธีการทดสอบโดยแรงดันลม โดยอาจต้องปรับรูปแบบการติดตั้งกระจกทดสอบ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในส่วนนี้อีกครั้ง

ส่วนแบบจำลอง Model 3 ในรูปแบบย่อยทั้ง 4 แบบ พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ ที่ใกล้เคียงกับเมื่อติดตั้งด้วยตัวยึดต่อ (A) ที่มีลักษณะแกนหมุนใกล้กับแนวกึ่งกลางแผ่นกระจก แต่จะให้เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำที่ต่างกันเล็กน้อย หากใช้วิเคราะห์กับตัวยึดต่อกระจก (B) โดยเฉพาะ Model 3.3 และ Model 3.4 จะให้ความแม่นยำใกล้เคียงการทดสอบมากที่สุด จึงพอสรุปได้ว่า จำนวน และ ตำแหน่ง จุด Link ในแบบจำลองมีผลเพียงเล็กน้อยกับผลการวิเคราะห์ ดังแสดงใน ตารางที่ 5-12

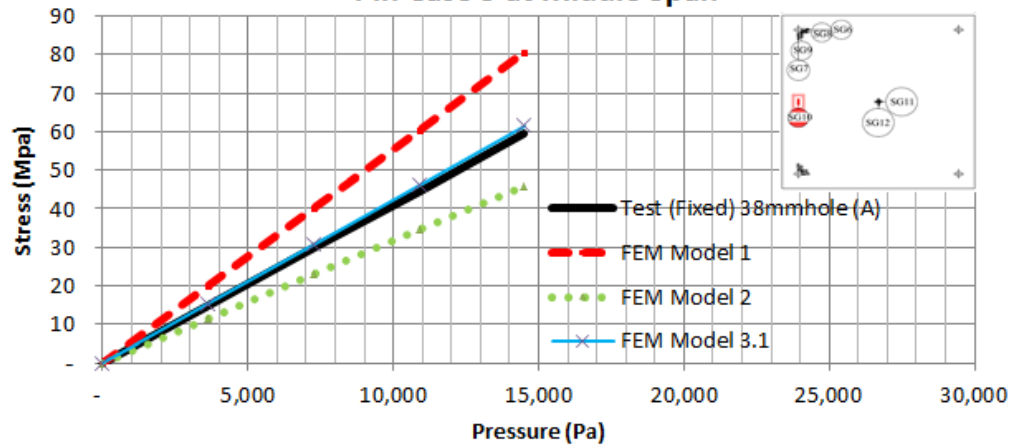


รูปที่ 5-9 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บนกระจกขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งด้วยยึดต่อ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ



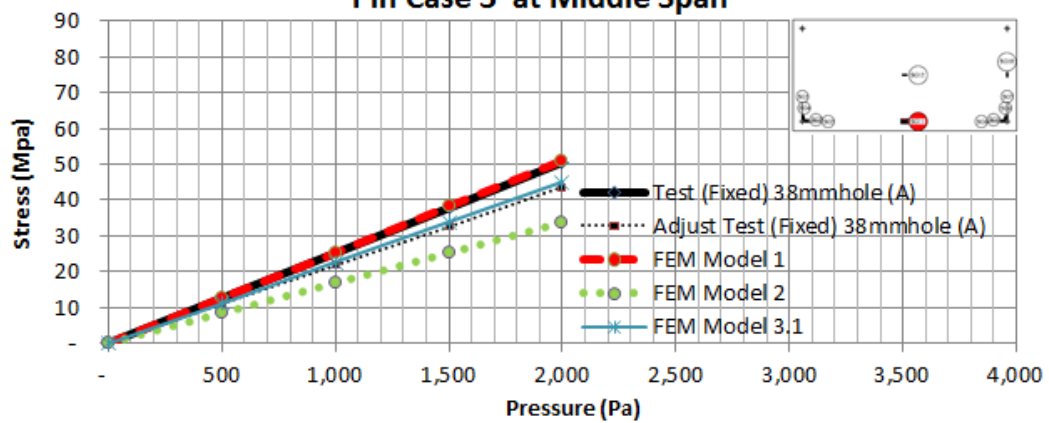
รูปที่ 5-10 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บนกระจกขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 18mm ติดตั้งด้วยยึดต่อ (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ

Compare FEM and Test 1200x1200x12mm 38mmhole (B) Pin Case 9 at Middle Span



รูปที่ 5-11 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระฉากขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งด้วยยึดต่อ (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin)
บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ

Compare FEM and Test 1200x2400x12mm 38mmhole (A) Pin Case 3 at Middle Span



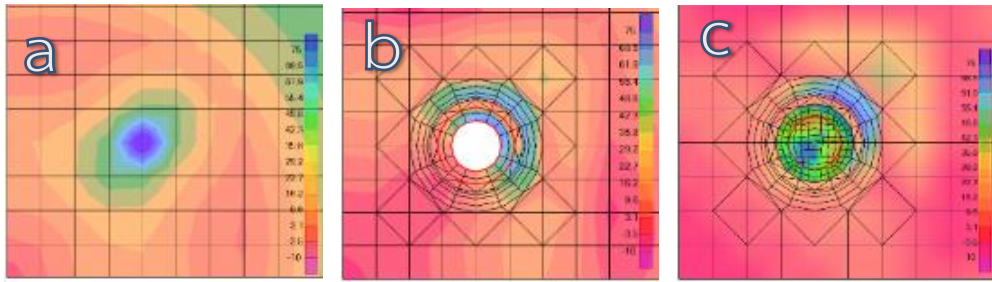
รูปที่ 5-12 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระฉากขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งด้วยยึดต่อ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin)
บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ

2. ผลการวิเคราะห์ ความเค้นที่ตำแหน่งรอบจูดรองรับ เมื่อติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin)

จากทดสอบจริงพบว่าค่าความเครียดที่วัดได้ ที่รอบจูดรองรับยังน้อยกว่าที่กึ่งกลางระหว่างกระจกทุกกรณี ดังนั้นผลการวิเคราะห์แบบจำลองบริเวณรอบจูดรองรับ ที่มีความคาดเคลื่อนของความเค้น จึงไม่เป็นประเด็นหลักในการกำหนดความสามารถในการรับแรงของกระจก แต่การการวิเคราะห์แบบจำลองบริเวณรอบจูดรองรับช่วยให้เรามั่นใจในความถูกต้องของแบบจำลองเพิ่มมากขึ้น

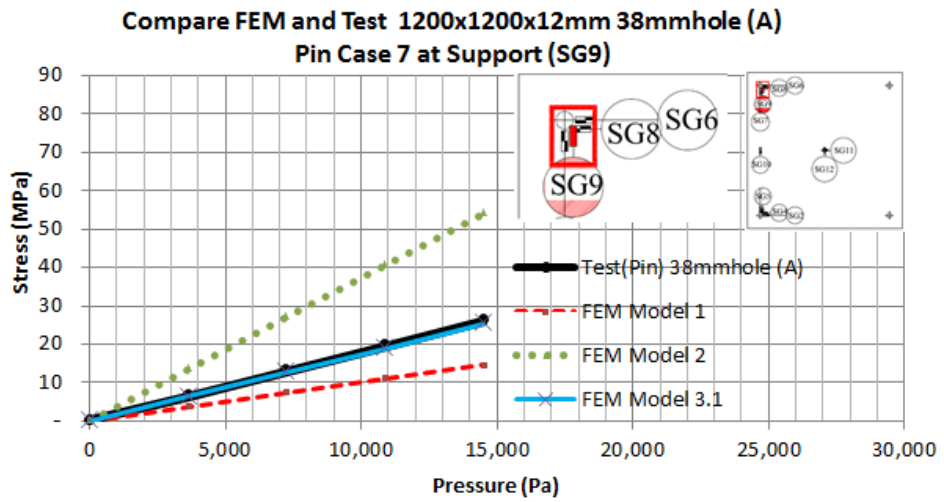
และจากการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่รอบจูดรองรับ ตามแสดงใน ตารางที่ 5-2 ถึง ตารางที่ 5-10 และการเปรียบเทียบแรงกระทำ ต่อความเค้นที่บริเวณจูดรองรับโดยแสดงข้อมูลในส่วนบริเวณที่ 3 (รอบจูดรองรับ ทำมุมทแยงกับขอบกระจก ,SG9) ของ Case7, Case1, Case9, Case3 ตามแสดงใน รูปที่ 5-14 ถึง รูปที่ 5-17 ที่พบว่า Model 1 ให้ผลการวิเคราะห์ที่น้อยกว่าการทดสอบ ประมาณ 50% ในทุกกรณีทดสอบที่ติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) แสดงว่าในการทดสอบจริงสภาพของจุดหมุนของแกนที่หมุนได้ มีแรงต้านทานบางส่วนในตัวยึดต่ออยู่ จึงทำให้ผลการทดสอบมีค่าสูงกว่าแบบจำลอง Model 1 ที่เป็นตัวแทนของแกนหมุนในอุดมคติ และพบว่าแบบจำลอง Model 2 ให้ผลการวิเคราะห์ที่มากกว่าการทดสอบ ประมาณ 50% - 100% ในทุกกรณีทดสอบที่ติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) ของกระจกขนาด 1200x1200x12mm และมากกว่าถึง 6 เท่าสำหรับกระจกขนาด 1200x2400x12mm ซึ่งต้องระวังการนำผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Model 2 ไปใช้ และ Model 3 ให้ผลการวิเคราะห์ที่มากกว่าการทดสอบ ประมาณ 3% - 100% ในทุกกรณีทดสอบ และเมื่อติดตั้งตัวยึดต่อ (A) ผลการวิเคราะห์ด้วย Model 3.1 จะให้ค่าได้ใกล้เคียงกับการทดสอบ ซึ่งตัวยึดต่อมีลักษณะแกนหมุนใกล้กับแนวกึ่งกลางแผ่นกระจก แต่มีความผิดพลาดสูงเมื่อใช้วิเคราะห์กับตัวยึดต่อ (B) ซึ่งตัวยึดต่อมีลักษณะแกนหมุนอยู่ห่างจากแนวกึ่งกลางแผ่นกระจกอยู่มาก และการกระจายแรงของแต่ละแบบจำลองดังแสดงใน รูปที่ 5-13 โดยพบว่าแบบจำลองที่ Model2 และ Model3 ให้รูปแบบการกระจายตัวของความเค้นเป็นไปตามผลการทดสอบในหัวข้อ 4.5 มากกว่า Model1 คือมีความเค้นสูงที่บริเวณ 3 มากกว่าบริเวณ 2

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากทุกแบบจำลอง ทำให้สันนิษฐานได้ว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นทั้งหมดยังมีข้อผิดพลาดหรือเงื่อนไขในการสร้างแบบจำลองที่รอบจูดรองรับ ที่ยังไม่ตรงกับความเป็นจริงบางประการ จึงทำให้เกิดความคาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์ที่รอบจูดรองรับสูง แต่ยังสามารถจำลองผลที่เกิดขึ้นกับบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และการโก่งตัวได้ใกล้เคียงกับการทดสอบอยู่ และพบว่าการใช้ค่า Stiffness ของสปริงเป็นค่าคงที่ ค่าหนึ่ง ไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์กับกระจกที่มีขนาดต่างกันได้ดีเท่าที่ควร



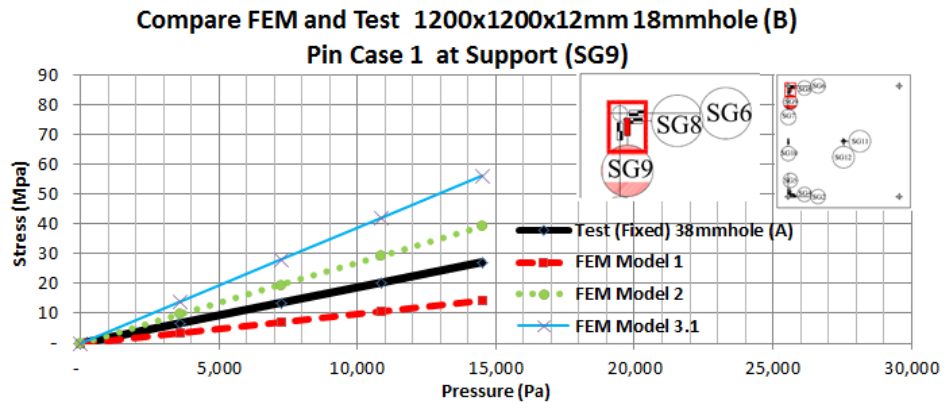
รูปที่ 5-13 ตัวอย่างการกระจายแรงรอบจุดรองรับของแต่ละแบบจำลอง Case 7 (Pin)

(a) Model 1 , (b) Model 2, (c) Model 3

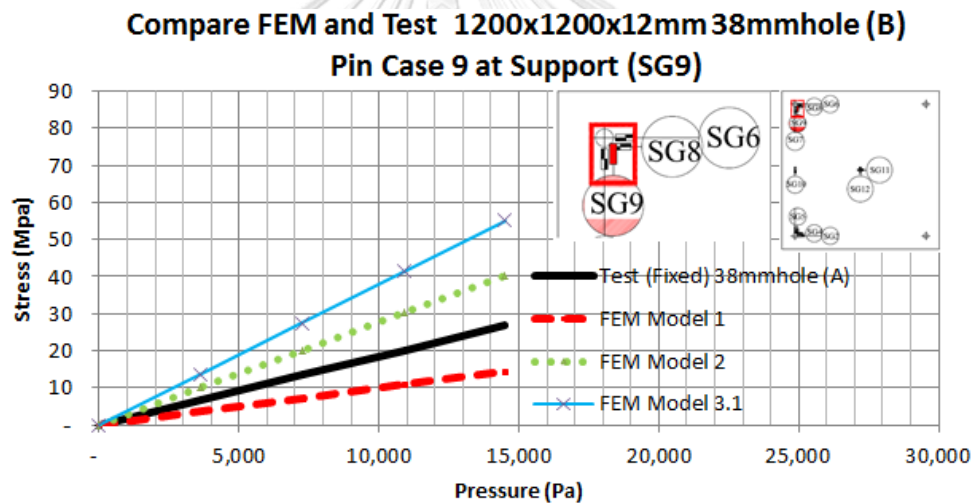


รูปที่ 5-14 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บนกระฉากขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin)

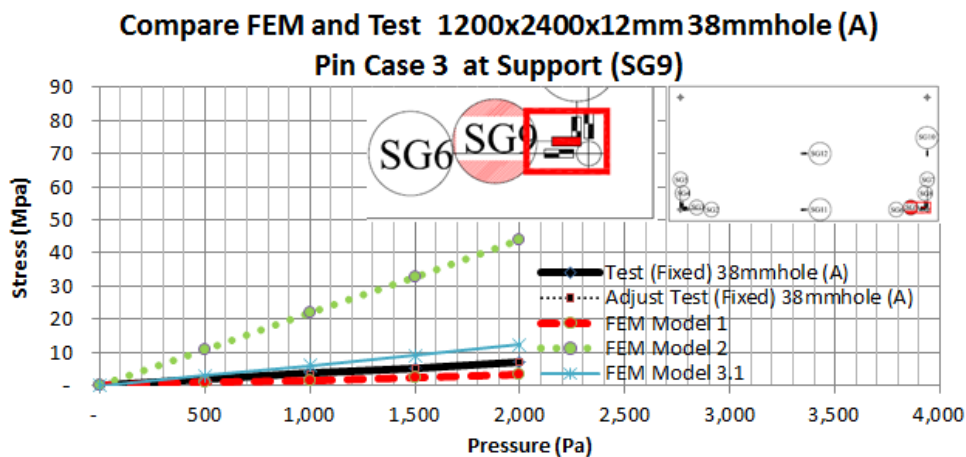
บริเวณจุดรองรับ



รูปที่ 5-15 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 18mm ติดตั้งด้วยยึดต่อ (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin)
บริเวณจุดรองรับ



รูปที่ 5-16 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งด้วยยึดต่อ (B) แบบแกนหมุนได้ (Pin)
บริเวณจุดรองรับ



รูปที่ 5-17 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน กระจกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบแกนหมุนได้ (Pin) บริเวณจุดรองรับ

3. ผลการวิเคราะห์ การโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจก เมื่อติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin)

การโก่งตัวที่กลางแผ่นกระจก ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ มีแนวโน้มไปเป็น ตามการรับแรง แต่จะมีเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำที่แตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงข้อมูลใน ตารางที่ 5-11 และ ตารางที่ 5-12

ตารางที่ 5-11 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ ในด้านความเค้น และการ โก่งตัว เทียบกับการทดสอบในลักษณะแกนหมุนได้ (Pin)

Pin Condition	Model 1		Model 2		Model 3.1	
	Defec- tion	Max Stress point	Defec- tion	Max Stress point	Defec- tion	Max Stress point
TF1200x1200x12mm 38mm hole (A) Pin Case 7	137%	126%	101%	98%	109%	114%
TF 1200x1200x12mm 18mm hole (B) Pin Case 1	143%	133%	119%	114%	100%	102%
TF1200x1200x12mm 38mm hole (B) Pin Case 9	142%	135%	112%	77%	99%	103%

TF 1200x2400x12mm 38mm hole (A) Pin Case 3	99%	101%	59%	67%	71%	89%
Average Pin installation	130%	124%	98%	89%	95%	102%

ตารางที่ 5-12 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ ในด้านความเค้น และการโก่งตัว เทียบกับการทดสอบของ Model 3 ใน 4 ลักษณะย่อยในลักษณะแกนหมุนได้ (Pin)

Pin Condition	Model 3.1		Model 3.2		Model 3.3		Model 3.4	
	Defec- tion	Max Stress point	Defec- tion	Max Stress point	Defec- tion	Max Stress point	Defec- tion	Max Stress point
Case 7	109%	114%	106%	113%	107%	114%	112%	115%
Case 1	100%	102%	97%	100%	98%	100%	98%	100%
Case 9	99%	103%	90%	97%	94%	100%	94%	100%
Case 3	71%	89%	69%	89%	70%	89%	70%	89%
Average Pin installation	95%	102%	91%	100%	92%	101%	93%	101%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.3.2 สรุบบนจำลองรูปแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

จากการวิเคราะห์ผลการจำลอง ในลักษณะการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) โดยกำหนดเงื่อนไขหลัก ในแบบจำลองดังนี้

- Model 1 กำหนดจุดรองรับเป็น Fixed ($U_1=U_2=U_3=R_1=R_2=R_3=0$)
- Model 2 กำหนดค่า stiffness ของ Line spring (k) รอบฐานรองรับทั้งด้านนอก และด้านในคองที่ $= 14 \times 10^7$ N/m/m
- Model 3 กำหนดค่า stiffness ของ Link (k) ที่รอบฐานรองรับด้านนอกคองที่ $U_1 = 2,000$ N/mm, $U_2=Fix$, $U_3=Fix$, $R_1=Null$, $R_2=Null$, $R_3=Null$

และ กำหนดค่าจุดรองรับแผ่นโลหะเป็น Fixed

$$(U1=U2=U3=R1=R2=R3= 0)$$

(กำหนดให้ทิศของ $U1, U2, U3$ เป็น Local Axis ของวัสดุนั้นๆ)

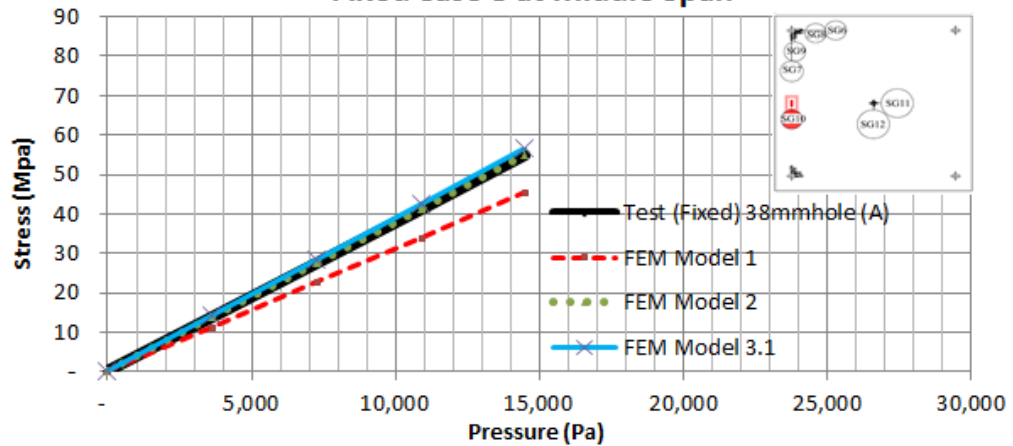
1. ผลการวิเคราะห์ ความเค้นที่ตำแหน่ง กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ เมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

จากการเปรียบเทียบแรงกระทำ ต่อความเค้นที่บริเวณจุดรองรับโดยแสดงข้อมูลในส่วน บริเวณที่ 3 (รอบจุดรองรับ ทำมุมทแยงกับขอบกระจก ,SG9) ของ Case8, Case2, Case10, Case4 ที่แสดงใน รูปที่ 5-18 ถึง รูปที่ 5-21 ในลักษณะแกนยึดแน่น (Fixed) พบว่า Model 1 ผลการวิเคราะห์จะให้ค่า ความเค้น ต่ำกว่าการทดสอบที่แรงดันเท่ากัน ในทุกกรณี 20% -30% หมายถึง หากวิเคราะห์ความเค้นด้วยแบบจำลอง Model 1 จะให้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ทำให้กระจกมีความเค้นถึงจุดที่ออกแบบไว้ก่อนผลการวิเคราะห์เสนอ ซึ่งไม่ปลอดภัยต่อ ออกแบบใช้งาน อีกทั้งพบว่าค่า ความเค้นที่รอบจุดรองรับสูงกว่าความเป็นจริง 4-5 เท่า จึงไม่สามารถนำผลการวิเคราะห์ด้วย แบบจำลอง Model 1 มาใช้ในกรณี ติดตั้งแบบแกนยึดแน่นได้เลย หรือหากใช้จำเป็นต้องระวังเรื่อง เปอร์เซ็นต์ความคาดเคลื่อนที่สูงดังกล่าวไว้

ส่วน Model 2 และ Model 3 ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกัน และมี ความเค้น ใกล้เคียงกับการทดสอบ สำหรับกระจกขนาด 1200x1200x12mm แต่เมื่อใช้กับกระจกขนาด 1200x2400x12mm พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่ต่ำกว่าการทดสอบจริง รวมทั้งในกรณีที่ทำการปรับแรงเนื่องจากผลการยึดแน่นยาระหว่างกระจกและผนังห้องทดสอบแล้ว จึงต้องระวังหากใช้ข้อมูลที่ นำเสนอการวิเคราะห์กระจกที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งควรต้องทำการปรับปรุงผลการวิเคราะห์ในส่วนนี้ เพิ่มเติม

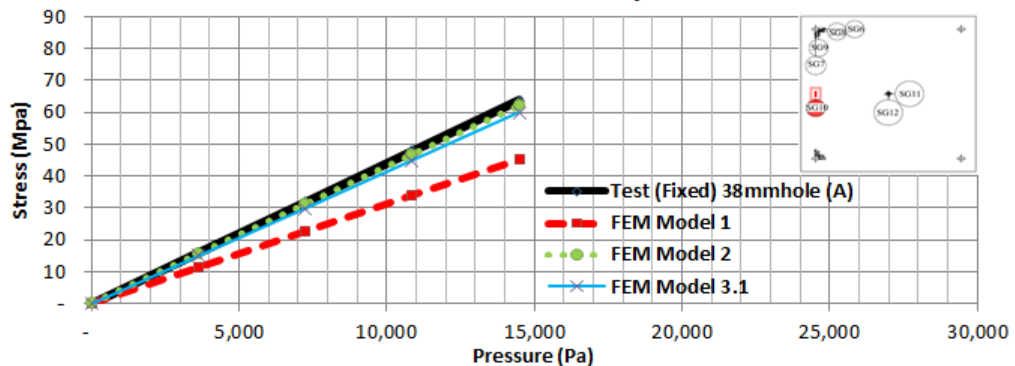
ผู้วิจัยเห็นว่า ในอนาคตอาจจำเป็นต้องปรับปรุงข้อมูลการวิเคราะห์ที่สามารถปรับค่า Stiffness ของสปริง และ Link ได้ระหว่างการเพิ่มแรงกระทำ เพื่อปรับแบบจำลองให้มีสภาพ ใกล้เคียงกับการที่ฐานรองรับมีแผ่นพลาสติกบางๆรองรับ ซึ่งแผ่นพลาสติกอาจมีปัจจัยการยึดหดตัว ระหว่างการรับแรง ได้มากกว่า 1 แกนหรือ มีค่าไม่คงที่ในช่วงเล็กๆ โดยเฉพาะเมื่อรับแรงน้อยเหมือน ในกรณีการทดสอบกระจกชิ้นใหญ่ที่ใช้แรงทดสอบน้อยกว่ากระจกชิ้นเล็ก ถึง 5 เท่า หรืออาจ ปรับปรุงข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ ที่ใช้แบบจำลองในลักษณะ Solid ที่น่าจะให้ผลของ การที่ขอบ กระจกสัมผัสกับแกนโลหะตัวยึดต่อกระจก เฉพาะผิวบน หรือผิวล่างของแผ่นกระจก ซึ่งทำ ให้ผลการทดสอบความเครียดรอบจุดรองรับที่ติดตั้งเฉพาะด้านหลังของการรับแรงแผ่นกระจก ต่ำกว่า ในแบบจำลองแบบ Thin-shell ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการวิจัยนี้

**Compare FEM and Test 1200x1200x12mm 38mmhole (A)
Fixed Case 8 at Middle Span**



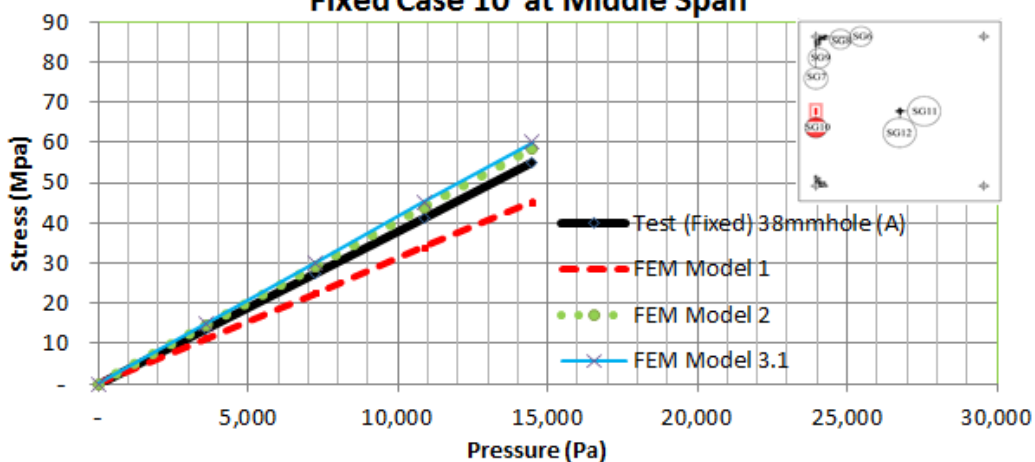
รูปที่ 5-18 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระฉากขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบแกนยึดแน่น
(Fixed) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ

**Compare FEM and Test 1200x1200x12mm 18mmhole (B)
Fixed Case 2 at Middle Span**



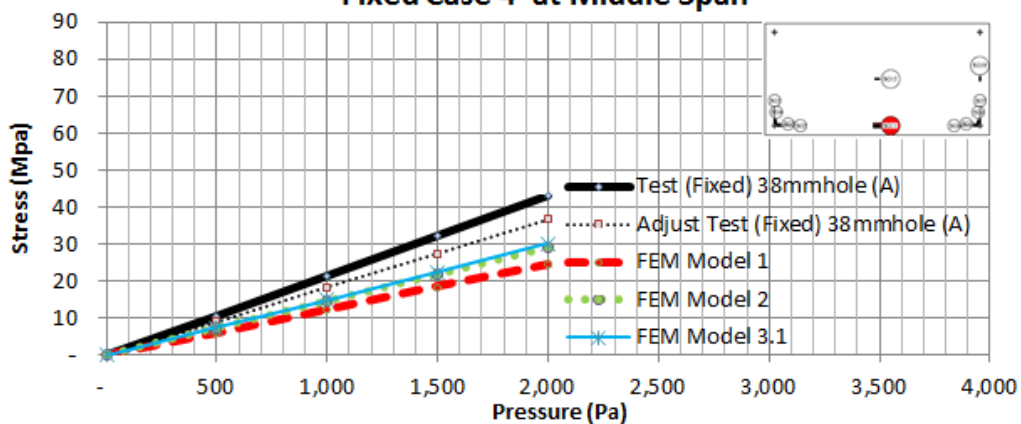
รูปที่ 5-19 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระฉากขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 18mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบแกนยึดแน่น
(Fixed)บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ

Compare FEM and Test 1200x1200x12mm 38mmhole (B) Fixed Case 10 at Middle Span



รูปที่ 5-20 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระงกขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบแกนยึดแน่น
(Fixed) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ

Compare FEM and Test 1200x2400x12mm 38mmhole (A) Fixed Case 4 at Middle Span

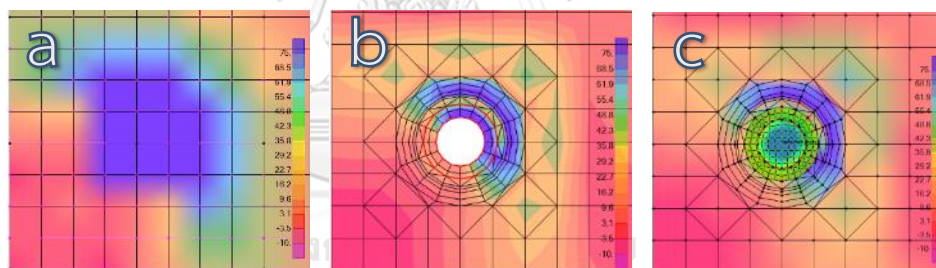


รูปที่ 5-21 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระงกขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบแกนยึดแน่น
(Fixed) บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ

2. ผลการวิเคราะห์ความเค้นบริเวณรอบจุดรองรับ เมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

ด้านผลการวิเคราะห์ความเค้นบริเวณรอบจุดรองรับพบว่า สูงกว่าการทดสอบ คือโดยการ
กระจายแรงโดยรอบจุดรองรับตามแสดงใน ตารางที่ 5-2 ถึง ตารางที่ 5-10 และรูปที่ 5-23 ถึง รูปที่

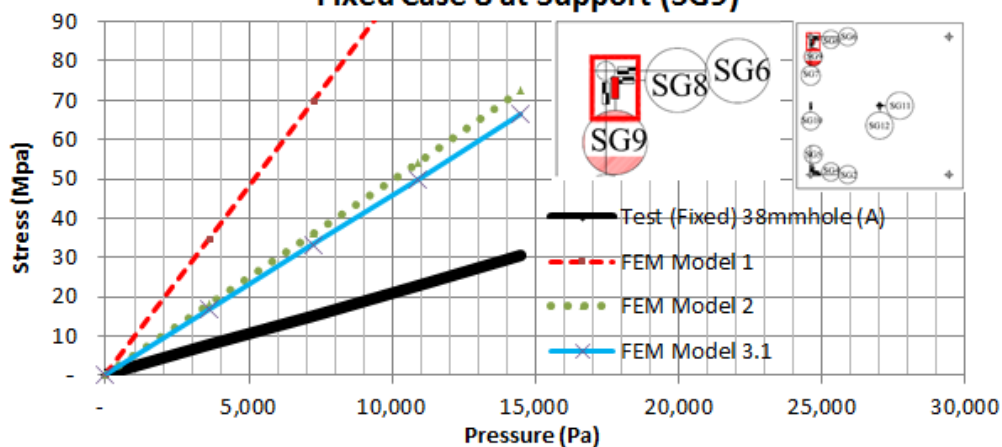
5-26 โดยมีการกระจายแรงของแต่ละแบบจำลอง ดังแสดงใน รูปที่ 5-13 โดย Model 1 พบความคาคเคลื่อนมากที่สุด คือมีความเค้นสูงกว่าการทดสอบมาก ถึง 4-5 เท่า ดังนั้นหากวิเคราะห์โดยใช้ Model 1 ต้องระวังการใช้ข้อมูลที่ผิดพลาดดังกล่าว และพบว่าแบบจำลอง Model 2 และ Model 3 มีรูปแบบการกระจายแรงที่มีความคาคเคลื่อนน้อยกว่า Model 1 คือมีความคาคเคลื่อนประมาณ 2 เท่าจากการทดสอบจริง ซึ่งน่าจะมีเงื่อนไขบางประการในอุปกรณ์การติดตั้งจริง ที่มากกว่าการสร้างในแบบจำลอง โดยเฉพาะบริเวณรอบจูดรองรับทั้ง 3 รูปแบบ ที่สามารถทำให้ความเค้นที่กึ่งกลางระหว่างจูดรองรับลดลง เมื่อปรับการติดตั้งจากแกนหมุนได้ เป็นแบบแกนยึดแน่น โดยทำให้ความเค้นที่รอบจูดรองรับเพิ่มขึ้นไม่มาก เท่ากับที่วิเคราะห์ได้ในแบบจำลอง ซึ่งในอนาคตอาจจำเป็นต้องศึกษาการกระจายแรงรอบจูดรองรับออกไปตามแนวรัศมีอีก 2-3 แนวเพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบว่ามีความคาคเคลื่อนที่ลดลงหรือไม่ และเนื่องจากที่รอบจูดรองรับพบการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่สูงมาก ซึ่งหากทำการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกันได้ รวมถึงการติดตั้งเครื่องมือวัดเป็นการหาค่าความเครียดเฉลี่ยในช่วงระยะ 2-5 mm ซึ่งที่รอบจูดรองรับ อาจมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นไปมากแล้ว ในระยะทางดังกล่าว ดังแสดงใน รูปที่ 5-22 จึงอาจมีส่วนทำให้การวิเคราะห์ และผลการทดสอบได้ค่าที่แตกต่างกันอยู่



รูปที่ 5-22 ตัวอย่างการกระจายแรงรอบจูดรองรับของแต่ละแบบจำลอง Case 8 (Fixed)

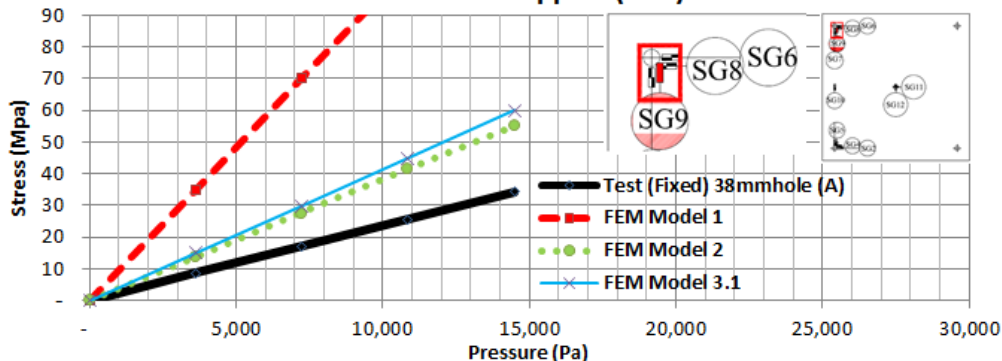
(a) Model 1 , (b) Model 2, (c) Model 3

Compare FEM and Test 1200x1200x12mm 38mmhole (A) Fixed Case 8 at Support (SG9)

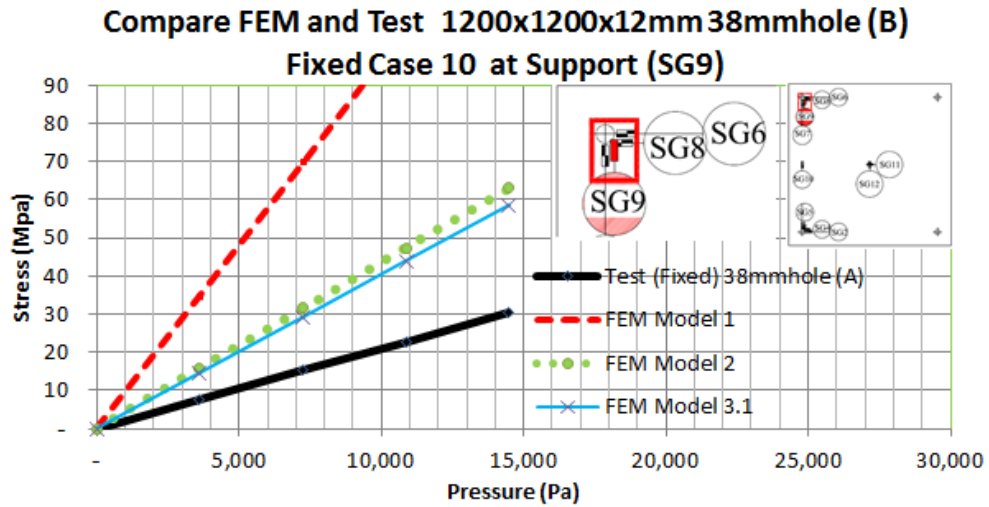


รูปที่ 5-23 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระฉากขนาด 1200x1200x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบแกนยึดแน่น
(Fixed) บริเวณจุดรองรับ

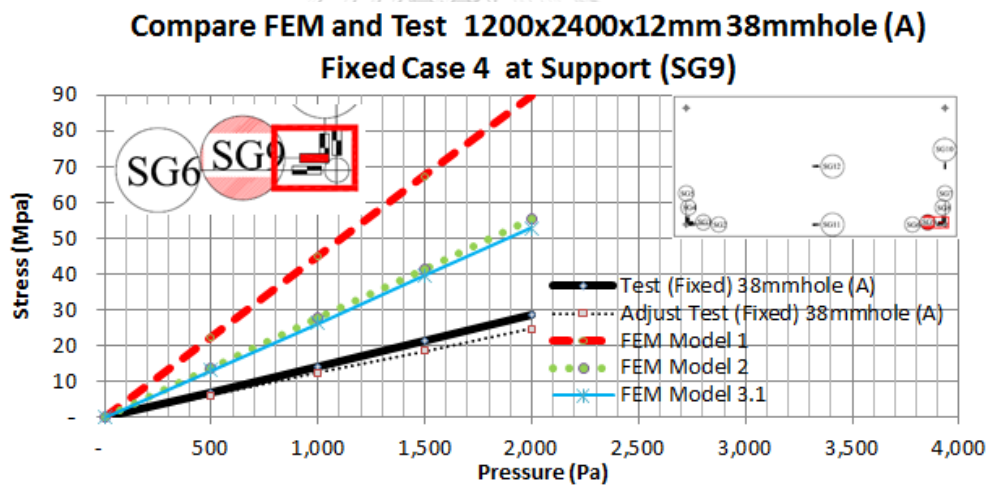
Compare FEM and Test 1200x1200x12mm 18mmhole (B) Fixed Case 2 at Support (SG9)



รูปที่ 5-24 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระฉากขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 18mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบแกนยึดแน่น
(Fixed) บริเวณจุดรองรับ



รูปที่ 5-25 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระฉากขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (B) แบบแกนยึดแน่น
(Fixed) บริเวณจุดรองรับ



รูปที่ 5-26 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบ กับ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ บน
กระฉากขนาด 1200x2400x12mm รูเจาะขนาด 38mm ติดตั้งตัวยึดต่อ (A) แบบแกนยึดแน่น
(Fixed) บริเวณจุดรองรับ

3. ผลการวิเคราะห์ การโค้งตัวที่กลางแผ่นกระจก เมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

และการโค้งตัวที่กลางแผ่นกระจก ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ มีแนวโน้มไปเป็นตามการรับแรง แต่จะมีเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำที่แตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 5-13 และ ตารางที่ 5-14

ตารางที่ 5-13 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ ในด้านความเค้น และการโค้งตัว เทียบกับการทดสอบในการติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed)

Fixed Condition	Model 1		Model 2		Model 3.1	
	Defec- tion	Max Stress point	Defec- tion	Max Stress point	Defec- tion	Max Stress point
TF1200x1200x12mm 38mm hole (A) Fixed Case 8	77%	82%	98%	100%	102%	103%
TF 1200x1200x12mm 18mm hole (B) Fixed Case 2	68%	71%	101%	97%	95%	94%
TF1200x1200x12mm 38mm hole (B) Fixed Case 10	73%	82%	101%	107%	101%	109%
TF 1200x2400x12mm 38mm hole (A) Fixed Case 4	41%	57%	53%	68%	55%	70%
Average Fix installation	64%	73%	88%	93%	88%	94%

ตารางที่ 5-14 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ เทียบกับการทดสอบ ในด้าน ความเค้น และการโก่งตัวของ Model 3 ใน 4 ลักษณะย่อยในลักษณะแกนยึดแน่น (Fixed)

Fixed Condition	Model 3.1		Model 3.2		Model 3.3		Model 3.4	
	Defec- tion	Max Stress point	Defec- tion	Max Stress point	Defec- tion	Max Stress point	Defec- tion	Max Stress point
Case 8	102%	103%	94%	97%	97%	100%	110%	110%
Case 2	95%	94%	92%	92%	94%	93%	94%	93%
Case 10	101%	109%	93%	102%	97%	105%	97%	105%
Case 4	55%	70%	50%	66%	52%	68%	52%	68%
Average Fix installation	88%	94%	82%	89%	85%	91%	88%	94%

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 ผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรง และการโก่งตัว

โดยรวม กระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x1200x12 mm สามารถรับแรงได้ในช่วง 16,700 Pa ถึง 19,300 Pa และมีการโก่งตัวที่ศูนย์กลางแผ่นกระจกที่ประมาณ 24.8 mm – 25.5 mm ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ และลักษณะการติดตั้ง (การนำกระจกไปใช้ติดตั้งจริงควรคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆตามที่ ASTM E1300 แนะนำปรับค่าตัวคูณลด ตามสภาพพื้นที่การใช้งานนั้นๆด้วย)

ส่วนกระจกกระจกเทมเปอร์ ขนาด 1200x2400x12mm สามารถรับแรงได้ในช่วง 3,200 Pa ถึง 3,400 Pa และมีการโก่งตัวที่ศูนย์กลางแผ่นกระจกที่ประมาณ 89 mm – 92 mm ขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้ง (ทำการทดสอบเพียงผลิตภัณฑ์เดียว)

ส่วนการโก่งตัวที่กึ่งกลางกระจก แปรผันตามความสามารถในการรับแรงของกระจกที่เพิ่มขึ้น หรือลดลง

1. ลักษณะการติดตั้งตัวยึดจับกระจกที่ต่างกัน

ลักษณะการติดตั้งตัวยึดจับกระจกที่ต่างกัน มีผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงโดยหากตัวยึดต่อมีลักษณะแกนหมุนอยู่ใกล้แนวกึ่งกลางแผ่นกระจก การติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) ทำให้รับแรงได้ดีขึ้น กว่าติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin) ประมาณ 16% ยกเว้นผลิตภัณฑ์ที่มีจุดหมุนของแกนยึดต่อกระจกที่ห่างจากแนวกึ่งกลางแผ่นกระจกมาก จะทำให้ข้อได้เปรียบในลักษณะดังกล่าวหายไปเมื่อติดตั้งแบบแกนยึดแน่น (Fixed) เป็นผลให้รับแรงได้ลดลงเล็กน้อยที่ 5% เมื่อเทียบกับการติดตั้งแบบแกนหมุนได้ (Pin)

2. ชนิด และลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ตัวยึดจับกระจกที่ต่างกัน

ชนิด และลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ตัวยึดจับกระจกที่ต่างกัน มีผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของกระจกเพิ่มขึ้น หรือลดลง มี 2 ประการที่ตรวจสอบพบจากการทดสอบ คือ

- ขนาดฐานรองรับกระจกของตัวยึดต่อกระจก

โดยขนาดฐานรองรับกระจกของตัวยึดต่อกระจกที่มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อติดตั้งในลักษณะแกนยึดแน่น (Fixed) จะทำให้กระจกสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น 5% -16% ขึ้นกับขนาดฐานรองรับที่ต่างกัน และขนาดแผ่นกระจกใหญ่ขึ้น มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ของการเพิ่ม ลดลง ได้

- ระยะห่างของแกนหมุนของตัวยึดต่อ จากแนวกึ่งกลางแผ่นกระจก

ระยะห่างของแกนหมุนของตัวยึดต่อ จากแนวกึ่งกลางแผ่นกระจก มีผลกับการติดตั้งในลักษณะ แกนหมุนได้ (Pin) โดยที่ผลิตภัณฑ์ที่มีระยะห่างดังกล่าวมากกว่าจะทำให้กระจกสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น 7% ทั้งที่มีขนาดฐานรองรับที่เล็กกว่า

3. ขนาดรูเจาะกระจกที่ต่างกัน

ขนาดรูเจาะกระจกที่ต่างกัน ในที่นี้หมายถึงขนาดรูเจาะพอดี (+2 mm) เทียบกับรูเจาะที่หลวม (+22 mm) มีผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรง เฉพาะกับลักษณะตัวยึดต่อที่มีระยะห่างของแกนหมุนของตัวยึดต่อ จากแนวกึ่งกลางแผ่นกระจกห่างกันมาก ที่ทำให้กระจกรับแรงลดลง เมื่อติดตั้งโดยใช้กระจกที่มีรูหลวม

แต่ในการใช้งานจริงจะไม่สามารถติดตั้งกระจกที่เจาะรูหลวมได้เนื่องจากจะเกิดปัญหาการน้ำรั่ว และการเคลื่อนตัวออกจากแนวการติดตั้งเดิม

4. ผลของขนาดกระจกที่ต่างกัน

ผลของขนาดกระจกที่มีความกว้าง ต่อ ความยาวต่างกัน ในส่วนนี้จะส่งผลกระทบต่อการกระจายแรงในแผ่นกระจกมากกว่าโดย ที่กึ่งกลางจุดรองรับ (Middle Span) ด้านที่ยาวกว่ามีเกิดความเครียด สูงกว่าและมีโอกาสที่กระจกจะแตกในบริเวณดังกล่าวมากกว่าจุดอื่น

6.1.2 การกระจายแรง

จากการทดสอบตัวอย่างกระจกทั้งหมดพบว่า ทุกรูปแบบการติดตั้ง ความเครียดสูงสุดเกิดขึ้นที่ กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ (Middle Span) โดยที่ด้านขอบกระจก (Edge) จะมีความเครียดสูงกว่าที่กลางแผ่นกระจก (Center) และที่รอบจุดรองรับจะมีความเครียด ประมาณ 15% -70% ของความเครียดสูงสุดที่กึ่งกลางจุดรองรับ ตามลักษณะการติดตั้งที่แตกต่างกัน และขนาดกระจกที่แตกต่างกัน

6.1.3 การสร้างแบบจำลองด้วยวิธี จำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองด้วยวิธี จำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรคำนึงถึงลักษณะของแบบจำลองในเรื่องของ ขนาดฐานรองรับกระจกที่ใช้ติดตั้ง ลักษณะการติดตั้งที่แกนหมุนได้ หรือแกนยึดแน่น และระยะห่างระหว่างแนวกึ่งกลางกระจก และตำแหน่งจุดศูนย์การของแกนหมุน ในกรณีติดตั้งแบบแกนหมุนได้ โดยควรมีสสมบัติเชิงกลที่ใช้เป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ ตามตารางที่ 5-1 ได้นำเสนอในบทที่ 5.2 หัวข้อแบบจำลองที่ 3 และใช้การเชื่อมต่อถ่ายแรงระหว่างวัสดุ แบบที่ 3.1 แกวที่ตำแหน่งริมนอกของฐานรองรับกระจก (Model 3.1) จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเฉลี่ยน้อยที่สุด (น้อยกว่า 5%) จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาในการวิจัยครั้งนี้ แต่ยังพบว่าคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น เมื่อกระจกมีขนาดใหญ่ขึ้น (ยาวขึ้น)

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ผู้ทำวิจัย เสนอให้ทำการศึกษา กระจกที่มีความหนาต่างๆกัน เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมโดยละเอียดว่าความหนากระจกที่ต่างกันมีผลกระทบต่อการส่งถ่ายแรงที่เกิดขึ้นเฉพาะผิวบนหรือผิวล่างของกระจก และกระจายแรงโดยเฉพาะรอบจุดรองรับ เพื่อนำไปปรับปรุงพัฒนาแบบจำลองให้มีความสมจริงมากขึ้น
- 2) ผู้ทำวิจัย เสนอให้ตรวจสอบ ตัวยึดจับกระจกที่มีลักษณะแกนยึดแน่นที่มีขายในท้องตลาด ว่ามีพฤติกรรมที่สอดคล้อง หรือแตกต่างออกไปจากที่ทำการทดลองในครั้งนีที่ใช้อยึดต่อกระจกแบบแกนหมุนได้ (Pin) มีปรับใช้โดยขันน็อตยึดไม่ให้แกนสามารถหมุนได้อิสระ หรือไม่
- 3) ผู้ทำวิจัย เสนอให้ทำการตรวจวัดความเครียดที่ผิวด้านบน และผิวด้านล่างของกระจกทดสอบ บริเวณรอบจุดรองรับ และบริเวณถัดออกไป อีก 2-3 แนว เพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการกระจายแรง และนำข้อมูลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่จะพัฒนารูปแบบของแบบจำลองเพิ่มเติมในอนาคต
- 4) ผู้ทำการวิจัย เสนอให้ทำการศึกษาปรับวิธีการทดสอบกระจกขนาด 1200x2400 mm เพื่อปรับลดผลกระทบจากการถ่ายของแผ่นยางยึดรอบกระจก และทดสอบใหม่อีกครั้ง ว่าได้ผลการทดสอบต่างไปจากเดิม หรือไม่
- 5) ผู้ทำการวิจัยเสนอให้ทำการศึกษาแบบจำลองที่สร้างขึ้นส่วนย่อยในลักษณะ 3 มิติประเภท Solid - Hexahedrons หรือ Pentahedrons ที่สามารถกำหนดเงื่อนไขแรงที่ขอบบนและขอบล่างแตกต่างกันได้เปรียบเทียบผลเพิ่มเติม

บรรณานุกรม

1. ASTM, Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings, in ASTM E1300 – 12a¹. 2012, ASTM International: 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.
2. M. Feldmann, R.K., B. Abeln, P. Cruz, J. Belis, J. Beyer, J. Colvin, F. Ensslen, M. Eliasova, L. Galuppi, A. Geßler, C. Grenier, A. Haese, H. Hoegner, R. Kruijs, K. Langosch, Ch. Louter, G. Manara, T. Morgan, J. Neugebauer, V. Rajcic, G. Royer-Carfagni, J. Schneider, S. Schula, G. Siebert, Z. Sulcova, F. Wellershoff, R. Zarnic, Guidance for European Structural Design of Glass Components. Scientific and Technical Research series 2014: Luxembourg: Publications Office of the European Union.
3. พินัส เลิศเลื่อมใส บุรพล แจ้งสว่าง. กระจกและการเลือกใช้ที่เหมาะสม [Online]. จุลสาร ACD บริษัท อรุณชัยเสรี คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง จำกัด [cited 2018 september,3]; 14-18]. Available from: <http://www.thanachai-glass.com/file/articleglass.pdf>.
4. มหาดไทย กระทรวง กรมโยธาธิการ, กฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527). Vol. ฉบับพิเศษ 101. 2527: ราชกิจจานุเบกษา 14.
5. ISO EN, Determination of the bending strength of glass, in ISO 1288 (EN). 2016.
6. Wintech Engineering Limited. Bending Strength Testing BS EN 1288-3 [Online]. 2016; Available from: <https://www.wintechtesting.com/glass-testing/bending-strength-testing/>.
7. Josef Ressel Centre for Thin Glass Technology. Coaxial double ring test [Online Figure]. Available from: <https://fh-joanneum.at/en/research/josef-ressel-centre-for-thin-glass-technology/>.
8. อุตสาหกรรม กระทรวง สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระจกเทมเปอร์ in มอก 965-2560. 2560.
9. ISO EN, Glass in building - Pendulum test - Impact test method and classification for flat glass, in EN 12600. 2002.
10. Rabindranath Andujar Moreno. What dose shape function mean in finite element formulation [Online]. 2011 [cited 2018 September, 3]; Available from:

<http://stochasticandlagrangian.blogspot.com/2011/07/what-does-shape-function-mean-in-finite.html>.

11. Wang, Y., et al., Experimental study on critical breaking stress of float glass under elevated temperature. *Materials & Design*, 2014. 60: p. 41-49.
12. Wang, Y., et al., Effects of fixing point positions on thermal response of four point-supported glass façades. *Construction and Building Materials*, 2014. 73: p. 235-246.
13. Wang, Z., et al., Bearing capacity of tempered glass panel in point supported glass facades against in-plane load. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2016. 16(4): p. 935-948.
14. Campione, G., et al., Flexural behaviour of glass panels under dead load and uniform lateral pressure. *Engineering Structures*, 2013. 49: p. 664-670.
15. Olmos, B., et al., Methodology to develop design aids of simple supported glass panels based on a probabilistic approach and experimental tests. *Engineering Structures*, 2016. 125: p. 92-106.
16. Computers & Structures Inc, *CSI Analysis Reference Manual For SAP2000 , ETAB , SAFE and CSiBridge*. 15 ed. 2016, Berkeley, California, USA.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	โสภณ ยศสาพงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	3 กันยายน 2517
สถานที่เกิด	เชียงใหม่
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัย เชียงใหม่ พ.ศ. 2539 กำลังศึกษาในระดับ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	114/1 หมู่ 9 ต เชียงดอย อ ดอยสะเก็ด จ เชียงใหม่
ผลงานตีพิมพ์	เสนอผลงานวิจัย เรื่อง Behavior of tempered glass installed with drilled type connector ในงานประชุมวิชาการ The Thirty-First KKHTCNN Symposium on Civil Engineering ครั้งที่ 31 จัดโดย มหาวิทยาลัยเกียวโต ณ เมืองเกียวโต ประเทศ ญี่ปุ่น ระหว่างวันที่ 22-24 พฤศจิกายน 2561