

ความสามารถในการเสียรูปในระนาบของผนังกระจกเปลือกนอกรอาคารภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์  
ระหว่างชั้น



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# In-plane Deformation Capacity of Curtain Walls under Story Drift

Miss Sirirat Keawkanka



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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความสามารถในการเสีรूपในระนาบของผนังกระจก
โดย	เปลื้องนอกอาคารภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น
สาขาวิชา	นางสาวสิริรัตน์ เกี่ยวการค้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	วิศวกรรมโยธา
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดิ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิโรจน์ บุญญภิญโญ)

สิริรัตน์ เกี่ยวการค้า : ความสามารถในการเสีรูปร่างในระนาบของผนังกระจกเปลือกนอกอาคารภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (In-plane Deformation Capacity of Curtain Walls under Story Drift) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี, 93 หน้า.

ผนังกระจกเปลือกนอกอาคารเป็นระบบที่กำลังได้รับความนิยมสำหรับอาคารสมัยใหม่ โดยการออกแบบโครงสร้างของผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารจำเป็นต้องพิจารณาผลจากแรงกระทำต่างๆ เช่นแรงลม การขยายตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แรงโน้มถ่วง รวมไปถึงแรงจากแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญให้เกิดการเสีรูปร่างในระนาบของระบบผนังกระจกเปลือกนอกอาคารทำให้เกิดความเสียหายและเกิดอันตรายจากวัตถุที่ร่วงหล่นหากไม่ได้รับการค้ำยันถึงในการออกแบบอย่างเหมาะสม

การวิจัยได้ศึกษาความสามารถในการเสีรูปร่างในระนาบของผนังกระจกเปลือกนอกอาคารภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น ที่ก่อสร้างในประเทศไทย จากการทดสอบการเคลื่อนที่ในระนาบแบบคงที่ของตัวอย่างขนาดจริง ซึ่งตัวอย่างทดสอบขนาดจริงถูกประกอบขึ้นและติดตั้งโดยบริษัทในประเทศ ใช้วัสดุและส่วนประกอบต่างๆ ประเภทของกระจก รายละเอียด วิธีการติดตั้ง และการยึดเป็นแบบเดียวกับใช้จริงในการก่อสร้างอาคาร ตัวอย่างทดสอบถูกทำให้เสีรูปร่างโดยอ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน AAMA 501.4 (2000) โดยทำการศึกษาพฤติกรรมจากการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เพิ่มขึ้นจากครั้งละ 0.25% ไปจนถึง 3% ของความสูงระหว่างชั้น โดยในแต่ละระดับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นกำหนดการเคลื่อนที่จำนวน 3 รอบ

ประสิทธิภาพของตัวอย่างผนังกระจกเปลือกนอกอาคารที่ทำการทดสอบภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น มีความสามารถอยู่ในระดับปลอดภัยต่อชีวิตที่ 2% ซึ่งอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน มยผ.1302 (2552) การทดสอบสังเกตเห็นรอยแยกระหว่างชั้นส่วนแนวตั้ง (mullion) และชั้นส่วนแนวนอน (transom) แต่ไม่พบการแตกของแผ่นกระจกและการหลุดร่วงของชั้นส่วนเมื่อทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นจนถึง 3% เนื่องจากการเสีรูปร่างโดยส่วนใหญ่ถูกลดทอนโดยการเลื่อนของแผงด้านบนและแผงด้านล่างตรงตำแหน่งรอยต่อแนวนอนของแผง (head-sill transom, stack joint)

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5670426121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: CURTAIN WALL / IN-PLANE DEFORMATION / STORY DRIFT / FACADE SYSTEM

SIRIRAT KEAWKANKA: In-plane Deformation Capacity of Curtain Walls under Story Drift. ADVISOR: ASST. PROF. CHATPAN CHINTANAPAKDEE, Ph.D., 93 pp.

Curtain wall façade systems becomes increasingly popular in modern buildings regardless of height. The structural design of curtain walls has to consider effects of wind loads, thermal expansion and gravity loads as well as seismic loads which could impose significant in-plane deformations of the curtain wall system resulting in damage and object-falling hazards if design detailing were not provided properly and sufficiently.

This study aims to examine in-plane deformation capacity of a curtain-walls system constructed in Thailand under story drift by performing full-scale static test of a mock-up specimen. The full-scale mock-up of exterior wall (façade) was fabricated and installed by a company in Thailand where all parts of specimen use the same materials, type of glass, details, methods of construction, and anchorage as those used on the actual building. The specimen was deformed by imposing story drift similar to static seismic test procedure in AAMA 501.4 standard but the story drift was incrementally increased from 0.25% to 3.0% of story height with increment of 0.25% and repeated for three cycles in each step.

The life-safety performance level of the curtain wall was verified under 2% story drift allowed by the seismic design code in Thailand (DPT 1302-2009). The specimen could be observed gap between mullion and transom joints when story drift was increased. The specimen sustained 3.0% story drift without glass breakage or falling parts and the deformation was mainly accommodated by sliding between upper and lower panels at the horizontal panel joint.

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี ที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษาช่วยให้คำชี้แนะ ตลอดจนให้แนวทางการแก้ปัญหา ระหว่างการทำงานวิจัยจนกระทั่งงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์ ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. วิโรจน์ บุญญภิญโญ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บริษัทผู้ผลิตและติดตั้งระบบผนังกระจกเปลือกนอกอาคาร (curtain wall) ประกอบไปด้วย บริษัท ซี.เอ็น.โพรเกรส อินเตอร์ กรุ๊ป จำกัด รวมถึงบริษัท เทคคินท์ จำกัด และบริษัท แคสแคล จำกัด สำหรับความช่วยเหลือในการสนับสนุนตัวอย่างทดสอบ และการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ ขอขอบพระคุณ คุณวิบูลย์ ทวีสกุลชัย ในความอนุเคราะห์ สนับสนุนสำหรับการวิจัย และอนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการทดสอบของบริษัท แคสแคล จำกัด รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ และความสนับสนุนจาก Mr.Lal Silva และ Mr.Joanel Tajonera รวมไปถึงขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องทดสอบ สำหรับความช่วยเหลือใน ระหว่างการทดสอบ ซึ่งการทดสอบนี้ จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีไม่ได้ถ้าขาดการช่วยเหลือจากทุกท่านตามที่กล่าว

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณเพื่อนร่วมรุ่น ป.โท ปี 56 ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนด้านต่างๆ และกำลังใจที่ได้มอบให้แก่ข้าพเจ้า จนกระทั่งสามารถ ทำงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1      บทนำ.....	1
1.1   ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.1.1. ประเภทของผนังเปลือกนอกของอาคาร .....	2
1.1.2. คำนิยามของวัสดุโครงสร้างสำหรับใช้ประกอบผนังภายนอกของอาคาร.....	8
1.1.3. รายละเอียดของวัสดุโครงสร้างสำหรับใช้ประกอบผนังเปลือกนอกของอาคาร .....	8
1.1.4. วิธีการประกอบแผงกระจกและการติดตั้งผนังภายนอกของอาคาร .....	13
1.1.5. ความเสียหายของผนังเปลือกนอกของอาคารจากแผ่นดินไหว .....	15
1.1.6. ข้อกำหนดและมาตรฐานในการออกแบบอาคารด้านการสั่นสะเทือนของ แผ่นดินไหว .....	19
1.2   วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	20
1.3   ขอบเขตการวิจัย.....	20
1.4   ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	21
1.5   แนวทางการดำเนินงานวิจัย .....	21
บทที่ 2      ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.1   งานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับผลกระทบ และการเสียรูปของผนังเปลือกนอกของอาคารจากการ สั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว .....	22
2.2   งานวิจัยและมาตรฐานต่างๆ ในการจัดระดับความเสียหายของผนังเปลือกนอกของอาคาร ..	22
2.3   ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) ที่ยอมให้ของ อาคารและผนังเปลือกนอกของอาคาร .....	26

2.4 การวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของผนัง เปลือกนอกของอาคาร.....	30
2.5 มาตรฐานเกี่ยวกับการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของผนัง เปลือกนอกของอาคาร.....	46
บทที่ 3      ระเบียบวิธีวิจัย .....	50
3.1 แนวคิดหลักของการทดสอบ .....	50
3.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ .....	51
3.3 อุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมือ.....	51
3.3.1 ห้องทดสอบ (test chamber).....	51
3.3.2 คานเหล็กเคลื่อนที่ (moveable beam).....	53
3.3.3 กลไกในการเคลื่อนที่และอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่.....	53
3.4 รายละเอียดพฤติกรรมของตัวอย่างที่พิจารณาภายใต้การทดสอบ .....	54
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ (test procedures).....	54
บทที่ 4      ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ .....	55
4.1 ตัวอย่างทดสอบและห้องปฏิบัติการ .....	55
4.1.1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ 1 .....	57
4.1.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ 2 .....	59
4.1.3 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ 3 .....	62
4.2 ผลการทดสอบผนังกระจกเปลือกนอกอาคาร.....	65
4.2.1 ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 1.....	65
4.2.2 ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 2.....	69
4.2.3 ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 3.....	74
4.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	79
บทที่ 5      สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	87



5.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง .....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	93



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ระบบผนังภายนอกของอาคาร “stick curtain wall system” (AAMA CW-DG-1-96, 2005) .....	3
รูปที่ 1.2 ระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร “unit curtain wall system” (AAMA CW-DG-1-96, 2005) .....	3
รูปที่ 1.3 ระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร “unit and mullion curtain wall system” (AAMA CW-DG-1-96, 2005) .....	4
รูปที่ 1.4 ระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร “panel curtain wall system” (AAMA CW-DG-1-96, 2005) .....	5
รูปที่ 1.5 ระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร “column-cover-and-spandrel curtain wall system” (AAMA CW-DG-1-96, 2005).....	5
รูปที่ 1.6 การกระจายของแรงลมในการออกแบบผนังของอาคาร 64 ชั้น รูปสามเหลี่ยม โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม (wind tunnel test) (AAMA CW-DG-1-96, 2005).....	6
รูปที่ 1.7 การออกแบบชิ้นส่วนโครงแนวตั้งเพื่อรองรับการขยับตัวในแนวระนาบ (AAMA CW-DG-1-96, 2005).....	7
รูปที่ 1.8 ตัวอย่างส่วนประกอบของระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร (รูปจาก บริษัทแคสแคล จำกัด) .....	9
รูปที่ 1.9 แรงดึงและแรงอัดภายในกระจกแต่ละชนิด ( <a href="http://www.chicagowindowexpert.com">http://www.chicagowindowexpert.com</a> ) .....	10
รูปที่ 1.10 กระจกลามิเนต (laminated glass) ( <a href="http://board.postjung.com">http://board.postjung.com</a> , <a href="http://directory.ttopen.co.th">http://directory.ttopen.co.th</a> ) .....	12
รูปที่ 1.11 กระจกอินซูลาเทท (insulated glass) ( <a href="http://www.board.postjung.com">http://www.board.postjung.com</a> , <a href="https://www.theglassblog.wordpress.com">https://www.theglassblog.wordpress.com</a> , <a href="http://www.smartglas.dk/privacy-laminated-smartglass">http://www.smartglas.dk/privacy-laminated-smartglass</a> ).....	12
รูปที่ 1.12 ตัวอย่างหน้าตัดของกระจกแต่ละประเภท ( <a href="http://board.postjung.com">http://board.postjung.com</a> ) .....	12

รูปที่ 1.13 วิธีการประกอบแผงผนังกระจกโดยวิธีการติดตั้งระบบแห้ง (dry glazing) ( <a href="http://www.kawneer.com">http://www.kawneer.com</a> ).....	13
รูปที่ 1.14 วิธีการประกอบแผงผนังกระจกโดยวิธีการติดตั้งระบบเปียก (wet glazing) ( <a href="http://frontdesk.co.in/glazing.html#.VRYQNvyUce0">http://frontdesk.co.in/glazing.html#.VRYQNvyUce0</a> ) .....	13
รูปที่ 1.15 ลำดับการติดตั้งผนังภายนอกของอาคารระบบสติก (stick curtain wall) และระบบยูนิไทซ์ (unitized curtain wall).....	15
รูปที่ 1.16 การแตกร้าวของกระจกในผนังภายนอกของอาคารจากแผ่นดินไหวขนาด 5.9 ในรัฐเวสต์เวอร์จิเนีย เมื่อปี 2010 ( <a href="http://www.dailymail.co.uk/news">http://www.dailymail.co.uk/news</a> ).....	16
รูปที่ 1.17 การหลุดร่วงของเศษกระจกจากแรงแผ่นดินไหวในประเทศแคลิฟอร์เนีย เมื่อปี 1994 (Photo courtesy of Wiss, Jenney, Elstner Associates, Inc.).....	16
รูปที่ 1.18 การแตกของกระจกและการเสียรูปของกรอบโครงสร้างผนังอาคารจากการเคลื่อนที่ในระนาบจากแผ่นดินไหวในประเทศแคลิฟอร์เนีย เมื่อปี 1994 ( <a href="http://www.fema.gov/plan/prevent/earthquake/fema74/">http://www.fema.gov/plan/prevent/earthquake/fema74/</a> ).....	16
ภาพถ่ายโดย Eduardo Miranda มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด รูปที่ 1.19 ความเสียหายของกระจกจากแผ่นดินไหวขนาด 8.8 ในประเทศชิลี เมื่อปี 2010 <a href="http://www.fema.gov/plan/prevent/earthquake/fema74/">http://www.fema.gov/plan/prevent/earthquake/fema74/</a> ).....	17
รูปที่ 1.20 ความเสียหายของผนังภายนอกอาคาร เนื่องจากการไม่สามารถรองรับการเคลื่อนที่ระหว่างชั้น ของอาคาร Mexico City (ESDEP WG 17, Seismic Design, <a href="http://www.fgg.uni-lj.si/~pmoze/ESDEP/master/wg17/l0100.htm">http://www.fgg.uni-lj.si/~pmoze/ESDEP/master/wg17/l0100.htm</a> ).....	17
รูปที่ 1.21 การแตกร้าวของกระจกของผนังภายนอกอาคารจากแรงแผ่นดินไหวในอาคาร Strategy Montreal St เมื่อปี 2011 (Mark JS Esslemont, <a href="http://wozawanderer.blogspot.com">http://wozawanderer.blogspot.com</a> ) .....	18
รูปที่ 1.22 การเสียหายของกระจกและผนังภายนอกอาคารจากแรงแผ่นดินไหว ใน Christchurch เมื่อปี 2011 (Baird และคณะ, 2011).....	18
รูปที่ 2.1 การทดสอบการเคลื่อนตัวตามแนวระนาบที่ใช้ในการประเมิน ผนังอาคารจากการเกิดแผ่นดินไหว (Baird และคณะ, 2011).....	29
รูปที่ 2.2 โครงสร้างกรอบโครงสร้างสำหรับการทดสอบ (Lim และ King, 1991) .....	32

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแผงแบบสองชั้น (double storey) (Lim และ King, 1991) .....	33
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างแผงชั้นเดียว (single storey) รวมกับสองชั้นครึ่ง (two haft storey) (Lim และ King, 1991).....	33
รูปที่ 2.5 วิธีการติดตั้งชิ้นงานตัวอย่างระบบผนังที่ทำการทดสอบรูปแบบ (a) (b) (c) (d) (King และ Thurston, 1992).....	35
รูปที่ 2.6 วิธีการติดตั้งชิ้นงานตัวอย่างระบบผนังที่ทำการทดสอบแต่ละรูปแบบ (e) (King และ Thurston, 1992).....	36
รูปที่ 2.7 รูปแบบของการทดสอบ Dynamic Racking Crescendo Test (Wensheng และ Baofeng, 2008) .....	38
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงช่วงเวลาและระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์ของการทดสอบแบบ crescendo test (Wensheng และ Baofeng, 2008).....	38
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของคลื่นแผ่นดินไหวตามความถี่ของชั้นที่ต้องการ (Wensheng และ Baofeng, 2008) .....	38
รูปที่ 2.10 การทดสอบ “shake table test” ของผนังเปลือกนอกของอาคาร (Wensheng และ Baofeng, 2008) .....	39
รูปที่ 2.11 การติดตั้งการทดสอบการกดกระจก (Eva, 2009).....	40
รูปที่ 2.12 การแตกของกระจกไม่ติดฟิล์ม (0mil Film) (Eva, 2009).....	40
รูปที่ 2.13 การแตกของกระจกติดฟิล์ม 2mil (0.0508 มม.) (Eva, 2009).....	40
รูปที่ 2.14 กราฟระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่และสติเฟนส์กับเวลา (Eva, 2009).....	41
รูปที่ 2.15 รูปด้านของระบบทดสอบ (Eva, 2009).....	41
รูปที่ 2.16 การติดตั้งหน้าต่างขนาด 5x5 ฟุต (Eva, 2009).....	42
รูปที่ 2.17 การติดตั้งหน้าต่างขนาด 4x8 ฟุต (Eva, 2009).....	42
รูปที่ 2.18 การติดตั้งหน้าต่างขนาด 6x4 ฟุต (Eva, 2009).....	42
รูปที่ 2.19 กราฟการสร้าง crescendo (dynamic) load protocol (Eva, 2009).....	43
รูปที่ 2.20 กราฟการสร้าง FEMA 461 drift-sensitive load protocol (Eva, 2009).....	43
รูปที่ 2.21 กราฟการสร้าง Mid-Rise Load Protocol (Hutchinson และคณะ, 2008).....	44

รูปที่ 2.22 กราฟการสร้าง Low-Rise Load Protocol (Hutchinson และคณะ, 2008) .....	44
รูปที่ 2.23 ยางขอบกระจกหลุด (SDS-1) (Eva, 2009).....	45
รูปที่ 2.24 กระจกฝ้าเล็กน้อย (SDS-2) (Eva, 2009) .....	45
รูปที่ 2.25 กาวซิลิโคนฉีกขาดหรือหลุด (SDS-3) (Eva, 2009).....	45
รูปที่ 2.26 ความเสียหายภายใต้สภาวะประลัย (ultimate damage state, UDS) (Eva, 2009) ....	46
รูปที่ 2.27 ตัวอย่างทดสอบที่ประกอบเข้ากับห้องทดสอบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (AAMA 501.4, 2000) .....	47
รูปที่ 2.28 รูปแบบตัวอย่างการทดสอบแบบ horizontal racking test (AAMA 501.6, 2001).....	48
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบโดยทั่วไปติดตั้งในห้องทดสอบ.....	52
รูปที่ 3.2 ห้องทดสอบขนาด 8 เมตร x ความสูง 15 เมตร (รูปจากบริษัท แคสแคล จำกัด).....	52
รูปที่ 3.3 ครอบอกสูบลมพร้อมอุปกรณ์ควบคุม .....	53
รูปที่ 3.4 ทรานสิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวนำแบบเชิงเส้น .....	53
รูปที่ 4.1 การประกอบกระจกเข้ากับชิ้นส่วนกรอบโครง .....	56
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการติดตั้งผนังกระจก unitized curtain wall system .....	57
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างทดสอบที่ 1 ผนังกระจกเปลือยนอกอาคารระบบยูนิไทซ์ (ความกว้าง 3.56 ม. x ความสูง 11.43 ม.) .....	58
รูปที่ 4.4 ลักษณะจุดรองรับแผงตัวอย่างทดสอบที่ 1 .....	58
รูปที่ 4.5 การติดตั้งครอบอกไฮดรอลิกเข้ากับคานเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 1.....	58
รูปที่ 4.6 การติดตั้งคานเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 1 .....	59
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ของตัวอย่างที่ 1.....	59
รูปที่ 4.8 รูปตัวอย่างทดสอบที่ 2 ติดตั้งเข้ากับห้องทดสอบ (ความกว้าง 6.27 ม. x ความสูง 8.60 ม.) .....	60
รูปที่ 4.9 ขนาดของตัวอย่างทดสอบที่ 2 ผนังกระจกเปลือยนอกอาคารระบบยูนิไทซ์.....	61
รูปที่ 4.10 ลักษณะจุดรองรับแผงตัวอย่างทดสอบที่ 2.....	61
รูปที่ 4.11 การติดตั้งครอบอกไฮดรอลิกเข้ากับคานเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 2 .....	61

รูปที่ 4.12 การติดตั้งคานเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 2.....	62
รูปที่ 4.13 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ของตัวอย่างที่ 2.....	62
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างทดสอบที่ 3 ผนังกระจกเปลือกนอกรออาคารระบบยูนีโทซ์ (ความกว้าง 2.40 ม. x ความสูง 7.65 ม.).....	63
รูปที่ 4.15 ลักษณะจุดรองรับแฉงตัวอย่างทดสอบที่ 3.....	63
รูปที่ 4.16 การติดตั้งคานเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 3.....	64
รูปที่ 4.17 การติดตั้งกระบอกไฮดรอลิกเข้ากับคานเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 3.....	64
รูปที่ 4.18 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ของตัวอย่างที่ 3.....	65
รูปที่ 4.19 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 1 ภายใต้ระยะ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 0.5% story height.....	66
รูปที่ 4.20 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 1 ภายใต้ระยะ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.0% story height.....	66
รูปที่ 4.21 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 1 ภายใต้ระยะ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 3.0% story height.....	67
รูปที่ 4.22 ลักษณะการเคลื่อนที่ตามแนวนอนของตัวอย่างทดสอบที่ 1.....	68
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่และความสูงของตัวอย่างทดสอบที่ 1.....	69
รูปที่ 4.24 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 2 ภายใต้ระยะ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.0% story height.....	71
รูปที่ 4.25 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 2 ภายใต้ระยะ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.5% story height.....	71
รูปที่ 4.26 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 2 ภายใต้ระยะ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 4% story height.....	72
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่และความสูงของตัวอย่างทดสอบที่ 2.....	73
รูปที่ 4.28 ลักษณะการเคลื่อนที่ตามแนวนอนของตัวอย่างทดสอบที่ 2.....	74
รูปที่ 4.29 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 3 ภายใต้ระยะ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.0% story height.....	75

รูปที่ 4.30 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 3 ภายใต้ระยะ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 2.0% story height.....	76
รูปที่ 4.31 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 3 ภายใต้ระยะ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 3.0% story height.....	76
รูปที่ 4.32 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 3 ภายใต้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 3.5% story height.....	77
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่และความสูงของตัวอย่างทดสอบที่ 3.....	78
รูปที่ 4.34 ลักษณะการเคลื่อนที่ตามแนวนอนของตัวอย่างทดสอบที่ 3 .....	79
รูปที่ 4.35 ชั้นส่วนรองรับของตัวอย่างทดสอบที่ 1 .....	83
รูปที่ 4.36 ชั้นส่วนรองรับของตัวอย่างทดสอบที่ 2 .....	84
รูปที่ 4.37 ชั้นส่วนรองรับของตัวอย่างทดสอบที่ 3 .....	85

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมสำหรับทำชิ้นส่วนกรอบโครงโดยทั่วไป (minimum mechanical properties for aluminum alloy) (ADM, 2005).....	9
ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติเชิงกลของกระจก (mechanical properties of glass) (AAMA Series No. 12, 1984).....	11
ตารางที่ 1.3 สรุปข้อดีข้อเสียของวิธีการประกอบแผงกระจกระหว่างการติดตั้งระบบแห้ง (dry glazing) และการติดตั้งระบบเปียก (wet glazing), (Nik และ Mark, 2009).....	14
ตารางที่ 1.4 ประเทศที่มีข้อกำหนดและมาตรฐานในการออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (CWTC, 2000).....	19
ตารางที่ 2.1 การจำกัดความเสียหายและระดับสมรรถนะของอาคาร (มยพ.1303, 2557).....	24
ตารางที่ 2.2 ระดับประสิทธิภาพของโครงสร้าง (FEMA 356, 2000).....	26
ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพที่ต้องการและสภาวะจำกัด (Ellingwood, 2001).....	27
ตารางที่ 2.4 มาตรฐานการออกแบบสำหรับระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Eva, 2009) .....	27
ตารางที่ 2.5 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ ( $\Delta$ ), (มยพ.1302, 2552).....	28
ตารางที่ 2.6 สรุปผลการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแนวระนาบ (King และ Thurston, 1992. 36	
ตารางที่ 4.1 การเสียรูปของตัวอย่างที่ 1 จากการเพิ่มระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (story drift).....	67
ตารางที่ 4.2 การเสียรูปของตัวอย่างที่ 2 จากการเพิ่มระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (story drift).....	72
ตารางที่ 4.3 การเสียรูปของตัวอย่างที่ 3 จากการเพิ่มระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (story drift).....	77
ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของตัวอย่างผนังกระจกเปลือกนอกอาคาร.....	80
ตารางที่ 4.5 ระดับความเสียหายของตัวอย่างผนังกระจกเปลือกนอกอาคารภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น จำแนกตาม มยพ.1303 (2557) .....	82



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันอาคารส่วนใหญ่นิยมใช้ผนังเปลือกนอกของอาคารเป็นระบบผนังกระจกโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยส่วนใหญ่ผนังภายนอกของอาคารสูงนิยมใช้ระบบที่ประกอบด้วยวัสดุโลหะเบาและกระจก เนื่องจากวัสดุประเภทหลักในเรื่องความโปร่งแสงที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้อาคาร รวมทั้งเชื่อมโยงไปถึงการประหยัดพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง ประกอบกับคุณสมบัติในเรื่องของน้ำหนักที่ค่อนข้างเบาและวัสดุสามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมได้ดีนั้นก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ระบบผนังอาคารกระจกถูกเลือกในการใช้งานสำหรับอาคารทุกประเภท แต่ในประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดในการออกแบบที่ระบุไว้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังมีผู้ให้ความสำคัญในการศึกษาวิจัยพฤติกรรมค่อนข้างน้อย เนื่องจากเป็นผนังอาคารที่ถูกจัดให้อยู่ในประเภทส่วนประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้าง (nonstructural component) ซึ่งอาจจะเป็นการจัดประเภทที่ไม่ค่อยถูกต้องนัก (Behr และคณะ, 1995) เนื่องจากผนังระบบนี้ต้องมีความสามารถในการต้านทานแรงจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่นลมพายุและแผ่นดินไหว จึงได้ทำการศึกษาขั้นตอนและรายละเอียดความสามารถของผนังเปลือกนอกของอาคารในการทนต่อการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นจากการเคลื่อนที่ในระนาบขณะเกิดแผ่นดินไหวโดยการทดสอบตัวอย่างขนาดจริงภายในห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นข้อมูลให้ผู้ต้องการศึกษาค้นคว้าต่อไป

ซึ่งในเบื้องต้นเพื่อให้เข้าใจในรายละเอียดของระบบผนังกระจกภายนอกของอาคาร (curtain wall system) และส่วนประกอบต่างๆ จึงได้ศึกษาค้นคว้าและสรุปรายละเอียดดังต่อไปนี้ ระบบผนังเปลือกนอกของอาคารโดยใช้กรอบโครงโลหะ (metal curtain wall) เกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1929 โดย Shreve และคณะ ได้ออกแบบอาคาร Empire State (Kawneer UK Limited, 1999) และเริ่มมีพัฒนาในต้นปี ค.ศ.1950 (AAMA CW-DG-1-96, 2005) ซึ่งในประเทศไทยนิยมใช้ระบบผนังเปลือกนอกของอาคารเมื่อ 10 ถึง 20 ปี ที่ผ่านมา โดยสังเกตจากปีที่ก่อตั้งบริษัทผู้ผลิตและติดตั้งระบบผนังเปลือกนอกของอาคารชั้นนำของประเทศ ประกอบกับความนิยมในการก่อสร้างอาคารสูงที่เริ่มขยายตัวมากขึ้นในพื้นที่ใจกลางเมืองใหญ่เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ โดยทั่วไปแล้วค่าใช้จ่ายสำหรับผนังเปลือกนอกของอาคารจะอยู่ที่ประมาณ 10 ถึง 20% (หรือมากกว่า) ของราคาค่าก่อสร้างอาคารทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาด ความสำคัญของอาคารและวัสดุที่ใช้ (Eva, 2009) ความเสียหายของผนังเปลือกนอกของอาคารจากการไม่สามารถทนต่อการสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหว หากพิจารณาในด้านมูลค่าทางการเงินเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นจากการไม่สามารถใช้งานของอาคาร และค่าใช้จ่ายใน

การซ่อมแซมส่วนที่เสียหาย โดยเฉพาะความสูญเสียหลักที่ต้องกังวลในการออกแบบระบบผนังเปลือกนอกของอาคารเป็นอย่างแรกคือ ความปลอดภัยต่อชีวิตของมนุษย์ ดังนั้นจึงต้องให้ความสนใจเกี่ยวกับการป้องกันความสูญเสียที่จะเกิดขึ้น

### 1.1.1. ประเภทของผนังเปลือกนอกของอาคาร

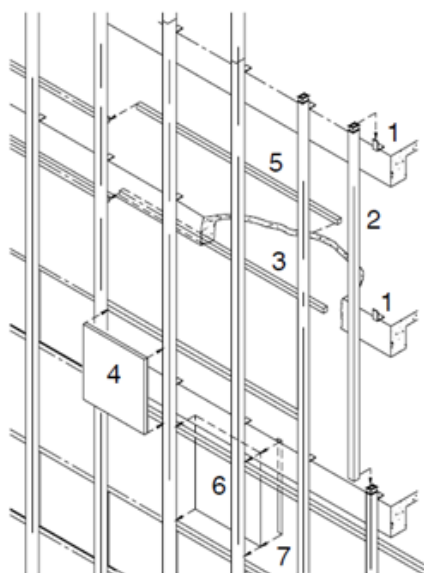
คำจำกัดความของผนังเปลือกนอกของอาคารตามข้อกำหนดพื้นฐานที่กำหนดไว้โดยทั่วไป แบ่งเป็น 3 ประเภท (AAMA CW-DG-1-96, 2005) ประเภทแรกเรียกว่า “curtain wall” คือผนังเปลือกนอกของอาคารโดยอาจเป็นวัสดุชนิดใดก็ได้ ซึ่งไม่ได้ออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักตามแนวตั้ง (non-bearing wall) ประเภทที่สองเรียกว่า “metal curtain wall” คือผนังเปลือกนอกของอาคาร โดยส่วนใหญ่ทำจากโลหะหรืออาจจะประกอบด้วยโลหะ กระฉก และวัสดุพื้นผิวอื่น ๆ ภายใตกรอบโครงโลหะ และประเภทที่สามเรียกว่า “window wall” เป็นส่วนหนึ่งของประเภท metal curtain wall โดยติดตั้งระหว่างชั้น ประกอบด้วยชิ้นส่วนแนวตั้งและแนวนอน โดยออกแบบเพื่อให้สามารถเปิดเพื่อระบายอากาศหรือเป็นบานปิดตาย

การจำแนกประเภทของระบบผนัง (AAMA CW-DG-1-96, 2005) แบ่งเป็น 5 ประเภท ซึ่งแต่ละประเภท สามารถขยายความได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบผนังเปลือกนอกของอาคารประเภท “stick system” (รูปที่ 1.1) เป็นระบบผนังที่ติดตั้งทีละชั้นเข้ากับโครงสร้างของอาคาร โดยทั่วไปชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) จะถูกติดตั้งเป็นอันดับแรก ตามด้วยชิ้นส่วนแนวนอน (transom) และประกอบแผ่นกระฉก (glazing) หรือชิ้นส่วนหน้าต่าง (window unit) เข้ากับกรอบโครง โดยระบบนี้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในช่วงแรก ๆ ของการพัฒนาอาคาร (metal curtain wall) และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งข้อดีของระบบนี้คือค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและขนส่งค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีปริมาณน้อย และสามารถปรับขนาดให้เข้าสภาพของหน้างานจริง ส่วนข้อเสียคือการทำต้องประกอบแผงหน้างานก่อสร้างซึ่งยากต่อการควบคุมคุณภาพ และไม่สามารถประกอบกระฉกได้ก่อนล่วงหน้า การออกแบบในปัจจุบันต้องพิจารณาดำเนินการติดตั้งกระฉกที่แปรผันตามระยะการก่อสร้างจริงของโครงสร้างหลัก

2. ระบบผนังเปลือกนอกของอาคารประเภท “unit system” (รูปที่ 1.2) เป็นระบบผนังที่ประกอบเป็นกรอบโครงโดยสมบูรณ์เป็นชุดสำเร็จจากโรงงาน (unit panel) ประกอบด้วยส่วนเชื่อมต่อของชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) ส่วนต่อของแผงด้านบนและด้านล่างของชิ้นส่วนแนวนอน (head-sill transom) ซึ่งในแต่ละชุดอาจจะประกอบเป็นชุดสำหรับหนึ่งชั้น สองชั้น หรือสามชั้นของความสูงอาคาร เป็นระบบที่มีข้อดี คือสามารถตรวจสอบและควบคุมคุณภาพได้ดี ใช้แรงงานน้อยใน

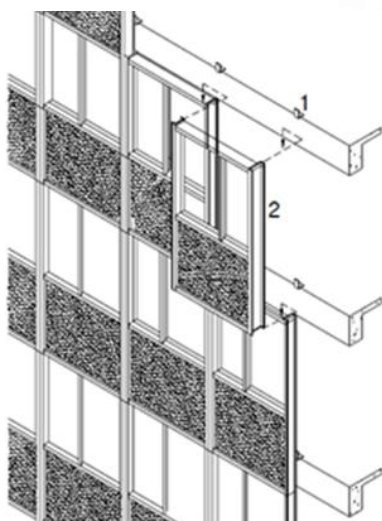
การทำงานหน้างาน และมีส่วนต่อเข้ากับอาคารค่อนข้างน้อย แต่ก็มีข้อเสียเนื่องจากต้องใช้พื้นที่มาก สำหรับการประกอบ การขนส่ง การจัดเก็บภายในโรงงานและหน้างานติดตั้ง อีกปัญหาหนึ่งที่พบในบางครั้งเป็นเรื่องของรายละเอียดและการติดตั้งซึ่งต้องมีการออกแบบเป็นพิเศษ



- 1) สมอยึดเข้ากับโครงสร้างอาคาร (anchors)
- 2) โครงแนวตั้ง (mullion)
- 3) โครงแนวนอน (horizontal rail) รางเหนือหน้าต่าง (gutter section at window head)
- 4) แผ่นที่บดแสงติดบริเวณหน้าพื้น (spandrel panel)
- 5) โครงแนวนอน (horizontal rail) รางใต้หน้าต่าง (window sill section)
- 6) แผ่นกระจกที่สามารถมองเห็นทะลุผ่าน (vision glass)
- 7) ตัวปิดโครงด้านในโครงแนวตั้ง (interior-mullion trim)

รูปที่ 1.1 ระบบผนังภายนอกของอาคาร “stick curtain wall system”

(AAMA CW-DG-1-96, 2005)

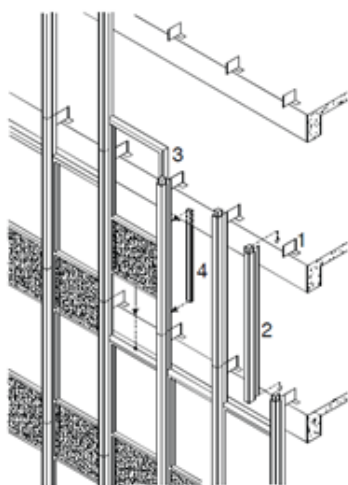


- 1) สมอยึดเข้ากับโครงสร้างอาคาร (anchors)
- 2) แผ่นผนังประกอบสำเร็จจากโรงงาน (pre-framed unit)

รูปที่ 1.2 ระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร “unit curtain wall system”

(AAMA CW-DG-1-96, 2005)

3. ระบบผนังเปลือกนอกของอาคารประเภท “unit and mullion system” เป็นระบบที่รวมสองระบบแรกเข้าด้วยกัน (รูปที่ 1.3) ในระบบนี้ชิ้นส่วนโครงแนวตั้งถูกติดตั้งก่อนและติดตั้งกรอบโครงสำเร็จเข้าไประหว่างโครงตั้ง โดยแต่ละแผงอาจจะเต็มความสูงของชั้นหรือประกอบด้วยส่วนของแผงทึบและกระจกโปร่งใส ซึ่งใช้สำหรับหน้าต่างโครงแนวตั้งที่มีขนาดหน้าต่างค่อนข้างลึกหรือขนาดใหญ่ ซึ่งข้อดีและข้อเสียของระบบคล้ายกับระบบ unit system แต่เพิ่มแรงงานหน้างานและเวลาในการก่อสร้าง



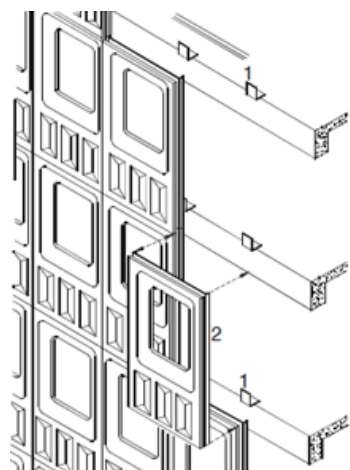
- 1) สมอยึดเข้ากับโครงสร้างอาคาร (anchors)
- 2) โครงแนวตั้ง (mullion) อาจยาวหนึ่งหรือสองชั้น (either one- or two-story lengths)
- 3) แผ่นผนังประกอบสำเร็จรูปสวมเข้าด้านหลังของโครงแนวตั้งจากพื้นด้านบน (pre-assembled unit-lowered into place behind mullion from floor above)
- 4) ตัวปิดโครงด้านในโครงแนวตั้ง (interior mullion trim)

รูปที่ 1.3 ระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร “unit and mullion curtain wall system”

(AAMA CW-DG-1-96, 2005)

4. ระบบผนังเปลือกนอกของอาคารประเภท “panel system” เป็นระบบที่คล้ายกับ unit system (รูปที่ 1.4) แตกต่างที่แผงไม่ได้ประกอบในแผงกรอบโครง แต่เป็นเนื้อเดียวกันจากแผ่นโลหะหรือการหล่อโดยไม่มีจุดเชื่อมออกจากตรงรอยต่อของขอบโครงกระจก แผงอาจจะเต็มความสูงของชั้นซึ่งอาจจะมีช่องเปิดหรือแผงที่มีขนาดเล็กประกอบอยู่ เป็นแผงที่สั่งทำจึงมีราคาค่อนข้างสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ผลิต

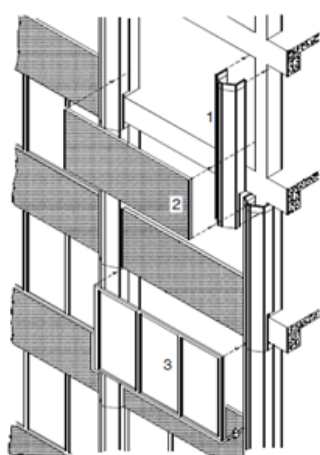
5. ระบบผนังเปลือกนอกของอาคารประเภท “column-cover-and-spandrel system” เป็นระบบที่ค่อนข้างถูกพัฒนาเมื่อเทียบกับระบบทั้งสี่ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยถูกใช้แล้วกว่า 25 ปี ชิ้นส่วนของระบบนี้ประกอบด้วยแผ่นหุ้มปิดเสา แผ่นปิดทึบยาวระหว่างเสาถึงเสาและแผ่นกระจก ซึ่งอาจประกอบสำเร็จหรือแยกส่วน โดยออกแบบสำหรับผนังขนาดใหญ่และผนังมีขนาดที่แตกต่างกันตามความต้องการของผู้ใช้งาน (รูปที่ 1.5)



- 1) สมอยึดเข้ากับโครงสร้างอาคาร (anchors)
- 2) แผ่นผนังประกอบสำเร็จรูป (panel)

รูปที่ 1.4 ระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร “panel curtain wall system”

(AAMA CW-DG-1-96, 2005)



- 1) แผ่นหุ้มปิดเสา (column cover section)
- 2) แผ่นที่บดแสงใช้ปิดบริเวณหน้าพื้น (spandrel panel)
- 3) กระจกช่องแสง (glazing infill)

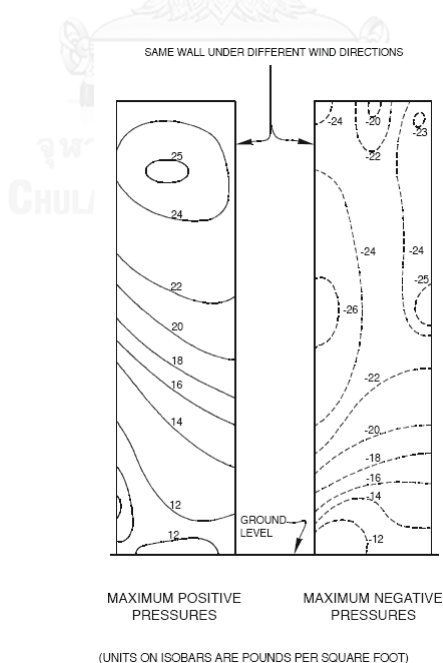
รูปที่ 1.5 ระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร “column-cover-and-spandrel curtain wall system”

(AAMA CW-DG-1-96, 2005)

ระบบผนังเปลือกนอกอาคารทั้ง 5 ประเภท ที่กล่าวเบื้องต้น เป็นการแบ่งตามวิธีของลักษณะการติดตั้งที่มีการใช้ในปัจจุบันเห็นได้ว่าการออกแบบไม่ได้มีขอบเขตที่แน่นอนตายตัว โดยคำนึงถึงวัตถุประสงค์ในเรื่องความสวยงาม ความโปร่งที่มีกรอบน้อย โดยในอนาคตนั้น นวัตกรรมนี้อาจมีการจำกัดความที่ชัดเจนมากขึ้น แต่ในปัจจุบันนั้นยังไม่มีการระบุไว้ชัดเจน (AAMA CW-DG-1-96, 2005) โดยทั่วไปแล้วสถาปัตยกรรมของผนังเปลือกนอกอาคารทั่วไปนิยมใช้ระบบ “stick system” และ “unit system”

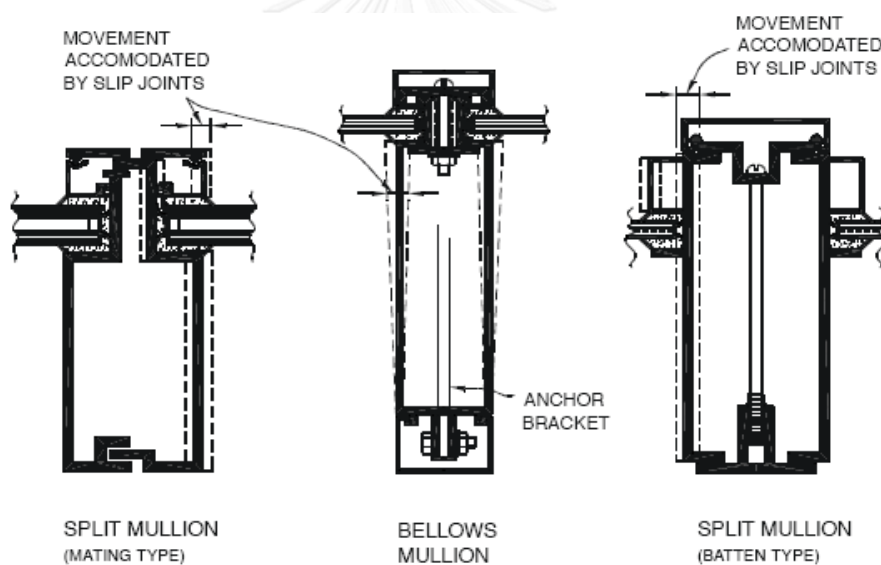
ข้อควรคำนึงในการออกแบบชั้นพื้นฐานของผนังเปลือกนอกของอาคาร ในการวิเคราะห์ผลกระทบของแรงจากปรากฏการณ์ธรรมชาติเพื่อคาดการณ์ปัญหาหลักที่อาจเกิดขึ้น จากประสบการณ์การออกแบบผนังอาคารที่ผ่านมาต้องคำนึงถึง 3 หัวข้อหลัก ดังนี้ 1. ความแข็งแรงมั่นคงของโครงสร้าง (structural integrity) 2. การขยับตัว (provision for movement) 3. การกันลมกันฝน (weather-tightness)

1. ความแข็งแรงมั่นคงของโครงสร้าง (structural integrity) เนื่องจากความเสียหายของโครงสร้างอาจเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ ดังนั้นความแข็งแรงของโครงสร้างจึงเป็นหัวข้อหลักที่ต้องคำนึงเบื้องต้นสำหรับการออกแบบ ซึ่งการออกแบบชั้นส่วนต่างๆ ของผนังเปลือกนอกของอาคารนั้นมีขั้นตอนเช่นเดียวกับผนังโดยทั่วไป ซึ่งให้ความสำคัญในเรื่องสติฟเนส (stiffness) มากกว่าเรื่องกำลัง (strength) และควบคุมความผิดพลาดของรายละเอียดของสมอยึด (anchor) การออกแบบโครงสร้างจะพิจารณาแรงกระทำจากแรงลมซึ่งแปรผันตามพื้นที่ ความสูงของอาคารจากพื้นดิน และลักษณะรูปร่างของอาคาร สำหรับอาคารสูง แรงลมด้านลบหรือแรงดูด (negative wind pressure or suction force) มีผลต่อโครงสร้างมากและอาจมีค่ามากกว่าแรงลมด้านบวกหรือแรงดัน (positive wind pressure or pressure force) ถึงสองเท่า (AAMA CW-DG-1-96, 2005) ซึ่งเป็นเหตุผลในการออกแบบสมอยึดให้ต้านทานความเสียหายจากแรงลมด้านลบ ซึ่งสามารถดูความแตกต่างของแรงลมที่กระทำกับผนังอาคารเดียวกันในแต่ละทิศทางของลมจากตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 การกระจายของแรงลมในการออกแบบผนังของอาคาร 64 ชั้น รูปสามเหลี่ยม โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม (wind tunnel test) (AAMA CW-DG-1-96, 2005)

2. การขยับตัว (provision for movement) เป็นหัวข้อที่มีความสำคัญที่สุดในการออกแบบผนังเปลือกนอกของอาคาร เนื่องจากไม่มีโครงสร้างใดที่อยู่กับที่ (static) แต่มีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากการขยับตัวที่เกิดขึ้นภายในระบบของผนังภายนอกเอง การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชิ้นส่วนองค์ประกอบต่างๆ และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผนังภายนอกและกรอบอาคาร การเคลื่อนไหวเหล่านี้มีสาเหตุไม่เพียงแต่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่มาจากแรงกระทำของลม แรงแม่เหล็ก แผ่นดินไหว และการเสีรูปร่างหรือการแอ่นตัวในกรอบอาคาร จึงต้องให้ความสนใจสาเหตุเหล่านี้ก่อนที่จะเกิดปัญหา โดยการออกแบบชิ้นส่วนให้สามารถรองรับการขยับตัวในแนวระนาบทั้งทิศทางในแนวตั้งและแนวนอน เช่นประเภทจุดต่อเลื่อนได้ (slip joint) หรือชนิดกระบอก (bellows action) ดังตัวอย่างหน้าตัดของชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) รูปที่ 1.7 อีกทั้งเนื่องจากรายละเอียดในการออกแบบชิ้นส่วนรองรับ (bracket connection) ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นสามารถลดความยุ่งยากโดยการออกแบบผนังให้มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะลดจำนวนจุดยึดต่อ



รูปที่ 1.7 การออกแบบชิ้นส่วนโครงแนวตั้งเพื่อรองรับการขยับตัวในแนวระนาบ

(AAMA CW-DG-1-96, 2005)

3. การกันลมกันฝน (weather-tightness) หมายถึงการป้องกันจากการรั่วซึมจากน้ำฝน และการรั่วซึมของอากาศภายนอกเข้ามาในอาคาร ขึ้นอยู่กับบริเวณที่ออกแบบสำหรับการขยับตัวและตรงตำแหน่งยึดต่อต่างๆ สำหรับวิธีการหลีกเลี่ยงการรั่วซึมของน้ำแบ่งออกเป็น 2 วิธีการคือ การออกแบบระบบระบายน้ำภายใน (internal drainage) และการออกแบบการสมดุลของแรงดัน (pressure equalization)

### 1.1.2. คำนิยามของวัสดุโครงสร้างสำหรับใช้ประกอบผนังภายนอกของอาคาร

ชิ้นส่วนต่างๆ ของผนังเปลือกนอกของอาคารมีคำศัพท์ทางเทคนิคเพื่อเรียกเฉพาะเจาะจงสำหรับใช้สื่อสารให้เข้าใจไปในทิศทางเดียวกันในการปฏิบัติงาน (รูปที่ 1.8) โดยหลักๆ แล้วมีดังต่อไปนี้

1. มัลเลียน (mullion) เป็นชิ้นส่วนแนวตั้ง ใช้แบ่งช่องหน้าต่าง ประตู หรือผนัง ในปัจจุบันโดยทั่วไปแล้วทำจากอลูมิเนียม ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างซึ่งรองรับน้ำหนักของแผงและแรงที่กระทำกับผนังแล้วถ่ายแรงทั้งหมดเข้าโครงสร้างหลักของอาคาร

2. แทรนซั่ม (transom) หรือกรอบวงกบด้านบน เป็นชิ้นส่วนแนวนอนหรือคานขวาง เพื่อแยกประตูและหน้าต่างออกจากกัน ซึ่งเชื่อมต่อส่วนปลายทั้งสองเข้ากับชิ้นส่วนแนวตั้ง โดยชิ้นส่วนแนวนอน อยู่ระหว่างแผงเรียกว่าแทรนซั่มเสริม (intermediate transom) และตรงส่วนบนของแผงเรียกว่าเฮดแทรนซั่ม (head transom) ส่วนล่างของแผงเรียกว่าซิลแทรนซั่ม (sill transom) ซึ่งมักนิยมใช้สำหรับระบบ “unit system”

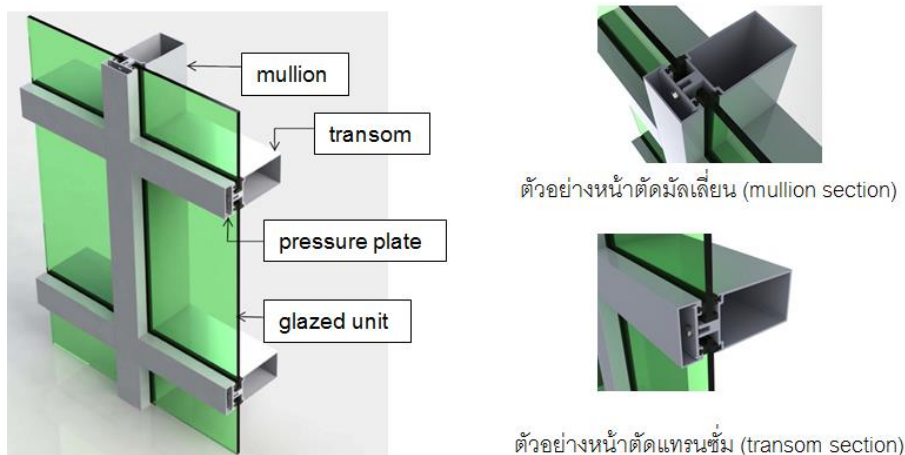
3. แผ่นกระจก (glazing) หรือส่วนที่โปร่งใสของผนังอาคาร อาจทำมาจากกระจกหรือพลาสติก (อะคริลิก หรือ โพลีคาร์บอเนต) โดยทั่วไปกระจกที่ใช้สำหรับงานสถาปัตยกรรมนั้นมีทั้งกระจกใสและกระจกสี กระจกแผ่นเดียว (monolithic glass) หรือกระจกหลายแผ่นที่ประกอบเข้าด้วยกัน (laminated or insulated glass)

4. แผ่นจับยึดต้านแรงดัน (pressure plate) เป็นชิ้นส่วนจับยึดกระจกเข้ากรอบโครง นิยมใช้สำหรับการติดตั้งระบบแห้ง (dry gasket method)

### 1.1.3. รายละเอียดของวัสดุโครงสร้างสำหรับใช้ประกอบผนังเปลือกนอกของอาคาร

1. ชิ้นส่วนกรอบโครง (frame) ในปัจจุบันนิยมใช้อลูมิเนียมสำหรับทำชิ้นส่วนกรอบโครง เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ป้องกันการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมได้ดี และสามารถขึ้นรูปได้ตามความต้องการ หน้าตัดอลูมิเนียมจะทำได้โดยการผลิตขึ้นรูปตามแบบ (aluminum extrusions) โดยทั่วไปประเทศไทยนิยมใช้อลูมิเนียมเกรดธรรมดา (common alloy) คือเกรด 6063-T5 และอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง (high strength alloy) เกรด 6063-T6 หรือ 6061-T6 ตามคุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียม ดังตารางที่ 1.1





รูปที่ 1.8 ตัวอย่างส่วนประกอบของระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร  
(รูปจาก บริษัทแคสแคล จำกัด)

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมสำหรับทำชิ้นส่วนกรอบโครงโดยทั่วไป (minimum mechanical properties for aluminum alloy) (ADM, 2005)

Alloy Type	Product	Strength (MPa)				Compressive Modulus of Elasticity, $E$ (MPa)
		$F_{tu}$	$F_{ty}$	$F_{cy}$	$F_{su}$	
6063-T5	Extrusions	150	110	110	90	69,600
6063-T6	Extrusions	205	170	170	130	69,600
6061-T6	Extrusions	260	240	240	165	69,600

$F_{tu}$  = tensile ultimate strength,  $F_{ty}$  = tensile yield strength

$F_{cy}$  = compressive yield strength,  $F_{cu}$  = compressive ultimate strength

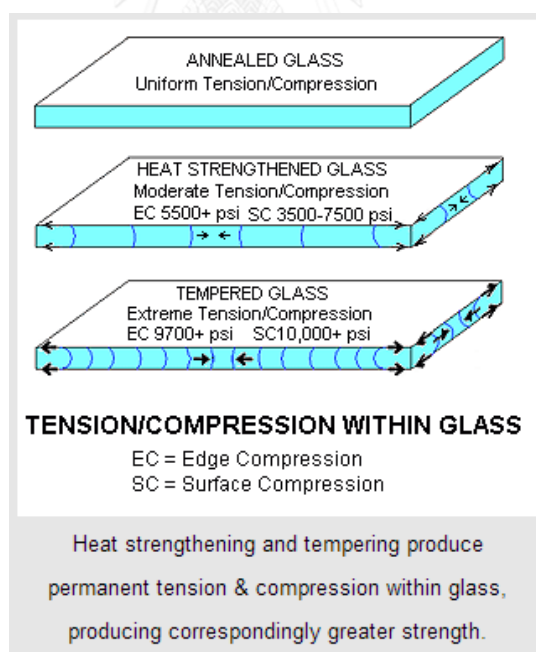
2. กระจก (glazing) สามารถแบ่งตามคุณสมบัติเชิงกลได้ 3 ชนิด คือ 1. กระจกธรรมดา (annealed glass) 2. กระจกฮีทสเตรงเท็นหรือกระจกอบร้อน (heat-strengthened glass) และ 3. กระจกเทม-เปอร์หรือกระจกนิรภัย (tempered glass) ดังรูปที่ 1.9 แสดงแรงดึงและแรงอัดภายในกระจกแต่ละชนิด โดยกระจกแต่ละชนิดมีลักษณะเชิงกลดังตารางที่ 1.2 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ (AAMA Series No. 12, 1984)

กระจกธรรมดา (annealed glass) หรือ กระจกโฟลต (float glass) โดยผ่านกระบวนการให้ความร้อนกับวัสดุผสมจากการหลอมเหลวออกไซด์ของโลหะต่าง ๆ ที่มีอุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส

แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงเหลือประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส จนมีความหนืดพอเหมาะต่อการขึ้นรูป แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ซึ่งผลิตได้ทั้งกระจกใสธรรมดา และกระจกสี หากเกิดการแตกหักจะมีลักษณะเป็นชิ้นแหลมคม

กระจกฮีทสเตรงเทนหรือกระจกอบร้อน (heat-strengthened glass) โดยการนำเอากระจกธรรมดา (annealed glass) มาอบให้ความร้อนเพิ่มขึ้นที่ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส (ASTM C 1048, 2004) แล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงจากกระจกธรรมดาขึ้นเป็น 2 เท่า มีความแหลมคมเมื่อแตกหักเหมือนกระจกธรรมดา โดยที่การบาก หรือเจาะ ต้องทำในกระบวนการผลิตเท่านั้น

กระจกเทมเปอร์หรือกระจกนิรภัย (tempered glass) โดยการนำเอากระจกธรรมดา (annealed glass) มาอบให้ความร้อนเพิ่มขึ้นที่ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส (ASTM C 1048, 2004) แล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยใช้ลมเย็นเป่า (air quenching) ทำให้ผิวของกระจกจะอยู่ในสภาพแรงอัดขณะที่ภายในของกระจกอยู่ในสภาวะแรงดึง เมื่อกระจกถูกกระแทกหรือทุบจนแตก แผ่นกระจกจะแตกละเอียดเป็นเม็ดเล็กๆ ที่ไม่มีความแหลมคม มีความแข็งแรงกว่ากระจกธรรมดาขึ้น 4 เท่า โดยที่การบาก หรือเจาะ ต้องทำในกระบวนการผลิตเท่านั้น



รูปที่ 1.9 แรงดึงและแรงอัดภายในกระจกแต่ละชนิด

(<http://www.chicagowindowexpert.com>)

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติเชิงกลของกระจก (mechanical properties of glass) (AAMA Series No. 12, 1984)

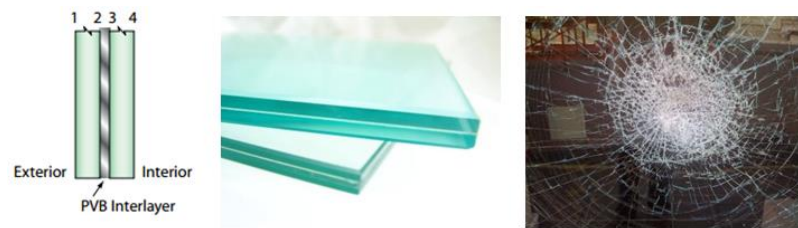
Modulus of Elasticity (Young's Modulus), $E$	10.4x10 <sup>6</sup>	psi	7.2x10 <sup>10</sup>	N/m <sup>2</sup>
Modulus of Rigidity (Shear Modulus), $G$	4.3x10 <sup>6</sup>	psi	3.0x10 <sup>10</sup>	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.22			
Coefficient of Thermal Expansion, $\alpha$	49x10 <sup>-7</sup>	/ °F	88x10 <sup>-7</sup>	/ °C
Density, $\rho$	157	lb/ft <sup>3</sup>	2.5	g/cm <sup>3</sup>
Modulus of Rupture (Flexure) of Annealed	6,000	psi	4.13x10 <sup>7</sup>	N/m <sup>2</sup>
Modulus of Rupture (Flexure) of Heat- strengthened	12,000	psi	8.27x10 <sup>7</sup>	N/m <sup>2</sup>
Modulus of Rupture (Flexure) of Fully Tempered	24,000	psi	1.65x10 <sup>8</sup>	N/m <sup>2</sup>

นอกจากนี้สามารถแบ่งประเภทของกระจกตามกระบวนการผลิตได้ 3 ประเภท คือ  
1. กระจกแผ่นเดียว (monolithic glass) 2. กระจกลามิเนต (laminated glass) 3. กระจกอินซูลเทท (insulated glass, IGU) แสดงในรูปที่ 1.12 ตัวอย่างหน้าตัดของกระจกแต่ละประเภท

กระจกแผ่นเดียว (monolithic glass) กระจกแผ่นเดียวที่ผ่านกระบวนการผลิต ไม่ว่าจะเป็น กระจกธรรมดา กระจกฮีทสเตรงเทนหรือกระจกอบร้อน และกระจกเทมเปอร์หรือกระจกนิรภัย มีความหนาตั้งแต่ 3 ถึง 25 มิลลิเมตร (AS 1288, 2006) ผลิตได้ทั้งกระจกใส และกระจกสี

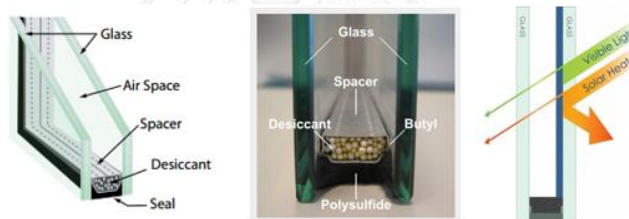
กระจกลามิเนต (laminated glass) การนำเอากระจกมากกว่าหนึ่งแผ่นมาประกบเข้าด้วยกันโดยมีฟิล์มเพื่อยึดติดอยู่ตรงกลาง ลักษณะการแตกของกระจกคือเศษกระจกจะติดอยู่กับฟิล์มไม่ร่วงหล่นมาเป็นอันตราย (รูปที่ 1.10) จึงถือเป็นกระจกนิรภัยประเภทหนึ่ง ฟิล์มนี้อาจเป็นฟิล์ม PVB (poly vinyl butyral) มีความหนาตั้งแต่ 0.38, 0.76, 1.14 มม. หรือ 1.52 มม. หรือฟิล์มอย่างบางพิเศษ InP (ionoplast interlayer) มีความหนา 0.86, 1.52 มม. หรือ 2.29 มม. ซึ่งการใช้ฟิล์มแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน สำหรับอาคารสูงระบุให้ใช้กระจกประเภทนี้สำหรับผนังภายนอกของอาคาร ตามข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องควบคุมอาคาร (สภากรุงเทพมหานคร, 2544)

กระจกอินซูลาต (insulated glass, IGU) การนำเอากระจกมากกว่าหนึ่งแผ่นมาประกบเข้าด้วยกันโดยมีช่องอากาศอยู่ตรงกลาง ซึ่งอาจเป็นอากาศแห้ง หรือก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน ก๊าซคริปทอน ก๊าซซีนอน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซซิลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Lingnell, 2011) โดยกระจกประเภทนี้มีคุณสมบัติในการป้องกันการถ่ายเทความร้อนและกันเสียงได้ดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของกระจกที่ใช้ (รูปที่ 1.11)



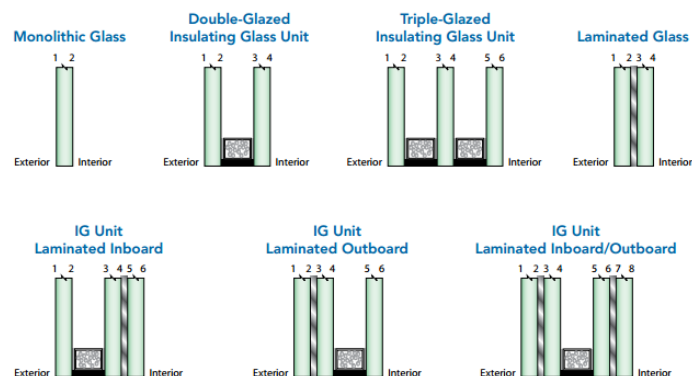
รูปที่ 1.10 กระจกลามิเนต (laminated glass)

(<http://board.postjung.com>, <http://directory.ttopen.co.th>)



รูปที่ 1.11 กระจกอินซูลาต (insulated glass)

(<http://www.board.postjung.com>, <https://www.theglassblog.wordpress.com>,  
<http://www.smartglas.dk/privacy-laminated-smartglass>)



รูปที่ 1.12 ตัวอย่างหน้าตัดของกระจกแต่ละประเภท

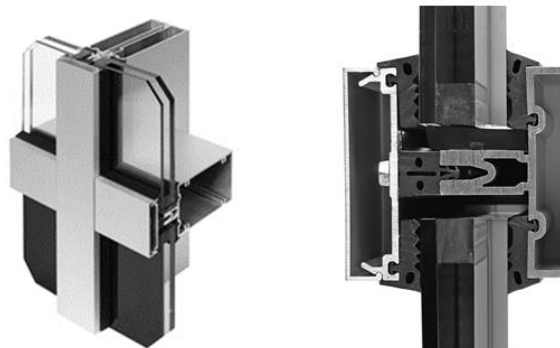
(<http://board.postjung.com>)

#### 1.1.4. วิธีการประกอบแผงกระจกและการติดตั้งผนังภายนอกของอาคาร

##### 1. วิธีการประกอบแผงกระจกผนังภายนอกของอาคาร

โดยทั่วไปแล้วการยึดกระจกเข้ากับกรอบโครงสร้างออกเป็น 2 วิธี คือการติดตั้งระบบแห้ง (dry glazing) และการติดตั้งระบบเปียก (wet glazing) สามารถสรุปข้อดีข้อเสียของแต่ละระบบดังตารางที่ 1.3 ซึ่งมีการละเอียดดังนี้

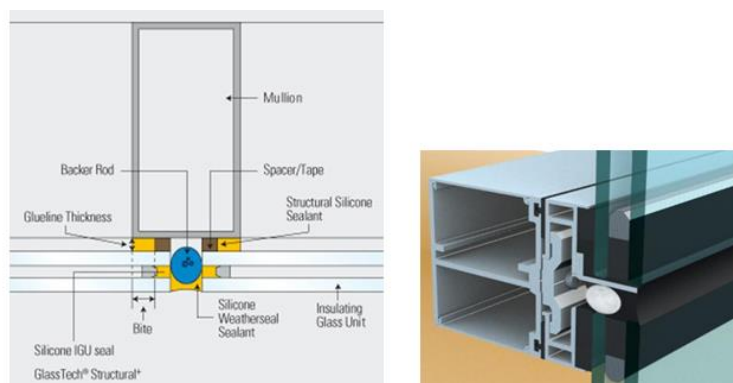
การติดตั้งระบบแห้ง (dry glazing) เป็นการใช้อย่างปะเก็น (rubber gasket) โดยอาศัยแรงกด (compression) เพื่อยึดแผงกระจกเข้ากับร่องกรอบโครงสร้างที่ออกแบบ (รูปที่ 1.13)



รูปที่ 1.13 วิธีการประกอบแผงผนังกระจกโดยวิธีการติดตั้งระบบแห้ง (dry glazing)

(<http://www.kawneer.com>)

การติดตั้งระบบเปียก (wet glazing) เป็นการใช้อาวุธซิลิโคนสำหรับงานโครงสร้าง (structural silicone sealant) ร่วมกับโฟม (backer rod) หรือ กาวสอง (double side tape) ชนิดเหนียวพิเศษ เพื่อยึดแผ่นกระจกเข้ากับกรอบโครงสร้างที่ออกแบบไว้ (รูปที่ 1.14)



รูปที่ 1.14 วิธีการประกอบแผงผนังกระจกโดยวิธีการติดตั้งระบบเปียก (wet glazing)

(<http://frontdesk.co.in/glazing.html#.VRYQNvyUce0>)

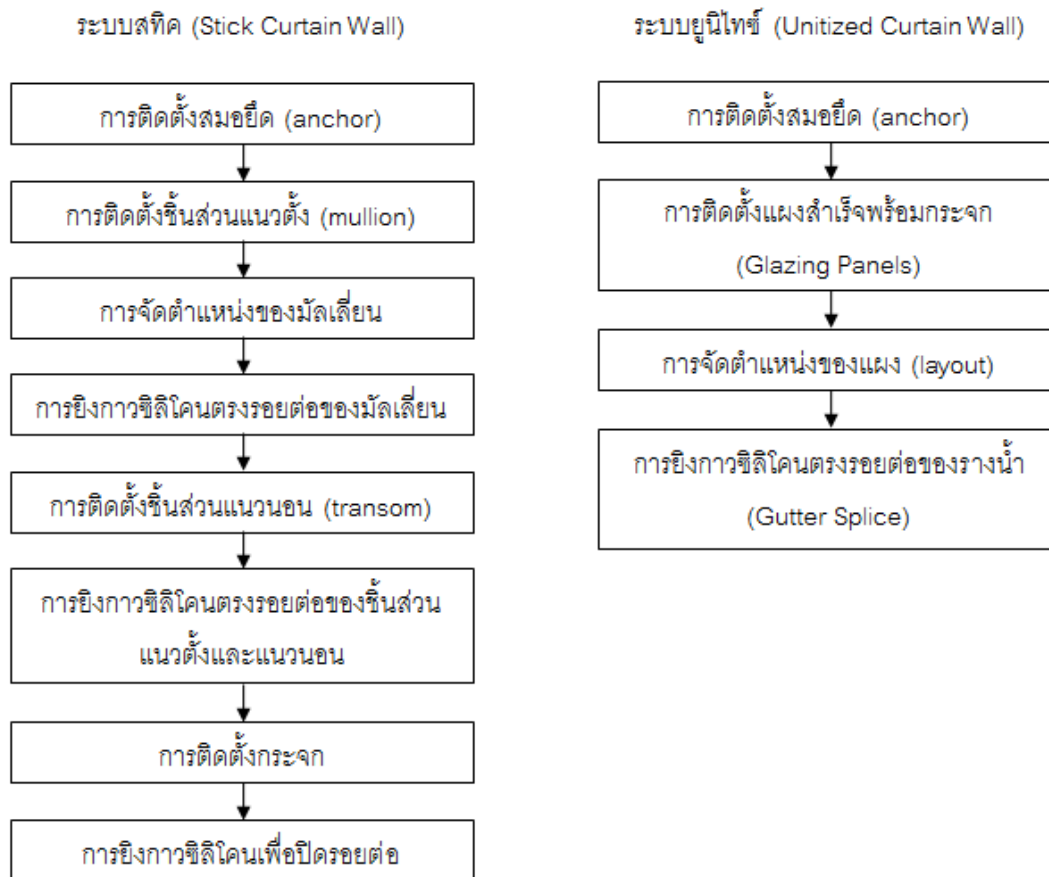
ตารางที่ 1.3 สรุปข้อดีข้อเสียของวิธีการประกอบแผงกระจกระหว่างการติดตั้งระบบแห้ง (dry glazing) และการติดตั้งระบบเปียก (wet glazing), (Nik และ Mark, 2009)

วิธีการประกอบแผงกระจก	ข้อดี	ข้อเสีย
การติดตั้งระบบแห้ง (dry glazing)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถทำได้จากภายใน</li> <li>- ประสิทธิภาพของการประกอบไม่ขึ้นอยู่กับฝีมือแรงงานและสภาพอากาศ</li> <li>- ราคาต่ำกว่าการติดตั้งระบบเปียก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่ใช่ระบบกันน้ำ</li> <li>- เกิดการหดตัวของยางทำให้เกิดช่องว่างซึ่งเป็นสาเหตุของการรั่วซึมของน้ำ</li> <li>- เกิดการม้วนของยางทำให้การกดอัดไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของกระจก</li> </ul>
การติดตั้งระบบเปียก (wet glazing)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีประสิทธิภาพในการต้านทานการรั่วซึมของน้ำ</li> <li>- ป้องกันส่วนขอบของกระจกประเภทลามิเนต และอินซูลเทจจากน้ำซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ</li> <li>- ช่วยลดการเคลื่อนตัวของกระจก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องทำการติดภายนอก ซึ่งยากต่อการซ่อมบำรุง และการเปลี่ยนกระจก</li> <li>- ประสิทธิภาพของการประกอบขึ้นอยู่กับฝีมือแรงงาน (การเตรียมผิว และสภาพอากาศ)</li> </ul>

## 2. การติดตั้งผนังเปลือกนอกของอาคาร

สำหรับการติดตั้งสามารถแบ่งเป็นการติดตั้งของระบบสติก (stick curtain wall) และระบบยูนิไทซ์ (unitized curtain wall) โดยมีลำดับการติดตั้งดังรูปที่ 1.15

ระบบสติก (stick curtain wall) การประกอบและการติดตั้งทำที่หน่วยงานก่อสร้าง ซึ่งไม่สามารถควบคุมคุณภาพได้ดีมากนัก ส่วนระบบยูนิไทซ์ (unitized curtain wall) การประกอบเป็นแผงสำเร็จรูปพร้อมกระจกโดยการควบคุมคุณภาพจากโรงงาน และติดตั้งที่หน่วยงานจะทำติดตั้งเชื่อมต่อกันของชิ้นส่วนแนวตั้งระหว่างมัลเลียนตัวผู้และตัวเมีย (male & female mullion) โดยรอยต่อของแผงชิ้นส่วนด้านบนและด้านล่างมีการเชื่อมต่อกันระหว่างชิ้นส่วนแนวนอนที่เรียกว่าเฮดทรานซอม (head-transom) และซิลแทนซอม (sill-transom) โดยตรงรอยต่อระหว่างแผงจะมีการวางรางน้ำ (gutter sleeve) แล้วปิดรอยต่อด้วยกาวซิลิโคน (silicone sealant)



รูปที่ 1.15 ลำดับการติดตั้งผนังภายนอกของอาคารระบบสติก (stick curtain wall) และระบบยูนิไทซ์ (unitized curtain wall)

#### 1.1.5. ความเสียหายของผนังเปลือกนอกของอาคารจากแผ่นดินไหว

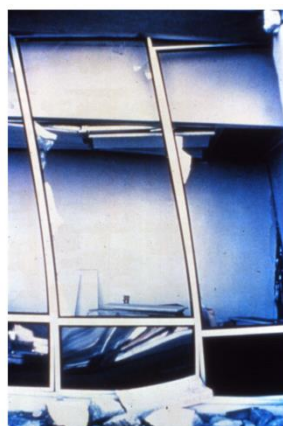
ผนังเปลือกนอกอาคารตามที่ได้กล่าวเบื้องต้น ซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่เป็นกระจกและกรอบโครงโลหะ ถ้าหากการประกอบติดตั้งไม่ได้มีการออกแบบเพื่อรองรับการขยับตัวจากแผ่นดินไหวอาจเกิดความเสียหายกับระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร โดยอาจเกิดความเสียหายได้ทั้งสองทิศทางจากแผ่นดินไหวคือจากการเคลื่อนที่ในระนาบ (in-plane) และการเคลื่อนที่นอกระนาบ (out-of-plane) โดยที่กระจกนั้นมีความเสี่ยงหากประกอบอยู่ในโครงสร้างที่มีความอ่อนตัวซึ่งเกิดการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นได้มาก และอีกสาเหตุหนึ่งของความเสียหายอาจเกิดจากความเร่งที่เกิดขึ้นในอาคารส่งถ่ายแรงมายังผนังและตำแหน่งยึดต่อ (CWTC, 2000) ดังที่ปรากฏตามภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวดังต่อไปนี้ (รูปที่ 1.16 ถึง รูปที่ 1.22)



รูปที่ 1.16 การแตกร้าวของกระจกในผนังภายนอกของอาคารจากแผ่นดินไหวขนาด 5.9  
ในรัฐเวสต์เวอร์จิเนีย เมื่อปี 2010  
(<http://www.dailymail.co.uk/news>)



รูปที่ 1.17 การหลุดร่วงของเศษกระจกจากแรงแผ่นดินไหวในประเทศแคลิฟอร์เนีย เมื่อปี 1994  
(Photo courtesy of Wiss, Jenney, Elstner Associates, Inc.)



รูปที่ 1.18 การแตกของกระจกและการเสียรูปของกรอบโครงสร้างผนังอาคารจากการเคลื่อนที่ใน  
ระนาบจากแผ่นดินไหวในประเทศแคลิฟอร์เนีย เมื่อปี 1994  
(<http://www.fema.gov/plan/prevent/earthquake/fema74/>)





ภาพถ่ายโดย Eduardo Miranda มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด

รูปที่ 1.19 ความเสียหายของกระจกจากแผ่นดินไหวขนาด 8.8 ในประเทศชิลี เมื่อปี 2010  
<http://www.fema.gov/plan/prevent/earthquake/fema74/>

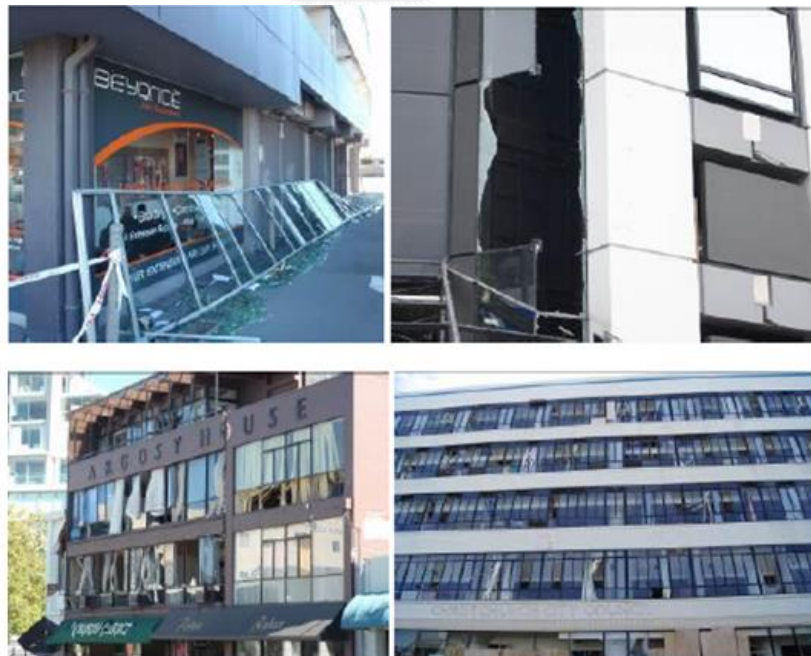


รูปที่ 1.20 ความเสียหายของผนังภายนอกอาคาร เนื่องจากการไม่สามารถรองรับการเคลื่อนที่  
 ระหว่างชั้น ของอาคาร Mexico City

(ESDEP WG 17, Seismic Design, <http://www.fgg.uni-lj.si/~pmoze/ESDEP/master/wg17/l0100.htm>)



รูปที่ 1.21 การแตกร้าวของกระจกของผนังภายนอกอาคารจากแรงแผ่นดินไหวในอาคาร  
Strategy Montreal St เมื่อปี 2011  
(Mark JS Esslemont, <http://wozawanderer.blogspot.com>)



รูปที่ 1.22 การเสียหายของกระจกและผนังภายนอกอาคารจากแรงแผ่นดินไหว  
ใน Christchurch เมื่อปี 2011  
(Baird และคณะ, 2011)

1.1.6. ข้อกำหนดและมาตรฐานในการออกแบบอาคารด้านการสันสะเทือนของแผ่นดินไหว ในหลายประเทศมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหวเพื่อการออกแบบ และก่อสร้างอาคาร โดยประเทศที่มีข้อกำหนดและมาตรฐานในการออกแบบอาคารด้านการ สันสะเทือนของแผ่นดินไหว (CWTC, 2000) แสดงในตารางที่ 1.4 สำหรับประเทศไทยมีระบุ ข้อกำหนดโดยกรมโยธาธิการและผังเมือง ซึ่งมาตรฐานในการออกแบบอาคารด้านการสันสะเทือนของ แผ่นดินไหว ถูกระบุไว้ใน มยผ. 1302-2552 และมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคง แข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสันสะเทือนของแผ่นดินไหว ระบุไว้ใน มยผ. 1303- 2557

ตารางที่ 1.4 ประเทศที่มีข้อกำหนดและมาตรฐานในการออกแบบอาคารด้านการสันสะเทือนของ แผ่นดินไหว (CWTC, 2000)

ประเทศที่มีข้อกำหนดและมาตรฐานในการออกแบบอาคารด้านการสันสะเทือนของแผ่นดินไหว สำหรับอาคารทั่วไป			
Algeria	Cuba	India	Turkey
Argentina	El Salvador	Iran	former USSR
Austria	Germany	Portugal	Venezuela
Canada	Greece	Romania	former Yugoslavia
ประเทศที่มีข้อกำหนดและมาตรฐานในการออกแบบอาคารด้านการสันสะเทือนของแผ่นดินไหว สำหรับผนังเปลือกนอกของอาคาร			
Australia	Ethiopia	Japan	Philippines
Bulgaria	France	Mexico	Spain
Chile	Indonesia	New Zealand	USA
China	Israel	Nicaragua	
Colombia	Italy	Peru	

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษามาตรฐานและข้อกำหนดของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) ของประเทศต่างๆ สำหรับผนังเปลือกนอกของอาคาร
2. ศึกษาความสามารถของผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) ตามมาตรฐานกำหนด โดยใช้การทดสอบตัวอย่างขนาดจริง ภายใต้สภาวะการใช้งาน ซึ่งอ้างอิงวิธีการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบสถิตตามมาตรฐาน AAMA 501.4-00
3. เพื่อตรวจสอบความสามารถของการทนต่อการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารเพื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของ มยผ.1302-2552 สำหรับประเภทโครงสร้างอื่นๆ ว่ามีความเหมาะสมสอดคล้องสำหรับผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารหรือไม่อย่างไร
4. ศึกษาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารจากการทดสอบตัวอย่างขนาดจริง จนถึงสภาวะประลัยที่ทำให้เกิดความเสียหายในระดับต่างๆ เช่นการเสียรูปของกรอบโครง การแตกของกระจก หรือการหลุดร่วงของชิ้นส่วนและจุดรองรับ โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบสถิตตามมาตรฐาน AAMA 501.4-00

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. พิจารณาเฉพาะวิธีการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นแบบสถิต (static) ในแนวระนาบของผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารอ้างอิงตามมาตรฐาน AAMA 501.4-00 ของตัวอย่างขนาดจริง (full scale)
2. พิจารณาการทดสอบเฉพาะผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารสำหรับระบบยูนิไทซ์ (unitized curtain wall) ในส่วนแผงผนังทั่วไป (typical panel) โดยไม่พิจารณาปฏิสัมพันธ์ในส่วนของบริเวณมุมอาคาร (corner panel) และในแนวระนาบตั้งฉาก (out-of-plane)
3. พิจารณาการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ของตัวอย่างขนาดจริงสำหรับผนังกระจกเปลือกนอกของอาคาร เพื่อเปรียบเทียบตามมาตรฐาน มยผ.1302-2552 ที่ระบุไว้ในประเภทโครงสร้างอื่นๆ โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบสถิตตามมาตรฐาน AAMA 501.4-00 เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของระบบผนังในสภาวะการใช้งานเนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ
4. พิจารณาการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของตัวอย่างขนาดจริงสำหรับผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารโดยใช้วิธีการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบสถิต จนถึงขั้นพังเสียหายเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของระบบผนังในสภาวะประลัยเนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำผลการทดสอบของตัวอย่างขนาดจริงสำหรับผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับผู้ออกแบบและภาคอุตสาหกรรมการผลิตผนังเปลือกนอกของอาคาร
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ของมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1302-2552

#### 1.5 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนของแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อผนังเปลือกนอกของอาคาร
2. ศึกษางานวิจัยและมาตรฐานต่างๆ ในการจัดระดับความเสียหายของผนังกระจกเปลือกนอกของอาคาร
3. ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับข้อกำหนดของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ของอาคารและผนังภายนอกของอาคาร
4. ทำการทดสอบตัวอย่างขนาดจริงของผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยที่ระบุ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับผลกระทบ และการเสีรูปของผนังเปลือกนอกของอาคารจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

Hareer (2007) ได้ศึกษาแบบจำลองและทำการวิเคราะห์ระบบเปลือกผนังของอาคารกับการดูดซับพลังงานที่จุดเชื่อมต่อ (energy absorbing connections) โดยพิจารณา 4 ตัวแปร คือ (1) โครงสร้างรูปแบบจำลอง 4 ประเภท (อาคารสูง 3, 6, 12 และ 18 ชั้น) (2) ความแตกต่างของแรงสองกรณี (3) แผ่นดินไหวสามรูปแบบ (4) ความแตกต่างของคุณสมบัติของจุดเชื่อมต่อ และ (5) ประเภทของอาคารและขนาดของมวล ได้ระบุว่าระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวนั้นพฤติกรรมของผนังภายนอกถูกกำหนดโดยการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแผงผนังและชิ้นส่วนรองรับ ซึ่งแบ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นได้เป็น 3 กรณี คือ 1) แรงเฉื่อยที่เกิดจากความเร่งของแผงถูกส่งจากแผงไปยังโครงสร้างหลักผ่านแรงเฉือนกระทำที่จุดเชื่อมต่อ 2) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแนวนอนถูกต้านทานโดยแผงซึ่งส่งผลให้เกิดแรงเฉือนในชิ้นส่วนรองรับ 3) แรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อแผงถูกรองรับโดยชิ้นส่วนแบกรับน้ำหนักกรอบโครงสร้างอาคารประสบกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่มากในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวซึ่งอาจทำให้ผนังอาคารเกิดความเสียหายตรงตำแหน่งเชื่อมต่อหรือเกิดความเสียหายจากการกระทบกันของชิ้นส่วนที่อยู่ใกล้เคียงกัน (Hareer, 2007)

#### 2.2 งานวิจัยและมาตรฐานต่างๆ ในการจัดระดับความเสียหายของผนังเปลือกนอกของอาคาร

ความเสียหายของผนังภายนอกของอาคารจากการไม่สามารถทนต่อการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว หากพิจารณาในด้านมูลค่าทางการเงินเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับผนังเปลือกนอกของอาคารจากการไม่สามารถใช้งานของอาคาร และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมส่วนที่เสียหายของอาคาร แต่ความสูญเสียหลักที่ต้องกังวลในการออกแบบระบบผนังภายนอกของอาคารเป็นอย่างแรกคือ ความปลอดภัยต่อชีวิตของมนุษย์ ดังนั้นจึงได้มีการนิยามลำดับความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาจากความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บของคนที่อยู่ภายในอาคารและรอบอาคารดังนี้

มาตรฐาน AS/NZS 4284 (1995) ได้ให้ความหมายของระดับการพังเสียหายของชิ้นงานตัวอย่างจากการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น เมื่อเกิดข้อใดข้อหนึ่ง ดังต่อไปนี้ 1) มีการหลุดออกของกระฉก 2) มีการหลุดออกของชิ้นส่วน แผงกระฉก หรือส่วนประกอบใดๆ 3) ความ

เสียหายที่เกิดกับจุดรองรับเพื่อใช้เชื่อมต่อเข้ากับอาคารหลักที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบไม่มั่นคง และ

4) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ยึดชั้นหรืออุปกรณ์รองรับสำหรับการเปิดช่องแสง

มาตรฐาน AAMA 501.4 (2000) ข้อกำหนดด้านการออกแบบแต่ละชนิดการใช้งานของผนังเปลือกนอกของอาคาร ระบุว่าหากไม่มีกำหนดไว้ ให้ใช้ตามที่ระบุในมาตรฐานดังนี้

1. อาคารที่มีความสำคัญ (essential facilities) อาคารที่มีการเก็บสารเคมีที่เป็นอันตราย ความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวของผนังภายนอกของอาคาร อาคารประเภท 3 ต้องสามารถใช้งานได้หลังเกิดแผ่นดินไหว (seismic use group III in NEHRP provisions)

- สามารถใช้งานได้โดยที่ไม่เกิดความเสียหาย
- ไม่เกิดการแตกหักหรือหลุดร่วงของกระจก
- การรั่วซึมของอากาศและน้ำยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

2. อาคารสาธารณะ (high occupancy assembly) อาคารที่อาจเกิดอันตรายกับบุคคล ผู้ใช้งานอาคารจำนวนมาก อาคารประเภท 2 (seismic use group II in NEHRP provisions)

- ไม่เกิดการแตกหักหรือหลุดร่วงของกระจก
- ความเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถซ่อมแซมได้ และไม่มีการเปลี่ยนชิ้นส่วนใดๆ
- การรั่วซึมของอากาศและน้ำยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
- ไม่มีการร่วงของชิ้นส่วนผนัง หรือความเสียหายที่มองเห็นได้
- ไม่มีการร่วงของชิ้นส่วนผนัง อาจมีความเสียหายที่มองเห็นได้

3. อาคารทั่วไป (standard occupancy) อาคารอื่นๆ ที่ไม่ได้กำหนดไว้ข้างต้น อาคารประเภท 1 (seismic use group I in NEHRP provisions)

- กระจกหนึ่งแถวหรือประมาณ 10% ของทั้งหมด อาจเกิดการแตกเสียหายแต่ไม่มีการหลุด
- ความเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถซ่อมแซมได้
- การรั่วซึมของอากาศและน้ำยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
- ไม่มีการร่วงของชิ้นส่วนผนัง อาจมีความเสียหายที่มองเห็นได้
- อาจต้องการเปลี่ยนชิ้นส่วน

Vlad (2008) กล่าวถึงมาตรฐานการออกแบบระบบผนังอาคารของประเทศโรมาเนียในบทที่ 4 โดยระบุรายละเอียดความต้องการและเกณฑ์การปฏิบัติ (specific requirements and performance criteria) แบ่งเป็น 2 ประเภท คือความต้องการในการใช้งาน (functional requirement) หมายถึงคุณภาพและความสามารถในการทำงานของระบบผนังตลอดอายุการใช้งาน ได้รับการออกแบบเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบกับผู้ใช้งานและอุปกรณ์ต่างๆ และความต้องการด้าน

โครงสร้าง (structural requirement) หมายถึงการต้านทานและความมั่นคงของระบบผนัง รวมถึงความสามารถในการต้านทานความเสียหายจากแรงแบบคงที่และแบบไดนามิก โดยต้องไม่เกิดเหตุการณ์ดังต่อไปนี้ (Vlad, 2008)

- บางส่วน หรือทั้งหมดของผนังอาคารเกิดการพังเสียหาย
- แผงกระจกพังเสียหาย
- อุปกรณ์ยึดชั้นพังเสียหายและข้อบกพร่องของระบบปิดจากการเสีรูปร่างที่มากเกินไปของระบบโครงสร้างหรือผนังภายนอกของอาคาร
- เกิดปัญหาต่อการปิด-เปิดของช่องประตูหน้าต่าง
- การสั่นสะเทือนที่มีระดับของความรุนแรงที่ยอมรับไม่ได้สำหรับการใช้งานของผนัง

มยพ.1303 (2557) ได้ระบุระดับสมรรถนะของอาคารโดยจำแนกได้ 4 ระดับคือ ระดับอาคารปฏิบัติการได้ (operational level) ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (immediate occupancy level, IO) ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (life safety level, LS) และระดับป้องกันการพังทลาย (collapse prevention level, CP) ตามตารางที่ 2.1 (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2557)

ตารางที่ 2.1 การจำกัดความเสียหายและระดับสมรรถนะของอาคาร (มยพ.1303, 2557)

	ระดับป้องกันการพังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที	ระดับอาคารปฏิบัติการได้
ความเสียหายโดยรวม	รุนแรงมาก	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำมาก
โครงสร้างทั่วไป	- อาคารมีสติฟเนสและกำลังค้ำค้ำงอยู่น้อยมาก แต่เสาและกำแพงยังสามารถแบกทานน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงต่อไปได้ - มีการเคลื่อนที่	- โครงสร้างอาคารทุกชั้นมีสติฟเนสและกำลังค้ำค้ำงไว้ได้พอสมควร - องค์อาคารที่รับน้ำหนักจากแรงโน้มถ่วงคงความสามารถแบกทาน	- ไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นแบบถาวร - โครงสร้างโดยรวมยังคงสติฟเนสและกำลังส่วนใหญ่ของเดิมไว้ได้ - ผนังรอบอาคาร (facades)	- ไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นแบบถาวร - โครงสร้างโดยรวมยังคงสติฟเนสและกำลังส่วนใหญ่ของเดิมไว้ได้ - ผนังรอบอาคารผนังกันห้องและ



	<p>สัมพัทธ์ระหว่าง ชั้นเกิดขึ้นมาก แบบถาวร</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ทางออกบาง แห่งถูกกีดขวาง ด้วยชั้นส่วนที่ พังลงมา</li> <li>- กำแพงอิฐก่อ และผนังกันตก (parapets) พัง เสียหาย</li> <li>- อาคารใกล้ ถล่ม</li> </ul>	<p>น้ำหนักบรรทุก ดังกล่าวได้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีการ พังทลายของ กำแพงหรือผนัง กันตกในทิศตั้ง ฉากกับระนาบ ของชั้นส่วน</li> <li>- มีการเคลื่อนที่ ระหว่างชั้น เล็กน้อยแบบ ถาวร</li> <li>- มีความ เสียหายกับผนัง กันห้อง</li> <li>- อาคารอาจ ยากต่อการ ซ่อมแซมได้ อย่างประหยัด</li> </ul>	<p>ผนังกันห้องและ ฝ้าเพดานรวมทั้ง ชั้นส่วน</p> <p>โครงสร้างเกิด รอยร้าวขนาด เล็ก</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ลิฟท์สามารถ เริ่มต้นใช้ใหม่ได้ ทันที</li> <li>- ระบบดับเพลิง สามารถทำงาน ได้</li> </ul>	<p>ฝ้าเพดานรวมทั้ง ชั้นส่วน</p> <p>โครงสร้างเกิด รอยร้าวขนาด เล็กมาก</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ระบบที่สำคัญ ต่อการ ดำเนินการปกติ ทั้งหมดสามารถ ทำงานได้</li> </ul>
--	--	--	---	---

จากตารางจะเห็นว่าได้มีการกล่าวถึงผนังกระจกเปลือกนอกของอาคาร ไว้ในโครงสร้างทั่วไป  
ในประเภทระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที ซึ่งความเสียหายโดยรวมของส่วนงานผนังรอบอาคาร (façade)  
อยู่ในระดับต่ำ โดยโครงสร้างเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก

Baird และคณะ (2011) กล่าวถึงตัวชี้วัดประสิทธิภาพหรือความเสียหายจำเป็นที่จะต้อง  
สะท้อนให้เห็นถึงระดับของความเสียหายในโครงสร้างหลังการเกิดแผ่นดินไหว โดยที่แต่ละตัวบ่งชี้  
ประสิทธิภาพการทำงานควรจะรวมถึงขอบเขตที่เหมาะสม โดยได้เสนอตามตารางที่ 2.2 (FEMA 356,  
2000) ระบุระดับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบชั่วคราวหรือถาวรสำหรับผนังก่ออิฐ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์  
ระหว่างชั้น นิยมใช้เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการทำงานสำหรับระดับความเสียหายของผนังอาคาร  
นอกจากนี้ต้องพิจารณาการเสีรูปถาวรเพิ่มเข้ามาสำหรับส่วนประกอบโครงสร้าง และส่วนประกอบที่

ไม่ใช่โครงสร้าง โดยที่ผนังภายนอกของอาคารนั้นการเสียรูปถาวรส่งผลให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม

ตารางที่ 2.2 ระดับประสิทธิภาพของโครงสร้าง (FEMA 356, 2000)

		Structural Performance Level		
Element	Type	Collapse Prevention	Life Safety	Immediate Occupancy
Cladding	Damage	Severe damage to connections and cladding. Many panels loosened.	Severe distortion in connections. Distributed cracking, bending, crushing and spalling of cladding elements.	Connections yield; minor cracks (< 1.5 mm width) or bending in cladding.
Glazing	Damage	General shattered glass and distorted frame. Widespread falling hazards	Extensive cracked glass; little broken glass	Some cracked panes; none broken.

### 2.3 ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) ที่ยอมให้ของอาคารและผนังเปลือกนอกของอาคาร

JASS14 (1996) เป็นมาตรฐานเพื่อใช้ประเมินพฤติกรรมของผนังภายนอกของอาคาร (curtain wall façade) ภายใต้การสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว มีการระบุระดับประสิทธิภาพการทำงานของผนังภายนอกของอาคารไว้ 3 ระดับ ตามระดับความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหว ดังนี้ (โดย “H” คือความสูงระหว่างชั้น (inter-story height) (JASS14, 1996)

ระดับที่ 1  $H/300$  ต้องไม่เกิดความเสียหายกับชิ้นส่วนประกอบของผนังทั้งภายในและภายนอกจากแรงแผ่นดินไหว ให้อยู่ในระดับประสิทธิภาพการทำงานที่อ้างอิงถึงเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่คาดว่าจะเกิดในประเทศญี่ปุ่น

ระดับที่ 2 H/200 องค์ประกอบภายนอกรับแรงดึงต้องไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ ให้อยู่ในระดับประสิทธิภาพการทำงานที่อ้างอิงถึงเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุดที่เคยเกิดขึ้นในอดีตของประเทศญี่ปุ่น

ระดับที่ 3 H/100 ต้องไม่เกิดการแตกหักและการหลุดร่วงของกระจกหรือชิ้นส่วนใด ให้อยู่ในระดับประสิทธิภาพการทำงานที่คาดว่าจะเกิดแผ่นดินไหวที่ยิ่งใหญ่ที่สุดในอีก 100 ปี

Ellingwood (2001) กล่าวว่า โดยทั่วไปแล้วเชื่อว่าการกำหนดสมภาวะขีดจำกัดโดยใช้การเสียรูปยืดหยุ่นโดยรวม หรือการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดของโครงสร้าง สรุปลงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพที่ต้องการและสมภาวะจำกัด (Ellingwood, 2001)

Performance Requirement	Inter-Story Drift (%)
Serviceability	0.5
Non-structural Damage	1.0
Impaired Function	2.0
Life Safety	5.0
Onset of Collapse	8.0

Eva (2009) ได้ศึกษามาตรฐานการออกแบบสำหรับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของแต่ละมาตรฐาน ซึ่งสามารถสรุปลงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานการออกแบบสำหรับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Eva, 2009)

มาตรฐานอ้างอิง	เกณฑ์การเคลื่อนที่ (drift criteria)
FEMA 461 (2006) (Federal Emergency Management Agency)	1% drift ratio (มีโอกาส 50% ที่กระจกจะแตก)
CSA (2005) (Canadian Standards Association)	0.5% drift ratio (ระยะโก่งตัวไม่ควรเกิน 1/16 นิ้วต่อ ฟุต ของความสูงของช่องกระจก)
UBC (1994) (Uniform building code)	ค่าที่ยอมรับไม่เกิน 1.5% drift ratio หรือ 0.0019Rw (T<0.7s) 1.1% drift ratio หรือ 0.0015Rw (T>0.7s)

มยผ.1302 (2552) ได้กำหนดค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสำหรับทุกองค์อาคารที่ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของระบบโครงสร้างต้านแรงแผ่นดินไหว จะต้องได้รับการออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งร่วมกับแรงภายในองค์อาคารที่เกิดจากเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเท่ากับเดลต้า ( $\Delta$ ) ดังแสดงในตารางที่ 2.5 (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552)

ตารางที่ 2.5 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ ( $\Delta$ ), (มยผ.1302, 2552)

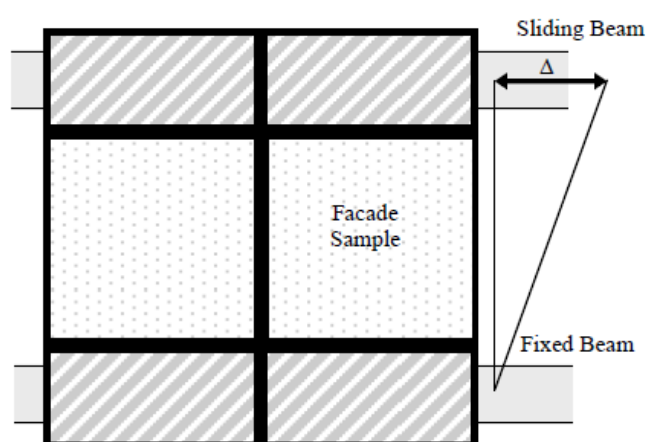
ลักษณะโครงสร้าง	ประเภทความสำคัญของอาคาร		
	I หรือ II	III	IV
โครงสร้างที่ไม่ใช่ผนังอิฐก่อรับแรงเฉือนและสูงไม่เกิน 4 ชั้น ซึ่งผนังภายใน ฉากกั้นห้อง ฝ้าเพดาน และผนังภายนอกถูกออกแบบให้สามารถทนต่อการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นได้มาก	0.025 $h_{sx}$	0.020 $h_{sx}$	0.015 $h_{sx}$
โครงสร้างอื่น ๆ ทั้งหมด	0.020 $h_{sx}$	0.015 $h_{sx}$	0.010 $h_{sx}$

( $h_{sx}$  คือความสูงระหว่างชั้นที่อยู่ใต้พื้นชั้นที่ x)

ประเภทความสำคัญของอาคารได้ถูกจำแนกตามลักษณะการใช้งานและความสำคัญของอาคารที่มีต่อสาธารณชนและการบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุออกเป็น 4 ประเภท (Occupancy Category) คือ ประเภท I (น้อย), II (ปกติ), III (มาก), และ IV (สูงมาก) โดยอาคารแต่ละประเภทมีค่าตัวประกอบความสำคัญ (Importance Factor) เพื่อใช้ในการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวแตกต่างกัน (มยผ.1302-2552 แสดงในตารางที่ 1.5-1 หน้า 30)

Baird และคณะ (2011) กล่าวว่าระหว่างปลาย ค.ศ.1980 ถึงต้น ค.ศ.1990 ไม่มีมาตรฐานสำหรับใช้ประเมินประสิทธิภาพของผนังอาคารจากการเกิดแผ่นดินไหว คุณสมบัติในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นถูกเสนอให้ภาคอุตสาหกรรมการผลิตผนังอาคารและโดยทั่วไปแล้วจะเลือกระบบ “off the shelf” ที่คิดว่าเหมาะสมที่สุด แต่ไม่ได้คำนึงถึงการเสียรูปของแต่ละองค์ประกอบ ดังนั้นสมาคมวิจัยด้านอาคารของนิวซีแลนด์ (BRANZ) ได้พัฒนามาตรฐานและการทดสอบความต้านทานการสั่นสะเทือนของผนังอาคาร การทดสอบนั้นจำลองอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหวโดยการใช้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (รูปที่ 2.1) ดังนั้นระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นจึงเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการทดสอบ ซึ่งถูกนำไปใช้ในมาตรฐาน Australian/New Zealand Standard (AS/NZS 4284, 1995) เป็นขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของผนังอาคาร การทดสอบแผ่นดินไหวโดยการเคลื่อนที่ในแนวระนาบด้านข้างของตัวอย่างผนัง ตามจำนวนรอบของเวลาที่กำหนด โดยมีตัว

แปรคือ ระยะการเคลื่อนที่ จำนวนรอบและช่วงเวลา ที่ระบุไว้ในการออกแบบโครงสร้าง ให้สอดคล้องกับสถานะการใช้งาน (serviceability limit state) และสถานะประลัย (ultimate limit state) ที่เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ สำหรับการออกแบบที่ 50 ปี AS/NZS 1170.0 (2002) กำหนดสถานะการใช้งาน (SLS) มากกว่า  $L/25$  ขณะที่กำหนดสถานะประลัย (ULS) ไว้ที่มากกว่า  $L/500$  คุณสมบัติที่ต้องการหลังจากการทดสอบสถานะการใช้งานนั้นคือ ผนังอาคารต้องไม่มีการรั่วซึมจากการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ โดยใช้แรงดันแบบไม่คงที่ (cyclic water penetration test) ส่วนสถานะประลัยต้องไม่ปรากฏความเสียหายของผนังซึ่งรวมไปถึงจุดเชื่อมต่อเข้ากับอาคาร (AS/NZS 1170.0, 2002)



รูปที่ 2.1 การทดสอบการเคลื่อนที่ตามแนวระนาบที่ใช้ในการประเมิน

ผนังอาคารจากการเกิดแผ่นดินไหว

(Baird และคณะ, 2011)

Rigone (2012) ได้ศึกษาการทดสอบของโครงการ Manchester Metropolitan University โดยอ้างอิงระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นตามมาตรฐาน JASS14 ซึ่งอาคารมีความสูงระหว่างชั้นอยู่ที่ 3,750 มม. ( $H = 3,750$  มม.) ดังนั้นจึงแบ่งตามระดับได้ดังนี้ ระดับที่ 1 คือ  $H/300$  ระดับที่ 2 คือ  $H/200$  และระดับที่ 3 คือ  $H/100$  โดยทำการทดสอบดังนี้ (Rigone, 2012)

1. การทดสอบการรั่วซึมของอากาศ (air leakage test)
2. การทดสอบการเคลื่อนที่  $H/300$  displacements จำนวน 20 รอบ (cycles)
3. ทำซ้ำการทดสอบการรั่วซึมของอากาศ (repeated air leakage test)
4. การทดสอบการเคลื่อนที่  $H/200$  displacements จำนวน 10 รอบ (cycles)
5. การทดสอบการเคลื่อนที่  $H/100$  displacements จำนวน 5 รอบ (cycles)

สำหรับผลการทดสอบของแต่ละระดับสรุปผลดังนี้คือ

ระดับที่ 1 ต้องได้รับการซ่อมแซมเพื่อให้ใช้งานได้ตามประสิทธิภาพที่กำหนด

ระดับที่ 2 ไม่ปรากฏความเสียหายระหว่างการทดสอบ

ระดับที่ 3 พบว่าหลังการทดสอบไปเพียงไม่กี่รอบพบว่าเกิดพฤติกรรมการหมุนและเกิดการเคลื่อนตัวแต่ไม่เกิดความเสียหายใด ๆ

## 2.4 การวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของผนังเปลือกนอกของอาคาร

Bowkamp และ Meehan (1960) ได้ทำการทดสอบแผงหน้าต่างขนาดกว้าง 1.2 ม. และสูง 2.4 ม. ศึกษาตัวแปรชนิดของวงกบ กระจก กาวซิลิโคน ระยะห่างของขอบกระจก ตำแหน่งของจุดยึดขนาดของวงกบ และชนิดของแรง โดยชิ้นงานที่ทำการทดสอบถูกให้แรงกระทำจนกระทั่งเสียหาย ทำการทดสอบโดยใช้ระยะการเคลื่อนที่ 6 มม. ในแต่ละทิศทางซึ่งเป็นระยะห่างของขอบกระจกกับกรอบโครง ดังแสดงตามสมการต่อไปนี้ (Bowkamp และ Meehan, 1960)

$$Drift = 2c \left( 1 + \frac{h}{w} - \frac{2c}{w} \right)$$

$h$  คือ ความสูงของแผง  $w$  คือ ความกว้างของแผง และ  $c$  คือ ระยะห่างระหว่างกระจกและชิ้นส่วนกรอบโครง

ผลของการทดสอบความแปรผัน (load reversal) ของแรง แสดงให้เห็นว่าการแอนตัวที่ทำให้เกิดความเสียหายกับแผงคล้ายกับการให้แรงในทิศทางเดียว โดยความเสียหาย 3 ประเภท ที่สังเกตเห็นคือ 1. การแตกร้าวของกระจกในตำแหน่งมุมทั้งสองสำหรับแผงหน้าต่างวงกบโลหะ (soft sealant metal sash window) 2. การเสียหายอย่างเต็มรูปแบบของแผงหน้าต่างวงกบไม้ (wood-sash window) เป็นผลมาจากการให้แรงสูงขึ้นเนื่องจากผลการควบคุมของไม้ที่ด้านข้างของกระจกทั้งสอง 3. การเสียหายจากการโก่งเดาะเกิดขึ้นเมื่อให้แรงสูงขึ้นเนื่องจากผลของวัสดุอุดกันรั่วแบบชนิดแข็ง (hard-sealant)

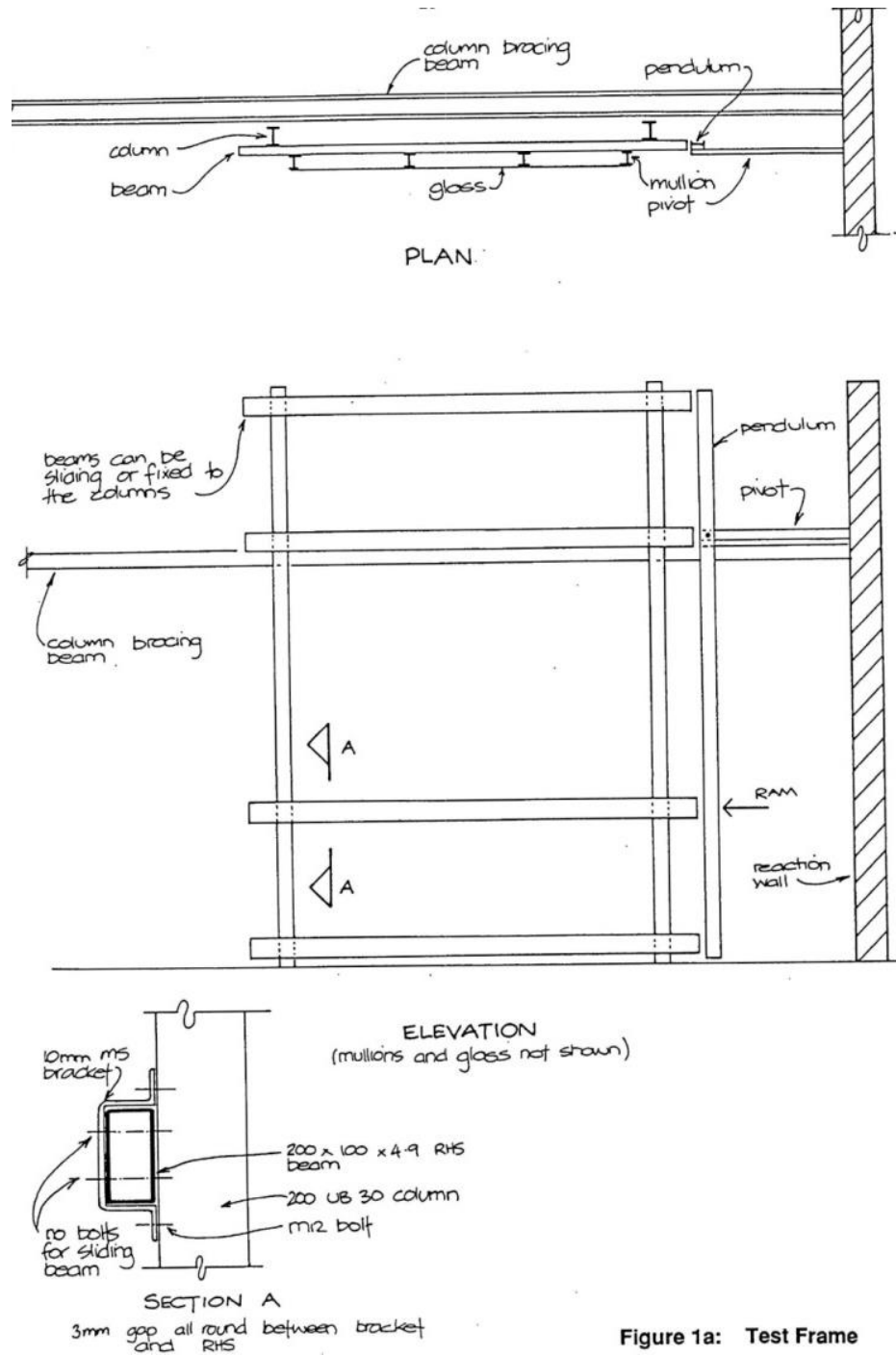
Wade (1990) ได้รายงานการทดสอบการเขย่า (racking test) แผงกระจกกรอบโครงอลูมิเนียมขนาด 4x2x2.5 เมตร ซึ่งชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) มีความยาว 2 เมตร และติดตั้งส่วนแนวนอน (transom) เข้ากับกึ่งกลางของชิ้นส่วนแนวตั้ง โดยใช้กระจกธรรมดา (annealed) ความหนา 5 มม. ติดเข้ากับช่องว่างด้านล่าง ส่วนช่องว่างด้านบนติดตั้งกระจกธรรมดาความหนา 4 มม. การทดสอบควบคุมการเคลื่อนที่และทำการผลัดด้านบนของผนังระยะ 10 มม. และหลังจากนั้นลดระยะเหลือ 5 มม. และเพิ่มระยะขึ้นทุกๆ 15 มม. (ในอัตราที่ช้า) จนกระทั่งเกิดการเสียหาย ซึ่งความ

เสียหายเกิดขึ้นที่ระยะ 93 มม. ที่มีมุมด้านบนของบานหน้าต่างและมีรอยแตกโค้ง (arc-shaped crack) แต่กระจกยังคงอยู่ในกรอบโครง (Wade, 1990)

Lim และ King (1991) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างผนังขนาดจริงจำนวน 5 ประเภท คือ 1. ระบบแผงกระจกแบบใช้ยางปะเก็น (gasket glazed system) 2. ระบบแผงกระจกมีจุดยึดแบบหนีบ (patch fitting system) 3. ระบบแผงกระจกแบบใช้กาวซิลิโคนสองด้าน (two-sided silicone system) 4. ระบบแผงกระจกแบบใช้กาวซิลิโคนสี่ด้าน (unitized four-sided silicone system) และ 5. ระบบแผงหน้าต่าง (conventional window system) ทำการทดสอบที่ห้องทดสอบ Branz Structural Engineering Laboratory ใน Judgeford ประเทศนิวซีแลนด์ โดยโครงสร้างของห้องทดสอบ (test rig) แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วยคานแนวนอน และเสาแนวตั้ง และยึดเสาเข้ากับชั้นของห้องทดสอบโดยใช้สมอยึดที่ระดับ 4.2 เมตร สำหรับอุปกรณ์ทดสอบ (test instrumentation) การเคลื่อนที่ของตัวกระทำที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุม servo-actuator และมีอุปกรณ์เก็บข้อมูล ให้แรงกระทำที่ 100 กิโลนิวตัน โดยที่ตัวกระทำ (ram) มีระยะชัก (stroke) สูงสุดที่ 600 มม. ซึ่งการทดสอบตั้งตำแหน่งไว้ที่ระยะกึ่งกลางคือ 300 มม. ทำการวัดแรงใช้โหลดเซลล์ (load cell) และวัดการเคลื่อนที่ (deflection measurements) โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (linear voltage displacement transducers, LVDT) เพื่อวัดการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ ทำการบันทึกการเคลื่อนที่ในแนวนอนและแนวตั้งของชิ้นส่วนกระจก และชิ้นส่วนกรอบโครง (mullion และ transom) โดยการทดสอบมีตัวแปรที่พิจารณาดังนี้ (Lim และ King, 1991)

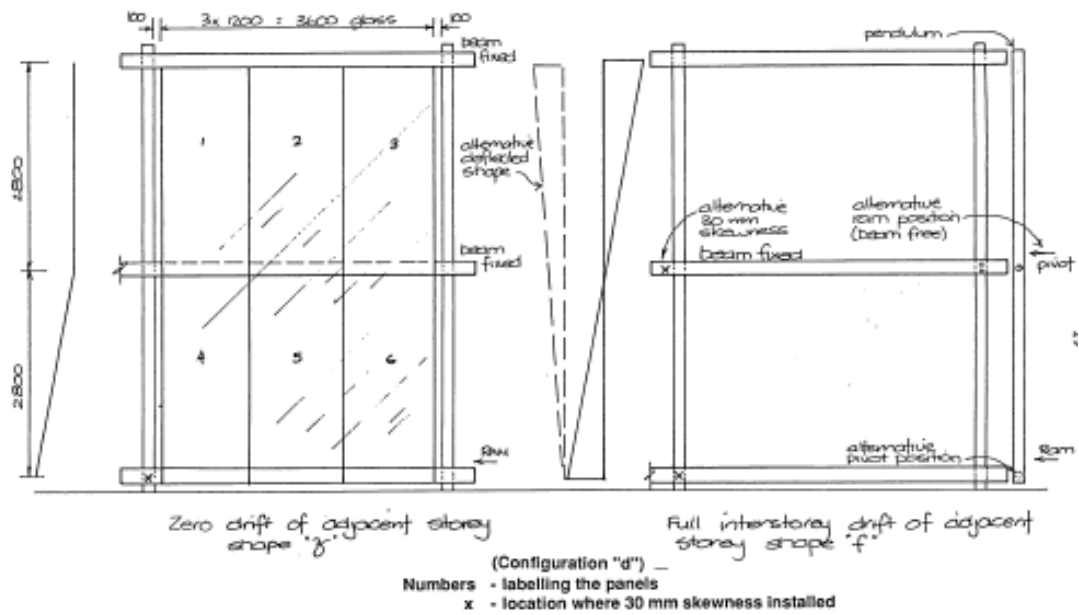
1. ความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ (displace rate) ขนาด 2, 5, 10, 15, 35, 50, 60 และ 70 มม. ต่อ วินาที
2. ความแตกต่างของเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) แบ่งเป็น แบบ “z” การเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างชั้นที่เป็นศูนย์ แบบ “f” การเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างชั้นแบบเต็มรูปแบบ หรือเรียกว่า “free shape”
3. ความแตกต่างของรูปแบบของชั้น (story configurations) รูปแบบ “d” เป็นแบบสองชั้น (double story) (รูปที่ 2.3) ส่วนรูปแบบ “s” เป็นแบบชั้นเดียว (single story) รวมด้วยสองชั้นครึ่ง (two haft story) ดังแสดงในรูปที่ 2.4
4. ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่ (cyclic displacement) แบ่งเป็นระยะ 5, 6, 10, 12, 25, 30 และ 40 มม.
5. ความแตกต่างของจำนวนรอบ (number of cycles) แบ่งเป็น 1, 2, 3, 5, และ 10 รอบ
6. ระยะเอียงออกนอกกระนาบ 30 มม. ของหนึ่งมุม

7. พฤติกรรมที่เกิดขึ้นที่ภายใต้ข้อสภาวะการใช้งาน (serviceability limit)

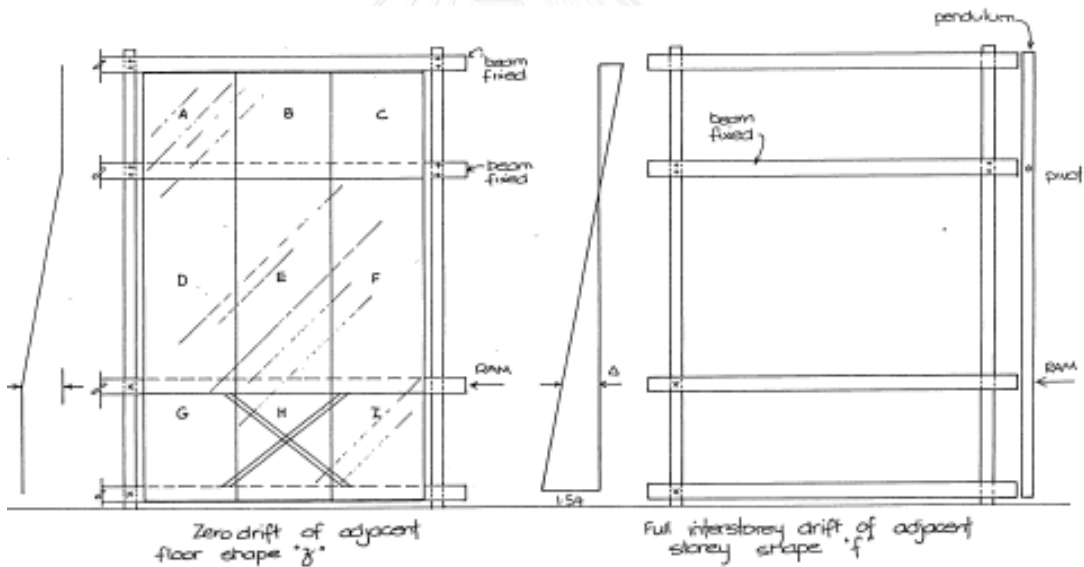


รูปที่ 2.2 โครงสร้างกรอบโครงสำหรับการทดสอบ  
(Lim และ King, 1991)





รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแผงแบบสองชั้น (double storey)  
 (Lim และ King, 1991)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างแผงชั้นเดียว (single storey) รวมกับสองชั้นครึ่ง (two haft storey)  
 (Lim และ King, 1991)

ซึ่งสามารถสรุปผลดังนี้

1. ตัวอย่างทดสอบทุกประเภทที่ทำการศึกษามีความสามารถในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดตามขอบเขตที่ยอมให้ของมาตรฐานของประเทศนิวซีแลนด์

2. มีความเป็นไปได้ที่จะตรวจสอบความสามารถของผนังภายนอกของอาคารที่ทนต่อการแรงเฉยในระนาบ (in-plane racking action) โดยการสร้างแบบจำลองเหล่านี้ภายในสภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ

3. อัตราการเคลื่อนที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบผนังกระจก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ขีดจำกัดการเคลื่อนที่ (serviceability displacement limit) ความสำคัญของอัตราการเคลื่อนที่ลดลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้น

4. จำนวนรอบของแต่ละระยะการเคลื่อนที่ ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความต้านทานของระบบความสามารถของระบบผนังกระจกแบบที่ใช้ยางปะเก็น เนื่องจากได้รับผลกระทบในสภาวะการใช้งาน (serviceability limit state) เกิดการหลุดของยางปะเก็น (gasket) เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น

5. การให้ระยะเอียง (skewness block) 30 มม. และให้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบผนังกระจกในลักษณะที่แตกต่างกัน

6. กลไกการเคลื่อนไหวของแผ่นดินไหวต้องใช้ความระมัดระวังในรายละเอียด ต้องแน่ใจว่าระบบได้รับการออกแบบรองรับการเคลื่อน โดยไม่ถูกขัดขวางโดยอุปกรณ์อื่นๆ

7. สติฟเนสของระบบผนังกระจก ซึ่งสติฟเนสในความสัมพันธ์กับโครงสร้างอาจมีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะแรกของการให้แรง

King และ Thurston (1992) ศึกษาพฤติกรรมของผนังระบบต่างๆ โดยทำการทดสอบภายใต้การจำลองการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวโดยการเขย่าตามแนวแกน (in-plane racking test) โดยทดสอบตัวอย่างผนัง 4 ประเภทดังนี้ 1. ระบบผนังอาคารแบบแห้งโดยใช้ยางนิโอพรีน (neoprene gasket dry-glazing system) 2. ระบบผนังอาคารแบบยูนิไทซ์โดยใช้กาวซิลิโคนทั้งสี่ด้าน (unitized 4-sided structural silicone glazing system) 3. ระบบผนังอาคารแบบใช้กาวซิลิโคนสองด้าน (a two-sided silicone glazing system) 4. ระบบผนังอาคารแบบใช้การยึดทางกล (mechanically fixed patch plate systems) ตามรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6

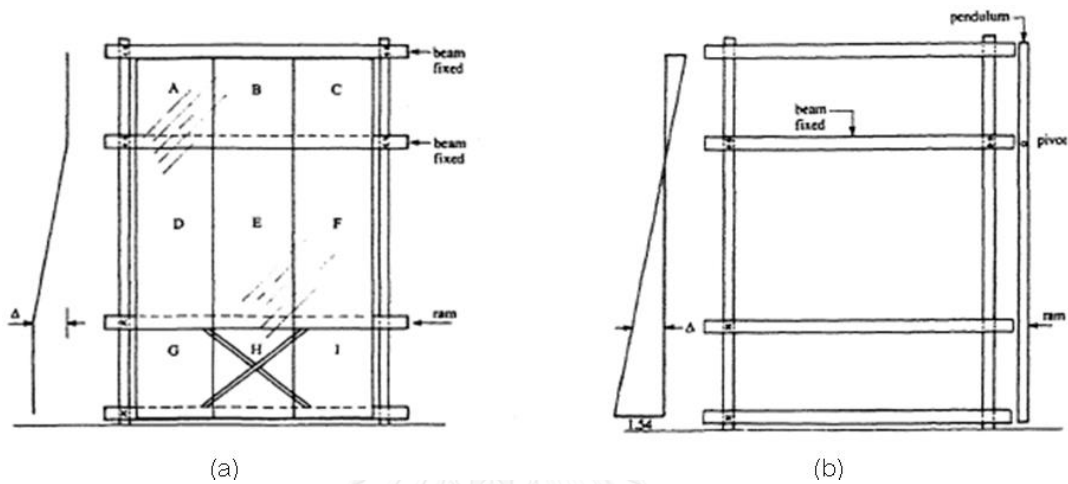
ซึ่งมีเกณฑ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนรองรับผนังหรือกรอบโครงสร้างเกิดการหลุดร่วงเกินกว่า 5% และการหลุดร่วงของกระจกที่เพิ่มความเสี่ยงของการบาดเจ็บต่อผู้คนที่อยู่ในและรอบอาคาร การทดสอบนั้นทำการการขยับคานที่ออกแบบให้เลื่อนได้ตามแนวระนาบ (sliding steel beams) ขยับตามรอบการเคลื่อนที่แบบสถิติโดยใช้กระบอกสูบ (King และ Thurston, 1992) โดยการทดสอบมีตัวแปรที่พิจารณาดังนี้

1. ขนาดและองค์ประกอบของตัวอย่าง (specimen configuration) ห้องทดสอบรองรับขนาดความกว้างของตัวอย่างได้ที่ 3.6 เมตร และความสูงสองชั้นครึ่ง แผงมุกกว้าง 2.4 เมตร

2. รายละเอียดการเคลื่อนที่ (displacement profile) อุปกรณ์สำหรับทดสอบออกแบบเพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ต่อความสูงของแผง

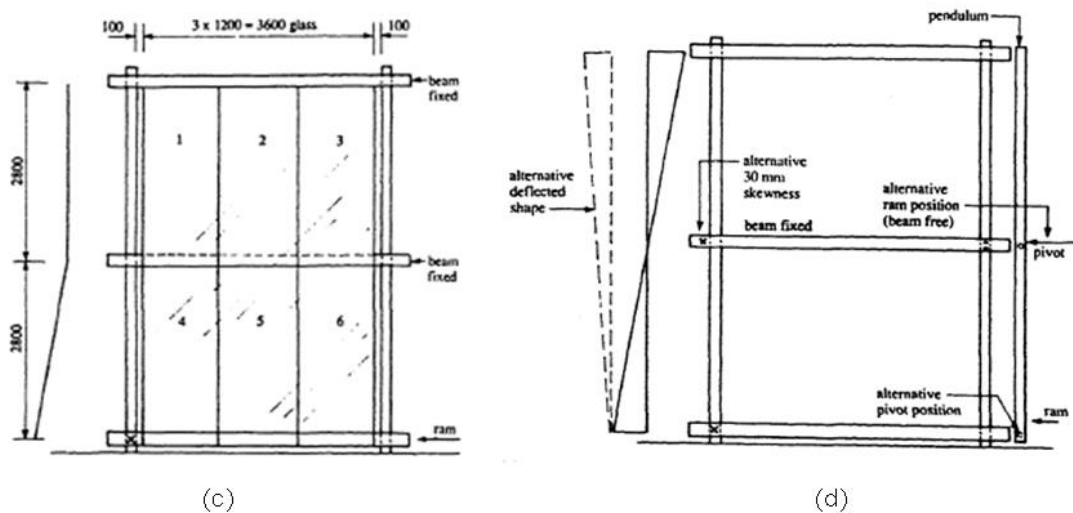
3. ผลกระทบของอัตราที่แตกต่างของการเคลื่อนที่ในการเขย่า

4. การบ่งชี้ถึงผลกระทบการเยื้องออกนอกระนาบ (out-of-plane skewness)



(a) single story specimen with zero adjacent inter-story drift (configuration “zs”)

(b) single story specimen with full adjacent inter-story drift (configuration “fs”)

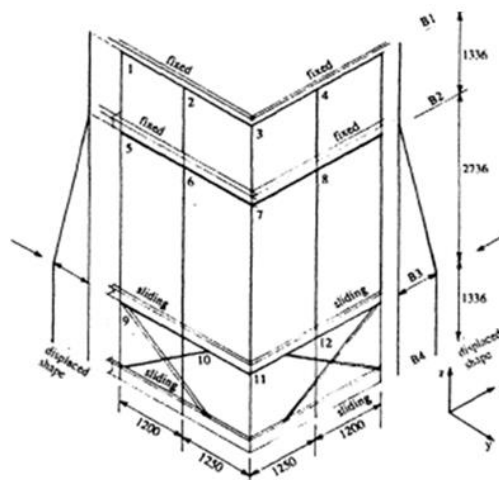


(c) doubly story specimen with zero adjacent inter-story drift (configuration “zd”)

(d) doubly story specimen with full adjacent inter-story drift (Configuration “zf”)

รูปที่ 2.5 วิธีการติดตั้งชิ้นงานตัวอย่างระบบผนังที่ทำการทดสอบรูปแบบ (a) (b) (c) (d)

(King และ Thurston, 1992)



(e)

(e) corner specimen with zero adjacent inter-story drift (configuration “cf”)

รูปที่ 2.6 วิธีการติดตั้งชิ้นงานตัวอย่างระบบผนังที่ทำการทดสอบแต่ละรูปแบบ (e)

(King และ Thurston, 1992)

ซึ่งสามารถสรุปผล (conclusions) ได้ว่าบางรูปแบบของระบบผนังภายนอกของอาคารมีความสามารถในการเคลื่อนที่ตามแนวระนาบได้มากโดยที่ไม่เกิดความเสียหาย แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สรุปผลการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแนวระนาบ (King และ Thurston, 1992)

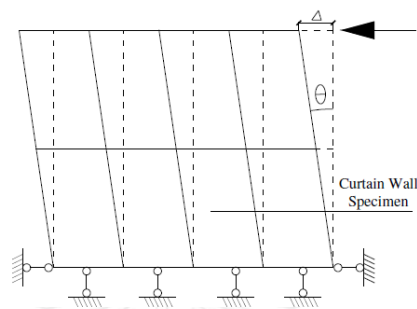
Test	Peak Load (kN)	Max. Inter-story Displacement (mm)	Failure Mode
Gasket System Config “s” Profile “f”	16	120	Glass fracture following pane rotation
Gasket System Config “s” Profile “f”	14	100	Glass fracture to following pane rotation
Patch Plate Config “s” Profile “z”	17.5	40	Toughened pane shattered
Patch Plate Config “s” Profile “f”	11	60	Toughened pane shattered

2-Sided Silicone Config “s” Profile “f”	12	120	No failure; sub-mullion slip
4-Sided Silicone Config “s” Profile “f”	15	80	Glass cracked but did not fall, Severe frame distortion at slip pane
4-Sided Silicone Config “d” Profile “f”	10	90	No failure; severe frame distortion at slip plane

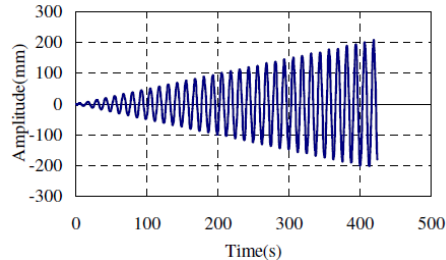
Behr และคณะ (1995) ดำเนินการทดสอบการเขย่าผนังอาคารกระจกโดยวิธีไดนามิก (dynamic racking test) โดยวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยเพื่อพิจารณาพฤติกรรมการแตกหักและหลุดร่วงของกระจกสถาปัตยกรรมแต่ละชนิด โดยใช้วิธีการติดตั้งกระจกแบบแห้ง (dry glazing façade system) ภายใต้ความเครียดในแนวระนาบ (in-plane stress) และความเครียดนอกระนาบจากการเคลื่อนไหวแบบไดนามิก (out of plane stress dynamic motions) ผลที่แสดงให้เห็นว่ากระจกส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะหลุดร่วงหรือแตกหักระหว่างการทดสอบความเครียดในแนวระนาบ (in-plane stress test) และมีความเสี่ยงในการแตกมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเครียดนอกระนาบจากการเคลื่อนไหวแบบไดนามิก การวิจัยพบว่ากระจกที่ไม่มีกริดฟิล์มไม่สามารถต้านทานการการแตกหักของกระจกภายใต้การเขย่าโดยวิธีไดนามิก แต่ปรากฏว่ากระจกธรรมดาติดฟิล์มความหนา 6 มม. และกระจกอีทสตรงแทนติดฟิล์ม ไม่มีการหลุดร่วงของกระจกระหว่างการทดสอบ (Behr และคณะ, 1995)

Wensheng และ Baofeng (2008) กล่าวว่าในปัจจุบันยังไม่ปรากฏสมการเพื่อใช้คำนวณประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของผนังภายนอกของอาคาร วิธีการที่มีประสิทธิภาพในปัจจุบัน คือการทดสอบการสั่นสะเทือนเพื่อให้เกิดความมั่นใจในความสามารถในการเคลื่อนที่จากการกระทำของโครงสร้างหลัก ซึ่งรวมไปถึงการทดสอบ dynamic racking crescendo test และ earthquake simulation shake table test นักวิชาการหลายท่านเชื่อว่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของผนังภายนอกของอาคารรับบทบาทหลักในระหว่างเกิดแผ่นดินไหวและการทดสอบดังกล่าวข้างต้นถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยการทดสอบแบบ “dynamic racking crescendo test” ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการตรวจสอบการเสียรูปในอเมริกา ญี่ปุ่น และยุโรป โดยในประเทศจีนก็ใช้เกณฑ์อ้างอิงจากต่างประเทศ โดยที่ตัวอย่างผนังอาจเป็นกระจกแผ่นเดียวหรือแผงกรอบโครงโลหะพร้อมกระจกหรือมีขนาดเทียบเท่าของจริง การตรวจสอบสามารถทำได้ในห้องทดสอบหรือหน่วยงาน

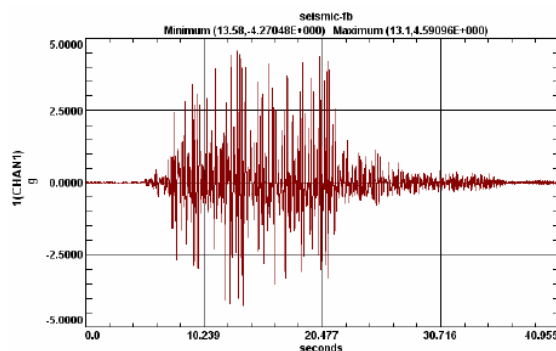
ก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ส่วนการจำลองแผ่นดินไหวโดยการทดสอบ “shake table test” ซึ่งประเทศจีนใช้มาตรฐาน GB/T 18575-2001 สเปกตรัมการตอบสนองต่อชั้น รวมทั้งความเร่งตอบสนองสเปกตรัม และการเคลื่อนที่ของชั้นตอบสนองสเปกตรัม ควรตรวจสอบดัชนีความเร่ง ( $\beta$ ) และดัชนีมุมของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น ( $\theta$ ) เพื่อให้ได้คลื่นความถี่ของชั้นที่ต้องการ ต้องทำการคำนวณคลื่นแผ่นดินไหวและการทำซ้ำ ดังรูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.7 รูปแบบของการทดสอบ Dynamic Racking Crescendo Test  
(Wensheng และ Baofeng, 2008)



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงช่วงเวลาและระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของการทดสอบแบบ crescendo test  
(Wensheng และ Baofeng, 2008)



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของคลื่นแผ่นดินไหวตามความถี่ของชั้นที่ต้องการ  
(Wensheng และ Baofeng, 2008)

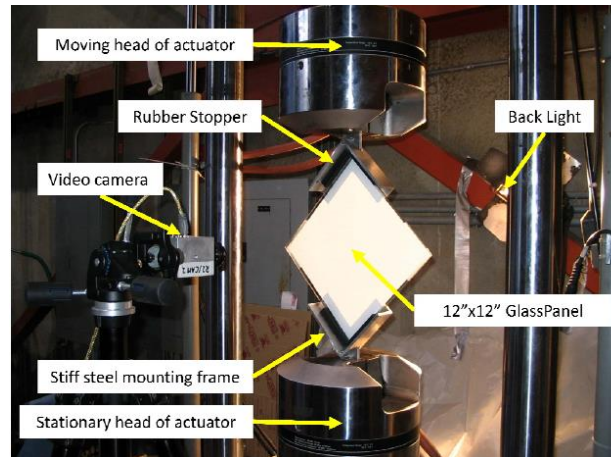


รูปที่ 2.10 การทดสอบ “shake table test” ของผนังเปลือกนอกของอาคาร  
(Wensheng และ Baofeng, 2008)

Eva (2009) ได้ทำการทดสอบการเขย่าในแนวระนาบเพื่อจำลองแรงแผ่นดินไหว (in-plane seismic racking) โดยศึกษาตัวอย่างของระบบ store-front window โดยให้ความสนใจ 3 ตัวแปรที่สำคัญ คือ 1. เกณฑ์วิธีของแรง (load protocol) 2. ชนิดฟิล์มสำหรับติดกระจกและวิธีการติด (window film type and attached) 3. อัตราส่วนของขนาดกระจก (aspect ratio) ซึ่งได้ทำการทดสอบนำร่องขนาดเล็ก (small scale pilot tests) และการทดสอบตัวอย่างขนาดจริง (full scale test)

1. การทดสอบนำร่องขนาดเล็ก (small scale pilot tests) โดยนำเอากระจกธรรมดา (annealed glass) ขนาด 12 นิ้ว (สี่เหลี่ยมจัตุรัส) จำนวน 8 แผ่น มาศึกษาผลการแตกร้าวของกระจกติดฟิล์ม และแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการเสียหาย ความหนาของฟิล์มแบ่งเป็น 0mil (uncoated), 2mil และ 8mil (4mil รวมกันสองแผ่น) การทดสอบเริ่มต้นโดยการดัดนอกระนาบเพื่อใช้ในการตรวจสอบการแตกร้าวของกระจก ผ่านการบันทึกภาพวิดีโอ และการทดสอบที่สองคือศึกษาความตึงเครียดในแนวระนาบโดยการกดชิ้นงาน (1mil เท่ากับ 0.0254 mm.) การทดสอบความตึงเครียดในแนวระนาบ (in-plane tension test) แผ่นกระจกตัวอย่างถูกติดตั้งในแนวทแยงเพื่อให้แรงกระทำตรงกึ่งกลางของแผ่น ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแรงทำให้เกิดความตึงเครียดขนานไปกับแนวแรง แผ่นกระจกถูกหิ้วโดยโครงเหล็กซึ่งยึดติดกับแท่นทดสอบของเครื่อง ระหว่างโครงเหล็กกับกระจกใช้ยางเพื่อให้ไม่เกิดแรงกระทำตรงรอยต่อ ซึ่งเป็นยางที่ใช้แยกชิ้นส่วนมัลเลียมกับกระจกของตัวอย่างเสมือนจริง ชิ้นงานถูกกดที่อัตรา 2 นิ้วต่อวินาที ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การแตกร้าวของกระจกเกิดขึ้นเร็ว

มากกว่า 0.0125 วินาที (กล้องมีอัตราเฟรมสูงสุด 80 เฮิรตซ์) รูปที่ 2.12 แสดงภาพการแตกร้าวของกระจกไม่ติดฟิล์ม และรูปที่ 2.13 แสดงการแตกร้าวของกระจกติดฟิล์ม



รูปที่ 2.11 การติดตั้งการทดสอบการกดกระจก

(Eva, 2009)



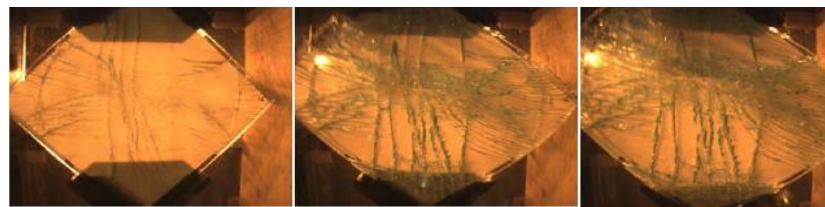
(a)  
Cracking minus one video  
frame

(b)  
Onset of cracking

(c)  
Cracking plus one video  
frame

รูปที่ 2.12 การแตกของกระจกไม่ติดฟิล์ม (0mil Film)

(Eva, 2009)



(a)  
Onset of cracking

(b)  
Cracking plus one video  
frame

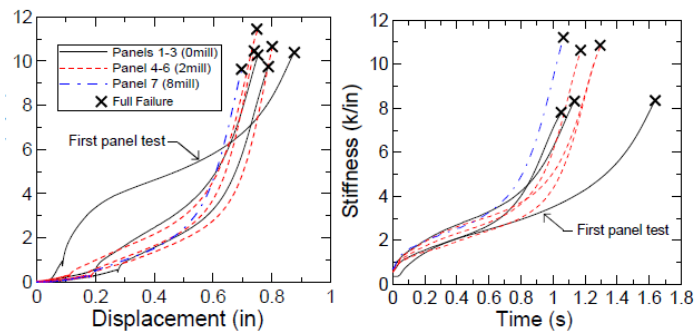
(c)  
Cracking plus two video  
frames

รูปที่ 2.13 การแตกของกระจกติดฟิล์ม 2mil (0.0508 มม.)

(Eva, 2009)

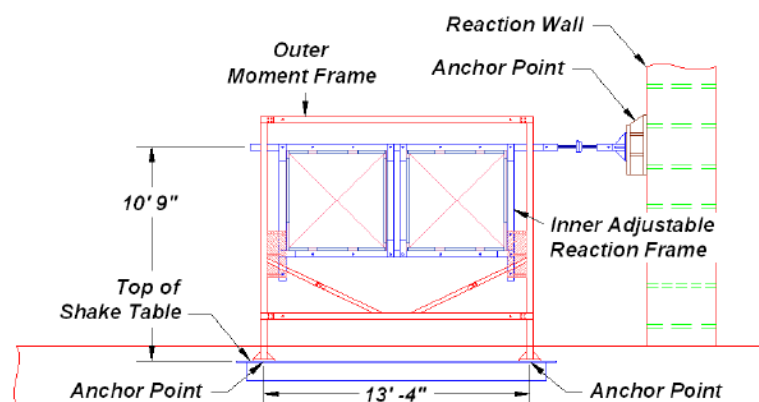


จากภาพแสดงให้เห็นว่ากระจกที่ติดฟิล์มเมื่อแตกแล้วไม่หลุดร่วง ซึ่งติดฟิล์มหนา 8mil (0.2032 มม.) ลดการแตกกระจายได้เกือบ 100% สามารถดูผลที่วัดได้จากการทดสอบระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่และสติฟเนสกับเวลาที่ได้ตามรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดจากการทดสอบทั้งหมดอยู่ที่ 10.5 kips และความสามารถในการเคลื่อนที่อยู่ที่ 0.7 ถึง 0.8 นิ้ว (17.78 ถึง 20.32 มม.) และกระจกไม่ติดฟิล์มมีค่าสติฟเนสน้อยกว่า 8 kips/in ส่วนกระจกติดฟิล์มค่าสติฟเนสอยู่ที่ 11 kips/in

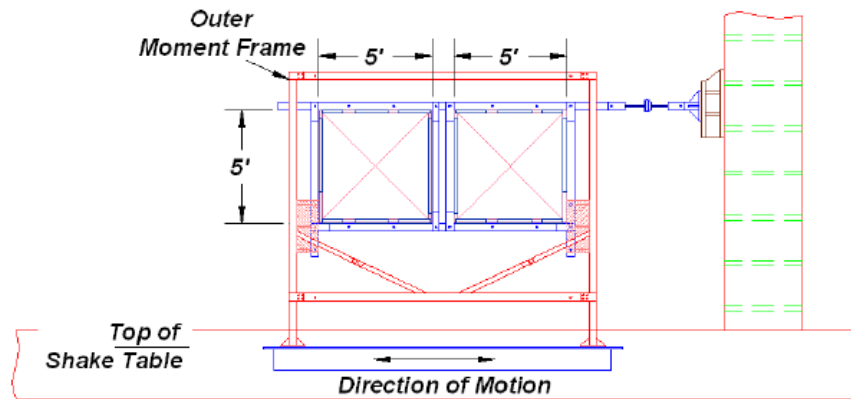


รูปที่ 2.14 กราฟระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่และสติฟเนสกับเวลา  
(Eva, 2009)

2. การทดสอบตัวอย่างขนาดจริง (full scale test) ชิ้นงานถูกแรงเฉือนกระทำโดยการดึงตามแนวระนาบคล้ายกับแนวคิดของ Pennsylvania State University และ University of Missouri-Rolla และแสดงในมาตรฐาน AAMA (2001b) โดยหลีกเลี่ยงการเกิดแรงนอกระนาบ ซึ่งทำการทดสอบหน้าต่าง 3 ขนาด คือ 5x5 ฟุต จำนวน 2 ชุด ขนาด 4x8 ฟุต และ 6x4 ฟุต แบบละหนึ่งชุด (รูปที่ 2.15 ถึง รูปที่ 2.18)

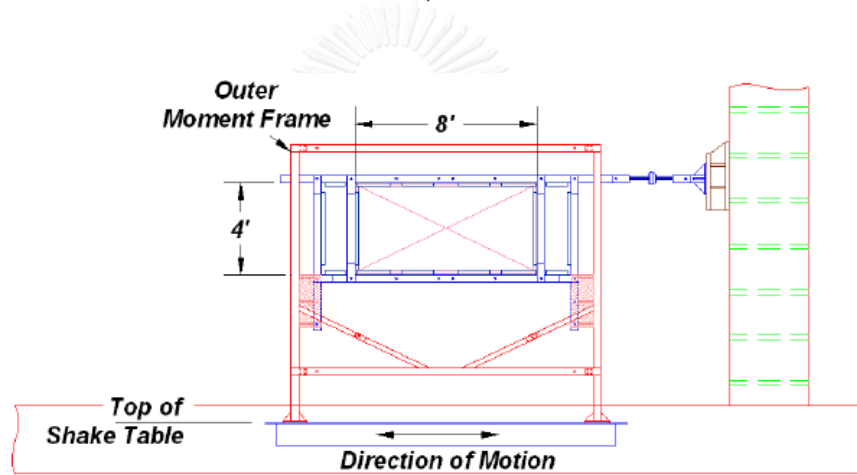


รูปที่ 2.15 รูปด้านของระบบทดสอบ  
(Eva, 2009)



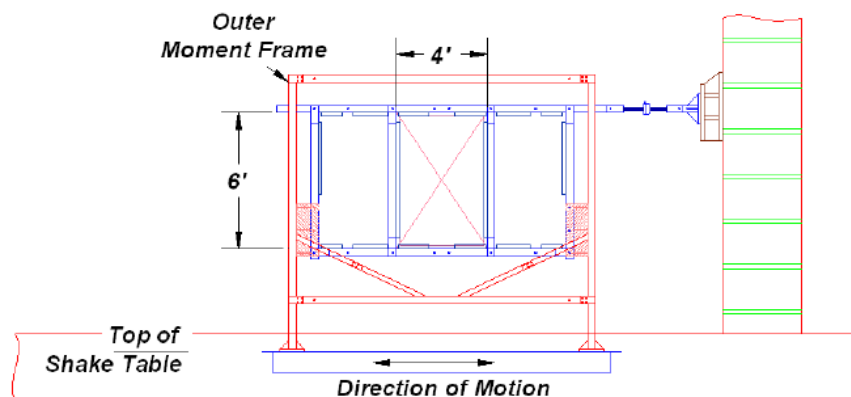
รูปที่ 2.16 การติดตั้งหน้าตาต่างขนาด 5x5 ฟุต

(Eva, 2009)



รูปที่ 2.17 การติดตั้งหน้าตาต่างขนาด 4x8 ฟุต

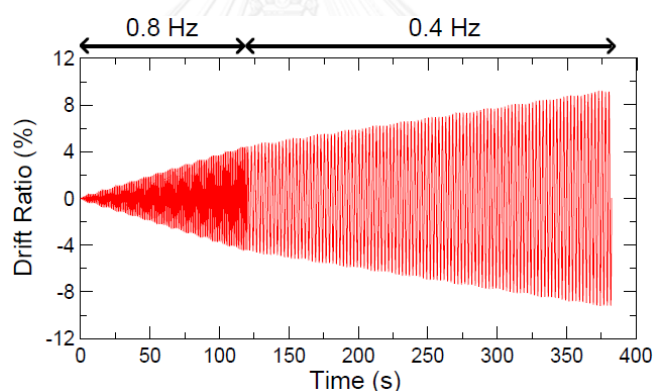
(Eva, 2009)



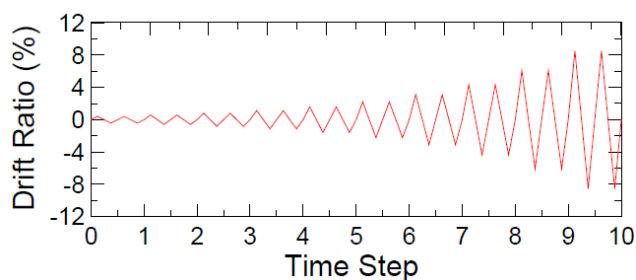
รูปที่ 2.18 การติดตั้งหน้าตาต่างขนาด 6x4 ฟุต

(Eva, 2009)

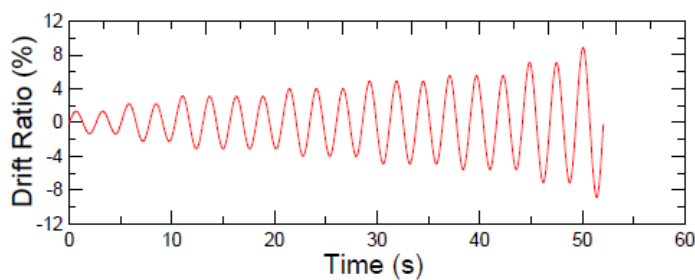
เกณฑ์วิธีของแรง (load protocols) ที่ใช้ในการทดสอบ แบ่งเป็น 1. monotonic (static) load protocol ซึ่งงานทดสอบถูกให้แรงกระทำในทิศทางเดียวที่อัตรา 0.03 นิ้วต่อวินาที จนกระทั่งพังเสียหาย เพื่อศึกษาความสามารถพื้นฐานและชั้นความเสียหาย 2. crescendo (dynamic) load protocol แรงชนิดนี้ถูกนำเสนอโดย Behr และ Belarbi (1996) โดยการเพิ่มแอมพลิจูดของแรงดึง (racking amplitude) ในช่วงเวลา 6 นาทีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแต่ละขั้นตอนประกอบด้วย การเคลื่อนที่ 4 รอบ ใช้ความถี่ที่ 0.8 เฮิรตซ์ (รูปที่ 2.19) สำหรับใช้ประเมินการหลุดร่วงของกระจกจากการเกิดแผ่นดินไหวของซึ่งงานทดสอบผนังภายนอกของอาคารและบานหน้าต่าง 3. FEMA 461 (quasi-static) load protocol เป็นการเพิ่มแอมพลิจูดสองรอบต่อแอมพลิจูด โดยแบ่งแรงออกเป็นสามอัตรา (รูปที่ 2.20) และ 4. mid and low-rise protocol สำหรับ mid-rise load protocol ถูกพัฒนาโดยใช้ระยะเวลาการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของโครงสร้างอาคารสูง 12 ชั้น (รูปที่ 2.21) ส่วน low-rise load protocol ถูกพัฒนาโดยใช้ระยะเวลาการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอาคารสูง 4 ชั้น (รูปที่ 2.22) (Behr และ Belarbi, 1996)



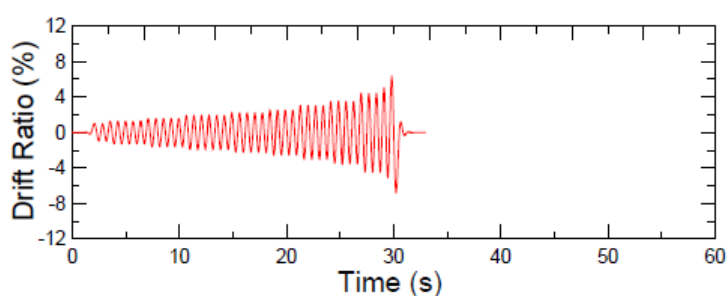
รูปที่ 2.19 กราฟการสร้าง crescendo (dynamic) load protocol  
(Eva, 2009)



รูปที่ 2.20 กราฟการสร้าง FEMA 461 drift-sensitive load protocol  
(Eva, 2009)



รูปที่ 2.21 กราฟการสร้าง Mid-Rise Load Protocol  
(Hutchinson และคณะ, 2008)



รูปที่ 2.22 กราฟการสร้าง Low-Rise Load Protocol  
(Hutchinson และคณะ, 2008)

โดยผลการทดสอบแบ่งเป็น 1. ความเสียหายที่สังเกตได้ แบ่งออกเป็นความเสียหายภายใต้สภาวะการใช้งาน (serviceability damage state, SDS) ในการทดสอบปรากฏผลดังนี้

SDS-1 เกิดความเสียหายกับยางขอบกระจก (รูปที่ 2.23)

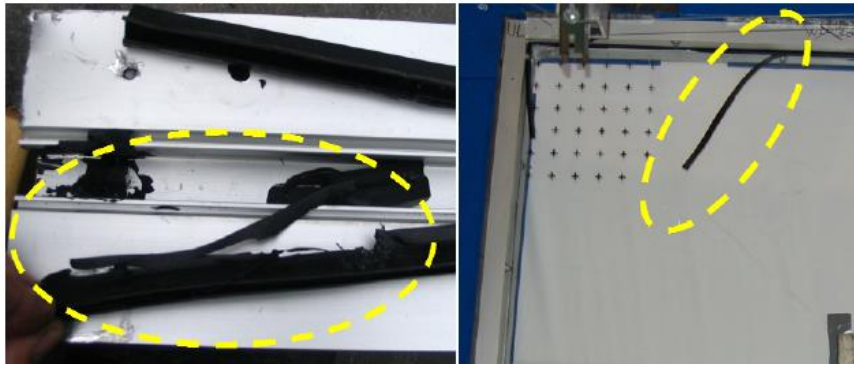
SDS-2 กระจกเกิดการร้าวเล็กน้อย น้อยกว่า 6 นิ้ว ของความยาวทั้งหมด (รูปที่ 2.24)

SDS-3 กาวซิลิโคนฉีกขาดหรือหลุด (รูปที่ 2.29)

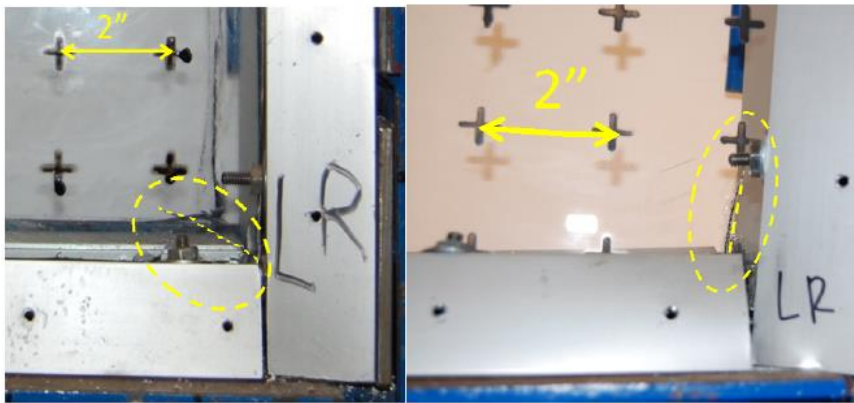
และความเสียหายภายใต้สภาวะประลัย (ultimate damage state, UDS) ในการทดสอบปรากฏผลดังนี้ (รูปที่ 2.26)

UDS-1 เกิดการแตกร้าวขนาดใหญ่ของกระจก มีขนาดมากกว่า 6 นิ้ว ของความยาวทั้งหมด

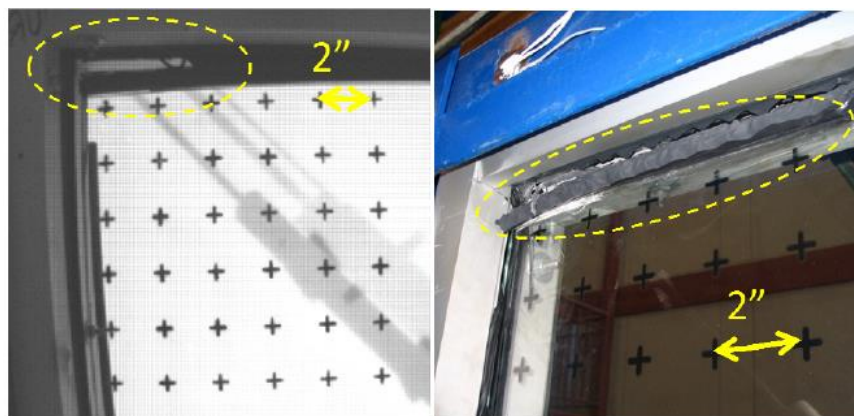
UDS-2 กระจกหลุดร่วงออกจากกรอบหน้าต่าง ชิ้นส่วนกระจกมีขนาดใหญ่กว่า 1 ตารางนิ้ว ผลจากเกณฑ์วิธีของแรงแต่ละชนิด (load protocol effects) จากการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าแรงมีผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับระดับความเสียหาย สังเกตได้ว่าแรงแบบ crescendo protocol ทำให้เกิดความเสียหายที่อัตราส่วนน้อยกว่าแรงแบบอื่น และผลจากอัตราส่วนของขนาดกระจก พบว่าหากอัตราส่วนของขนาดกระจกเพิ่มขึ้น มีผลต่ออัตราส่วนของระยะเวลาเคลื่อนที่ทำให้ความเสียหายภายใต้สภาวะใช้งานเพิ่มขึ้นด้วย



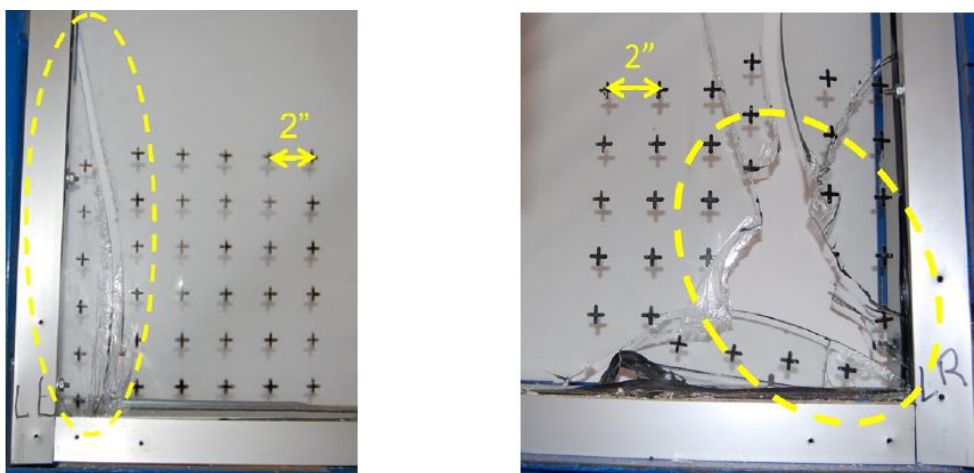
รูปที่ 2.23 ยางขอบกระจกหลุด (SDS-1)  
(Eva, 2009)



รูปที่ 2.24 กระจกฝ้าเล็กน้อย (SDS-2)  
(Eva, 2009)



รูปที่ 2.25 กาวซิลิโคนฉีกขาดหรือหลุด (SDS-3)  
(Eva, 2009)



(a) การแตกร้าวขนาดใหญ่ของกระจก (UDS-1) (b) กระจกหลุดร่วงออกจากกรอบหน้าต่าง (UDS-2)

รูปที่ 2.26 ความเสียหายภายใต้สภาวะประลัย (ultimate damage state, UDS)

(Eva, 2009)

## 2.5 มาตรฐานเกี่ยวกับการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของผนังเปลือกนอกของอาคาร

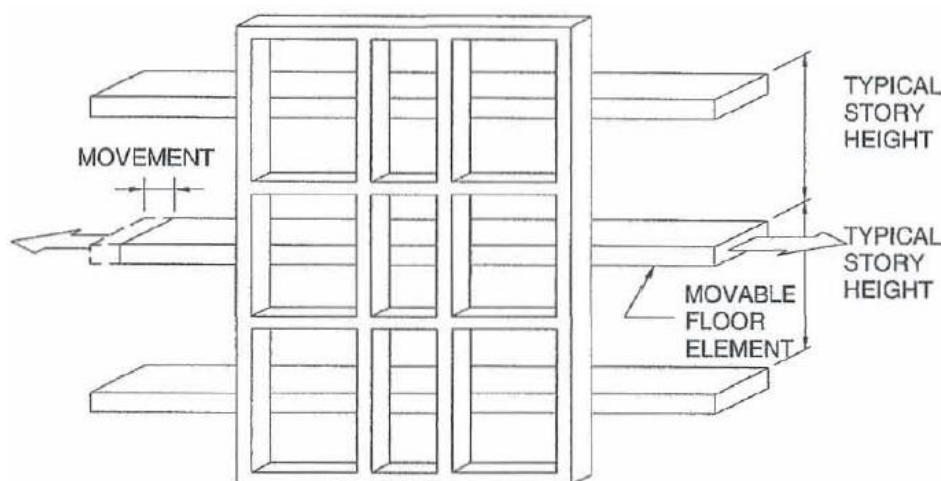
AAMA 501.4 (2000) “Recommended Static Test Method for Evaluating Curtain Wall and Storefront Systems Subjected to Seismic and Wind Induced Inter-story Drifts” เป็นวิธีการทดสอบเพื่อประเมินคุณสมบัติของระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร (curtain wall) และแผงหน้าร้าน (store-front) สำหรับการเคลื่อนที่ตามแนวแกน (horizontal displacement) เนื่องจากแผ่นดินไหวและแรงลม วิธีการทดสอบนี้กำหนดขั้นตอนสำหรับการประเมินภายใต้สภาพห้องปฏิบัติการ เพื่อหาความเสียหาย (failure mode) ของเปลือกอาคาร (cladding) โดยการคำนวณการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (inter-story drift) ของระบบโครงสร้างพื้นฐานของอาคารควรน้อยกว่า  $0.005 \times$  ความสูงระหว่างชั้น (story height) ถ้าไม่ได้ระบุไว้ในข้อกำหนดให้ใช้ค่าการออกแบบการเคลื่อนที่ตัวที่  $0.01 \times$  ความสูงระหว่างชั้น (story height) (AAMA 501.4, 2000)

ชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ (test specimens) ควรจะมีขนาดที่เหมาะสมและครอบคลุมรายละเอียดทั้งหมดของระบบผนัง สำหรับผนังภายนอกของอาคาร (curtain wall) ที่ประกอบเป็นแผงสำเร็จ ต้องมีความกว้างไม่น้อยกว่า 2 แผง รวมกับจุดรองรับและจุดเชื่อมต่อส่วนปลายทั้งสองด้วย ซึ่งต้องมีการรับแรงได้เต็มพื้นที่เสมือนจริงอย่างน้อย 1 จุดเชื่อมต่อหรือชิ้นส่วน หรือทั้งสองกรณี ความสูงต้องไม่น้อยกว่าความสูงหนึ่งชั้นหรือความสูงของแผง ส่วนแผงต่อเนื่องความสูงของตัวอย่างไม่

ควรจะน้อยกว่า 2 ชั้น รวมทั้งความสูงที่จำเป็นเพื่อรวมทั้งจุดเชื่อมต่อแนวนอนที่รองรับการขยายตัวทางแนวตั้งด้วย ชิ้นงานตัวอย่างควรมีขนาดเท่าจริง ใช้วัสดุจริง ชนิดของกระจก รายละเอียด วิธีการติดตั้ง และการยึดต่อเหมือนที่ใช้จริงในการก่อสร้าง โดยส่วนของโครงสร้างระหว่างชั้นที่ให้อาจขยับได้ตามแนวนอน สำหรับตัวอย่างที่มีหนึ่งชั้นให้จุดยึดแผงด้านข้างและด้านบนเชื่อมต่อเข้ากับโครงสร้างห้องทดสอบที่สามารถขยับได้ตามแนวนอน

ซึ่งขั้นตอนการทดสอบ (recommended test procedures) นั้น องค์ประกอบของห้องทดสอบที่เป็นตัวแทนของโครงสร้างอาคารหลักจะต้องสามารถเคลื่อนที่ตามที่ระบุไว้ (รูปที่ 2.27) ในแต่ละการทดสอบประกอบด้วยเคลื่อนที่ 3 รอบ (1 รอบ หมายถึงการเคลื่อนที่ไปหนึ่งทิศทางและกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นแล้วเคลื่อนไปอีกทิศทางตรงข้ามและกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นอีกครั้ง) ในการสรุปการทดสอบควรตรวจสอบความเสียหายของตัวอย่างทดสอบ และทำการบันทึกความเสียหายที่มองเห็น เช่น การหลุด การบิดตัวของโลหะ ความเสียหายของกาวซิลิโคนหรือกระจก หรือการเสียรูปถาวร กระจกแตก ความเสียหายของจุดรองรับ และสำหรับอาคารทุกประเภท ควรพิจารณาการทดสอบที่ 1.5 เท่า ของระยะการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้ (design displacement test) โดยที่กระจกต้องไม่มีการหลุดร่วงและไม่มีการแตกหักของชิ้นส่วนของผนัง

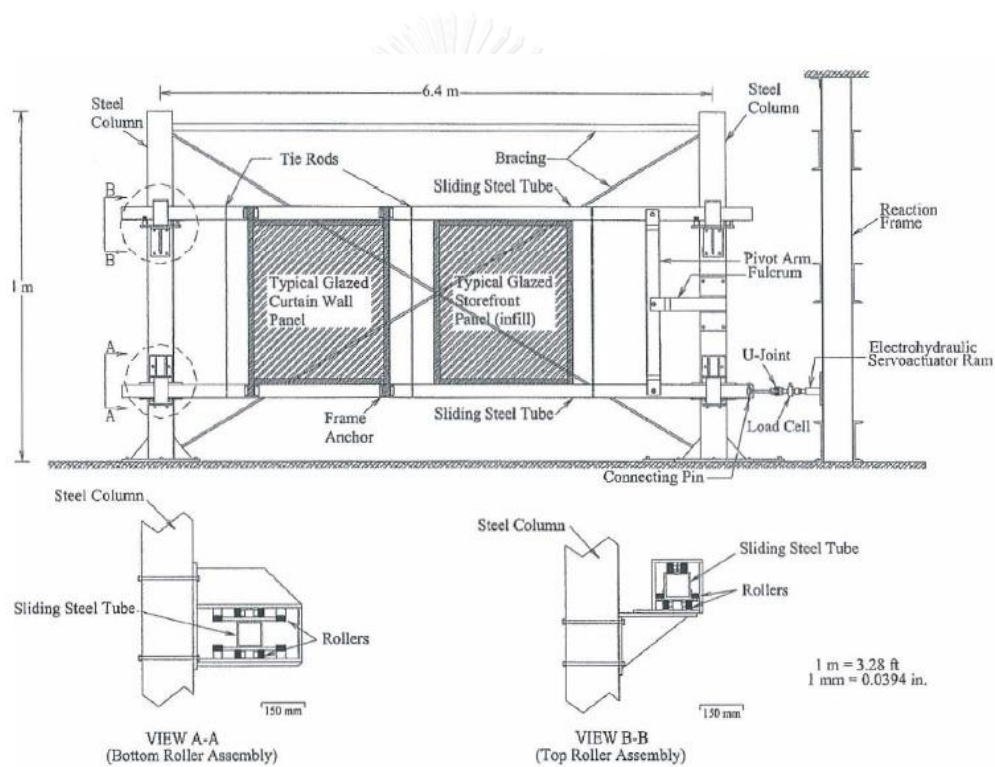
อุปกรณ์ (apparatus) ในการทดสอบนั้น การเคลื่อนที่ที่สามารถทำได้โดยใช้ กระจบอกลสูบ (hydraulic) หรือ กระจบอกลม (pneumatic cylinder) หรือแม่แรง (jack) ที่สามารถให้แรงและจังหวะได้ตามที่ระบุ หรือใช้อุปกรณ์เครื่องจักรกล เช่น รอกวงล้อหรือรอกโซ่ ส่วนอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ควรมีความละเอียดที่ 2 มม. (1/16 นิ้ว) และต้องมีอุปกรณ์ช่วยหยุด (fail-safe stops) เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานทดสอบเคลื่อนเกินระยะที่กำหนด



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างทดสอบที่ประกอบเข้ากับห้องทดสอบที่สามารถเคลื่อนที่ได้

(AAMA 501.4, 2000)

AAMA 501.6 (2001) “Recommended Dynamic Test Method for Determining the Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System” เป็นวิธีการทดสอบในการกำหนดขนาดการเคลื่อนที่ตามแนวนอน (horizontal racking displacement amplitude) ของกรอบชิ้นส่วนผนังที่อาจเกิดการร่วงหล่นของตัวอย่างทดสอบซึ่งถูกควบคุมในห้องปฏิบัติการ เป็นวิธีการทดสอบที่เพิ่มเติมขึ้นมาจากมาตรฐาน AAMA 501.4 ซึ่งการทดสอบนี้จะเน้นในการพิจารณาผลกระทบแบบการร่วงหล่นแบบไดนามิกของชิ้นงานทดสอบ วิธีการจะมุ่งเน้นไปที่พฤติกรรมแบบสถานะขีดจำกัดด้านกำลังเนื่องจากแผ่นดินไหว (seismic ultimate limit state) ของผนังกระจก โดยตัวอย่างทดสอบ (test specimen) ต้องมีจุดรองรับตามจริง (รูปที่ 2.28) โดยการทดสอบพิจารณาการหลุดร่วงของกระจกเมื่อชิ้นส่วนที่หลุดร่วงมีขนาดใหญ่กว่า 650 ตร.ม



รูปที่ 2.28 รูปแบบตัวอย่างการทดสอบแบบ horizontal racking test  
(AAMA 501.6, 2001)

AS-NZS 4284 (1995) “Testing of Building Façade” มาตรฐานนี้กำหนดวิธีการสำหรับประเมินประสิทธิภาพการทำงานของผนังเปลือกนอกของอาคารภายใต้แรงกระทำแบบต่างๆ การทดสอบวัดค่าการแอ่นตัวของตัวอย่าง (displacement of prototype) การทดสอบการรั่วซึมของน้ำ (water penetration) ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (ultimate load capacity)



การทดสอบ BMU (BMU test) การรับแรงแผ่นดินไหว (seismic loading) การทดสอบวัสดุกันรั่ว (seal degradation) สำหรับการทดสอบแผ่นดินไหว (seismic test) เป็นการทดสอบการเคลื่อนตัว (test displacement) ตัวอย่างทดสอบติดตั้งในแนวระนาบของห้องทดสอบ สำหรับการทดสอบจำนวน  $n$  รอบ (cycle) จำนวนคาบ  $T$  (period) ระยะ  $\pm W$  มม. จากจุดอ้างอิงที่กำหนด โดยที่ค่าพารามิเตอร์ควรกำหนดจากสภาวะการใช้งาน (serviceability limit states) และ สภาวะประลัย (ultimate limit states) ของแต่ละภูมิภาค

ขั้นตอนการทดสอบ (test procedure) จำลองคานให้เสมือนเป็นพื้นรับแผ่นดินไหวโดยที่คานสามารถเลื่อนไปมาเพื่อจำลองการเคลื่อนไหวด้านข้างจากแผ่นดินไหว (lateral seismic motion) โดยจุดรองรับตัวอย่างทดสอบควรยึดติดอยู่กับคานที่กำหนด การขยับตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบควรวัดจากระยะจากจุดอ้างอิงที่กำหนดกับระยะของคานที่ขยับไป โดยกลไกที่ใช้ขยับคานนั้นต้องมีความแข็งแรงเพียงพอในการทำให้เกิดคาบตามที่กำหนด (AS/NZS 4284, 1995)



## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 แนวคิดหลักของการทดสอบ

1. การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) ในแนวระนาบ (in-plane) ของตัวอย่างขนาดจริงของผนังเปลือกนอกของอาคาร โดยใช้แนวทางวิธีการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบสถิต ตามมาตรฐาน AAMA 501.4-00 ให้อัตราการเคลื่อนที่ค่อนข้างช้าอย่างคงที่ (relatively slow, static) ที่อัตราการเคลื่อนที่ (displacement rate) 10 มม.ต่อ วินาที แล้ว ค้างไว้สำหรับแต่ละระยะการเคลื่อนที่ของแต่ละรอบการทดสอบ เป็นเวลาประมาณ 1 นาที เพื่อตรวจสอบและบันทึกผลพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบที่เกิดขึ้น

2. แต่ละระยะการเคลื่อนที่ที่กำหนดจำนวนรอบ (cycle) ในการเคลื่อนที่ 3 รอบ (1 รอบ หมายถึง การเคลื่อนที่ไปหนึ่งทิศทางและกลับไปที่ตำแหน่งเริ่มต้นแล้วเคลื่อนไปอีกทิศทางตรงข้ามและกลับไปที่ตำแหน่งเริ่มต้นอีกครั้ง)

3. ทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น โดยเน้นตรวจสอบพฤติกรรมของระบบผนังกระจกในสภาวะการใช้งานเนื่องจากแผ่นดินไหว (seismic serviceability limit state) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน มยผ.1302-2552 ว่ามีความเหมาะสมเพียงพอสำหรับผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารหรือไม่อย่างไร

4. ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.25% ของความสูงระหว่างชั้น (story drift) ตามลำดับดังนี้ 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5, 2.75, 2.5 และ 3% ของระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น

5. สังเกตและบันทึกพฤติกรรมที่เกิดขึ้นที่ภายใต้สภาวะการใช้งาน (serviceability limit state) วัดระยะการเคลื่อนที่สำหรับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ในระนาบ ของชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) ตลอดความสูงของตัวอย่างทดสอบ โดยสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและทำการบันทึกระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของตัวอย่างทดสอบสำหรับการเคลื่อนที่ไม่เกินระยะ 100 มม.

6. สังเกตและบันทึกพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะประลัย (ultimate limit state) เมื่อเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตามหัวข้อ 3.1.4 โดยทดสอบถึงขั้นพังเสียหาย เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของระบบผนังในสภาวะประลัยเนื่องจากแผ่นดินไหว (seismic ultimate limit state) (เนื่องด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ทำให้ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดไม่เกิน 200 มิลลิเมตร)

### 3.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

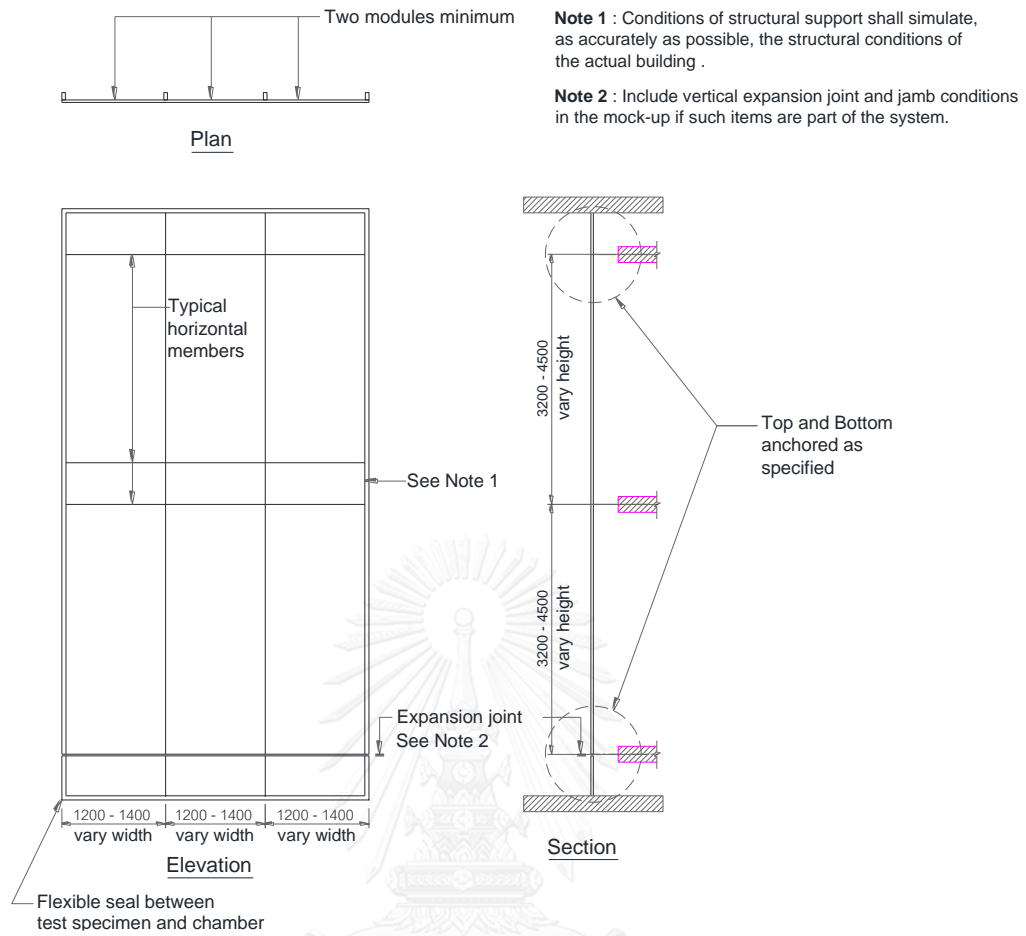
1. ตัวอย่างขนาดจริงจำนวน 3 ตัวอย่าง ของผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารระบบยูนิไทซ์ (unitized curtain wall) โดยตัวอย่างถูกเลือกจากขนาดที่เหมาะสมและครอบคลุมรายละเอียดทั้งหมดของระบบผนังของอาคาร (typical panel) โดยมีความกว้างเต็มไม่น้อยกว่า 2 แผง รวมกับจุดรองรับและจุดเชื่อมต่อส่วนปลายทั้งสองซึ่งต้องมีการรับแรงได้เต็มพื้นที่จริงอย่างน้อยหนึ่งจุดเชื่อมต่อ ความสูงต้องไม่น้อยกว่าความสูงหนึ่งชั้นหรือความสูงของแผง ส่วนแผงต่อเนื่อง ความสูงของตัวอย่างไม่ควรจะน้อยกว่า 2 ชั้น รวมทั้งความสูงที่จำเป็นเพื่อรวมทั้งจุดเชื่อมต่อแนวนอนที่รองรับการขยายตัวทางแนวตั้งด้วย (รูปที่ 3.1)

2. ชิ้นส่วนต่างๆ ของตัวอย่างควรมีขนาดเท่าจริง ใช้วัสดุจริง ชนิดของกระจก รายละเอียดวิธีการติดตั้ง และการยึดเป็นแบบเดียวกับใช้จริงในการก่อสร้าง

### 3.3 อุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมือ

#### 3.3.1 ห้องทดสอบ (test chamber)

ห้องทดสอบสามารถปรับขนาดช่องเพื่อรองรับตัวอย่างทดสอบโดยใช้โครงสร้างเหล็ก โครงสร้างของห้องทดสอบถูกจำลองเพื่อรองรับตำแหน่งยึดต่างๆ ของตัวอย่างเสมือนอาคารจริง โดยส่วนของคานาระหว่างชั้นที่จำลองพื้นโครงสร้าง ถูกออกแบบให้สามารถขยับได้ตามแนวนอน สำหรับจุดรองรับด้านล่างและด้านบนของชุดตัวอย่างเชื่อมต่อเข้ากับโครงสร้างห้องทดสอบที่ถูกยึดอยู่กับที่ (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบโดยทั่วไปติดตั้งในห้องทดสอบ



รูปที่ 3.2 ห้องทดสอบขนาด 8 เมตร x ความสูง 15 เมตร

(รูปจากบริษัท แคสแคล จำกัด)

### 3.3.2 คานเหล็กเคลื่อนที่ (moveable beam)

ถูกออกแบบให้เป็นคานกลางที่เคลื่อนที่ได้ในระนาบเพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของพื้นโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.27 ตัวอย่างทดสอบที่ประกอบเข้ากับห้องทดสอบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (AAMA 501.4, 2000)

### 3.3.3 กลไกในการเคลื่อนที่และอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่

#### 1. กระบอบอกสูบ (hydraulic cylinder) พร้อมอุปกรณ์ควบคุม

อุปกรณ์ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของคานเหล็ก (รูปที่ 3.3) เพื่อให้ระยะการเคลื่อนที่และรอบได้ตามที่กำหนดในหัวข้อ 3.1 โดยกระบอบอกสูบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 มม. ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 200 มม. อัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที ความเร็วสูงสุดที่ 40 มม.ต่อวินาที ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 15 แรงม้า และแรงดันที่ 100 บาร์



รูปที่ 3.3 กระบอบอกสูบพร้อมอุปกรณ์ควบคุม

#### 2. ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (linear variable differential transformer, LVDT)

LVDT ขนาด 100 มม. (รูปที่ 3.4) อุปกรณ์ใช้วัดระยะการเคลื่อนที่ของคานเหล็ก และชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) ของตัวอย่างตลอดแนวความสูงของชั้น



รูปที่ 3.4 ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

### 3.4 รายละเอียดพฤติกรรมของตัวอย่างที่พิจารณาภายใต้การทดสอบ

ระหว่างการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแต่ละระยะการเคลื่อนที่ ให้สังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

- การแตกหักหรือหลุดร่วงของกระจก
- การหลุด การบิดตัวของโลหะ หรือการเสียรูปถาวร
- ความเสียหายของกาวซิลิโคนหรือกระจก
- ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนผนังหรือชิ้นส่วนรองรับ

### 3.5 ขั้นตอนการทดสอบ (test procedures)

1. ใช้กระบอกสูบดันคานกลางให้เคลื่อนที่ตามระยะ รอบการเคลื่อนที่ และอัตราการเคลื่อนที่ ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.1 ถึง หัวข้อ 3.1.3 เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของระบบผนังกระจกเปลือกนอกอาคารในสภาวะใช้งานเนื่องจากแผ่นดินไหว (seismic serviceability limit state)

2. ใช้กระบอกสูบดันคานกลางให้เคลื่อนที่โดยเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น ตามหัวข้อ 3.1.4 โดยทดสอบถึงขั้นพังเสียหาย เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของระบบผนังในสภาวะประลัยจากแผ่นดินไหว (seismic ultimate limit state)

3. การวัดระยะการเคลื่อนที่โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวนำแบบเชิงเส้น (LVDT) ให้วัดที่คานจำลองที่กำหนดให้เคลื่อนได้ (moveable beam) และวัดการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) ของตัวอย่างทดสอบตลอดแนวความสูง โดยสังเกตและทำการบันทึกระยะการเคลื่อนที่สูงสุดที่ 100 มม.

4. โดยในแต่ละการทดสอบให้บันทึกผลสิ่งที่สังเกตได้ตามรายละเอียดหัวข้อที่ 3.4

## บทที่ 4

### ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

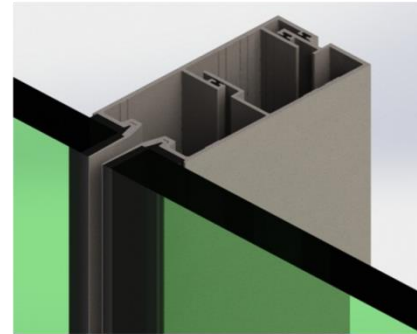
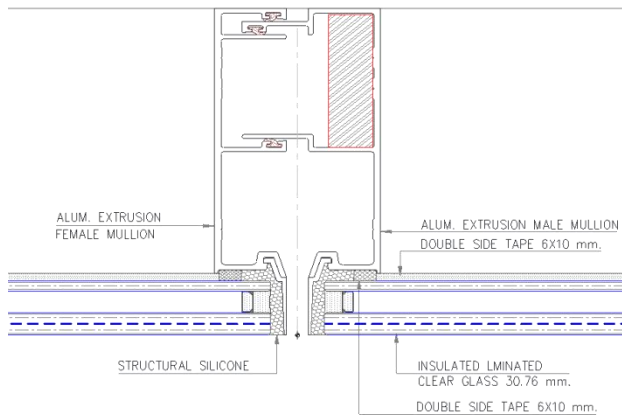
ตัวอย่างทดสอบของผนังกระจกเปลือกนอกรอาคารขนาดจริงถูกติดตั้งและทำการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการทดสอบที่สภาวะใช้งาน (serviceability limit state) และสภาวะประลัย (ultimate limit state)

#### 4.1 ตัวอย่างทดสอบและห้องปฏิบัติการ

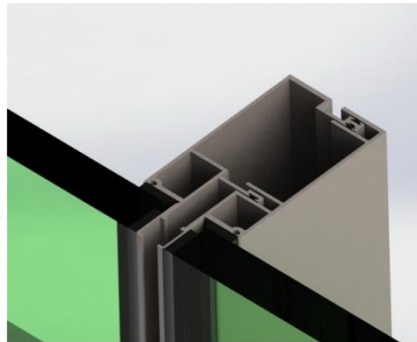
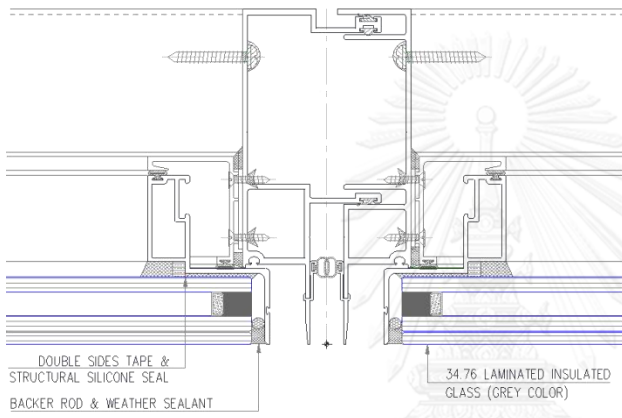
ตัวอย่างทดสอบขนาดจริง 3 ตัวอย่าง ของผนังกระจกเปลือกนอกรอาคารระบบยูนิไทซ์ (unitized curtain wall) ซึ่งแผ่นกระจกถูกประกอบเข้ากับกรอบโครงอลูมิเนียมทั้งสี่ด้านโดยใช้เทปกาวสองหน้าสำหรับติดกระจกกับอลูมิเนียม (adhesive tape) และกาวซิลิโคนประเภทโครงสร้าง (structural silicone sealant) ดังรูปที่ 4.1 เป็นแบบหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ แสดงการยึดติดกระจกเข้ากับชิ้นส่วนกรอบโครง ตัวอย่างทดสอบถูกเลือกจากขนาดที่เหมาะสมและครอบคลุมรายละเอียดทั้งหมดของระบบผนังของอาคาร (typical panel) โดยมีความกว้างเต็มไม่น้อยกว่า 2 เมตร รวมทั้งจุดรองรับและจุดเชื่อมต่อส่วนปลายทั้งสองซึ่งมีการรับแรงได้เต็มพื้นที่จริงอย่างน้อยหนึ่งจุดเชื่อมต่อ ความสูงต้องไม่น้อยกว่าความสูงหนึ่งชั้นหรือความสูงของแผงต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 2 ชั้น ชิ้นส่วนต่างๆ ของตัวอย่างมีขนาดเท่าจริง ใช้วัสดุจริง ชนิดของกระจก รายละเอียด วิธีการติดตั้ง และการยึดเป็นแบบเดียวกับใช้จริงในการก่อสร้าง

ห้องทดสอบสำหรับติดตั้งตัวอย่างนั้น โครงสร้างห้องทดสอบออกแบบด้วยโครงสร้างเหล็ก และทำการติดตั้งคานเคลื่อนที่ (moveable beam) ระหว่างชั้น 2 ของแผงตามระดับพื้นจริง เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ในระนาบ (in-plane movement) คานเคลื่อนที่รองรับโดยเพลลา 2 จุด ที่ระยะหนึ่ง 1/4 โดยวัดจากท้ายคานทั้งสองด้าน ซึ่งวางอยู่บนคานหลักยึดแน่น (fixed beam) เพื่อรองรับการเคลื่อนที่และน้ำหนักทั้งหมด เป็นการจำลองพื้นโครงสร้างหลักที่รองรับผนังกระจกเปลือกนอกรอาคาร

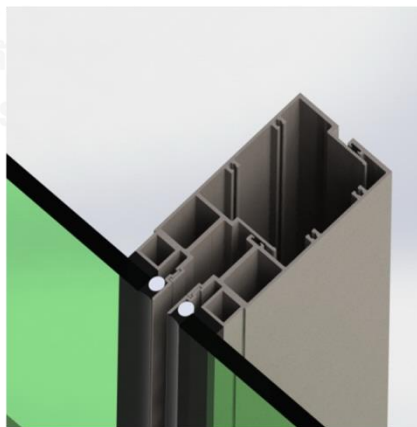
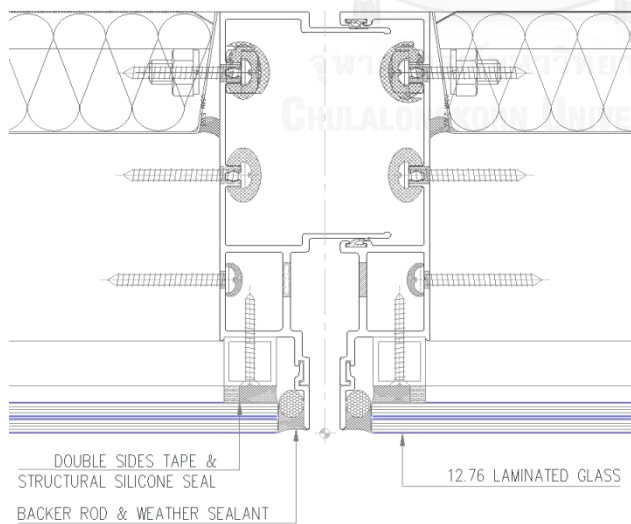
การติดตั้งของแผงตัวอย่าง ทำการติดแผงตัวอย่างแต่ละชุด (unit panel) เข้ากับชิ้นส่วนรองรับ (bracket connection) ที่ยึดเข้ากับพื้นโครงสร้าง โดยเริ่มติดตั้งจากแผงด้านล่างสุดจากด้านใดด้านหนึ่งไล่ไปตามลำดับ ดังตัวอย่างการติดตั้งตามรูปที่ 4.2



ตัวอย่างที่ 1



ตัวอย่างที่ 2



ตัวอย่างที่ 3

รูปที่ 4.1 การประกอบกระจกเข้ากับชิ้นส่วนกรอบโครง





รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการติดตั้งผนังกระจก unitized curtain wall system

#### 4.1.1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ 1

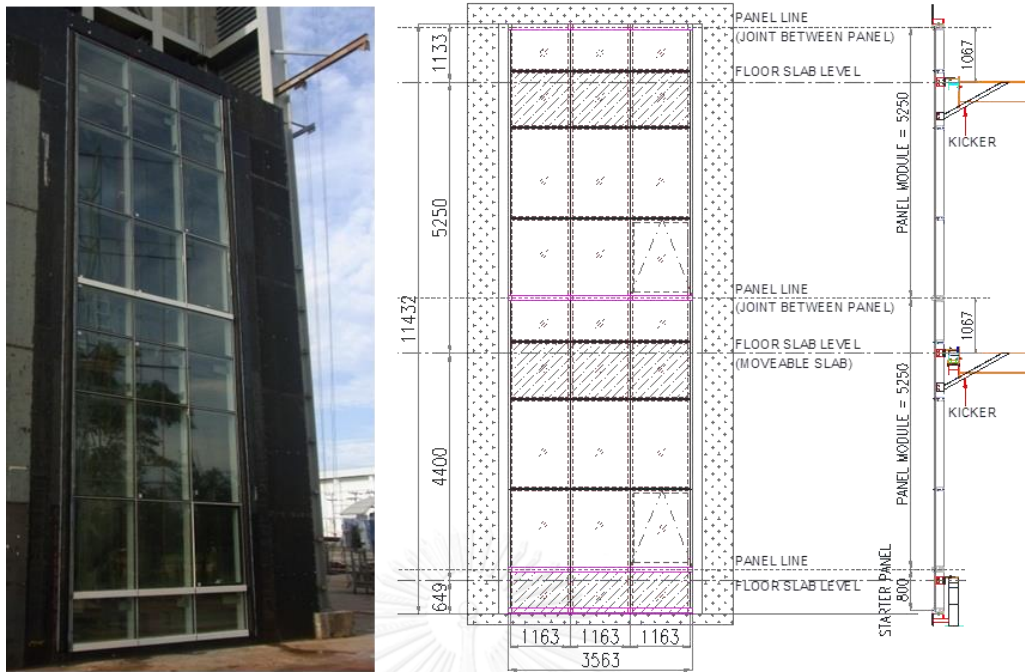
ผนังกระจกเปลือกนอกรอาคารระบบยูนิไทซ์ ขนาดกว้าง 3 แผง และสูง 2 ชั้น และมีแผงเริ่มต้นร่วมด้วย ซึ่งขนาดรวมของตัวอย่างมีความกว้าง 3,563 มม. และความสูง 11,432 มม. ดังรูปที่ 4.3 (กว้างแผงละ 1,163 มม. ความสูงระหว่างชั้น 5,250 มม.) โดยชิ้นส่วนแนวดิ่ง (mullion) มีการติดตั้งชิ้นส่วนรองรับแผง 2 จุด (double bracket) ตำแหน่งรองรับจุดแรกติดเข้ากับพื้น (floor bracket) และมีรอยต่อของแผง (stack joint) อยู่เหนือระดับพื้นขึ้นไป 1,067 มม. โดยตำแหน่งรองรับจุดที่สองคือการติดตั้งค้ำยัน (kicker) เพื่อต้านแรงลมที่กระทำในแนวนอน (out-of-plane) ดังรูปที่ 4.4

##### 1. คานเคลื่อนที่และการติดตั้งเครื่องมือวัดของตัวอย่างที่ 1

สำหรับคานเคลื่อนที่ติดตั้งที่ระยะสูงจากพื้น 5,224 มม. รองรับโดยเพลา 2 จุด โดยติดตั้งกระบอกไฮดรอลิกที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่เข้ากับส่วนปลายของคาน (รูปที่ 4.5) ดังแสดงตำแหน่งคานเคลื่อนที่ตามรูปที่ 4.6 และการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ในแนวระนาบ จำนวน 8 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.7 สังเกตและทำการบันทึกการเคลื่อนที่สูงสุดที่ 100 มม. โดยระยะการเคลื่อนที่ที่มากกว่า 100 มม. ทำการสังเกตและบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้น

##### 2. ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างซึ่งมีความสูงระหว่างชั้นที่ 5,250 มม. จึงทดสอบโดยการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ตั้งแต่ 12.55 มม. (0.25% drift) ไปจนถึง 157.50 มม. (3.0% drift)



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างทดสอบที่ 1 ผนังกระจกเคลื่อนนอกอาคารระบบยูนีไทซ์  
(ความกว้าง 3.56 ม. x ความสูง 11.43 ม.)

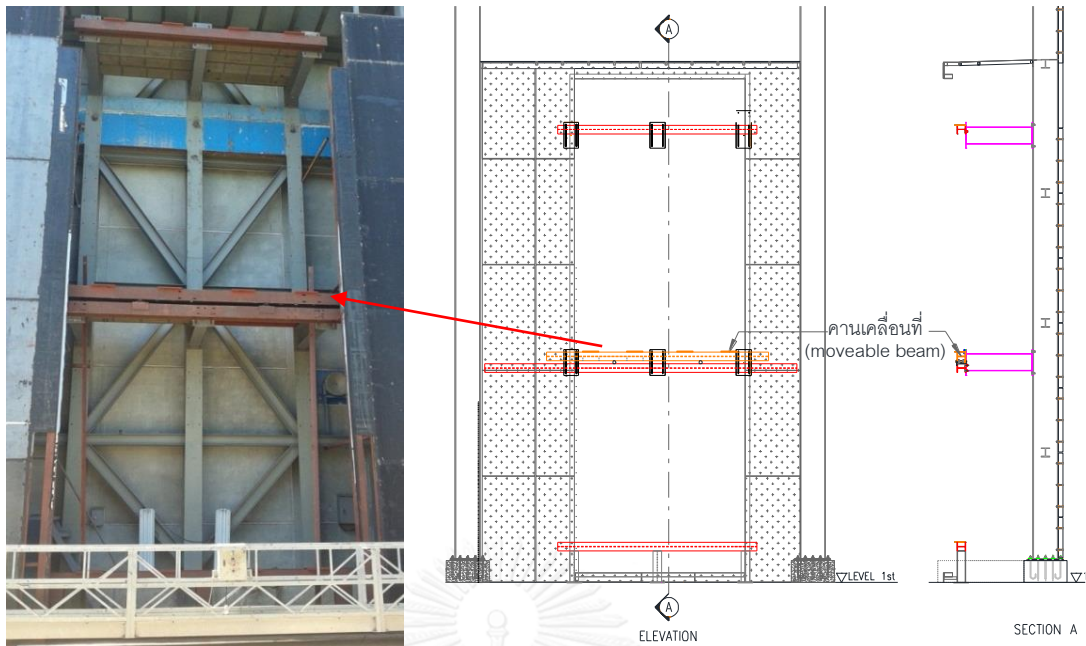


ก) ชิ้นส่วนรองรับติดเข้ากับพื้น (floor bracket)      ข) ค้ำยันเพื่อต้านแรงลม

รูปที่ 4.4 ลักษณะจุดรองรับแผงตัวอย่างทดสอบที่ 1



รูปที่ 4.5 การติดตั้งกระบอกไฮดรอลิคเข้ากับคานเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 4.6 การติดตั้งคานเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ของตัวอย่างที่ 1

#### 4.1.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ 2

ผนังกระจกเปลือกนอกอาคารระบบยูนีไทช์ ขนาดกว้าง 5 เมตร และสูง 2 ชั้น ซึ่งขนาดรวมของตัวอย่างมีความกว้าง 6,268 มม. และความสูง 8,600 มม. ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 (ความกว้างของแผงมีขนาดไม่เท่ากันแสดงตามแบบ โดยมีความสูงระหว่างชั้นสูงสุด 4,800 มม.) ชั้นส่วนแนวตั้ง

(mullion) มีการติดตั้งชิ้นส่วนรองรับ 2 จุด (double bracket) จุดแรกคือติดเข้ากับพื้น (floor bracket) และมีรอยต่อของแผง (stack joint) ในแนวเดียวกับจุดรองรับของพื้น โดยจุดที่สองติดตั้งค้ำยัน (kicker) เพื่อต้านแรงลมที่กระทำในแนวนอนตามแนบ ดังรูปที่ 4.10

#### 1. คานเคลื่อนที่และการติดตั้งเครื่องมือวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2

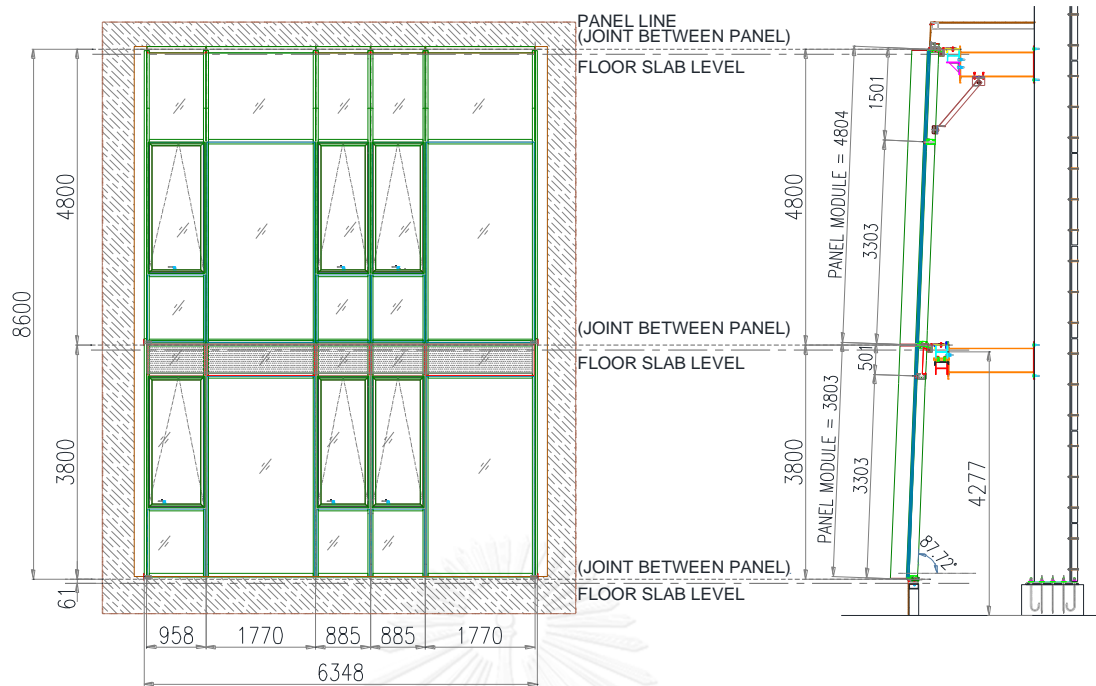
สำหรับคานเคลื่อนที่ที่ติดตั้งที่ระยะสูงจากพื้น 4,277 มม. รองรับโดยเพลา 2 จุด (รูปที่ 4.12) โดยติดตั้งกระบอกลิขสิทธิ์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่เข้ากับส่วนปลายของคาน (รูปที่ 4.11) และการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ในแนวระนาบ จำนวน 8 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.13 สังเกตและทำการบันทึกการเคลื่อนที่สูงสุดที่ 100 มม. โดยระยะการเคลื่อนที่มากกว่า 100 มม. ทำการสังเกตและบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้น

#### 2. ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของตัวอย่างทดสอบที่ 2

ตัวอย่างมีความสูงระหว่างชั้นที่ 4,800 มม. จึงทดสอบโดยการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ ตั้งแต่ 12 มม. (0.25% drift) ไปจนถึง 192 มม. (4.0% drift)



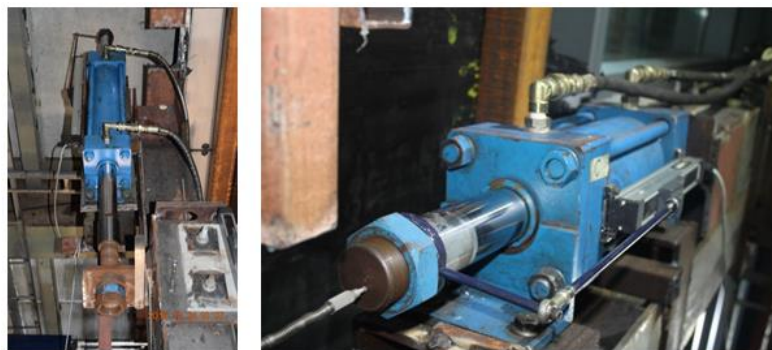
รูปที่ 4.8 รูปตัวอย่างทดสอบที่ 2 ติดตั้งเข้ากับห้องทดสอบ  
(ความกว้าง 6.27 ม. x ความสูง 8.60 ม.)



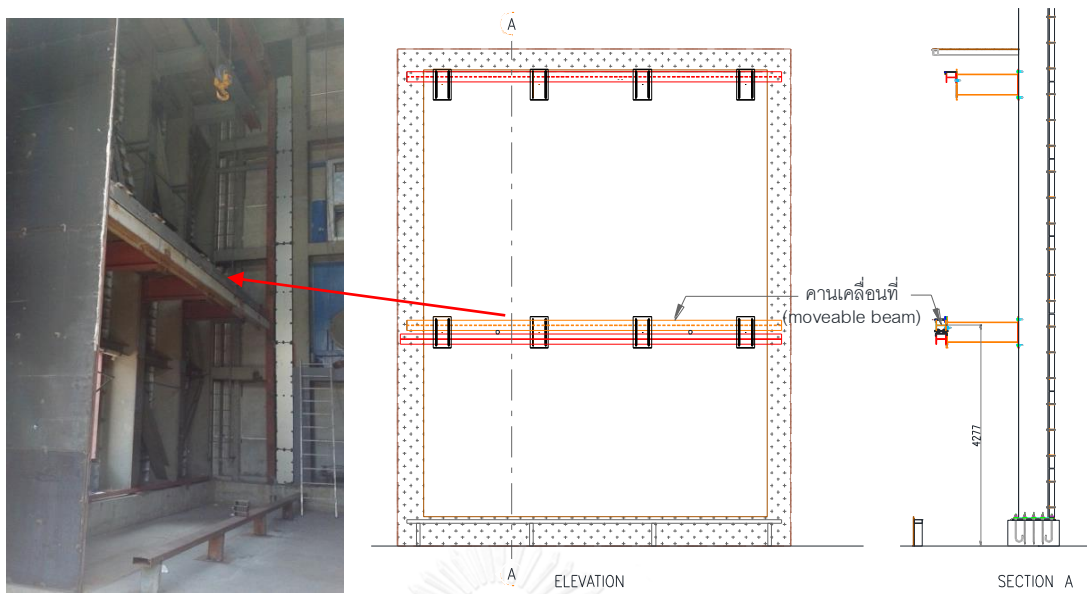
รูปที่ 4.9 ขนาดของตัวอย่างทดสอบที่ 2 ผนังกระจกเปลือกนอกอาคารระบบยูนิไทซ์



รูปที่ 4.10 ลักษณะจุดรองรับแผงตัวอย่างทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.11 การติดตั้งกระบอกไฮดรอลิกเข้ากับคานเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 4.12 การติดตั้งคานเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 2

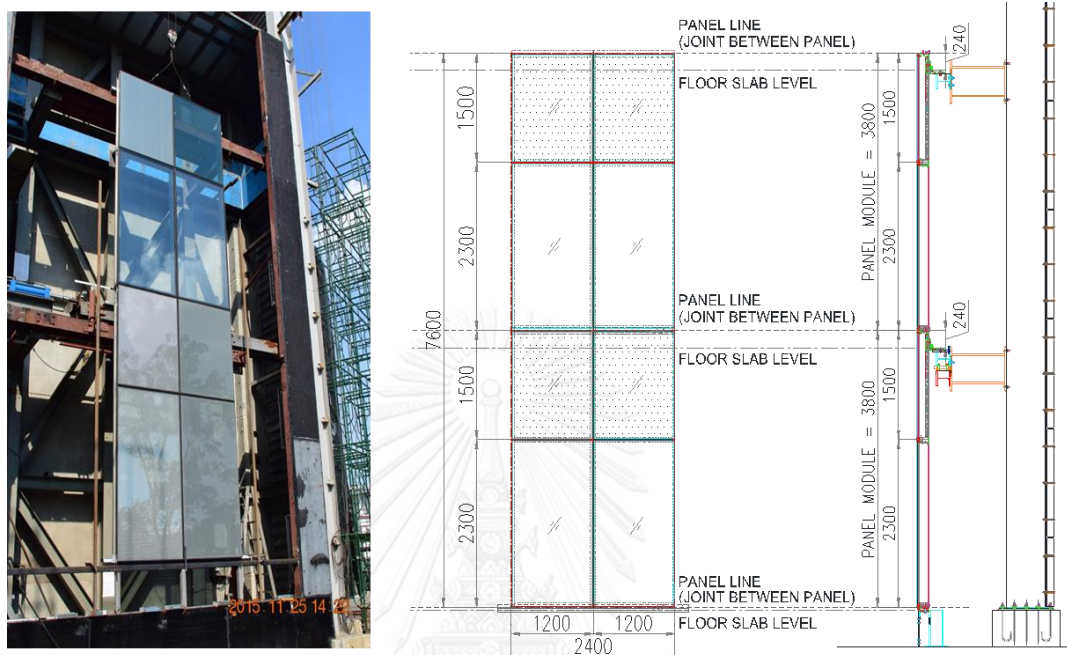


รูปที่ 4.13 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ของตัวอย่างที่ 2

#### 4.1.3 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ 3

ผนังกระจกเปลือกนอกรอาคารระบบยูนิไทป์ ขนาดกว้าง 2 แผง และสูง 2 ชั้น ซึ่งขนาดรวมของตัวอย่างมีความกว้าง 2,400 มม. และความสูง 7,647 มม. ดังรูปที่ 4.14 (กว้างแผงละ 1,200 มม.)

ความสูงระหว่างชั้นสูงสุด 3,800 มม.) โดยชั้นส่วนแนวตั้ง (mullion) มีการติดตั้งชั้นส่วนรองรับแผงหนึ่งจุด (single bracket) เข้ากับพื้น (floor bracket) โดยมีรอยต่อของแผงอยู่เหนือขึ้นไป 240 มม. ตามรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างทดสอบที่ 3 ผนังกระจกเปลือกนอาคารระบบยูนิไทซ์  
(ความกว้าง 2.40 ม. x ความสูง 7.65 ม.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ลักษณะจุดรองรับแผงตัวอย่างทดสอบที่ 3

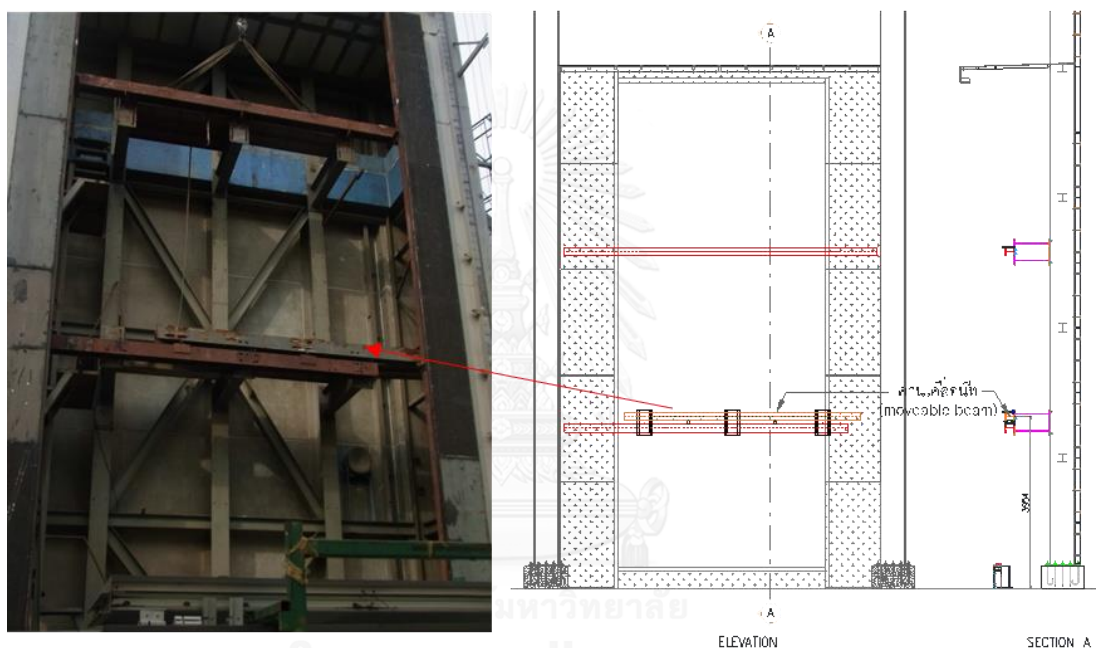
1. คานเคลื่อนที่และการติดตั้งเครื่องมือวัดของตัวอย่างที่ 3

สำหรับคานเคลื่อนที่ติดตั้งที่ระยะสูงจากพื้น 3,954 มม. รองรับโดยเพลา 2 จุด (รูปที่ 4.16) โดยติดตั้งกระบอกไฮดรอลิกที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่เข้ากับส่วนปลายของคาน (รูปที่ 4.17) และการ

ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ในแนวระนาบ จำนวน 6 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.18 สังเกตและทำการบันทึกการเคลื่อนที่สูงสุดที่ 100 มม. โดยระยะการเคลื่อนที่ที่มากกว่า 100 มม. ทำการสังเกตและบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้น

## 2. ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของตัวอย่างทดสอบที่ 3

ตัวอย่างซึ่งมีความสูงระหว่างชั้นที่ 3,800 มม. จึงทดสอบโดยการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ตั้งแต่ 9.50 มม. (0.25% drift) ไปจนถึง 190 มม. (5.0% drift)

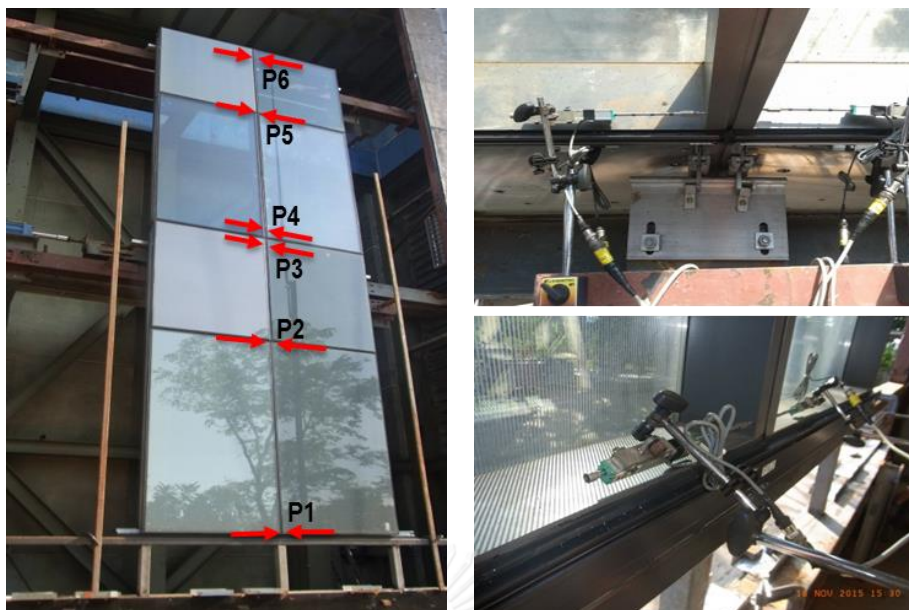


รูปที่ 4.16 การติดตั้งคานเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 4.17 การติดตั้งกระบอกไฮดรอลิกเข้ากับคานเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ 3





รูปที่ 4.18 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ของตัวอย่างที่ 3

#### 4.2 ผลการทดสอบผนังกระจกเปลือกนอกรอาคาร

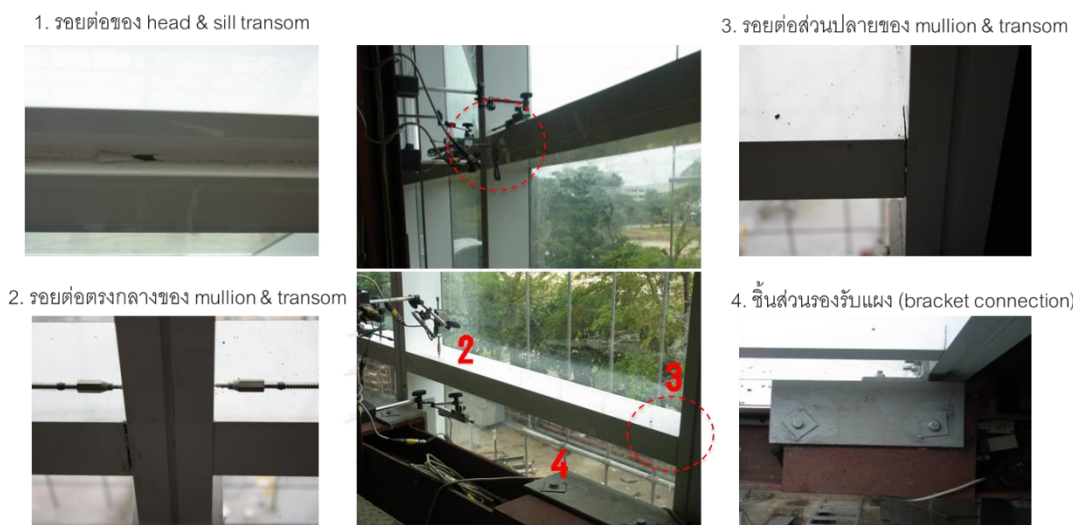
จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบขนาดจริง 3 ตัวอย่าง ของผนังกระจกเปลือกนอกรอาคาร ระบบยูนิไทซ์ (unitized curtain wall) โดยแบ่งการทดสอบที่สภาวะใช้งาน (serviceability limit state) และสภาวะประลัย (ultimate limit state) ซึ่งพบว่า

##### 4.2.1 ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 1

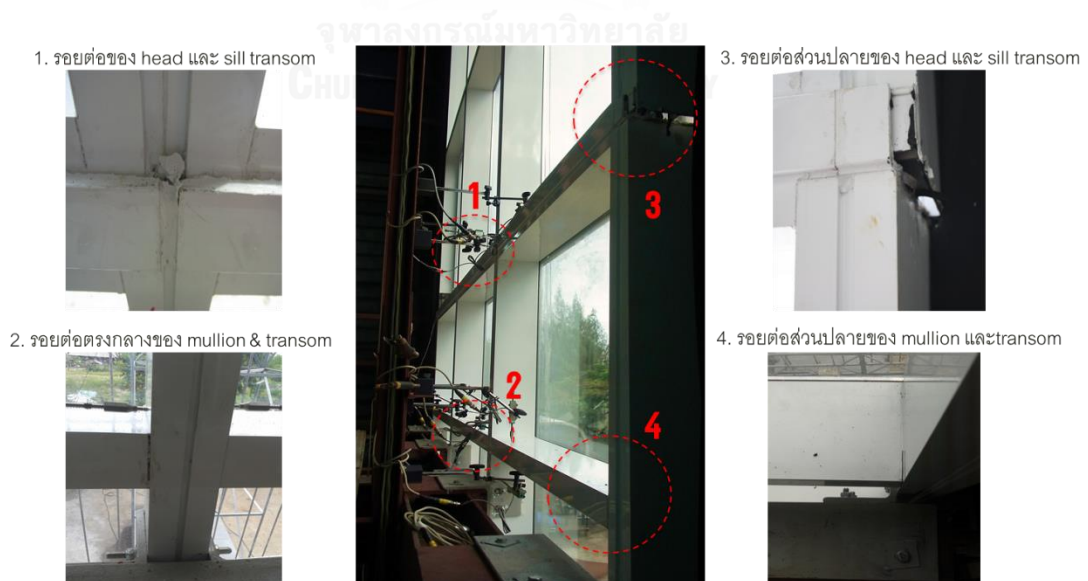
ทดสอบโดยเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ตั้งแต่ 12.55 มม. (0.25% story drift) ไปจนถึง ระยะ 157.5 มม. (3% story drift) สังเกตและทำการบันทึกที่ระยะการเคลื่อนที่ตามแนวนอนจากติดตั้ง อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ระยะตั้งแต่ 12.55 มม. (0.25% story drift) ถึงระยะสูงสุดที่ 91.88 มม. (1.75% story drift) โดยระยะการเคลื่อนที่มากกว่า 91.88 มม. ทำการสังเกตและบันทึก ความเสียหายที่เกิดขึ้น

จากการทดสอบระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 0.25% (12.55 มม.) ของความสูงระหว่างชั้น (story height) ไม่พบความเสียหาย ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 0.5% (26 มม.) ของความสูงระหว่างชั้น เริ่มสังเกตเห็นรอยแยกของกาวซิลิโคนที่บริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนแนวนอน (transom) และชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) ดังรูปที่ 4.19 และชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket connection) ที่ยึดเข้ากับพื้นบริเวณใกล้กับคานเคลื่อนที่ (moveable beam) พบการขยับออกจากตำแหน่งเดิม รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนแนวนอนและแนวตั้งพบความเสียหายมากขึ้นเมื่อระยะการ

เคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มขึ้นที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 1% (รูปที่ 4.20) แต่ไม่พบการหลุดร่วงหรือการแตกของแผ่นกระจกเมื่อทดสอบไปจนถึงระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 3% (156 มม.) ของความสูงระหว่างชั้น (รูปที่ 4.21) ซึ่งจะเห็นรอยฉีกขาดของซิลิโคนอย่างรุนแรงบริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) และชิ้นส่วนแนวนอน (transom) และแนวรอยต่อของชิ้นส่วนต่างๆ มีการขยับตัวถาวร ไม่กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น โดยสามารถสรุปการเสียรูปของตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.19 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 1 ภายใต้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 0.5% story height



รูปที่ 4.20 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 1 ภายใต้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.0% story height



รูปที่ 4.21 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 1 ภายใต้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 3.0% story height

ตารางที่ 4.1 การเสียรูปของตัวอย่างที่ 1 จากการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (story drift)

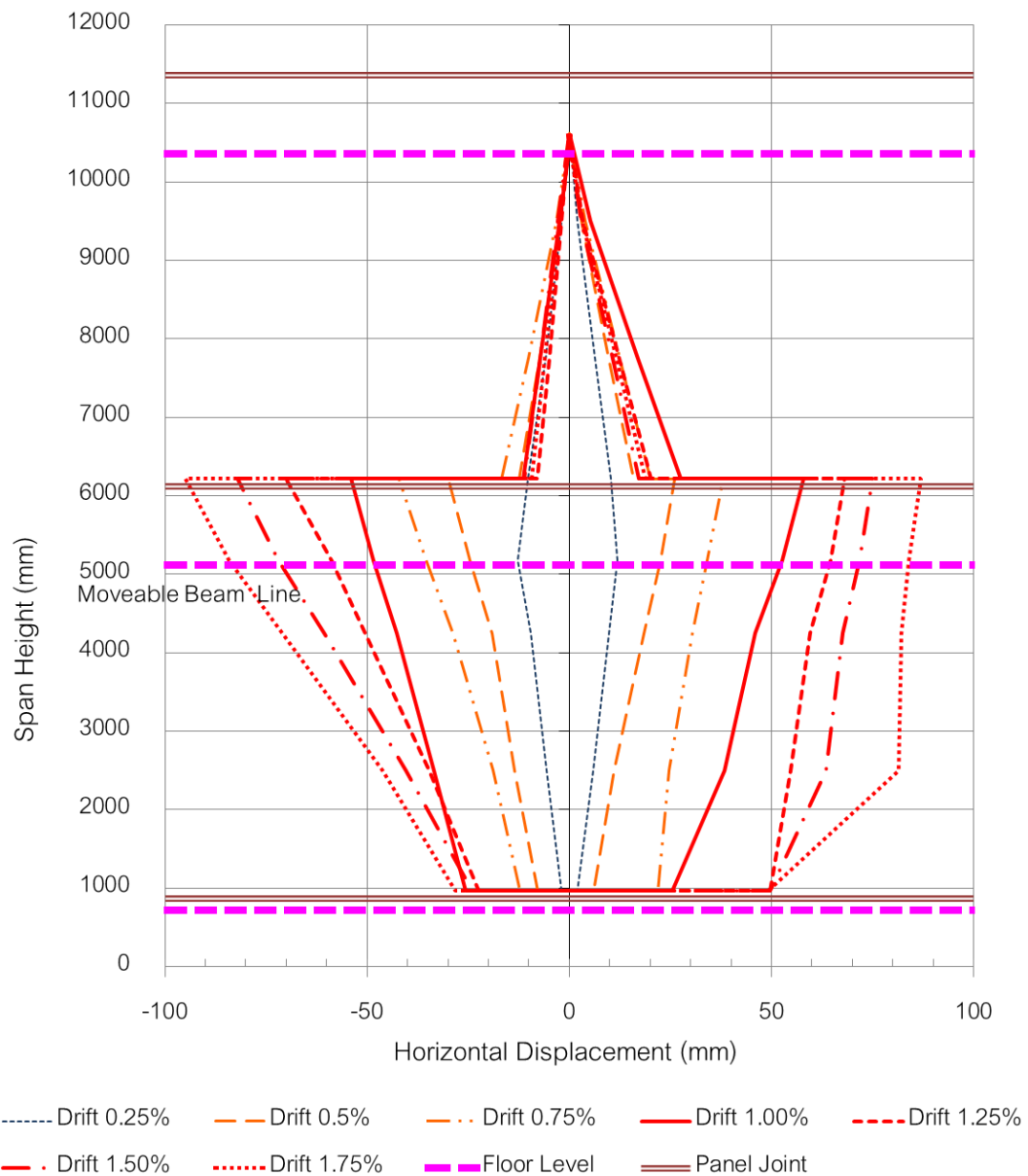
เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (% story drift)	ลักษณะการเสียรูปของตัวอย่าง
0.25	ไม่พบความเสียหาย
0.5	หน้าต่างด้านบนเปิดออกเนื่องจากอุปกรณ์ยึดจับเกิดการเคลื่อนหลุด พบการขยับของชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket connection) ออกจากตำแหน่งเดิมบริเวณใกล้กับคานเคลื่อนที่ และเกิดรอยแยกของกาวซิลิโคนระหว่างชิ้นส่วนแนวนอน (transom) และชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion)
0.75	หน้าต่างด้านล่างเปิดออกเนื่องจากอุปกรณ์ยึดจับเกิดการเคลื่อนหลุด พบการขยับของชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket connection) ออกจากตำแหน่งบริเวณใกล้กับคานเคลื่อนที่ และเกิดรอยแยกของกาวซิลิโคนระหว่างชิ้นส่วนแนวนอน (transom) และชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion)

1.0	พบการขยับของชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket connection) ออกจากตำแหน่งบริเวณใกล้กับคานเคลื่อนที่ เกิดรอยแยกของกาวซิลิโคนระหว่างชิ้นส่วนแนวนอน (transom) และชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) และสังเกตเห็นความเสียหายของชิ้นส่วนแนวตั้งบริเวณด้านข้างของแผงทั้งสองฝั่งที่อยู่ติดกับโครงสร้างของห้องทดสอบ
1.25 ถึง 3.0	พบการขยับของชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket connection) ออกจากตำแหน่งบริเวณใกล้กับคานเคลื่อนที่ เกิดการฉีกขาดของกาวซิลิโคนระหว่างชิ้นส่วนแนวนอน (transom) และชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) ที่เพิ่มมากขึ้น พบความเสียหายของรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนแนวตั้งและแนวนอนที่เพิ่มขึ้น ไม่พบการแตกหรือการหลุดร่วงของแผ่นกระจก

จากการบันทึกการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) ตามความสูงของตัวอย่างทดสอบจำนวน 8 ตำแหน่ง ของแต่ละระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์ แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.23 โดยเส้นสีของกราฟแบ่งลักษณะความเสียหายตามความรุนแรงที่เกิดขึ้นตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่าชิ้นส่วนแผงด้านบนมีระยะการเคลื่อนที่น้อยกว่าแผงด้านล่างที่ติดเข้ากับคานเคลื่อนที่ เนื่องจากระยะของรอยต่อของแผงตัวอย่างอยู่เหนือจุดรองรับ (bracket connection) ขึ้นไประยะ 1,076 มม. จึงมีการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งพบว่า การเคลื่อนที่ของแผงตรงกลางที่ติดตั้งเข้ากับคานเคลื่อนที่ (moveable beam) มีการเคลื่อนตามไปในทิศทางเดียวกับคาน โดยเป็นการเลื่อนตามแนวนอนของรอยต่อชิ้นส่วนบน (sill transom) และชิ้นส่วนล่าง (head transom) ของระหว่างแผงด้านบน (upper panel) และแผงด้านล่าง (lower panel) ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ลักษณะการเคลื่อนที่ตามแนวนอนของตัวอย่างทดสอบที่ 1



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่และความสูงของตัวอย่างทดสอบที่ 1

#### 4.2.2 ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 2

ทดสอบโดยเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ตั้งแต่ 12 มม. (0.25% story drift) ไปจนถึง 192 มม. (4% story drift) สังเกตและทำการบันทึกการเคลื่อนที่ตามแนวนอนจากติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ระยะตั้งแต่ 12 มม. (0.25% story drift) ถึงระยะสูงสุดที่ 96 มม. (2% story drift) โดยระยะการเคลื่อนที่มากกว่า 96 มม. ทำการสังเกตและบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้น

จากการทดสอบระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 12 มม. (0.25% story drift) ถึงระยะ 36 มม. (0.75% story drift) ของความสูงระหว่างชั้น (story height) ไม่พบความเสียหาย ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1% (48 มม.) ของความสูงระหว่างชั้น เริ่มสังเกตเห็นรอยแยกของกาชิลิโคนที่บริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนแนวนอนของแผงบน-ล่าง (sill & head transom) ของระดับพื้นชั้น 2 และชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket connection) ที่ยึดเข้ากับพื้นบริเวณใกล้กับคานเคลื่อนที่ (moveable beam) พบการขยับหมุนออกจากตำแหน่งเดิม 2 มม. (รูปที่ 4.24) เมื่อเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.5% (72 มม.) ของความสูงระหว่างชั้น พบว่ารอยต่อระหว่างชิ้นส่วนแนวนอน (transom) และแนวตั้ง (mullion) พบรอยฉีกขาดของชิลิโคนและการแยกของจากกันเล็กน้อย และเกิดการยกตัวของแผงตัวอย่างระหว่างทดสอบโดยสังเกตเห็นจากระยะที่ต่างกันของชิ้นส่วนแนวนอน (รูปที่ 4.25) ซึ่งส่งผลให้ช่องว่างของชิ้นส่วนแนวตั้ง (male & female mullion) เกิดการเปลี่ยนจากระยะติดตั้งเดิม โดยความเสียหายมากขึ้นเมื่อระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มขึ้น แต่ไม่พบการหลุดร่วงหรือการแตกของแผ่นกระจกเมื่อทดสอบไปจนถึงระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 4% ของความสูงระหว่างชั้น (รูปที่ 4.26) ซึ่งสามารถสรุปการเสียรูปของตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 4.2

จากการบันทึกระยะการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) ตามความสูงของตัวอย่างทดสอบจำนวน 8 ตำแหน่ง ของแต่ละระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.27 โดยเส้นสีของกราฟแบ่งลักษณะความเสียหายตามความรุนแรงที่เกิดขึ้นตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่าบริเวณรอยต่อแผงด้านบนและด้านล่างเคลื่อนที่ไปในระยะเท่ากัน เนื่องจากยะของรอยต่อของแผงตัวอย่างอยู่ติดกับจุดรองรับ (bracket connection) ซึ่งพบว่า การเคลื่อนที่ของแผงตรงกลางที่ติดตั้งเข้ากับคานเคลื่อนที่ (moveable beam) มีการเคลื่อนที่ตามไปในทิศทางเดียวกับคาน โดยเป็นการเลื่อนตามแนวนอนของรอยต่อชิ้นส่วนบน (sill transom) และชิ้นส่วนล่าง (head transom) ของระหว่างแผงด้านบน (upper panel) และแผงด้านล่าง (lower panel) ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.24 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 2 ภายใต้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.0% story height



รูปที่ 4.25 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 2 ภายใต้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.5% story height



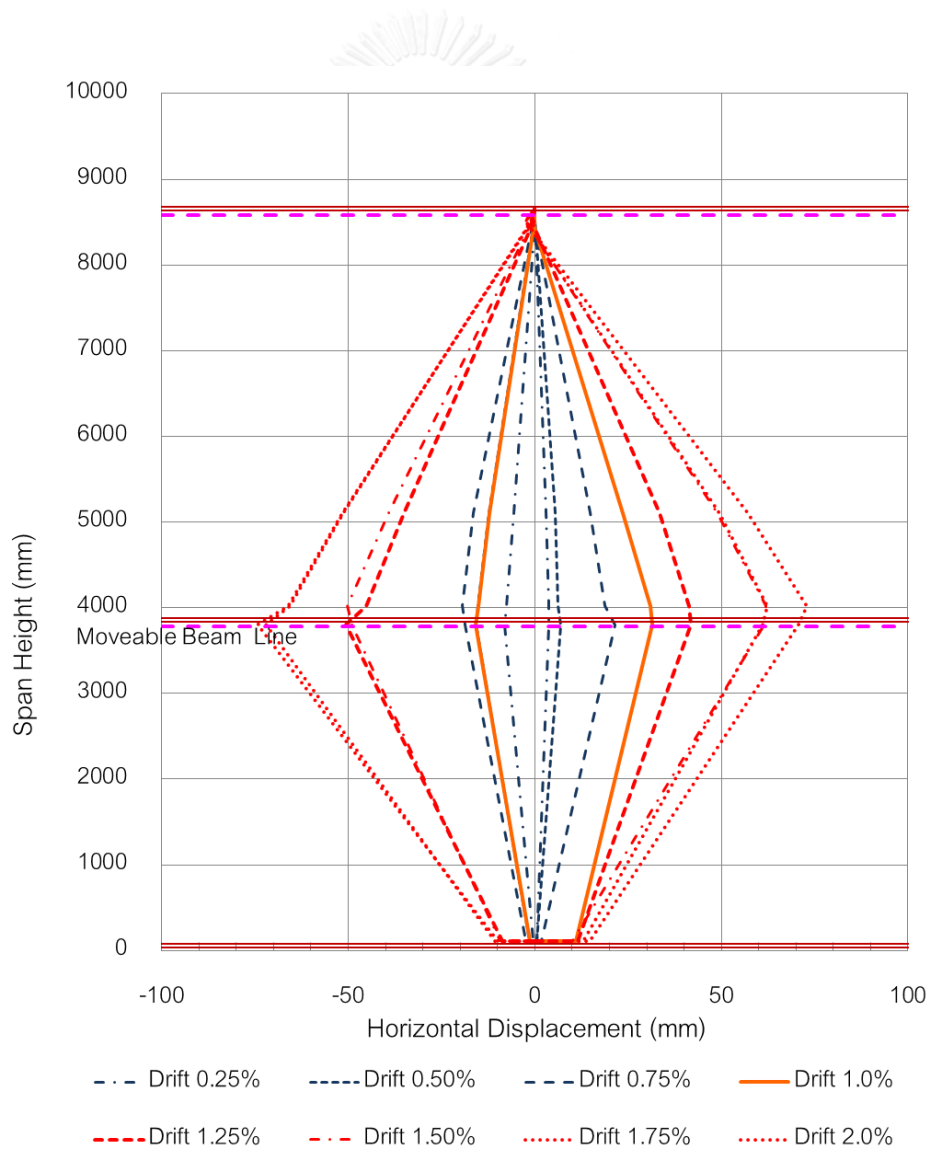
รูปที่ 4.26 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 2 ภายใต้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 4% story height

ตารางที่ 4.2 การเสียรูปของตัวอย่างที่ 2 จากการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (story drift)

เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (% story drift)	ลักษณะการเสียรูปของตัวอย่าง
0.25 ถึง 0.75	ไม่พบความเสียหาย
1.0 ถึง 1.25	พบรอยแยกของกาวยซิลิโคนที่บริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนแนวนอนของแผงบน-ล่าง (sill & head transom) ของระดับพื้นชั้น 2 และชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket connection) ที่ยึดเข้ากับพื้นบริเวณใกล้กับคานเคลื่อนที่ พบการขยับหมุนออกจากตำแหน่งเดิม 2 มม.
1.5 ถึง 2.0	รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนแนวนอน (transom) และแนวตั้ง (mullion) พบรอยฉีกขาดของซิลิโคนเล็กน้อย เกิดการยกตัวของแผงตัวอย่างระหว่างการทดสอบโดยพบระยะที่ต่างกันของชิ้นส่วนแนวนอน ส่งผลให้ชิ้นส่วนแนวตั้ง (male & female mullion) ระยะเปลี่ยนจากการติดตั้งเดิมทำให้เกิดการฉีกขาดของกาวยซิลิโคนบริเวณรอยต่อของแผง และชิ้นส่วนแนวนอนส่วนปลายของแผงเลื่อนออกจากแนวของชิ้นส่วนแนวตั้ง



2.25 ถึง 4.0	<p>เกิดเสียงกระทบของชิ้นส่วนหัวแฉก (hook bracket) เมื่อเกิดการเลื่อนไปแตะกับชิ้นส่วนรองรับแฉก (bracket connection) และดันให้เกิดการเคลื่อนที่ของแฉกซึ่งพบว่าชิ้นส่วนแนวนอน (transom) ฝั่งเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ที่เกิดการยกตัวขึ้นและทำให้ช่องว่างของชิ้นส่วนแนวตั้ง (male &amp; female mullion) เปลี่ยนจากระยะติดตั้งเดิม ความเสียหายมากขึ้นเมื่อระยะเวลาเคลื่อนที่สัมพันธ์เพิ่มขึ้น แต่ไม่พบการหลุดร่วงหรือการแตกของแผ่นกระจกเมื่อทดสอบไปจนถึงระยะเวลาเคลื่อนที่สัมพันธ์ที่ 4% ของความสูงระหว่างชั้น</p>
--------------	---



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่และความสูงของตัวอย่างทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.28 ลักษณะการเคลื่อนที่ตามแนวนอนของตัวอย่างทดสอบที่ 2

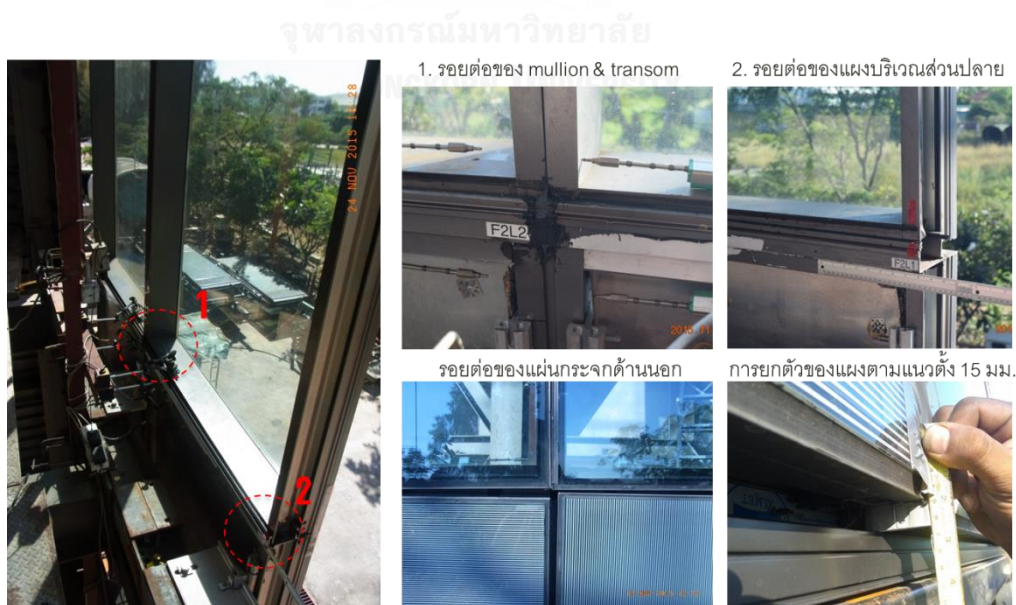
#### 4.2.3 ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 3

ทดสอบโดยเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ตั้งแต่ 9.5 มม. (0.25% story drift) ไปจนถึง 133 มม. (3.5% story drift) สังเกตและทำการบันทึกการเคลื่อนที่ตามแนวนอนจากติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ระยะตั้งแต่ 9.5 มม.(0.25% story drift) ถึงระยะสูงสุดที่ 95 มม. (2.5% story drift) โดยระยะการเคลื่อนที่มากกว่า 95 มม. ทำการสังเกตและบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้น

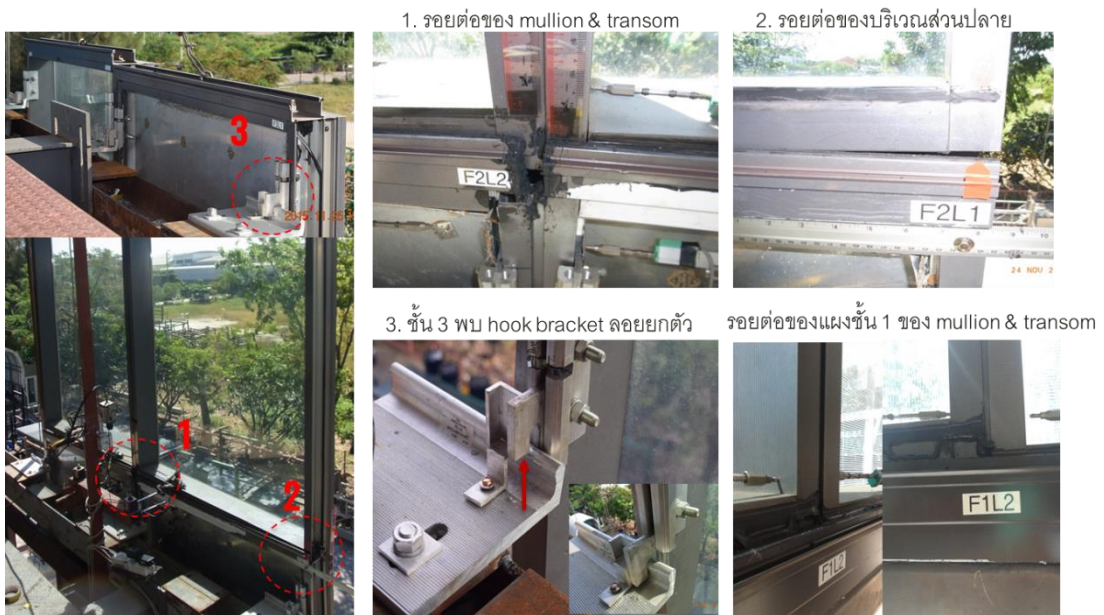
จากการทดสอบระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 0.25% (9.5 มม.) ถึง 1.0% (38 มม.) ของความสูงระหว่างชั้น (story height) ไม่พบความเสียหาย โดยสังเกตเห็นการเคลื่อนที่ของแผงบริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนแนวนอนของแผงบน-ล่าง (sill & head transom) ของระดับพื้นชั้น 2 ตามทิศทางการเคลื่อนที่ของคานเคลื่อนที่ เมื่อระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 0.75% (28.5 มม.) พบการเคลื่อนตัวชิดติดกันของรอยต่อชิ้นส่วนแนวตั้ง (male & female mullion) ขณะทำการทดสอบ และที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 1.0% (38 มม.) เกิดการขยับยกตัวของแผงตามแนวตั้ง (รูปที่ 4.29) โดยส่วนปลายด้านล่างบริเวณชั้น 1 และส่วนปลายด้านบนบริเวณชั้น 3 ไม่เกิดการขยับตัว เมื่อเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.25% (47.5 มม.) ถึง 2.0% (76 มม.) ของความสูงระหว่างชั้น สังเกตเห็นความเสียหายของกาวซิลิโคนที่บริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนแนวนอนของแผงบน-ล่าง (sill & head transom) ระดับพื้นชั้น 2 และเกิดการขยับยกตัวของแผงตามแนวตั้งมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นส่วนหัวแผง

(hook bracket) ลอยยกตัวขึ้นจากชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket connection) ดังรูปที่ 4.30 และเมื่อระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 2.25% (85.5 มม.) ความเสียหายของกาวซิลิโคนที่บริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนแนวนอนของแผงบน-ล่าง (sill & head transom) เพิ่มมากขึ้น พบการฉีกขาดของสกรูยึดแผ่นทึบแสงติดบริเวณหน้าพื้น (spandrel panel) เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 3.0% (114 มม.) บริเวณตรงกลางรอยต่อของชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) และชิ้นส่วนแนวนอน (transom) เกิดความเสียหายฉีกขาดอย่างรุนแรง (รูปที่ 4.31) และเมื่อระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 3.5% (133 มม.) พบว่าชิ้นส่วนหัวแผง (hook bracket) ของแผงบนสุดลอยยกตัวขึ้นออกจากชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket connection) ซึ่งถือว่าเกิดการหลุดของแผงออกจากชิ้นส่วนรองรับ (รูปที่ 4.32) โดยสามารถสรุปการเสียหายของตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 4.3

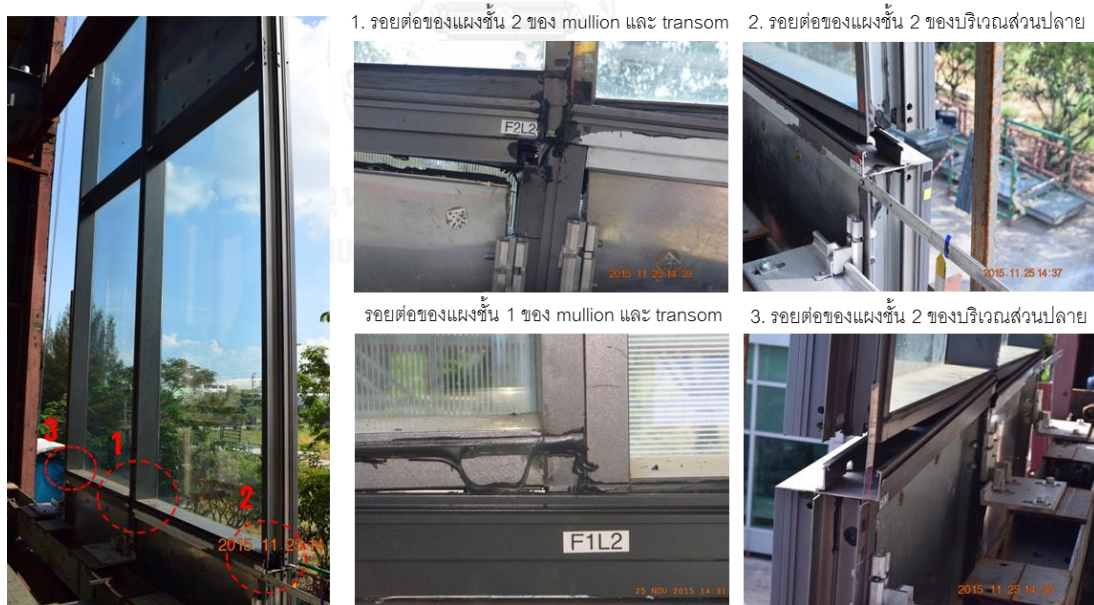
จากการบันทึกระยะเวลาการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) ตามความสูงของตัวอย่างทดสอบจำนวน 6 ตำแหน่ง ของแต่ละระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.33 โดยเส้นสีของกราฟแบ่งลักษณะความเสียหายตามความรุนแรงที่เกิดขึ้นตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่าชิ้นส่วนแผงด้านบนมีระยะเวลาการเคลื่อนที่น้อยกว่าแผงด้านล่างที่ติดเข้ากับคานเคลื่อนที่ เนื่องจากระยะของรอยต่อของแผงตัวอย่างอยู่เหนือจุดรองรับ (bracket connection) ขึ้นไประยะ 240 มม. จึงมีการเคลื่อนที่ของแผงด้านบน-ล่าง ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่ของแผงตรงกลางที่ติดตั้งเข้ากับคานเคลื่อนที่ (moveable beam) มีการเคลื่อนที่ตามไปในทิศทางเดียวกับคาน โดยเป็นการเลื่อนตามแนวนอนของรอยต่อชิ้นส่วนบน (sill transom) และชิ้นส่วนล่าง (head transom) ของระหว่างแผงด้านบน (upper panel) และแผงด้านล่าง (lower panel) ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.29 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 3 ภายใต้ระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.0% story height



รูปที่ 4.30 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 3 ภายใต้ระยะ  
การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 2.0% story height



รูปที่ 4.31 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 3 ภายใต้ระยะ  
การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 3.0% story height

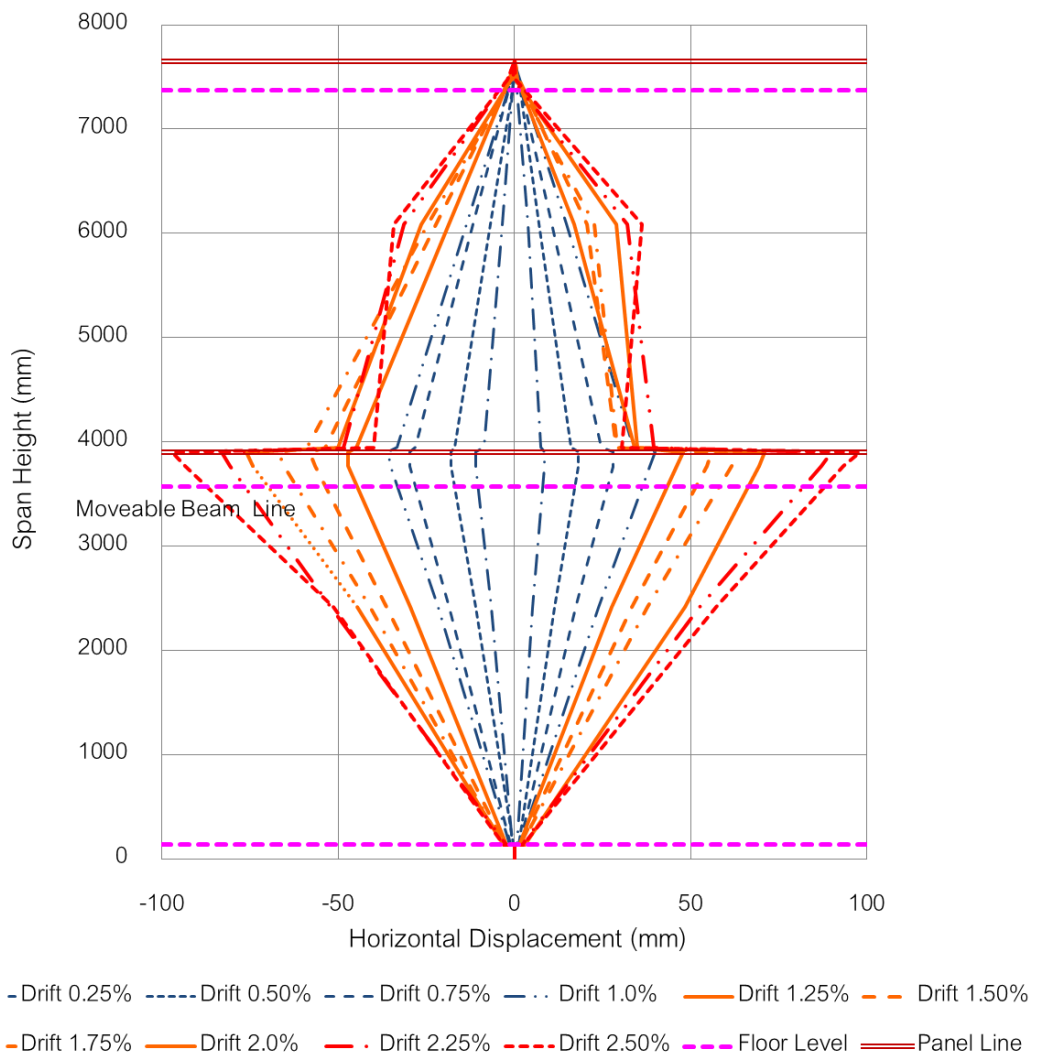


รูปที่ 4.32 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 3 ภายใต้ระยะ  
การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 3.5% story height

ตารางที่ 4.3 การเสียรูปของตัวอย่างที่ 3 จากการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (story drift)

เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (% story drift)	ลักษณะการเสียรูปของตัวอย่าง
0.25 ถึง 1.0	ไม่พบความเสียหาย สังเกตเห็นการเคลื่อนที่ของแผงบริเวณรอยต่อของ ชิ้นส่วนแนวนอนของแผงบน-ล่าง (sill & head transom) ของระดับ พื้นชั้น 2 ตามทิศทางการเคลื่อนที่ของคานเคลื่อนที่ เมื่อระยะการ เคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 0.75% (28.5 มม.) พบการเคลื่อนตัวชิดติดกันของ รอยต่อชิ้นส่วนแนวตั้ง (male & female mullion) ขณะทำการ ทดสอบ และที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ 1.0% เกิดการขยับยกตัว ของแผงตามแนวตั้ง โดยส่วนปลายด้านล่างบริเวณชั้น 1 และส่วนปลาย ด้านบนบริเวณชั้น 3 ไม่เกิดการขยับตัว
1.25 ถึง 2.0	สังเกตเห็นความเสียหายของกาวซิลิโคนที่บริเวณรอยต่อของชิ้นส่วน แนวนอนของแผงบน-ล่าง (sill & head transom) ระดับพื้นชั้น 2 และ เกิดการขยับยกตัวของแผงตามแนวตั้งมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นส่วนหัวแผง (hook bracket) ลอยยกตัวขึ้นจากชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket)

2.25 ถึง 2.75	ความเสียหายของกาวซิลิโคนที่บริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนแนวนอนของแผงบน-ล่าง (sill & head transom) เพิ่มมากขึ้น พบการฉีกขาดของสกรูยึดแผ่นทับแสงติดบริเวณหน้าพื้น (spandrel panel)
3.0 ถึง 3.25	บริเวณตรงกลางรอยต่อของชิ้นส่วนแนวตั้ง (mullion) และชิ้นส่วนแนวนอน (transom) เกิดความเสียหายฉีกขาดอย่างรุนแรง
3.5	พบว่าชิ้นส่วนหัวแฉก (hook bracket) ของแผงบนสุดลอยยกตัวขึ้นออกจากชิ้นส่วนรองรับแผง (bracket connection) ซึ่งถือว่าเป็นการหลุดของแผงออกจากชิ้นส่วนรองรับ



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่และความสูงของตัวอย่างทดสอบที่ 3



รูปที่ 4.34 ลักษณะการเคลื่อนที่ตามแนวนอนของตัวอย่างทดสอบที่ 3

#### 4.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของตัวอย่างขนาดจริง ของผนังกระจกเปลือกนอกอาคารระบบยูนิไทซ์ (unitized curtain wall) ทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่าระบบผนังกระจกเปลือกนอกอาคารสามารถต้านทานการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ 0.25% ของความสูงระหว่างชั้น (story drift) โดยไม่เกิดความเสียหายกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยจะเห็นว่าตัวอย่างทดสอบที่ 2 ไม่พบความเสียหายจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ 0.75% ส่วนตัวอย่างที่ 3 สามารถต้านทานโดยไม่พบความเสียหายที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.0% ของความสูงระหว่างชั้น ซึ่งพบว่าตัวอย่างมีความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยสามารถจำแนกระดับความเสียหายของตัวอย่างผนังกระจกเปลือกนอกอาคารภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นตาม มยผ.1303 (2557) ดังตารางที่ 4.5 พบว่าทั้ง 3 ตัวอย่าง มีความสามารถในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในระดับระดับปลอดภัยต่อชีวิต ที่ 2% ของความสูงระหว่างชั้น (story drift) ซึ่งอยู่ภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ตามมาตรฐาน มยผ.1302 (2552) ที่ระบุไว้สำหรับโครงสร้างอื่นๆ

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของตัวอย่างผนังกระจกเปลี่ยนนอกอาคาร

การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ระหว่างชั้น (% story drift)	ความเสียหายของตัวอย่างผนังกระจกเปลี่ยนนอกอาคาร		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
0.25	ไม่พบความเสียหาย	ไม่พบความเสียหาย	ไม่พบความเสียหาย
0.5 ถึง 0.75	พบความเสียหายของ กาวซิลิโคน และพบ การขยับของชิ้นส่วน รองรับแผง	ไม่พบความเสียหาย	ไม่พบความเสียหาย
1.0	พบความเสียหายของ กาวซิลิโคนเพิ่มขึ้น และความเสียหายของ ชิ้นส่วนแนวนอนและ แนวตั้งเล็กน้อย	พบความเสียหายของ กาวซิลิโคน และพบ การขยับของชิ้นส่วน รองรับแผง	ไม่พบความเสียหาย
1.25 ถึง 2.0	พบความเสียหาย รุนแรงของกาวซิลิโคน และความเสียหาย เพิ่มขึ้นของชิ้นส่วน แนวนอนและแนวตั้ง	พบความเสียหายของ กาวซิลิโคน และพบ ความเสียหายของ ชิ้นส่วนแนวนอนและ แนวตั้งเล็กน้อย	พบความเสียหายของ กาวซิลิโคน และพบ การขยับของชิ้นส่วน หัวแผง (hook bracket)
2.25 ถึง 3.0	พบความเสียหาย รุนแรงของกาวซิลิโคน และความเสียหาย รุนแรงของรอยต่อ ชิ้นส่วนแนวนอนและ แนวตั้ง แต่ไม่มีการ หลุดร่วงของชิ้นส่วน ผนัง หรือ ชิ้นส่วน รองรับ	พบความเสียหาย รุนแรงของกาวซิลิโคน และความเสียหาย เพิ่มขึ้นของชิ้นส่วน แนวนอนและแนวตั้ง	พบความเสียหายของ กาวซิลิโคน พบความ เสียหายของสกรูยึด แผ่นทึบแสง และความ เสียหายของรอยต่อ ชิ้นส่วนแนวนอนและ แนวตั้ง



3.25 ถึง 4.0	ไม่ได้ทดสอบ	พบ ความเสียหาย รุนแรงของกาวซิลิโคน และความเสียหาย เพิ่มขึ้น รุนแรงของ ชิ้นส่วนแนวนอนและ แนวดิ่ง แต่ไม่มีการ หลุดร่วงของชิ้นส่วน ผนัง หรือ ชิ้นส่วน รองรับ	พบ ความเสียหาย รุนแรงของกาวซิลิโคน พบความเสียหายฉีก ขาดรุนแรงของรอยต่อ ชิ้นส่วนแนวนอนและ แนวดิ่ง และเกิดการ หลุดของชิ้นส่วนหัว แฉงออกจากชิ้นส่วน รองรับ สำหรับการ เคลื่อน ที่ สัม พัทธ์ ระหว่างชิ้น 3.5%
--------------	-------------	---	--

ระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารที่ทำการทดสอบ ได้ระบุระดับสมรรถนะของอาคารเป็น 4 ระดับ ตามความเสียหายที่เกิดขึ้น ดังนี้คือ

- ระดับอาคารปฏิบัติการได้ (operational level) หมายถึง ไม่พบความเสียหายเกิดขึ้น
- ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (immediate occupancy level, IO) หมายถึง พบความเสียหายเล็กน้อย เช่นรอยแยกของกาวซิลิโคนเพียงเล็กน้อย หรือพบความเสียหายของชิ้นส่วนแนวนอนและแนวดิ่งเล็กน้อย และพบการขยับของชิ้นส่วนรองรับแผงเล็กน้อย
- ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (life safety level, LS) หมายถึง พบความเสียหายรุนแรงของกาวซิลิโคน และพบความเสียหายของชิ้นส่วนแนวนอนและแนวดิ่งมาก แต่ไม่มีการหลุดร่วงของชิ้นส่วนรองรับ (bracket connection) หรือการหลุดร่วงของแผ่นกระจก
- ระดับป้องกันการพังทลาย (collapse prevention level, CP) พบการฉีกขาดเสียหายรุนแรงของกาวซิลิโคน และพบความเสียหายของชิ้นส่วนแนวนอนและแนวดิ่งรุนแรง และมีการหลุดร่วงของชิ้นส่วนรองรับ (bracket connection) หรือการหลุดร่วงของแผ่นกระจก

ลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวอย่างภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชิ้นนั้น พบว่าแผงตรงกลางบริเวณที่ยึดติดเข้ากับคานเคลื่อนที่ มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับคานเคลื่อนที่ โดยเป็นการเลื่อนตามแนวนอนของรอยต่อชิ้นส่วนบน (sill transom) และชิ้นส่วนล่าง (head transom) ของระหว่างแผงด้านบน (upper panel) และแผงด้านล่าง (lower panel) โดยระยะห่างของรอยต่อของแผงตัวอย่าง (sill and head transom) กับตำแหน่งของชิ้นส่วนรองรับ (bracket connection) มีผลกับลักษณะการเคลื่อนที่ระหว่างแผงด้านบนและแผงด้านล่าง ดังปรากฏตามความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่และความสูงของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 4.5 ระดับความเสียหายของตัวอย่างผนังกระจกเปลือกนอกรอาคารภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น จำแนกตาม มยพ.1303 (2557)

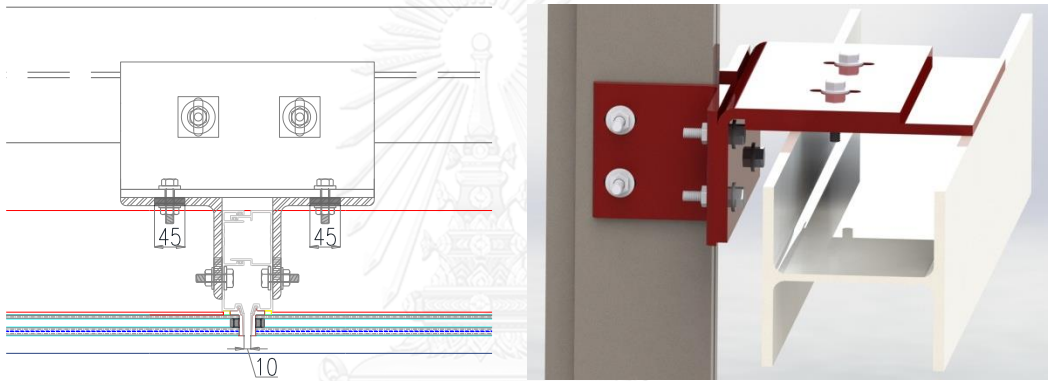
การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (% story drift)	ระดับความเสียหายของตัวอย่างผนังกระจกเปลือกนอกรอาคาร		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
0.25	ระดับอาคารปฏิบัติการได้ (OL)	ระดับอาคารปฏิบัติการได้ (OL)	ระดับอาคารปฏิบัติการได้ (OL)
0.5 ถึง 0.75	ระดับเข้าใช้อาคารได้		
1.0	ทันที (IO)	ระดับเข้าใช้อาคารได้	ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO)
1.25 ถึง 2.0	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (LS)	ทันที (IO)	
2.25 ถึง 3.0	ไม่ได้ทดสอบ	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (LS)	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (LS)
3.25		ระดับป้องกันการพังทลาย (CP)	ระดับป้องกันการพังทลาย (CP)
3.5 ถึง 4.0		ระดับป้องกันการพังทลาย (CP)	ระดับป้องกันการพังทลาย (CP)

สังเกตได้ว่าตัวอย่างผนังเปลือกนอกรอาคารที่ทำการทดสอบ มีความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ต่างกัน สาเหตุหนึ่งมาจากความแตกต่างกันของการออกแบบชิ้นส่วนรองรับ (bracket connection) พิจารณาจากระยะการยอมให้มีการเคลื่อนที่ตามแนวแกน (in-plane movement) โดยตัวอย่างที่ 1 ลักษณะจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น โดยใช้เหล็กฉากประกบเข้ากับชิ้นส่วนแนวตั้งและยึดเข้ากับคานรองรับโดยใช้สลักเกลียว (bolt) ซึ่งมีการออกแบบระยะการเคลื่อนที่สำหรับระยะห่างของชิ้นส่วนแนวตั้ง (male & female mullion) ขนาด 10 มม. และมีเจาะช่องยาว 45 มม. สำหรับระยะการขยับของสลักเกลียว (รูปที่ 4.35) ส่วนตัวอย่างที่ 2 ลักษณะจุดรองรับออกแบบให้ชิ้นส่วนหัวแฉก (hook bracket) ร้อยทะลุเข้ากับชิ้นส่วนรองรับ (bracket connection) ที่กั้นด้านข้างทั้งสองด้านเพื่อกันไม่ให้ชิ้นส่วนหัวแฉกหลุดโดยสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกนได้ 126 มม. ซึ่งมีการออกแบบระยะการเคลื่อนที่สำหรับระยะห่างของชิ้นส่วนแนวตั้ง (male & female mullion) ขนาด 10 มม. (รูปที่ 4.36) และสำหรับตัวอย่างที่ 3 ลักษณะจุดรองรับออกแบบให้ชิ้นส่วนหัวแฉก (hook bracket) วางอยู่บนชิ้นส่วนรองรับ (bracket connection) โดยไม่มีที่กั้นด้านข้างทั้งสองด้านเพื่อกันไม่ให้ชิ้นส่วนหัวแฉกหลุด สามารถเคลื่อนที่ตาม

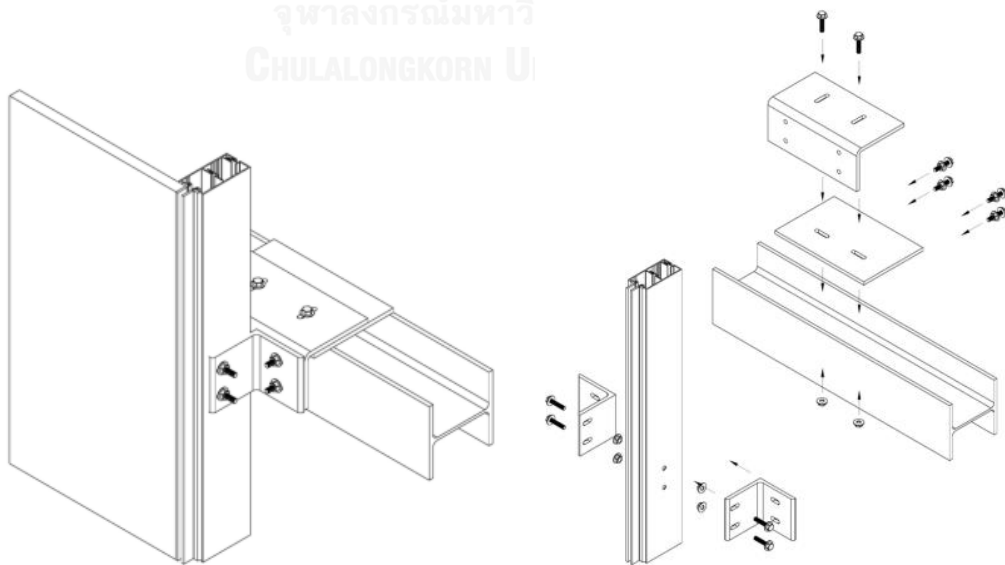
แนวแกนที่ระยะ 175 มม. ซึ่งมีการออกแบบระยะการเคลื่อนที่สำหรับระยะห่างของชิ้นส่วนแนวตั้ง (male & female mullion) ขนาด 12 มม. (รูปที่ 4.37)



(ก) ลักษณะชิ้นส่วนรองรับของตัวอย่างที่ 1



(ข) ระยะการเคลื่อนที่ตามการออกแบบของตัวอย่างทดสอบที่ 1

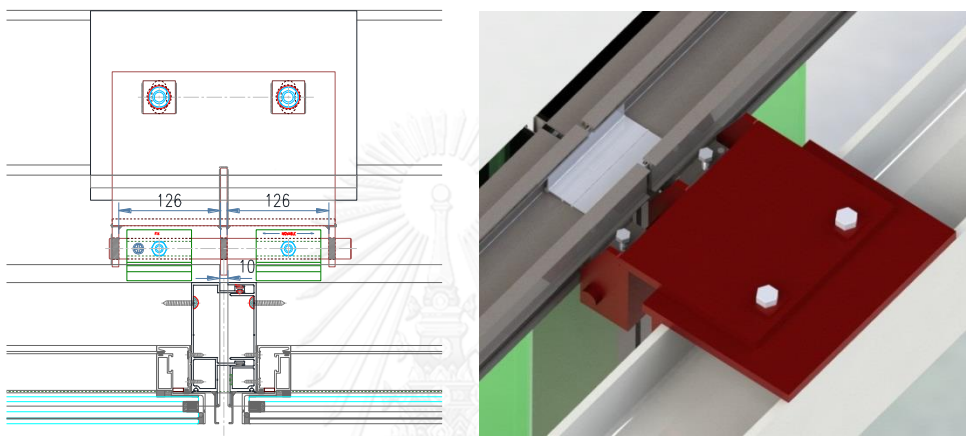


(ค) ส่วนประกอบของชิ้นส่วนและจุดรองรับของตัวอย่างทดสอบที่ 1

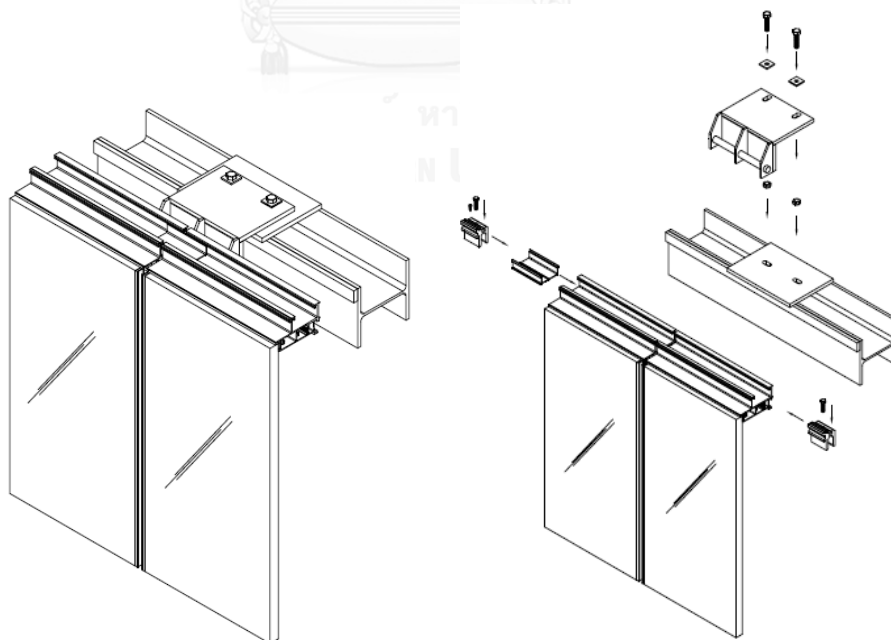
รูปที่ 4.35 ชิ้นส่วนรองรับของตัวอย่างทดสอบที่ 1



(ก) ลักษณะชิ้นส่วนรองรับของตัวอย่างที่ 2



(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ตามการออกแบบของตัวอย่างทดสอบที่ 2

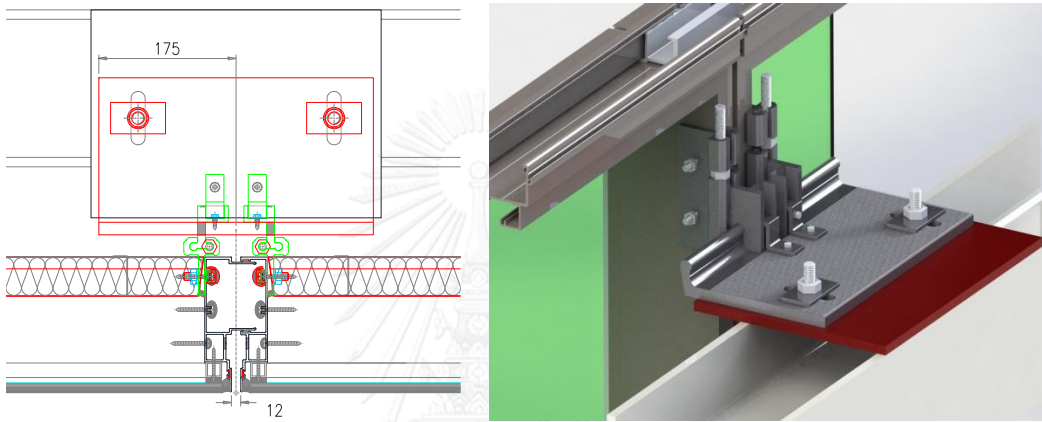


(ค) ส่วนประกอบของชิ้นส่วนและจุดรองรับของตัวอย่างทดสอบที่ 2

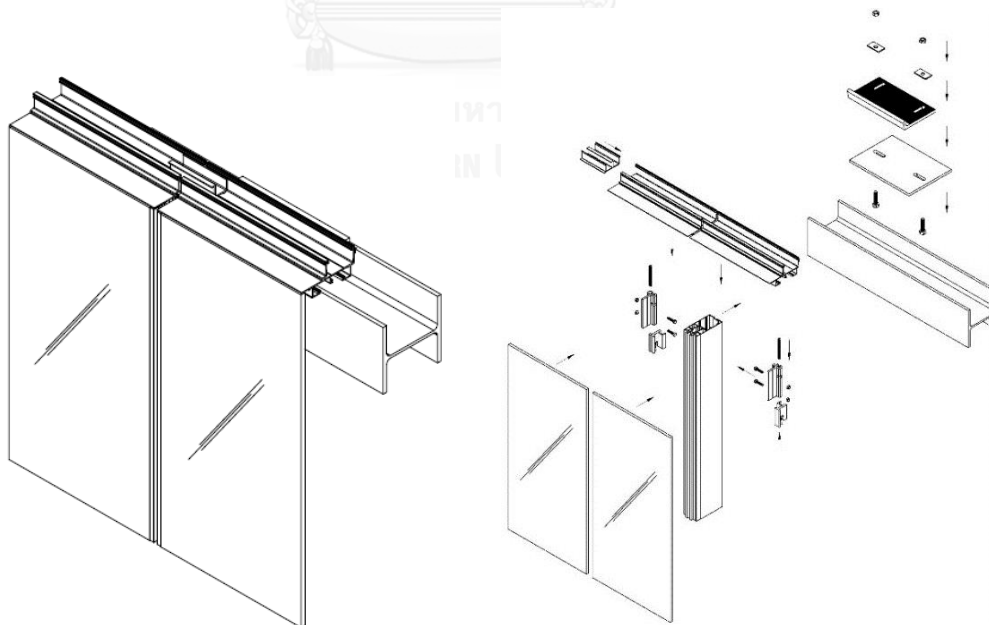
รูปที่ 4.36 ชิ้นส่วนรองรับของตัวอย่างทดสอบที่ 2



(ก) ลักษณะชิ้นส่วนรองรับของตัวอย่างที่ 3



(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ตามการออกแบบของตัวอย่างทดสอบที่ 3



(ค) ส่วนประกอบของชิ้นส่วนและจุดรองรับของตัวอย่างทดสอบที่ 3

รูปที่ 4.37 ชิ้นส่วนรองรับของตัวอย่างทดสอบที่ 3

จากการออกแบบระยะการยอมให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน (in-plane movement) ของแต่ละตัวอย่างผนังกระจกเปลือกนอกของอาคารที่แตกต่างกัน สามารถสรุปลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นดังนี้ ลักษณะของชิ้นส่วนรองรับแบบยึดแน่นของตัวอย่างที่ 1 ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวแกนขยับได้น้อย จึงเริ่มเกิดความเสียหายขึ้นกับชิ้นส่วนต่างๆ ที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นตั้งแต่ระยะเริ่มต้นที่ 0.5% (26 มม.) ของความสูงระหว่างชั้น (story drift) ส่วนตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 มีลักษณะของชิ้นส่วนรองรับที่ออกแบบให้มีการเคลื่อนที่ตามแนวแกน จึงพบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่างๆ ที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.0% (48 มม.) และ 1.25% (47.5 มม.) ของความสูงระหว่างชั้น (story drift) ตามลำดับ ซึ่งความเสียหายของชิ้นส่วนต่างๆ ที่เกิดขึ้น มีปัจจัยเกี่ยวข้องจากลักษณะของชิ้นส่วนรองรับ (ตารางที่ 4.4) โดยลักษณะชิ้นส่วนรองรับแบบยึดแน่น (ตัวอย่างที่ 1) จะพบความเสียหายตั้งแต่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่น้อย แต่เมื่อระยะการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นในช่วงสภาวะประลัยก็ไม่พบการหลุดร่วงของชิ้นส่วนผนังหรือชิ้นส่วนรองรับเนื่องจากความสามารถในการต้านทานของลักษณะชิ้นส่วนรองรับแบบยึดแน่น สำหรับลักษณะชิ้นส่วนรองรับที่ออกแบบให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน ระดับความเสียหายของชิ้นส่วนขึ้นอยู่กับระยะที่ออกแบบไว้กับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น แต่เมื่อเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ในช่วงสภาวะประลัย การหลุดร่วงของชิ้นส่วนผนังหรือชิ้นส่วนรองรับก็ขึ้นอยู่กับการออกแบบลักษณะชิ้นส่วนรองรับเพื่อให้มีความสามารถในการต้านทานการหลุดร่วงด้วยเช่นกัน ดังจะเห็นความแตกต่างของการออกแบบชิ้นส่วนรองรับแผงสำหรับตัวอย่างที่ 2 ที่มีชิ้นส่วนกันตก (stopper) บริเวณส่วนปลายของชิ้นส่วนรองรับ (bracket connection) ดังรูปที่ 4.36 ส่วนตัวอย่างที่ 3 ไม่ได้ออกแบบชิ้นส่วนกันตกไว้ดังรูปที่ 4.37

จากการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของตัวอย่างขนาดจริงนั้นเป็นการจำลองส่วนของผนังกระจกภายนอกของอาคาร โดยเลือกตัวแทนของผนังบริเวณพื้นที่ส่วนใหญ่ทั่วไปของอาคาร (typical panel) เท่านั้น ซึ่งยังไม่ได้ครอบคลุมบริเวณผนังด้านข้างหรือมุมของอาคาร

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของผนังกระจกเปลือกนอกอาคารระบบยูนิไทซ์ (unitized curtain wall) ภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น โดยการทดสอบความสามารถของในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) ตามแนวระนาบ (in-plane) ตัวอย่างขนาดจริงของผนังเปลือกนอกของอาคาร จำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งอ้างอิงวิธีการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบสถิต ตามมาตรฐาน AAMA 501.4-00 ให้อัตราการเคลื่อนที่ค่อนข้างช้าอย่างคงที่ (relatively slow, static) ในอัตราการเคลื่อนที่ (displacement rate) 10 มิลลิเมตร ต่อ วินาที โดยระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.25% ของความสูงระหว่างชั้น ตามลำดับดังนี้ 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5, 2.75, 2.5 และ 3% ของความสูงระหว่างชั้น (story drift) โดยแต่ละระยะเวลาการเคลื่อนที่ของแต่ละรอบการทดสอบ จะหยุดเวลาไว้ที่ 1 นาที เพื่อสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของตัวอย่างทดสอบ โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจเกิดการแตกหักหรือหลุดร่วงของกระจก การหลุด การบิดตัวของโลหะหรือการเสียรูปถาวรของกรอบโครง ความเสียหายของกาวซิลิโคนหรือกระจก และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนผนังหรือชิ้นส่วนรองรับ ซึ่งผลการศึกษาในงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ตัวอย่างผนังกระจกเปลือกนอกอาคารภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) พบว่าทั้ง 3 ตัวอย่าง มีความสามารถในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในระดับระดับปลอดภัยต่อชีวิต ที่ 2% ของความสูงระหว่างชั้น ซึ่งอยู่ภายใต้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ที่ถูกระบุไว้ในประเภทโครงสร้างอื่นๆ ตามมาตรฐาน มยผ.1302 (2552)

2. การศึกษาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของผนังเปลือกนอกของอาคารจากการทดสอบตัวอย่างขนาดจริงจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่สภาวะใช้งาน (serviceability limit state) พบว่าระบบผนังกระจกเปลือกนอกอาคารทั้ง 3 ตัวอย่าง สามารถต้านทานการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ 0.25% ของความสูงระหว่างชั้น (story drift) โดยไม่เกิดความเสียหายกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ 2 ไม่พบความเสียหายจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ 0.75% ส่วนตัวอย่างที่ 3 สามารถต้านทานโดยไม่พบความเสียหายที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.0% ของความสูงระหว่างชั้น ซึ่งจะเห็นว่าตัวอย่างมีความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ต่างกัน เนื่องจากลักษณะของชิ้นส่วนรองรับ (bracket connection) ที่แตกต่างกัน

3. การศึกษาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของผนังเปลือกนอกของอาคารจากการทดสอบ ตัวอย่างขนาดจริงที่สภาวะประลัย (ultimate limit state) โดยการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบ สถิตจนถึงขั้นพังเสียหาย พบว่าที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น 3% ของความสูงระหว่างชั้น (story drift) พบความเสียหายรุนแรงของกาวซิลิโคน และความเสียหายรุนแรงของรอยต่อชิ้นส่วน แนวนอนและแนวตั้ง แต่ไม่มีการหลุดร่วงของแผ่นกระจก ชิ้นส่วนผนัง หรือชิ้นส่วนรองรับ

4. จากผลการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) ในแนว ระนาบ (in-plane) ตัวอย่างขนาดจริงของผนังเปลือกนอกของอาคาร สามารถนำผลการทดสอบของ แต่ละตัวอย่าง ประกอบการพิจารณาด้านการออกแบบระบบผนังและชิ้นส่วนรองรับแผงแต่ละชนิด เพื่อให้สามารถรองรับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) ซึ่งใช้เป็นข้อมูลสำหรับผู้ออกแบบ และภาคอุตสาหกรรมการผลิตผนังเปลือกนอกของอาคารต่อไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของตัวอย่างขนาดจริงทั้ง 3 ตัวอย่างนั้น เป็น การจำลองส่วนของผนังกระจกภายนอกของอาคาร โดยเลือกตัวแทนของผนังบริเวณพื้นที่ส่วนใหญ่ ทั่วไปของอาคาร (typical panel) จะเห็นได้ว่าลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ทำการศึกษา ยังไม่ได้ครอบคลุมลักษณะการเคลื่อนที่ในส่วนของแผงผนังด้านข้างหรือมุมของอาคาร (corner panel) อีกทั้งในส่วนของการเคลื่อนที่นอกระนาบก็ยังไม่ได้อธิบายถึง ซึ่งอาจจะต้องมีการศึกษาผนังกระจกภายนอกของอาคารบริเวณด้านริมอาคารที่ส่วนด้านข้างมีการยึดติดเข้ากับ โครงสร้างหลักของอาคาร และการเคลื่อนที่นอกระนาบ (out-of-plane) ของผนังกระจกเปลือกนอก อาคารที่อาจเกิดขึ้นได้จากแรงแผ่นดินไหว เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียหายเพิ่มเติมของผนังกระจก เปลือกนอกของอาคารต่อไป



## รายการอ้างอิง

- AAMA 501.4. (2000). Recommended Static Test Method for Evaluating Curtain Wall and Storefront Systems Subjected to Seismic and Wind Induced Interstory Drifts: American Architectural Manufacturers Association.
- AAMA 501.6. (2001). Recommended Dynamic Test Method for Determining The Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System: American Architectural Manufacturers Association.
- AAMA CW-DG-1-96. (2005). *Curtain Wall Design Guide Manual*: American Architectural Manufacturers Association.
- AAMA Series No. 12. (1984). *Structural Properties of Glass Aluminum Curtain Wall* American Architectural Manufacturers Association.
- ADM. (2005). *Specifications & Guidelines for Aluminum Structures: Aluminum Design Manual*.
- AS 1288. (2006). *Glass in Building-Selection and Installation*: Australian Standard.
- AS/NZS 1170.0. (2002). *Structural design actions - Part 0: General principles*: Australian/New Zealand Standard.
- AS/NZS 4284. (1995). *Testing of Building Facade Item 7.9 seismic test*: Australian/New Zealand Standard
- ASTM C 1048. (2004). *Standard Specification for Heat-Treated Flat Glass - Kind HS, Kind FT Coated and Uncoated Glass*: American Standard Testing Method.
- Baird, A., Palermo, A., Pampanin, S., Riccio, P. และ Tasligedik, A. S. (2011). Focusing on Reducing the Earthquake Damage to Façade System. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(2).
- Behr, R. A. และ Belarbi, A. (1996). Seismic test methods for architectural glazing systems. *Earthquake Spectra* 12.
- Behr, R. A., Belarbi, A. และ Culp, J. H. (1995). Dynamic Racking Tests of Curtain Wall Glass Elements with In-plane and Out-of-plane Motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.24.

- Bowkamp, J. G. and Meehan, J. F. (1960). *Drift Limitation imposed by Glass*. Proceeding of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan.
- CWTC. (2000). Cladding of buildings subject to earthquakes *Technical Note No. 30*: Centre for Window and Cladding Technology.
- Ellingwood, B. R. (2001). *Earthquake Risk Assessment of Building Structures*: Elsevier Science Ltd.
- Eva, C. A. (2009). *Experimental Evaluation of the In-plane Seismic Behavior of Storefront Window Systems*. (Master), University of California, San Diego.
- FEMA 356. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building*: Federal Emergency Management Agency.
- Hareer, R. W. (2007). *Seismic Response of Building Façade System with Energy Absorbing Connections*. Queensland University of Technology.
- Hutchinson, T., Zhang, J. and Eva, C. (2008). *Development of a Load Protocol for Glass Panel System Racking Experimentals Considering a Damage Index Concept*: University of California, Structural Systems Research Project.
- JASS1 4. (1996). *Japanese Architectural Standard Specification Curtain Wall*: Architectural Institute of Japan (AIJ).
- King, A. B. and Thurston, S. J. (1992). *The Racking Behavior of Curtain Wall Glazing During Simulated Earthquake*. Proceeding of the Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam.
- Lim, K. Y. S. and King, A. B. (1991). *The Behaviour of External Glazing Systems under Seismic In-Plane Racking*.
- Lingnell, A. W. (2011). *An Introduction to Insulating Glass*: Insulating Glass Manufacturers Alliance (IGMA) Technical Consultant.
- Nik, V. and Mark, A. B. (2009). *Building Envelope Design Guide – Glazing* [Press release]
- Rigone, P. (2012). *Seismic Behaviour of Curtain Wall Façades, A Comparison between Experimental Mock-up Test and Finite Element Method Analysis*. Polytechnic University of Milan.
- Vlad, I. (2008). *A Code for Curtain Wall Systems in Seismic Regions*. Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

Wade, C. A. (1990). *Structural Performance of Conservatories*. Proceeding of the Annual Conference of the Institution of Professional Engineers, New Zealand.

Wensheng, L. U. และ Baofeng, H. (2008). *Discussion on Seismic Performance Indexes of Architectural Curtain Walls*. Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2552). มาตรฐานการออกแบบต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302). ถนนพระรามที่ 6 แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2557). มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1303). ถนนพระรามที่ 6 แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย.

สภากรุงเทพมหานคร. (2544). ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมอาคาร ข้อ 112. สำนักงานเลขานุการสภา ศาลาว่าการกรุงเทพมหานคร.



ภาคผนวก



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสิริรัตน์ เกี่ยวการค้า เกิดเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม 2527 ได้รับวุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2549 ระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้ร่วมกิจกรรมต่าง ๆ ที่ทางภาควิชาวิศวกรรมโยธา และกิจกรรมของหอพักนักศึกษาหญิงมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จัดขึ้นเป็นประจำ โดยเมื่อหลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาตรี ได้เข้าทำงานในบริษัท แคสแคล จำกัด ในตำแหน่ง วิศวกรออกแบบโครงสร้าง และดูแลงานในส่วนห้องทดสอบระบบผนังกระจกเปลือกนอกอาคาร (KASKAL Façade Testing Centre) ระหว่าง พ.ศ. 2550 ถึง ปัจจุบัน และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2556 ระหว่างการศึกษาได้เข้าร่วมสัมมนาและนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ The Twenty-Eight KKHTCNN Symposium on Civil Engineering ครั้งที่ 28 ระหว่างวันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2558 จัดโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย