

การศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตโดยพิจารณาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาที่แรงกระทำด้วย  
ระเปียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



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 2559  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Load duration and temperature effects on the structural behavior of laminated glass  
using finite element method

Miss Weeraya Panyasansern



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาพฤติกรรมของกระจกلاميเน็ตโดยพิจารณาผล  
ของอุณหภูมิและระยะเวลาที่แรงกระทำด้วยระเบียบวิธีไฟ  
ไนต์เอลิเมนต์

โดย

นางสาววีระยา ปัญญาสรเสริญ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ปาลพิพัฒน์ แสงชูวงศ์)

วีระยา ปัญญาสรรเสริญ : การศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตโดยพิจารณาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาที่แรงกระทำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Load duration and temperature effects on the structural behavior of laminated glass using finite element method) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข, 106 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนองานวิจัยการวิเคราะห์พฤติกรรมของกระจกลามิเนตด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาที่แรงกระทำ กระจกลามิเนตประกอบด้วยกระจกมากกว่า 2 ชั้นยึดติดกันด้วยโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น จากงานวิจัยในอดีตพบว่ากระจกลามิเนตเมื่อเกิดการตัดจะมีพฤติกรรม 2 ลักษณะ คือพฤติกรรมแบบกระจกแยกชั้นและพฤติกรรมแบบกระจกชั้นเดียว ซึ่งพฤติกรรมของกระจกลามิเนตขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้ยึดติด งานวิจัยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองกระจกลามิเนตด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาที่แรงกระทำ โดยพิจารณากระจกมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นและโพลีไวนิลบิวทิลมีคุณสมบัติยืดหยุ่นหนืด ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบในอดีต จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองกระจกลามิเนตตามกรณีศึกษาโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิและระยะเวลาที่แรงกระทำ ผลที่ได้พบว่าที่อุณหภูมिन้อยกว่า 5 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมการตัดแบบกระจกชั้นเดียว ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 70 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมการตัดแบบกระจกแยกชั้น นอกจากนี้ผลที่ได้จากแบบจำลองนำไปใช้ในการพัฒนากราฟเพื่อใช้ในการออกแบบกระจกลามิเนต พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่แรงกระทำต่อพฤติกรรมของกระจกลามิเนต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

# # 5870358321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: FINITE ELEMENT ANALYSIS / LAMINATED GLASS / POLYVINYL BUTYRAL / VISCOELASTICITY

WEERAYA PANYASANSERN: Load duration and temperature effects on the structural behavior of laminated glass using finite element method. ADVISOR: ASSOC. PROF. WITHIT PANSUK, Ph.D., 106 pp.

This research presents the finite element analysis of the behavior of laminated glass subjected to temperature and load duration. Laminated glass consists of two or more glass layers bonded by an elasto-polymeric layer. The behavior of laminated glass lies in between the two limits of a layered glass unit with no interaction and a monolithic unit of the same total thickness, depending on the stiffness of the interlayer material. The research first develops the finite element model of laminated glass. Glass and polyvinyl butyral are modeled in a linear elastic manner and viscoelastic manner, respectively. The results were validated by the previous experimental test. Then, the researcher developed the finite element model by varying temperature and load duration. The results showed that at less than 5°C the laminated glass behaves like monolithic glass and at more than 70°C the laminated glass behaves much like layered glass. The results from validated finite element models were used to develop the graph for design laminated glass and study the effects due to varying temperature and load duration.

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

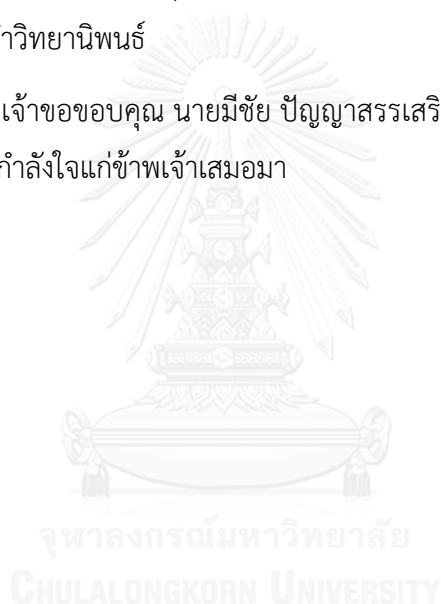
## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาให้ความรู้และคำแนะนำในการทำวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดิ์, รองศาสตราจารย์ ดร.จรรยา รุ่งอมรรัตน์ และ ดร.ปาลพิพัฒน์ แสงชูวงศ์ ที่ให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ และคำแนะนำ เพื่อใช้ในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่น้องและเพื่อนทุกคน ที่ให้ข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะ และคำแนะนำต่าง ๆ ระหว่างระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นายมีชัย ปัญญาสรรเสริญ และนางสุวรรณี ช่อเหลี่ยม ที่ให้ความอุปการะ และเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา



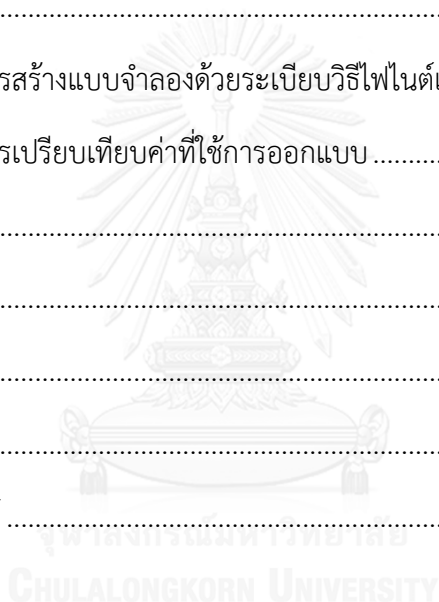
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 ความหมายและหน้าที่ของระบบผนังเปลือกนอก .....	3
2.1.1 องค์ประกอบหลักของระบบผนังเปลือกนอก.....	3
2.1.2 ประเภทของระบบผนังเปลือกนอก .....	8
2.2 คุณสมบัติและพฤติกรรมของกระจกลามิเนต.....	12
2.2.1 คุณสมบัติของกระจก.....	13
2.2.2 คุณสมบัติของโพลีไวนิลบิวทิริล.....	13
2.2.3 พฤติกรรมของกระจกลามิเนต.....	15
2.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการพฤติกรรมของกระจกลามิเนต .....	16
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	16
2.3.1 มาตรฐานการคำนวณแรงลม .....	16
2.3.2 มาตรฐานการออกแบบ ASTM E 1300-09 .....	21

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมและการทดสอบของกระจกลามิเนต.....	22
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	29
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
3.1 ขนาดและชนิดของวัสดุ.....	32
3.2 การจำลองคุณสมบัติของกระจก.....	32
3.3 การจำลองคุณสมบัติของโพลีไวนิลบิวทิล.....	33
3.3.1 แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์.....	33
3.3.2 การหาค่าคงที่ของอนุกรมโฟรนี.....	33
3.4 เงื่อนไขขอบเขต.....	34
3.5 ชนิดของชิ้นส่วนและการแบ่งชิ้นส่วน.....	35
3.5.1 การแบ่งขนาดชิ้นส่วน (Mesh).....	35
3.5.2 ชนิดของชิ้นส่วน.....	37
3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต.....	38
3.6.1 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับ Behr et al. (1985).....	39
3.6.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับ Behr et al. (1986).....	43
บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองตามกรณีศึกษา.....	47
4.1 ขนาดและชนิดของวัสดุ.....	47
4.2 ตัวแปรและกรณีศึกษา.....	47
4.3 เงื่อนไขขอบเขต.....	48
4.4 ชนิดของชิ้นส่วนและการแบ่งชิ้นส่วน.....	48
4.5 ผลที่ได้จากแบบจำลอง.....	48
4.5.1 ระยะเวลาที่แรงกระทำระยะสั้น 1 นาที.....	48



4.5.2 ระยะเวลาที่แรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที .....	61
บทที่ 5 การเปรียบเทียบค่าที่ใช้ในการออกแบบกับมาตรฐานการออกแบบ .....	74
5.1 การคำนวณโมเมนต์ความเคี้ยวจากแบบจำลอง .....	74
5.2 การคำนวณโมเมนต์ความเคี้ยวจากมาตรฐานการออกแบบ ASTM E 1300-09 .....	76
5.3 การเปรียบเทียบค่าที่ใช้ในการออกแบบ .....	77
5.4 การพัฒนาสมการการออกแบบเป็นกราฟสำหรับออกแบบกระจกลามิเนต .....	82
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย.....	87
6.1 สรุปผลงานวิจัยการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	87
6.2 สรุปผลงานวิจัยการเปรียบเทียบค่าที่ใช้การออกแบบ .....	87
6.3 ข้อเสนอแนะ .....	88
รายการอ้างอิง .....	89
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	106



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติเชิงกลของกระจก.....	13
ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลล ..... 14	14
ตารางที่ 2-3 การจำแนกประเภทอาคารตามความสำคัญต่อสาธารณสุข .....	17
ตารางที่ 2-4 ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม.....	17
ตารางที่ 2-5 การจำแนกการแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง .....	19
ตารางที่ 2-6 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ สำหรับวิธีการอย่างง่าย .....	19
ตารางที่ 2-7 โมดูลัสเฉือนของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลลที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ .....	28
ตารางที่ 2-8 โมดูลัสยืดหยุ่นของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลลที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ .....	28
ตารางที่ 2-9 ค่าคงที่ของโพรนี้.....	30
ตารางที่ 3-1 ค่าคงที่ของอนุกรมโพรนี้จากโปรแกรม MATLAB .....	34
ตารางที่ 3-2 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้น ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส .....	41
ตารางที่ 3-3 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้น ที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส .....	42
ตารางที่ 3-4 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าการโก่งตัว ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส .....	42
ตารางที่ 3-5 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าการโก่งตัว ที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส .....	42
ตารางที่ 3-6 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้น ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส .....	45
ตารางที่ 3-7 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้น ที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส .....	45
ตารางที่ 3-8 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าการโก่งตัว ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส .....	45
ตารางที่ 3-9 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าการโก่งตัว ที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส .....	46
ตารางที่ 4-1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	48
ตารางที่ 5-1 โหมดความเฉื่อยประสิทธิผลเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 1 นาที .....	74
ตารางที่ 5-2 โหมดความเฉื่อยประสิทธิผลเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที .....	75

ตารางที่ 5-3 ค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือนเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 1 นาที.....	75
ตารางที่ 5-4 ค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือนเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที .....	76
ตารางที่ 5-5 โมเมนต์ความเฉื่อยเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 1 นาที .....	76
ตารางที่ 5-6 โมเมนต์ความเฉื่อยเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที .....	77
ตารางที่ 5-7 การเปรียบเทียบโมเมนต์ความเฉื่อยจากมาตรฐานการออกแบบกับแบบจำลอง เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 1 นาที.....	79
ตารางที่ 5-8 การเปรียบเทียบการโก่งตัวจากมาตรฐานการออกแบบกับแบบจำลอง เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 1 นาที .....	79
ตารางที่ 5-9 การเปรียบเทียบโมเมนต์ความเฉื่อยจากมาตรฐานการออกแบบกับแบบจำลอง เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที.....	81
ตารางที่ 5-10 การเปรียบเทียบการโก่งตัวจากมาตรฐานการออกแบบกับแบบจำลอง เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที.....	81

## สารบัญรูป

รูปที่ 2-1 องค์ประกอบหลักของระบบผนังเปลือกนอก .....	3
รูปที่ 2-2 กระจกนิรภัย (Tempered Glass).....	5
รูปที่ 2-3 กระจกลามิเนต (Laminated Glass).....	5
รูปที่ 2-4 กระจกอินซูลेट (Insulated Glass).....	6
รูปที่ 2-5 วิธีการติดตั้งแผงกระจกระบบแห้ง (Dry Glazing).....	7
รูปที่ 2-6 วิธีการติดตั้งแผงกระจกระบบเปียก (Wet Glazing).....	7
รูปที่ 2-7 ระบบผนังเปลือกนอกชนิดแยกโครงสร้าง .....	9
รูปที่ 2-8 ระบบผนังเปลือกนอกชนิดโครงสร้างสำเร็จรูป.....	9
รูปที่ 2-9 ระบบผนังเปลือกนอกชนิดผนังสำเร็จรูปและโครงสร้างตัวตั้ง .....	10
รูปที่ 2-10 ระบบผนังเปลือกนอกชนิดแผ่นผนังสำเร็จรูป.....	11
รูปที่ 2-11 ระบบผนังเปลือกนอกชนิดแผ่นปิดหุ้มและแผ่นพาดช่วงเสา .....	11
รูปที่ 2-12 องค์ประกอบของกระจกลามิเนต .....	12
รูปที่ 2-13 คุณสมบัติยืดหยุ่นของกระจกและเหล็ก.....	13
รูปที่ 2-14 แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ .....	14
รูปที่ 2-15 การตัดเป็นชิ้นเดียวกัน (Monolithic Glass) .....	15
รูปที่ 2-16 การตัดแยกชั้น (Layered Glass).....	15
รูปที่ 2-17 การแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง .....	18
รูปที่ 2-18 กระจกลามิเนตตามแนวยาว และภาคตัดขวาง.....	21
รูปที่ 2-19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและโมดูลัสเฉือนของโพลีไวนิลบิวทิล .....	22
รูปที่ 2-20 ลักษณะตัวอย่างการทดสอบ .....	23
รูปที่ 2-21 ผลการเปรียบเทียบความเค้นสูงสุดและแรงกระทำของกระจกลามิเนต ตัดเป็นชิ้นเดียวกัน.....	24

รูปที่ 2-22 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวและแรงกระทำของกระจกลามิเนตตัดเป็นชิ้นเดียวกัน.....	24
รูปที่ 2-23 ผลการเปรียบเทียบความเค้นสูงสุดและแรงกระทำของกระจกลามิเนต ตัดแยกชิ้น .....	25
รูปที่ 2-24 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวและแรงกระทำของ กระจกลามิเนตตัดแยกชิ้น .....	25
รูปที่ 2-25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความเค้นสูงสุด.....	26
รูปที่ 2-26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการโก่งสูงสุด .....	27
รูปที่ 2-27 โมดูลัสแรงเฉือนของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ .....	29
รูปที่ 2-28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล .....	30
รูปที่ 2-29 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และน้ำหนักกระทำจากการทดลอง .....	31
รูปที่ 2-30 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และน้ำหนักกระทำจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	31
รูปที่ 3-1 ลักษณะคานกระจกลามิเนตในแบบจำลอง.....	32
รูปที่ 3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของกระจก.....	33
รูปที่ 3-3 การเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลด้วยโปรแกรม MATLAB.....	34
รูปที่ 3-4 การเปรียบเทียบขนาดของชิ้นส่วน .....	35
รูปที่ 3-5 การเปรียบเทียบขนาดของชิ้นส่วน .....	36
รูปที่ 3-6 การแบ่งขนาดของชิ้นส่วนในแบบจำลอง.....	36
รูปที่ 3-7 การแบ่งความหนาของชิ้นส่วนในแบบจำลอง .....	37
รูปที่ 3-8 ชิ้นส่วน Solid Hexahedral Elements (C3D8R) และ 20-Node Quadratic Brick Elements (C3D20) .....	37
รูปที่ 3-9 การเปรียบเทียบชนิดของชิ้นส่วน C3D8R กับ C3D20 .....	38
รูปที่ 3-10 การเปรียบเทียบชนิดของชิ้นส่วน C3D8R กับ C3D20.....	38
รูปที่ 3-11 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต .....	39
รูปที่ 3-12 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต .....	40
รูปที่ 3-13 การเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต .....	40

รูปที่ 3-14 การเปรียบเทียบค่าการโค้งตัวที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต .....	41
รูปที่ 3-15 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต .....	43
รูปที่ 3-16 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต .....	43
รูปที่ 3-17 การเปรียบเทียบค่าการโค้งตัวที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต .....	44
รูปที่ 3-18 การเปรียบเทียบค่าการโค้งตัวที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต .....	44
รูปที่ 4-1 ลักษณะคานกระจกلاميเนตในแบบจำลองตามกรณีศึกษา .....	47
รูปที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ..	49
รูปที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส.....	49
รูปที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส.....	50
รูปที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส.....	50
รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส.....	51
รูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	51
รูปที่ 4-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	52
รูปที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	52
รูปที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโค้งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส.....	53
รูปที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโค้งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส.....	53



รูปที่ 4-28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส.....	63
รูปที่ 4-29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส.....	63
รูปที่ 4-30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	64
รูปที่ 4-31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	64
รูปที่ 4-32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	65
รูปที่ 4-33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส.....	65
รูปที่ 4-34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส.....	66
รูปที่ 4-35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส.....	66
รูปที่ 4-36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส.....	67
รูปที่ 4-37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส.....	67
รูปที่ 4-38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	68
รูปที่ 4-39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	68
รูปที่ 4-40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	69
รูปที่ 4-41 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส .....	70
รูปที่ 4-42 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส.....	70



รูปที่ 4-43 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส .....	71
รูปที่ 4-44 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส .....	71
รูปที่ 4-45 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส .....	72
รูปที่ 4-46 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส .....	72
รูปที่ 4-47 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส .....	73
รูปที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยกับอุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื้อ 1 นาที่.....	78
รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับอุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื้อ 1 นาที่.....	78
รูปที่ 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยกับอุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื้อ 60 นาที่.....	80
รูปที่ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับอุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื้อ 60 นาที่ .....	80
รูปที่ 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยกับอุณหภูมิ สำหรับระยะเวลาต่อเนื้อ 1 นาที่ ..	82
รูปที่ 5-6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับอุณหภูมิ สำหรับระยะเวลาต่อเนื้อ 1 นาที่ .....	83
รูปที่ 5-7 การเปรียบเทียบโมเมนต์ความเฉื่อยและโมดูลัสเฉือน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับ ระยะเวลาต่อเนื้อ 1 นาที่ .....	83
รูปที่ 5-8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยกับอุณหภูมิ สำหรับระยะเวลาต่อเนื้อ 60 นาที่.....	84
รูปที่ 5-9 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับอุณหภูมิ สำหรับระยะเวลาต่อเนื้อ 60 นาที่ .....	84
รูปที่ 5-10 การเปรียบเทียบโมเมนต์ความเฉื่อยและโมดูลัสเฉือน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับ ระยะเวลาต่อเนื้อ 60 นาที่ .....	85
รูปที่ 5-11 การสร้างกราฟเพื่อใช้ในการออกแบบกระจกลามิเนต เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื้อ 1 นาที่.....	86
รูปที่ 5-12 การสร้างกราฟเพื่อใช้ในการออกแบบกระจกลามิเนต เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื้อ 60นาที่ .....	86

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

กระจกลามิเนตเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในงานระบบผนังเปลือกนอกของอาคาร โดยเฉพาะในอาคารสูงและอาคารขนาดใหญ่ เนื่องจากกระจกลามิเนตมีส่วนช่วยในเรื่องของความแข็งแรง การรับน้ำหนักกระทำได้มากกว่ากระจกธรรมดา นอกจากนี้ยังช่วยรับแสงธรรมชาติจากภายนอก ลดความร้อนภายในอาคาร และยังมีความทันสมัยสวยงาม จึงทำให้กระจกลามิเนตถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ในการออกแบบกระจกลามิเนตสำหรับงานผนังเปลือกนอกของอาคารนั้น จะต้องออกแบบให้รับแรงกระทำด้านข้างต่าง ๆ เช่น แรงลม แรงแผ่นดินไหว รวมทั้งน้ำหนักของตัวเอง แล้วถ่ายแรงต่าง ๆ เข้าสู่โครงสร้างอาคารต่อไป

ในอดีตมีงานวิจัยวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของกระจกลามิเนต [1-3] ที่ประกอบด้วยกระจกมากกว่า 2 ชั้น ยึดติดกันด้วยโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการยึดติดสูง พบว่าพฤติกรรมของกระจกลามิเนตขึ้นอยู่กับชนิดของกระจกและคุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่นำมาใช้ยึดติด เมื่อกระจกลามิเนตมีน้ำหนักกระทำจะเกิดพฤติกรรมการตัดได้ 2 ลักษณะ ลักษณะแรกคือกระจกลามิเนตจะมีพฤติกรรมการตัดเป็นชิ้นเดียวกัน (Monolithic Glass) ขณะที่อีกลักษณะหนึ่งคือพฤติกรรมการตัดของกระจกลามิเนตจะตัดแยกชิ้นกัน (Layered Glass) โดยไม่มีการส่งผ่านแรงเฉือนผ่านชั้นฟิล์ม แต่กระจกลามิเนตก็สามารถมีพฤติกรรมที่อยู่ระหว่างพฤติกรรมสองลักษณะนี้ได้ ดังนั้นในการออกแบบกระจกลามิเนตจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของกระจกลามิเนตเพื่อให้การออกแบบประหยัดที่สุด

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาพฤติกรรมการตัดของกระจกลามิเนตที่ประกอบด้วยกระจก 2 ชั้น ยึดติดกันด้วยฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล (Polyvinyl butyral) เมื่อเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการตัดของกระจกลามิเนต ที่อุณหภูมิ 5, 15, 28, 39, 49, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการรับแรงระยะสั้น 1 นาที และต่อเนื่อง 60 นาที รวมไปถึงเปรียบเทียบค่าที่ใช้ในการออกแบบ ได้แก่ โมเมนต์ความเฉื่อยและการโก่งตัว จากมาตรฐานการออกแบบ [4] เทียบกับแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS รวมไปถึงพัฒนากราฟสำหรับการออกแบบเพื่อทำนายพฤติกรรมของกระจกลามิเนต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. สร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความถูกต้องเปรียบเทียบกับผลวิจัยในอดีต
2. วิเคราะห์พฤติกรรมของกระจกลามิเนตเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและระยะเวลาที่มีแรงกระทำ
3. เปรียบเทียบค่าที่ใช้ในการออกแบบจากมาตรฐานการออกแบบและจากแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ โมเมนต์ความเฉื่อยและการโก่งตัว

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตการวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาพฤติกรรมการตัดของกระจกลามิเนตโดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่แรงกระทำเป็นตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของกระจกลามิเนต
2. คุณสมบัติของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทีเรตที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและเวลาจะพิจารณาจากงานวิจัยในอดีต
3. งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการตัดของกระจกลามิเนต สำหรับอาคารสูง 80 เมตร ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร

## บทที่ 2

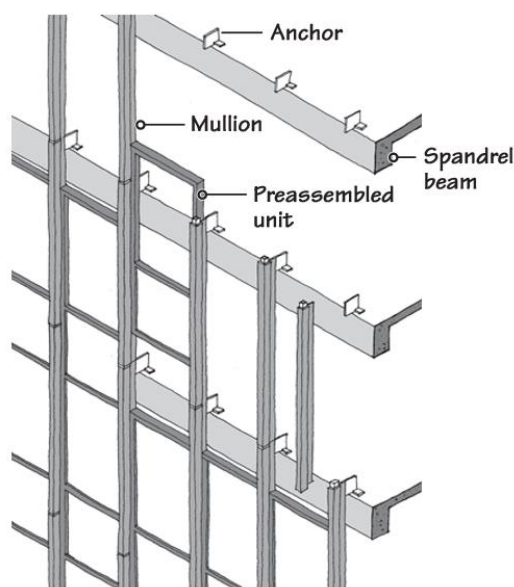
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความหมายและหน้าที่ของระบบผนังเปลือกนอก

ระบบผนังเปลือกนอก (Facade) ประกอบด้วยวัสดุโลหะเบาและกระจก ติดตั้งโดยการแขวนอยู่กับโครงอาคาร ไม่ได้ออกแบบให้รับน้ำหนักโครงสร้างอาคารแต่ออกแบบให้รับน้ำหนักของตัวเอง และแรงที่กระทำด้านข้าง โดยผนังเปลือกนอกจะถ่ายแรงสู่โครงสร้างผ่านฐานที่ยึดตรึงเข้ากับโครงอาคาร นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ช่วยควบคุมการไหลของอากาศ การป้องกันการซึมผ่านของน้ำ การควบคุมอุณหภูมิ และรับแรงกระทำด้านข้าง เช่น แรงลม แรงแผ่นดินไหว เป็นต้น

##### 2.1.1 องค์ประกอบหลักของระบบผนังเปลือกนอก

ระบบผนังเปลือกนอกโดยทั่วไปจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลักคือ ระบบโครงกรอบ (Framing System), แผ่นลูกฟัก (Infill Panel), ระบบรอยต่อ (Joint System) และกระจก (Glazed) ดังรูปที่ 2-1 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2-1 องค์ประกอบหลักของระบบผนังเปลือกนอก [5]

1. ระบบโครงกรอบ (Framing System) เป็นองค์ประกอบหลักในการถ่ายน้ำหนักตัวเองและแรงกระทำด้านข้างสู่โครงอาคาร ประกอบด้วย

โครงตัวตั้ง (Mullion) เป็นชิ้นส่วนแนวตั้งโดยทั่วไปทำจากอลูมิเนียม ทำหน้าที่ถ่ายแรงกระทำและน้ำหนักของตัวเองเข้าสู่โครงสร้างหลักของอาคาร

โครงตัวนอน (Transom) เป็นชิ้นส่วนแนวนอนเชื่อมต่อส่วนปลายเข้ากับชิ้นส่วนแนวตั้ง มีทั้งส่วนเหนือหน้าต่างและใต้หน้าต่าง ทำหน้าที่ถ่ายแรงจากโครงกรอบสู่โครงตัวตั้ง

2. แผ่นลูกฟัก (Infill Panel) คือแผ่นปิดผิวของโครงกรอบ มี 2 ประเภทคือ

แผ่นลูกฟักกระจก (Vision Panel) คือแผ่นลูกฟักที่มีลักษณะโปร่งแสงหรือโปร่งใส เพื่อประโยชน์ในการให้แสงธรรมชาติสามารถส่องผ่านเข้ามาในตัวอาคารได้

แผ่นวัสดุปิดทึบ (Spandrel Panel) คือแผ่นวัสดุที่ใช้ปิดหน้าโครงสร้าง โดยเฉพาะคานหรือพื้น เพื่อให้เกิดความสวยงาม

3. ระบบรอยต่อ (Joint System) มีหน้าที่เชื่อมต่อองค์ประกอบทั้งหมดของระบบผนังเปลือกนอกเชื่อมต่อระหว่างระบบผนังเปลือกนอกและโครงสร้างอาคาร รวมถึงป้องกันการรั่วซึมของน้ำและอากาศ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

ระบบยึดตรึงผนังเปลือกนอกเข้ากับโครงสร้างอาคาร (Anchorage System) ประกอบด้วยฐานยึดตรึง (Anchorage) และแผ่นประกบโครงกรอบ (Bracket) ทำหน้าที่ยึดผนังเปลือกนอกเข้ากับโครงสร้างอาคารและถ่ายแรงสู่โครงสร้างอาคาร

ระบบเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบของระบบผนังเปลือกนอก มีหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบของระบบผนังเปลือกนอกเข้าด้วยกัน ป้องกันการรั่วซึมของน้ำ ความชื้น และอากาศ รวมถึงรองรับการขยายตัวหรือหดตัวของโครงสร้างอาคารอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

4. กระจก (Glazing) เป็นวัสดุที่มีความสำคัญเพื่อช่วยในการรับแสงธรรมชาติจากภายนอกเข้าสู่ในอาคาร สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือกระจกธรรมดา (Annealed Glass), กระจกอบร้อน (Heat-Strengthened Glass) และกระจกนิรภัย (Tempered Glass)

กระจกธรรมดา (Annealed Glass or Float Glass) คือกระจกทั่วไป มีทั้งกระจกใสและกระจกสี บางและเปราะ เมื่อแตกจะมีความคมเป็นอันตราย

กระจกอบร้อน (Heat-Strengthened Glass) คือกระจกธรรมดาที่ผ่านการให้ความร้อน จึงมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่ากระจกธรรมดา 2 เท่า เมื่อแตกจะมีความคมเป็นอันตราย

กระจกนิรภัย (Tempered Glass) คือกระจกธรรมดาที่ผ่านการให้ความร้อนสูง แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วเพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรง โดยจะมีความแข็งแรงขึ้นกว่ากระจกธรรมดาถึง 4 เท่า เมื่อแตกจะแตกเป็นเม็ดเล็ก ๆ คล้ายเม็ดข้าวโพด ไม่เป็นอันตราย

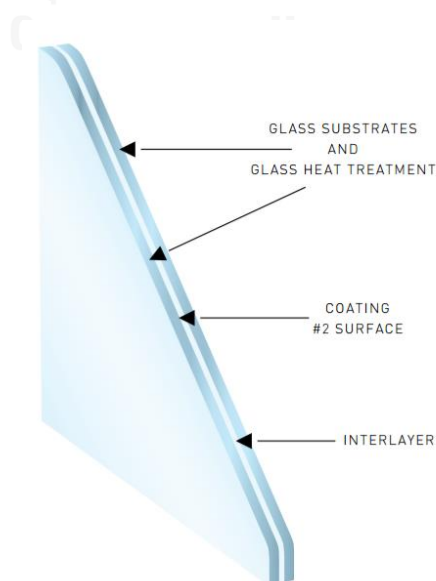


รูปที่ 2-2 กระจกนิรภัย (Tempered Glass) (<http://bsgglass.com>)

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งกระจกได้อีก 3 ประเภท ตามวิธีการผลิตเพื่อนำไปใช้งาน คือกระจกแผ่นเดียว (Monolithic Glass), กระจกลามิเนต (Laminated Glass) และกระจกอินซูลेट (Insulated Glass)

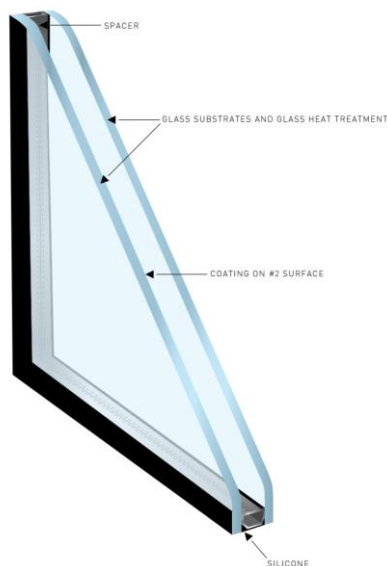
กระจกแผ่นเดียว (Monolithic Glass) คือกระจกที่ผ่านการผลิตออกมาเป็นแผ่นเดียว เป็นได้ทั้งกระจกธรรมดา กระจกอบร้อน หรือกระจกนิรภัย

กระจกลามิเนต (Laminated Glass) คือการนำกระจกมากกว่าหนึ่งแผ่นมาประกบกัน ไม่ว่าจะเป็กระจกธรรมดา กระจกอบร้อน หรือกระจกนิรภัย ยึดติดกันด้วยแผ่นฟิล์มโพลีไวนิลบิวทีรัล (Polyvinyl butyral, PVB), เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (Ethylvinyl acetate, EVA) หรือเซนต์ริกลาส (SentryGlas, SGP) เมื่อแตกจะไม่ร่วงหล่นเนื่องจากกระจกจะยึดเกาะอยู่บนแผ่นฟิล์ม จึงทำให้มีความปลอดภัยสูง กระจกลามิเนตจะช่วยชะลอการส่งผ่านความร้อนจากภายนอกและลดเสียงรบกวน



รูปที่ 2-3 กระจกลามิเนต (Laminated Glass) (<http://viracon.com>)

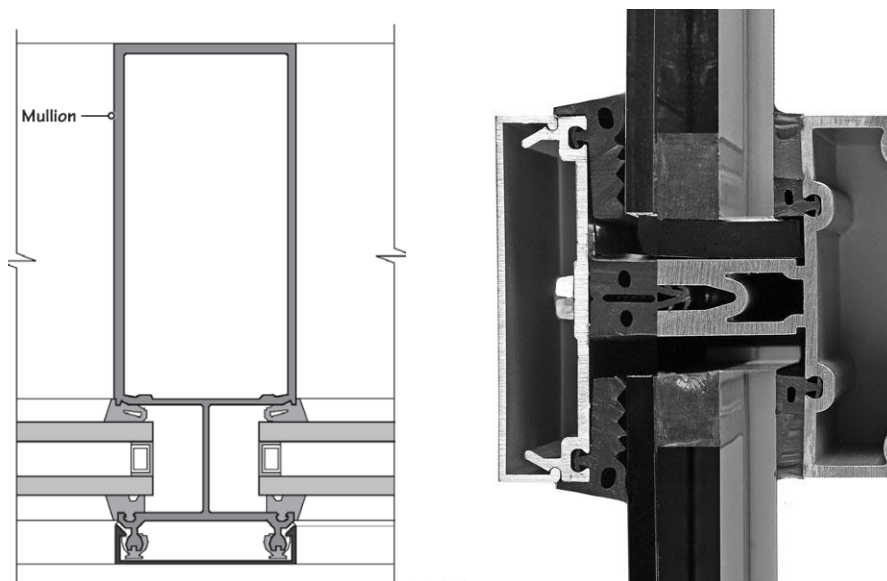
กระจกอินซูลेट (Insulated Glass) คือกระจกที่ประกอบด้วยกระจกตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไป ส่วนใหญ่จะใช้กระจกธรรมดาหรือกระจกบรอน คั่นกลางระหว่างกระจกด้วยช่องอากาศ วัตถุประสงค์หลักของกระจกอินซูลेटคือช่วยลดการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายนอกและภายในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน รวมถึงช่วยลดเสียงรบกวนจากภายนอกได้อีกด้วย



รูปที่ 2-4 กระจกอินซูลेट (Insulated Glass) (<http://viracon.com>)

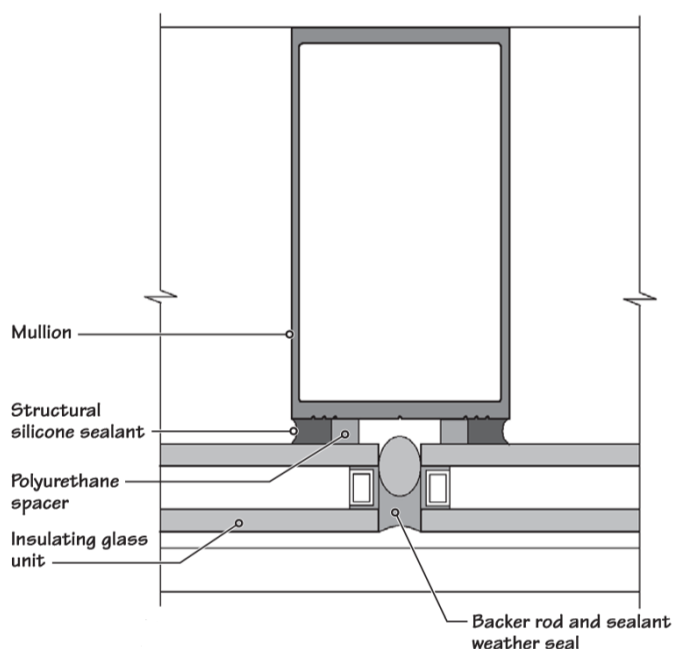
นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทวิธีการติดตั้งแผงกระจกเข้ากับกรอบโครงได้เป็น 2 วิธี คือการติดตั้งระบบแห้ง (Dry Glazing) และการติดตั้งระบบเปียก (Wet Glazing) ดังนี้

การติดตั้งระบบแห้ง (Dry Glazing) จะใช้อย่างปะเก็นในการยึดแผงกระจกเข้ากับกรอบโครง โดยการติดตั้งระบบแห้งมีข้อดีคือสามารถติดตั้งได้ง่ายจากภายใน แต่อาจเกิดการหดตัวเป็นสาเหตุทำให้เกิดการรั่วซึมของน้ำและอากาศได้



รูปที่ 2-5 วิธีการติดตั้งแผงกระจกระบบแห้ง (Dry Glazing) [5]

การติดตั้งระบบเปียก (Wet Glazing) คือการใช้วัสดุอุดยาแนวที่มีคุณสมบัติในการยึดเกาะสูงมายึดแผ่นกระจกเข้ากับกรอบโครง มีข้อดีคือสามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำ แต่การติดตั้งต้องทำจากภายนอก ยากต่อการดูแลและซ่อมบำรุง รวมถึงประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับฝีมือแรงงานในการติดตั้ง



รูปที่ 2-6 วิธีการติดตั้งแผงกระจกระบบเปียก (Wet Glazing) [5]



## 2.1.2 ประเภทของระบบผนังเปลือกนอก

การแบ่งประเภทของผนังเปลือกนอกนั้นสามารถแบ่งได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่ง ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่งประเภทของระบบผนังสามารถแบ่งได้ ดังนี้

1. การจำแนกประเภทของระบบผนังเปลือกนอกตามข้อกำหนดพื้นฐาน สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท [6] ดังนี้

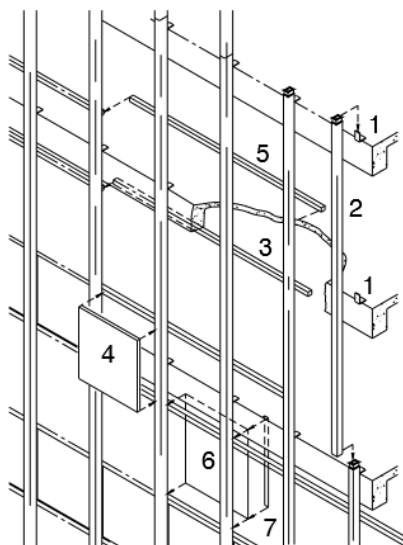
ระบบผนังเปลือกนอก (Curtain Wall) คือผนังเปลือกนอกของอาคาร โดยจะเป็นวัสดุใดก็ได้ ซึ่งไม่ได้ออกแบบให้รับน้ำหนักตามแนวตั้ง

ระบบผนังโลหะ (Metal Curtain Wall) คือผนังเปลือกนอกของอาคารที่ทำจากโลหะ หรือประกอบด้วยโลหะ กระจก และวัสดุพื้นผิวอื่น ๆ

ระบบผนังหน้าต่าง (Window Wall) เป็นประเภทหนึ่งของระบบผนังโลหะ มีการติดตั้งระหว่างชั้นจากพื้นถึงพื้น หรือระหว่างพื้นกับหลังคา ออกแบบให้สามารถเปิดเพื่อระบายอากาศได้

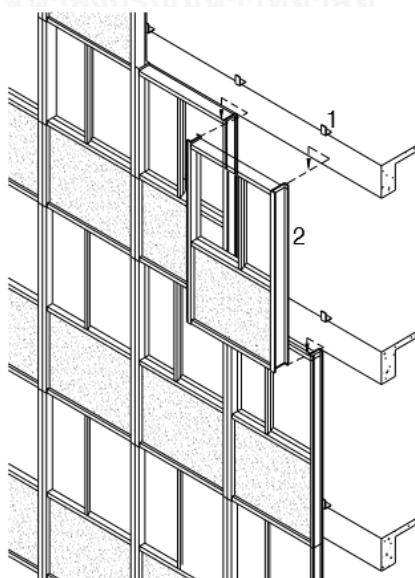
2. การจำแนกประเภทของระบบผนังเปลือกนอกตามการติดตั้ง สามารถแบ่งได้ 5 ประเภท [6] ดังนี้

ระบบแยกโครงกรอบ (Stick System) เป็นระบบที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ระบบนี้จะติดตั้งชิ้นส่วนทีละชิ้น โดยติดตั้งโครงตัวตั้ง (Mullion) ก่อน จากนั้นติดตั้งโครงตัวนอน (Transom) และสุดท้ายติดตั้งแผ่นกระจก (Glazing) หรือแผ่นหน้าต่าง (Window Unit) ดังรูปที่ 2-7 โดยหมายเลข1 คือฐานยึดตรึงเข้ากับโครงสร้างอาคาร (Anchors) หมายเลข2 คือโครงตัวตั้ง หมายเลข3 คือโครงตัวนอนรางเหนือหน้าต่าง หมายเลข4 คือแผ่นทึบส่วนปิดหน้าคาน หมายเลข5 คือโครงตัวนอนรางใต้หน้าต่าง หมายเลข6 คือแผ่นกระจก และหมายเลข7 คือโครงตัวตั้งภายใน เนื่องจากการติดตั้งผนังเปลือกนอกระบบแยกโครงกรอบต้องติดตั้งทีละชิ้นส่วน ทำให้ยากต่อการควบคุมคุณภาพ และต้องใช้แรงงานมาก แต่ชิ้นส่วนของระบบเป็นชิ้นเล็ก จึงทำให้ง่ายในการขนส่ง สามารถปรับขนาดได้ตามสภาพหน้างานจริง และมีราคาถูกเมื่อเทียบกับระบบผนังแบบอื่น ๆ



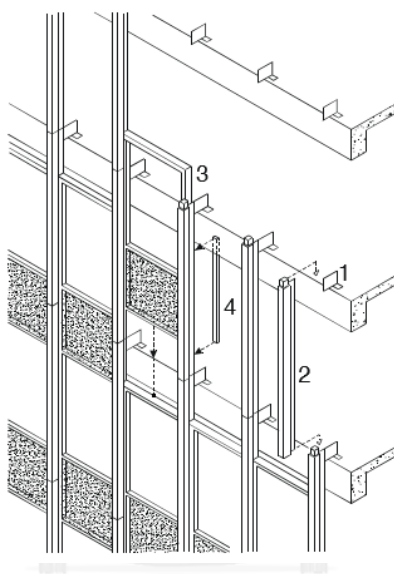
รูปที่ 2-7 ระบบผนังเปลือกนอกชนิดแยกโครงกรอบ [6]

ระบบโครงผนังสำเร็จรูป (Unit System) เป็นระบบผนังสำเร็จรูปที่ประกอบโครงตัวตั้ง โครงตัวนอน และแผ่นผนัง เป็นกรอบโครงโดยสมบูรณ์จากโรงงาน แล้วจึงนำมาติดตั้งที่หน้างาน ดังรูปที่ 2-8 โดยหมายเลข 1 คือฐานยึดตรึงเข้ากับโครงสร้างอาคาร และหมายเลข 2 คือแผ่นผนังสำเร็จรูป เนื่องจากระบบโครงผนังสำเร็จรูปเป็นการประกอบโครงกรอบมาจากโรงงาน จึงทำให้สามารถควบคุมคุณภาพได้ดี และใช้แรงงานในการติดตั้งน้อย แต่มีข้อเสียคือโครงสำเร็จรูปต้องใช้พื้นที่ในการขนส่งและจัดเก็บมาก รวมถึงไม่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดตามสภาพหน้างานจริงได้



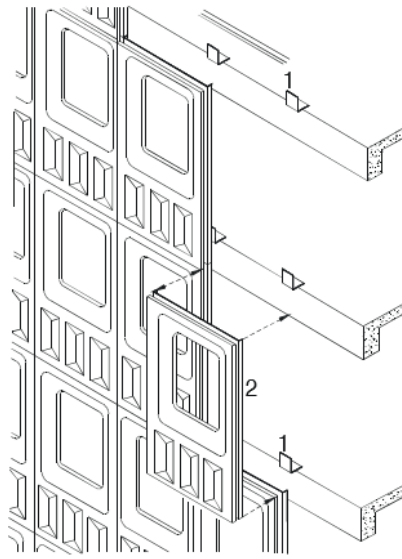
รูปที่ 2-8 ระบบผนังเปลือกนอกชนิดโครงผนังสำเร็จรูป [6]

ระบบผนังสำเร็จรูปและโครงตัวตั้ง (Unit and Mullion System) เป็นการรวมกันของระบบแยกโครงกรอบและระบบโครงผนังสำเร็จรูป โดยระบบนี้จะติดตั้งโครงตัวตั้งก่อน จากนั้นจะติดตั้งโครงกรอบสำเร็จรูปลงไประหว่างโครงตัวตั้ง ดังรูปที่ 2-9 โดยหมายเลข1 คือฐานยึดตรึงเข้ากับโครงสร้างอาคาร หมายเลข2 คือโครงตัวตั้งซึ่งมีความสูงหนึ่งหรือสองชั้น หมายเลข3 คือโครงผนังสำเร็จรูป และหมายเลข4 คือตัวปิดโครงตัวตั้งด้านใน ระบบผนังสำเร็จรูปและโครงตัวตั้งมีค่าขนส่งที่ต่ำกว่าระบบโครงผนังสำเร็จรูป เนื่องจากมีการแยกส่วนประกอบโครงตัวตั้งในการขนส่ง แต่ต้องใช้แรงงานในการติดตั้งและใช้เวลามากกว่าเมื่อเทียบกับระบบแยกโครงกรอบ



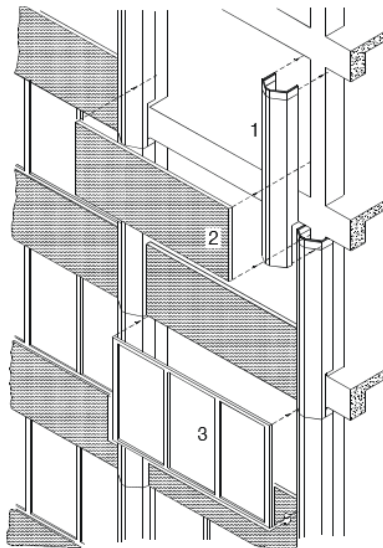
รูปที่ 2-9 ระบบผนังเปลือกนอกชนิดผนังสำเร็จรูปและโครงตัวตั้ง [6]

ระบบแผ่นผนังสำเร็จรูป (Panel System) เป็นระบบที่คล้ายกับระบบโครงผนังสำเร็จรูป (Unit System) แตกต่างกันว่าระบบแผ่นผนังสำเร็จรูปจะเป็นแผ่นเนื้อเดียวจากโลหะหรือการหล่อขึ้นรูป โดยที่ไม่มีรอยต่อใด ๆ ยกเว้นรอบแผ่นกระฉก แผ่นผนังสำเร็จรูปอาจมีความสูงเต็มความสูงของชั้น และกระฉกอาจเปิดได้หรือไม่ได้ก็ได้ ดังรูปที่ 2-10 โดยหมายเลข1 คือฐานยึดตรึงเข้ากับโครงสร้างอาคาร และหมายเลข2 คือแผ่นผนังสำเร็จรูป ข้อดีของระบบแผ่นผนังสำเร็จรูปคือใช้แรงงานในการติดตั้งน้อย แต่มีข้อเสียคือราคาแพงนอกจากจะผลิตในปริมาณมากจึงจะคุ้มค่า



รูปที่ 2-10 ระบบผนังเปลี่ยนนอกชนิดแผ่นผนังสำเร็จรูป [6]

ระบบแผ่นปิดหุ้มและแผ่นพาดช่วงเสา (Column Cover and Spandrel System) ประกอบด้วยแผ่นปิดหุ้มเสา แผ่นปิดทับพาดช่วงเสา และกระจกซึ่งอาจประกอบสำเร็จจากโรงงานหรือประกอบที่หน้างานก็ได้ ดังรูปที่ 2-11 หมายเลข1 คือแผ่นปิดหุ้มเสา หมายเลข2 คือแผ่นปิดทับพาดช่วงเสา และหมายเลข3 คือแผ่นกระจก



รูปที่ 2-11 ระบบผนังเปลี่ยนนอกชนิดแผ่นปิดหุ้มและแผ่นพาดช่วงเสา [6]

3. การจำแนกประเภทของระบบผนังเปลือกนอกตามรูปลักษณะที่ปรากฏ จากหนังสือระบบผนัง Curtain Wall สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

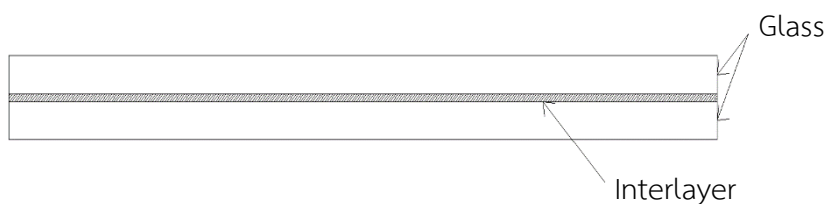
ประเภทที่เห็นโครงกรอบทั้ง 4 ด้านเมื่อมองจากภายนอก (Conventional system) คือระบบที่ใช้ยางอัดแน่นเป็นตัวยึดกระจกทั้ง 4 ด้าน โดยสอดเข้าไปข้างในตัวโครงกรอบ ดังนั้นเมื่อมองจากภายนอกจะเห็นโครงกรอบทั้ง 4 ด้าน

ประเภทที่เห็นโครงกรอบ 2 ด้าน (Two-sided structural silicone glazing system) เป็นระบบที่มีการยึดกระจกด้วยซิลิโคน 2 ด้าน อาจเป็นด้านแนวตั้งหรือแนวนอนก็ได้ ส่วนอีก 2 ด้านจะมียางเป็นตัวยึดกระจก ดังนั้นเมื่อมองจากภายนอกจะเห็นโครงกรอบเพียง 2 ด้าน

ประเภทที่ไม่เห็นโครงกรอบภายนอก (Four-sided structural silicone glazing system) เป็นระบบที่มีการยึดกระจกด้วยซิลิโคนทั้ง 4 ด้าน ดังนั้นเมื่อมองจากภายนอกจะเห็นแต่กระจก ไม่เห็นโครงกรอบ

## 2.2 คุณสมบัติและพฤติกรรมของกระจกลามิเนต

กระจกลามิเนตเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของระบบผนังเปลือกนอกถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้เป็นวัสดุที่สามารถรับแรงกระทำ (Load-Bearing Capacity) ได้มากกว่ากระจกชั้นเดียวธรรมดา แต่กระจกลามิเนตยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ เช่นการชะลอการส่งผ่านความร้อนและมีความปลอดภัยสูง จึงทำให้กระจกลามิเนตเป็นหนึ่งในตัวเลือกในการใช้งาน กระจกลามิเนตประกอบด้วยกระจกมากกว่า 2 ชั้นมาประกบกัน ยึดติดกันด้วยชั้นฟิล์ม (Interlayer) ซึ่งโดยทั่วไปใช้ฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล (Polyvinyl Butyral)

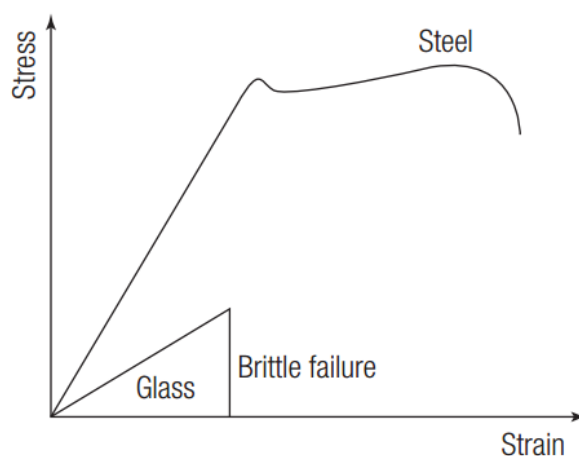


รูปที่ 2-12 องค์ประกอบของกระจกลามิเนต

### 2.2.1 คุณสมบัติของกระจก

กระจกที่นำมาประกอบเป็นกระจกลามิเนตมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) คล้ายกับคุณสมบัติของเหล็กในช่วงแรก ดังรูปที่ 2-13 ซึ่งคุณสมบัติยืดหยุ่นสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามกฎของฮุก (Hooke's law)

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$



รูปที่ 2-13 คุณสมบัติยืดหยุ่นของกระจกและเหล็ก [7]

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติเชิงกลของกระจก [8]

ความหนาแน่น	2500 kg/m <sup>3</sup>
อัตราส่วนของผิวช่อง	0.22
โมดูลัสความยืดหยุ่น (E)	70.0 GPa

### 2.2.2 คุณสมบัติของโพลีไวนิลบิวทีรัล

โพลีไวนิลบิวทีรัล (Polyvinyl butyral) คือโพลิเมอร์ที่ไม่มีสี เสถียรต่อแสง และมีความสามารถในการยึดติดสูง มักถูกนำมาใช้ในงานกระจกนิรภัยเนื่องจากเมื่อกระจกแตกเศษกระจกจะยึดติดอยู่กับฟิล์ม ทำให้มีความปลอดภัยและไม่เป็นอันตราย โพลีไวนิลบิวทีรัลเป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นหนืด (Viscoelastic) จึงทำให้คุณสมบัติของโพลีไวนิลบิวทีรัลในการส่งผ่านแรงเฉือนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และแรงกระทำ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลถึงพฤติกรรมของกระจกลามิเนต

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล

ความหนาแน่น (Density)	1100 kg/m <sup>2</sup>
อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio)	0.49
โมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus), G	0-4 GPa

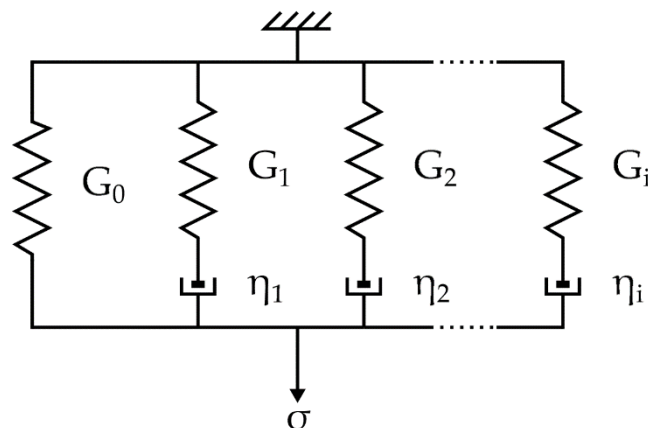
คุณสมบัติยืดหยุ่นของโพลิเมอร์สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองที่ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนสปริง (Spring) และชิ้นส่วนตัวหน่วง (Dashpot) โดยที่ชิ้นส่วนสปริงแสดงถึงพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นของวัสดุ สามารถเขียน Constitutive Equation ได้ดังสมการ 2.2

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} \quad (2.2)$$

โดยที่  $E$  คือความแข็งแกร่ง (Stiffness) ในขณะที่ชิ้นส่วนตัวหน่วงแสดงถึงพฤติกรรมยืดหยุ่นหนืด สามารถเขียน Constitutive Equation ได้ดังสมการ 2.3

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\eta$  คือค่าคงที่ความหนืด ซึ่งแบบจำลองที่นำชิ้นส่วนสปริงและชิ้นส่วนตัวหน่วงมาต่ออนุกรมกัน เรียกว่าแบบจำลองชิ้นส่วนของแมกซ์เวลล์ (Maxwell Model) และเมื่อนำชิ้นส่วนของแมกซ์เวลล์ ตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไปมาต่อขนานกันจะเรียกว่าแบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ (Generalized Maxwell Model) ดังแสดงในรูปที่ 2-14 ซึ่งสามารถหาโมดูลัสเฉือนของวัสดุยืดหยุ่นหนืดได้ดังสมการ 2.4



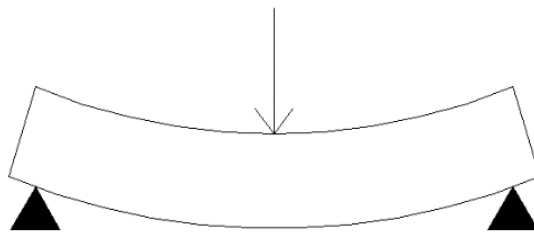
รูปที่ 2-14 แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์

$$G(t) = G_0 \left( 1 - \sum_{i=1}^n g_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right) \quad (2.4)$$

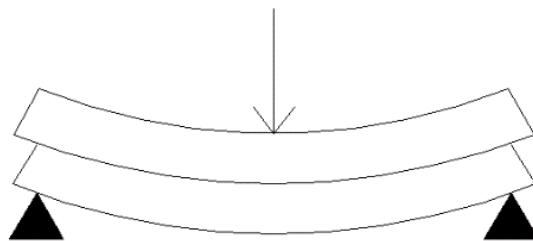
เมื่อ  $G_0$  คือโมดูลัสแรงเฉือนที่เวลาเริ่มต้น,  $G_i$  และ  $\tau_i$  เมื่อ  $i = 1 \dots N$  คือการผ่อนคลายความเค้นโมดูลัสเฉือน (Relaxation Shear Modulus) และระยะเวลาผ่อนคลาย (Relaxation Times)

### 2.2.3 พฤติกรรมของกระจกลามิเนต

พฤติกรรมของกระจกลามิเนตขึ้นอยู่กับชนิดของกระจก ความหนา และคุณสมบัติของฟิล์มที่นำมาใช้ยึดติด เมื่อมีแรงกระทำจนเกิดตัดจะเกิดพฤติกรรมได้ 2 ลักษณะ แบบแรกคือกระจกลามิเนตจะมีพฤติกรรมของการตัดเป็นชิ้นเดียวกัน (Monolithic Glass) ที่มีความหนาเท่ากับความหนาของกระจกรวมกัน สามารถส่งผ่านแรงเฉือนระหว่างชั้นกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่แบบที่สองคือพฤติกรรมการตัดของกระจกลามิเนตจะตัดแยกชิ้นกัน (Layered Glass) คือกระจก 2 ชั้นที่ไม่ยึดติดกัน ซึ่งจะไม่สามารถส่งผ่านแรงเฉือนระหว่างชั้นกระจกได้



รูปที่ 2-15 การตัดเป็นชิ้นเดียวกัน (Monolithic Glass)



รูปที่ 2-16 การตัดแยกชั้น (Layered Glass)



## 2.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการพฤติกรรมของกระจกลามิเนต

เนื่องจากพฤติกรรมของกระจกลามิเนตขึ้นอยู่กับชนิดของกระจกและชั้นฟิล์ม ดังนั้นอุณหภูมิ ระยะเวลาที่มีแรงกระทำ ความหนาของชั้นฟิล์ม จึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของกระจก ลามิเนตทั้งสิ้น ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาอุณหภูมิและระยะเวลาที่แรงกระทำเป็นหลัก อุณหภูมิเป็น ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของกระจกลามิเนตเนื่องจากที่อุณหภูมิต่าง ๆ ชั้นฟิล์มโพลีไวนิลไบริบจะมีความสามารถในการส่งถ่ายแรงเฉือนหรือมีค่าโมดูลัสเฉือนที่ต่างกัน รวมถึงระยะเวลา ในการรับแรงกระทำ (Duration of loading) ก็เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของ กระจกลามิเนต ซึ่งสามารถแบ่งระยะเวลาที่มีแรงกระทำได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือรับแรง กระทำเป็นระยะเวลาสั้น ๆ (Short duration) เช่นเมื่อรับแรงลม มีระยะเวลาเป็นวินาที ประเภทที่ สองคือรับแรงกระทำต่อเนื่อง (Long-term duration) เช่นน้ำหนักกระจกลามิเนตเอง หรือน้ำหนัก หิมะ เป็นต้น มีระยะเวลาเป็นนาที ชั่วโมง วัน หรือปี

## 2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 มาตรฐานการคำนวณแรงลม

จากมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร [9] เสนอการคำนวณหน่วย แรงลมที่กระทำต่อส่วนใดส่วนหนึ่งของด้านใดด้านหนึ่งของอาคาร เช่น ผนังภายนอก เป็นผลรวมแบบ เวกเตอร์ของหน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายนอก คำนวณได้จากสมการ 2.5 กับหน่วยแรงลมที่ กระทำบนพื้นผิวที่กระทำภายใน คำนวณได้จากสมการ 2.6

$$p = I_w q C_e C_g C_p \quad (2.5)$$

โดยที่  $p$  คือหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่ากระทำตั้งฉากกับพื้นผิวภายนอกอาคาร (Equivalent static wind pressure),  $I_w$  คือค่าประกอบความสำคัญของแรงลม,  $q$  คือหน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจาก ความเร็วลม (Reference velocity pressure),  $C_e$  คือค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (Exposure factor),  $C_g$  คือค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (Gust effect factor) และ  $C_p$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร (External pressure coefficient)

$$p_i = I_w q C_e C_{gi} C_{pi} \quad (2.6)$$

โดยที่  $p_i$  คือหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่ากระทำตั้งฉากกับพื้นผิวภายในอาคาร,  $C_{gi}$  คือค่าประกอบ เนื่องจากผลการกระโชกของลมที่กระทำภายในอาคาร และ  $C_{pi}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม ที่กระทำภายนอกอาคาร

ตารางที่ 2-3 การจำแนกประเภทอาคารตามความสำคัญต่อสาธารณชน [9]

ประเภทของอาคาร	ประเภทความสำคัญ
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่มีปัจจัยเสี่ยงอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ค่อนข้างน้อยเมื่อเกิดการพังทลายของอาคารหรือส่วนโครงสร้างนั้น ๆ เช่น อาคารที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร, อาคารชั่วคราว หรืออาคารเก็บของเล็ก ๆ เป็นต้น	น้อย
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่ไม่จัดอยู่ในอาคารประเภท ความสำคัญน้อย มาก และสูงมาก	ปกติ
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่หากเกิดการพังทลายจะเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสาธารณชนอย่างมาก เช่นอาคารชุมนุมคน มากกว่า 300 คน, โรงเรียนที่มีความจุมากกว่า 250 คน, มหาวิทยาลัยที่มีความจุมากกว่า 500 คน เป็นต้น	มาก
อาคารและส่วนของโครงสร้างอาคารที่มีความจำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชนอย่างมาก หรืออาคารที่จำเป็นต่อการบรรเทาหลังเกิดเหตุเป็นอย่างมาก เช่นโรงพยาบาล, สถานีตำรวจ, โรงไฟฟ้า หรือ อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย เป็นต้น	สูงมาก

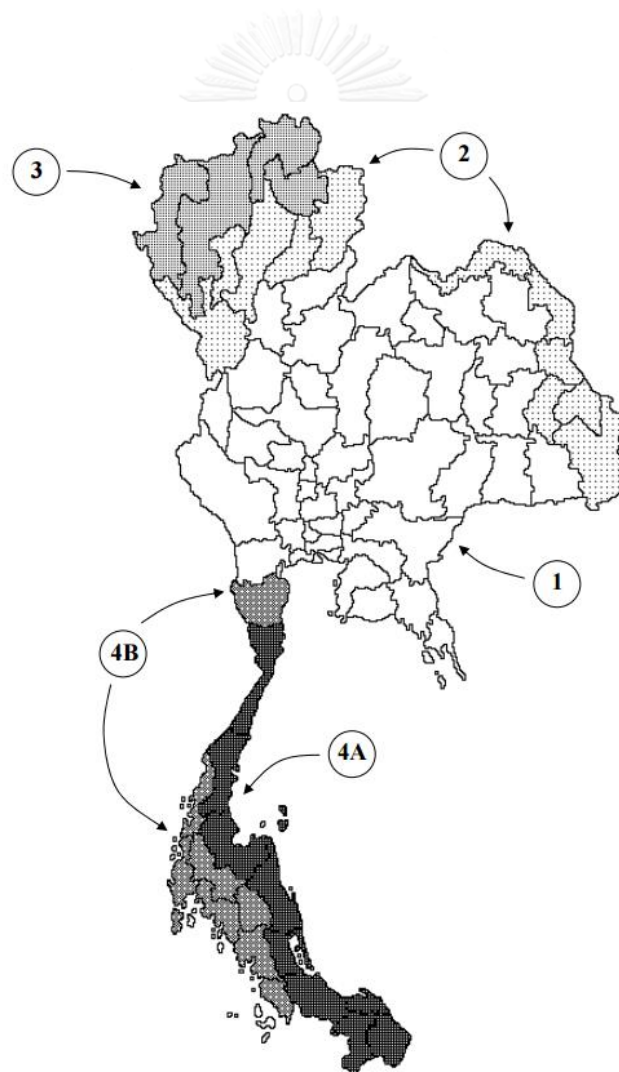
ตารางที่ 2-4 ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม [9]

ประเภทความสำคัญ ของอาคาร	ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม	
	สภาวะจำกัดด้านกำลัง	สภาวะจำกัดด้านการใช้งาน
น้อย	0.8	0.75
ปกติ	1	0.75
มาก	1.15	0.75
สูงมาก	1.15	0.75

หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม ( $q$ ) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.7

$$q = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho}{g} \right) \bar{V}^2 \quad (2.7)$$

โดยที่  $\rho$  คือความหนาแน่นของมวลอากาศ ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับความดันบรรยากาศปกติและอุณหภูมิของอากาศประมาณ 15 ถึง 45 องศาเซลเซียส,  $\bar{V}$  คือความเร็วลมอ้างอิง ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วลมในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศแบบโล่ง สำหรับคาบเวลากลับ (Return period) 50 ปี ดังแสดงในรูปที่ 2-17 และตารางที่ 2-5 และ  $g$  คืออัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.806 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>



รูปที่ 2-17 การแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง [9]

ตารางที่ 2-5 การจำแนกการแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง [9]

กลุ่ม	$V_{50}$ (เมตรต่อวินาที)
1	25
2	27
3	29
4A	25
4B	25

ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ ( $C_e$ ) เป็นค่าประกอบที่นำมาปรับค่าหน่วยแรงลมให้แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดินและสภาพภูมิประเทศ โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ สภาพภูมิประเทศแบบ A เป็นสภาพภูมิประเทศแบบโล่ง ซึ่งมีอาคาร ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้างกระจัดกระจายอยู่ห่าง ๆ กัน หรือบริเวณชายฝั่งทะเล และสภาพภูมิประเทศแบบ B เป็นสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง หรือพื้นที่ที่มีต้นไม้ใหญ่หนาแน่น หรือบริเวณศูนย์กลางเมืองขนาดเล็ก สามารถหาค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศอย่างง่ายได้จากตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ สำหรับวิธีการอย่างง่าย [9]

ความสูงจากพื้นดิน	สภาพภูมิประเทศแบบ A	สภาพภูมิประเทศแบบ B
สูงไม่เกิน 6 เมตร	0.90	0.70
สูงเกิน 6 เมตร แต่ไม่เกิน 10 เมตร	1.00	0.70
สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	1.15	0.82
สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 30 เมตร	1.25	0.92
สูงเกิน 30 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.32	1.00
สูงเกิน 40 เมตร แต่ไม่เกิน 60 เมตร	1.43	1.13
สูงเกิน 60 เมตร แต่ไม่เกิน 80 เมตร	1.52	1.24

ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม ( $C_g$ ) คืออัตราส่วนระหว่างผลของแรงลมสูงสุดต่อผลของแรงลมเฉลี่ย โดยสามารถคำนวณค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมได้ดังนี้

- ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกอาคาร
  - กรณีที่ 1 ให้ใช้ค่า  $C_g$  เท่ากับ 2.0 ในการออกแบบโครงสร้างหลักด้านทานแรงลม
  - กรณีที่ 2 ให้ใช้ค่า  $C_g$  เท่ากับ 2.35 สำหรับป้ายและกำแพง

กรณีที่ 3 ให้ใช้ค่า  $C_g$  เท่ากับ 2.5 ในการออกแบบโครงสร้างรองและผนังภายนอกอาคาร

2. ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมที่กระทำกับพื้นผิวภายในอาคาร ให้ใช้ค่า  $C_{gi}$  เท่ากับ 2.0 หรือคำนวณจากสมการ 2.8 ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะและปริมาณช่องเปิดของอาคาร

$$C_{gi} = 1 + \frac{1}{\sqrt{1+\tau}} \quad (2.8)$$

โดยที่  $\tau$  คือตัวแปรที่บอกระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อการแปรเปลี่ยนของความดันภายนอกอาคาร สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.9

$$\tau = \frac{V_0}{6,950A_0} \quad (2.9)$$

โดยที่  $V_0$  คือปริมาตรภายในของอาคาร (ลูกบาศก์เมตร) และ  $A_0$  คือพื้นที่รวมทั้งหมดของช่องเปิดบนผนังภายนอกอาคาร (ตารางเมตร)

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม ( $C_p$ ) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอาคาร ทิศทางลม และลักษณะการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมตามความสูงอาคาร

1. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก สำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคารและระบบโครงสร้างหลักของอาคาร กรณีที่ 1 สำหรับอาคารเตี้ยที่มีความสูงต่อความกว้างน้อยกว่า 1 และมี ความสูงอ้างอิงน้อยกว่า 23 เมตร, กรณีที่ 2 สำหรับอาคารสูง และกรณีที่ 3 สำหรับโครงสร้างพิเศษ
2. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายใน สำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคาร และระบบโครงสร้างหลักด้านแรงลม

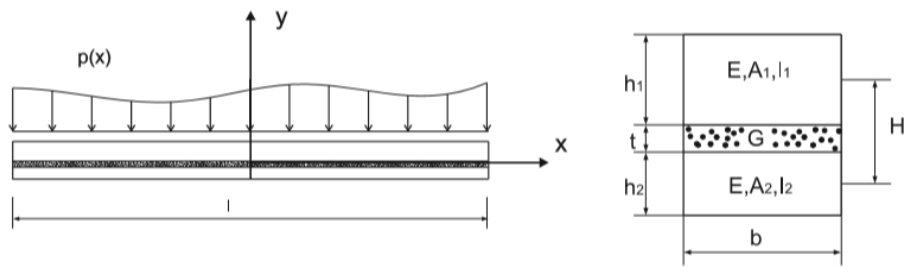
กรณีที่ 1 ให้ใช้ค่า  $C_{pi}$  เท่ากับ -0.15 ถึง 0 สำหรับอาคารที่ปราศจากช่องเปิดขนาดใหญ่ แต่อาจมีช่องเปิดขนาดเล็กกระจายสม่ำเสมอ โดยมีพื้นที่ช่องเปิดรวมน้อยกว่า 0.1% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด เช่น คลังสินค้าที่ไม่มีหน้าต่างหรือช่องเปิด เป็นต้น

กรณีที่ 2 ให้ใช้ค่า  $C_{pi}$  เท่ากับ -0.45 ถึง 0.3 สำหรับอาคารที่มีการรั่วซึมซึ่งกระจายไม่สม่ำเสมอ อาจมีช่องเปิดขนาดใหญ่ที่ได้รับการปิดสนิท เช่นอาคารขนาดเล็กทั่วไป อาคารสูงที่มีหน้าต่างซึ่งสามารถเปิด-ปิดได้ เป็นต้น

กรณีที่ 3 ให้ใช้ค่า  $C_{pi}$  เท่ากับ -0.7 ถึง 0.7 สำหรับอาคารที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ เช่นอาคารโรงงาน อุตสาหกรรม เป็นต้น

### 2.3.2 มาตรฐานการออกแบบ ASTM E 1300-09

มาตรฐานการออกแบบ [4] เสนอสมการพื้นฐานการคำนวณความหนาประสิทธิผล (Effective Thickness) ของกระจกลามิเนต ซึ่งพัฒนาโดย Bennison et al. [10, 11]



รูปที่ 2-18 กระจกลามิเนตตามแนวยาว และภาคตัดขวาง [12]

จากรูปที่ 2-18 กระจกลามิเนตขนาดความยาว  $l$  และความกว้าง  $b$  ประกอบจากกระจก 2 ชั้นที่มีความหนา  $h_1$  และ  $h_2$  และมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น  $E$  (Young's modulus) เชื่อมต่อกันด้วยแผ่นฟิล์มที่มีความหนา  $t$  และมีโมดูลัสเฉือน  $G$  (Shear modulus) จะได้สมการพื้นฐานดังแสดงในสมการ 2.10 และ 2.11 และสามารถคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือนได้ดังสมการ 2.12 และ 2.13

$$h_{s,1} = \frac{h_s h_1}{h_1 + h_2}, \quad h_{s,2} = \frac{h_s h_2}{h_1 + h_2} \quad (2.10)$$

$$H = t + \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (2.11)$$

$$I_{eq} = I_1 + I_2 + \Gamma \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} H^2 \quad (2.12)$$

$$\Gamma = \frac{1}{1 + \beta \frac{Et}{Gbl^2} \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $h_1, h_2$  คือความหนาของกระจกแผ่นบนและแผ่นล่าง,  $t$  คือความหนาของชั้นโพลีเมอร์,  $\Gamma$  คือค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือน (Shear transfer coefficient) ซึ่ง  $\Gamma = 0$  เมื่อกระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบการตัดแยกชั้นกันและ  $\Gamma = 1$  เมื่อกระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบการตัดเป็นชั้นเดียวกัน และ  $\beta$  คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของน้ำหนักกระทำ (Load Condition) เช่น  $\beta = 9.6$  เมื่อเป็นน้ำหนักกระทำแบบแผ่สม่ำเสมอ,  $\beta = 12$  เมื่อมีน้ำหนักกระทำจุดเดียวที่กึ่งกลางคาน และ  $\beta = \pi^2$  เมื่อน้ำหนักกระทำรูปคลื่นแบบไซน์ (Sinusoidal Load) เป็นต้น ซึ่งจะสามารถคำนวณหาค่าความหนาประสิทธิผลสำหรับการคำนวณการแอ่นตัวของกระจกลามิเนต (Deflection-effective

thickness) และค่าความหนาประสิทธิผลสำหรับการคำนวณความเค้นของกระจกลามิเนต (Stress-effective thickness) ได้ตั้งสมการ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ

$$h_{ef:w} = \sqrt[3]{h_1^3 + h_2^3 + 12\Gamma \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} H^2} \quad (2.14)$$

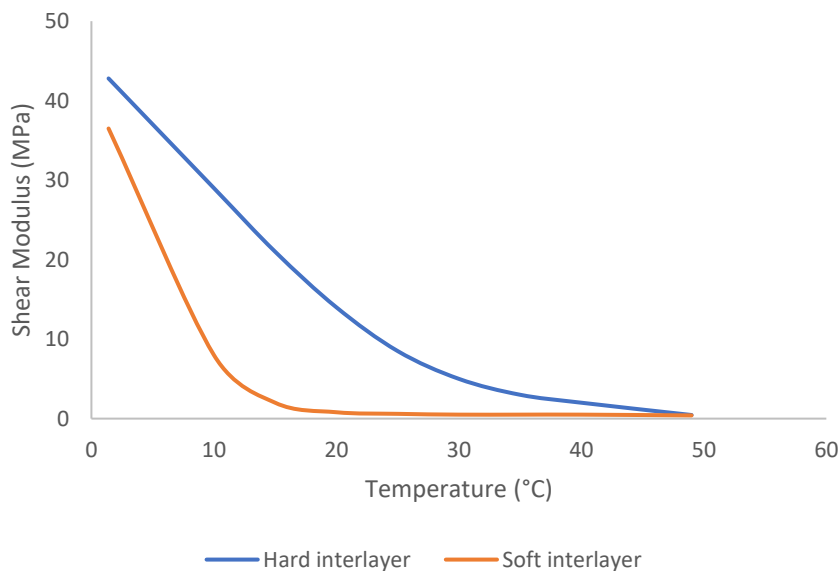
$$h_{1,ef:\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef:w}^3}{h_1 + 2\Gamma h_{s;2}}}, \quad h_{2,ef:\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef:w}^3}{h_2 + 2\Gamma h_{s;1}}} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $h_{s;i} = \frac{h_i H}{h_1 + h_2}$

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมและการทดสอบของกระจกลามิเนต

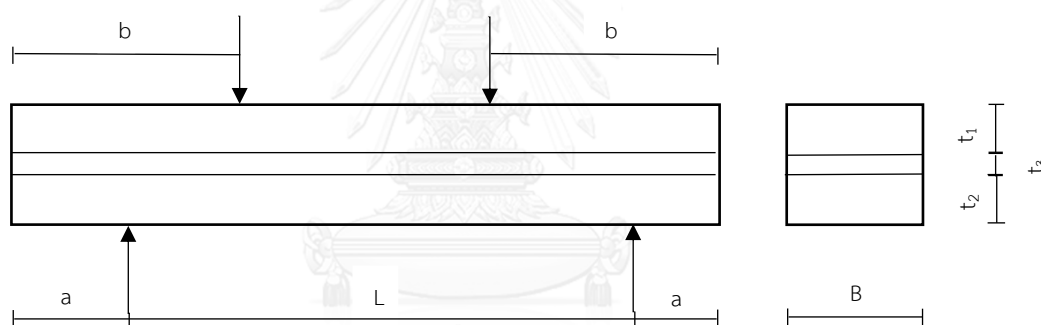
Hooper [1] ศึกษาโมดูลัสเฉือนของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลสองชนิด ชนิดแรกคือ Hard interlayer ใช้ในงานกระจกลามิเนตที่เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องบิน อีกชนิดคือ Soft interlayer ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 1.4, 25 และ 49 องศาเซลเซียส ได้ผลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและโมดูลัสแรงเฉือนดังรูปที่ 2-19



รูปที่ 2-19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและโมดูลัสเฉือนของโพลีไวนิลบิวทิล [1]

นอกจากนี้ยังศึกษาพฤติกรรมการคืบของกระจกลามิเนตจากการทดลองการคืบ (Creep) ของคานกระจกลามิเนตรับแรงกด 4 จุด (four-point bending) โดยพิจารณาการรับแรงต่อเนื่อง

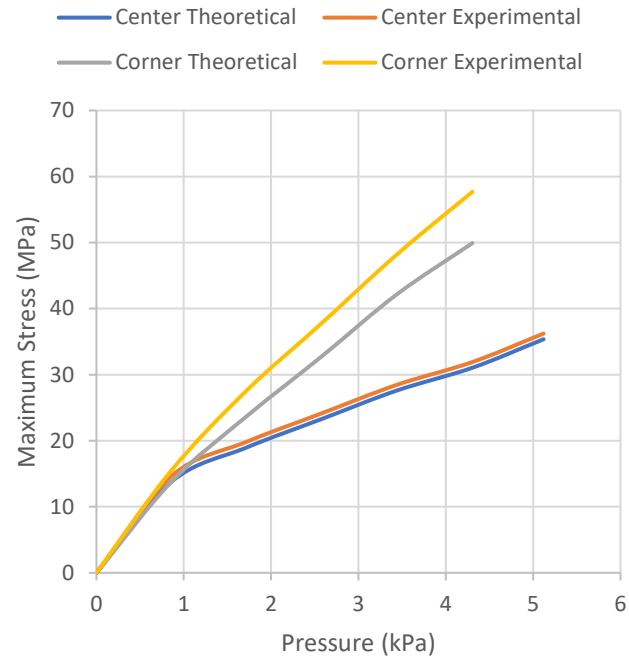
ระยะเวลา 80 วันที่อุณหภูมิ 1.4, 25 และ 49 องศาเซลเซียส พบว่าการต้านทานการตัดขึ้นอยู่กับความหนาและโมดูลัสเฉือนของชั้นฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลรัล ที่ชั้นฟิล์มความหนามากจะมีโมดูลัสเฉือนน้อยกว่าชั้นฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส การแอนตัวของกระจกเท่ากับ 1.41 มิลลิเมตรและไม่มีการคืบ ขณะที่โมดูลัสเฉือนของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลรัลมีค่าน้อยมากจนใกล้เคียง 0 ดังนั้นกระจกลามิเนตจะมีพฤติกรรมแบบการตัดแยกชั้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การแอนตัวของกระจกเท่ากับ 1.3 มิลลิเมตรและมีการคืบเพียงเล็กน้อย ดังนั้นพฤติกรรมของกระจกลามิเนตใกล้เคียงกับการตัดแยกชั้น และที่อุณหภูมิ 1.4 องศาเซลเซียส การแอนตัวของกระจกในช่วงเวลาเริ่มต้นเท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมินี้กระจกมีพฤติกรรมแบบการตัดเป็นชั้นเดียวกัน งานวิจัยนี้สรุปว่าที่อุณหภูมิ 1.4 องศาเซลเซียส กระจกจะเกิดการคืบและมีพฤติกรรมแบบการตัดเป็นชั้นเดียวกัน ในขณะที่พฤติกรรมแบบการตัดแยกชั้น จะเกิดที่อุณหภูมิ 25 และ 49 องศาเซลเซียส



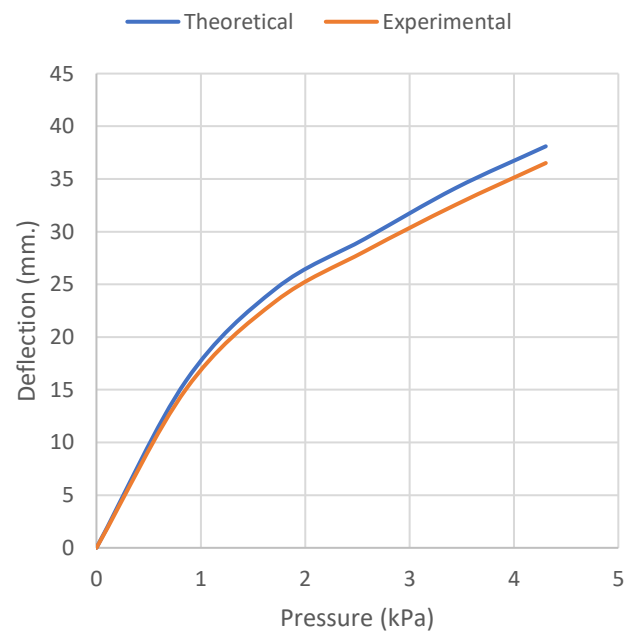
รูปที่ 2-20 ลักษณะตัวอย่างการทดสอบ [1]

Behr et al. [2] ศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนต โดยทำการทดลองหาค่าความเค้นสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางและขอบกระจก รวมถึงหาค่าการโก่งตัวของกระจกชั้นเดียว (Monolithic Glass) และกระจกแยกชั้น (Layered Glass) ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี ได้ผลการทดลองและจากทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 2-21 และรูปที่ 2-22 สำหรับการตัดเป็นชั้นเดียวกัน และ รูปที่ 2-23 และรูปที่ 2-24 สำหรับการตัดแยกชั้น รวมไปถึงทำการศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตเมื่อรับแรงระยะสั้น ๆ 15 วินาที ที่อุณหภูมิ 0, 22, 38, 49 และ 77 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง 22 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมเป็นแบบการตัดเป็นชั้นเดียวกัน ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิห้อง กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมเป็นแบบ การตัดแยกชั้นไม่สามารถส่งผ่านแรงเฉือนได้

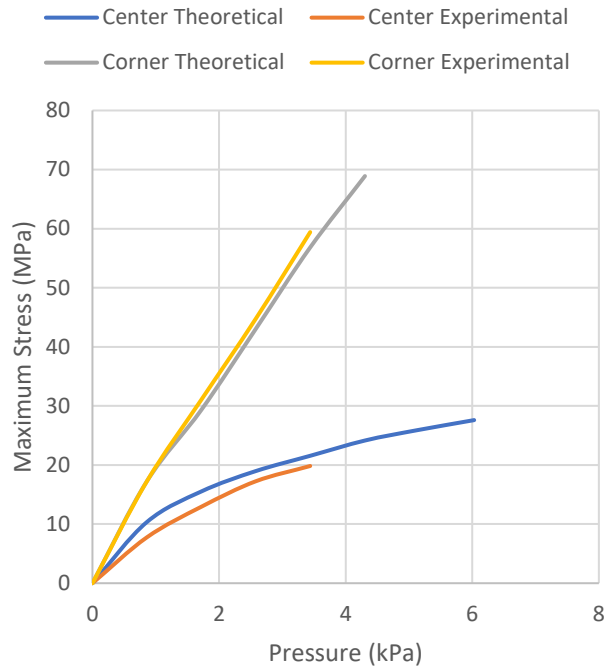




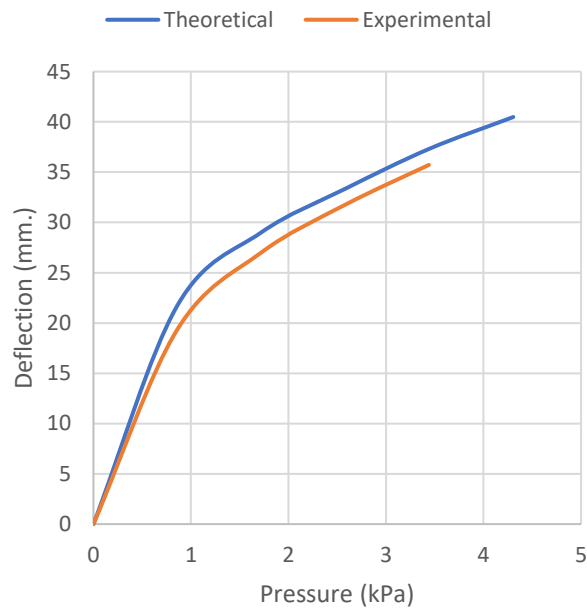
รูปที่ 2-21 ผลการเปรียบเทียบความเค้นสูงสุดและแรงกระทำของกระจกลามิเนต  
ตัดเป็นชิ้นเดียวกัน [2]



รูปที่ 2-22 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวและแรงกระทำของกระจกลามิเนตตัดเป็นชิ้นเดียวกัน [2]

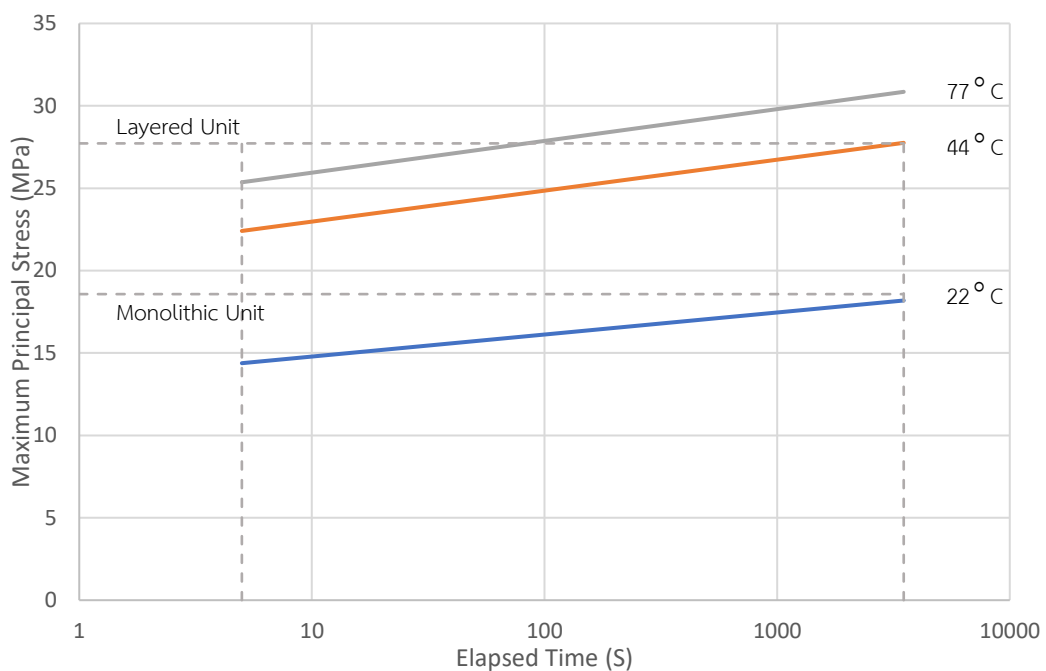


รูปที่ 2-23 ผลการเปรียบเทียบความเค้นสูงสุดและแรงกระทำของกระจกลามิเนต  
ตัดแยกชั้น [2]

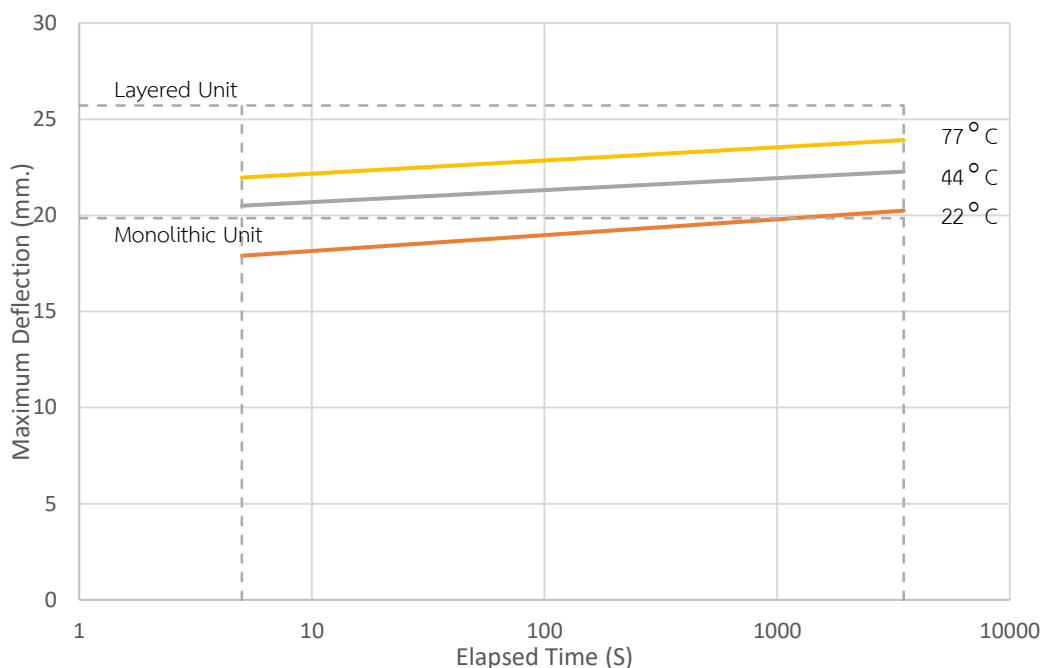


รูปที่ 2-24 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวและแรงกระทำของ  
กระจกลามิเนตตัดแยกชั้น [2]

Behr et al. [3] ทำการทดสอบกระจกลามิเนตเพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาและอุณหภูมิ ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม 0.76 และ 1.52 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกระทำกระจายสม่ำเสมอต่อเนื่อง 1 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 22, 49 และ 77 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าความเค้นและการแอ่นตัวของชั้นฟิล์ม 0.76 และ 1.52 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ขณะที่เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง จะมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นรวมถึงการแอ่นตัวเพิ่มขึ้น 10% ที่ทุกอุณหภูมิ สรุปได้ว่าอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของกระจกลามิเนตมากกว่าความหนาของชั้นฟิล์ม



รูปที่ 2-25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความเค้นสูงสุด [2]



รูปที่ 2-26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการโก่งสูงสุด [2]

Behr et al. [13] ศึกษาพฤติกรรมจากงานวิจัยในอดีต ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัว (Load-Deflection Behavior), ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเค้น (Load-Stress Relationship) และความแข็งแรง (Ultimate Strength) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ระยะเวลาในการรับแรง และความหนาของชั้นฟิล์ม สรุปว่าภายใต้แรงกระทำระยะสั้น กระจกلاميเนตจะมีพฤติกรรมแบบการตัดเป็นชิ้นเดียวกันที่อุณหภูมิน้อยกว่าอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส กระจกلاميเนตจะเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นแบบการตัดแยกชั้นที่อุณหภูมิประมาณ 49 องศาเซลเซียส ในขณะที่ภายใต้แรงกระทำต่อเนื่อง กระจกلاميเนตจะมีพฤติกรรมเป็นแบบการตัดเป็นชิ้นเดียวกันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส

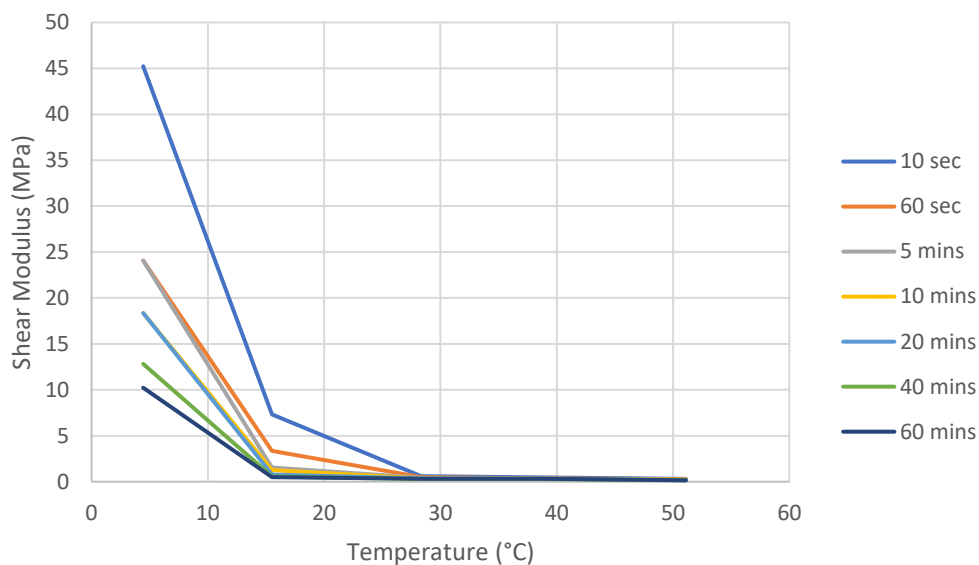
Brackin [14] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อโมดูลัสเฉือนของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล เพื่อคำนวณหาโมดูลัสแรงเฉือนโดยการทดลองและใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ระยะเวลาต่อเนื่อง 10 วินาที, 1, 5, 10, 20, 40 และ 60 นาที และอุณหภูมิ 40, 60, 83, 102 และ 124 องศาฟาเรนไฮต์ พบว่าโมดูลัสแรงเฉือนของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาของแรงกระทำ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและโมดูลัสเฉือนของชั้นฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล ดังรูปที่ 2-27

ตารางที่ 2-7 โมดูลัสเฉือนของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ [14]

อุณหภูมิ (°C)	โมดูลัสเฉือน (MPa)						
	10 วินาที	1 นาที	5 นาที	10 นาที	20 นาที	40 นาที	60 นาที
5	45.2290	24.0688	24.0688	18.3580	18.3580	12.8190	10.2300
15	7.3150	3.3470	1.5270	1.2710	0.7870	0.5820	0.5005
28	0.6040	0.4850	0.4110	0.3670	0.3530	0.2840	0.3245
39	0.4560	0.3670	0.3240	0.3240	0.3130	0.2840	0.3070
49	0.3070	0.2265	0.2200	0.2020	0.1679	0.1670	0.1447

ตารางที่ 2-8 โมดูลัสยืดหยุ่นของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ [14]

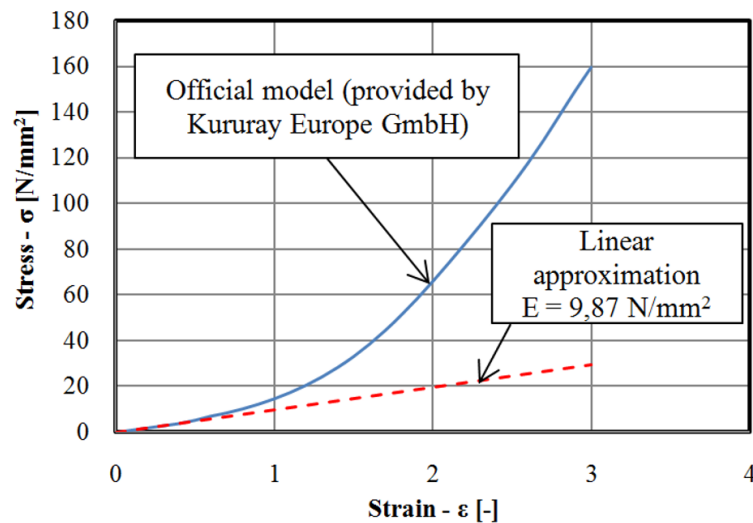
อุณหภูมิ (°C)	โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)						
	10 วินาที	1 นาที	5 นาที	10 นาที	20 นาที	40 นาที	60 นาที
5	131.164	69.7995	69.7995	53.2382	53.2382	37.1751	29.6670
15	21.2135	9.7063	4.4283	3.6859	2.2823	1.6878	1.4515
28	1.7516	1.4065	1.1919	1.0643	1.0237	0.8236	0.9411
39	1.3224	1.0643	0.9396	0.9396	0.9077	0.8236	0.8903
49	0.8903	0.7729	0.6380	0.5858	0.4869	0.4843	0.4196



รูปที่ 2-27 โมดูลัสแรงเฉือนของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ [14]

#### 2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Molnar et al. [15] ศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของกระจกและฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลจากการทดลองรับแรงกด 4 จุด เปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS พิจารณากระจกมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) และฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Elastic) ประมาณโดยการใช้ Multi-Linear Elastic Model มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.45 ดังรูปที่ 2-28 สรุปว่าเมื่อกระจกลามิเนตมีความหนาของกระจกแผ่นล่างน้อยกว่ากระจกแผ่นบน ค่าความเค้นแรงดึงที่ผิวล่างของกระจกลามิเนตจะลดลง 15-20%



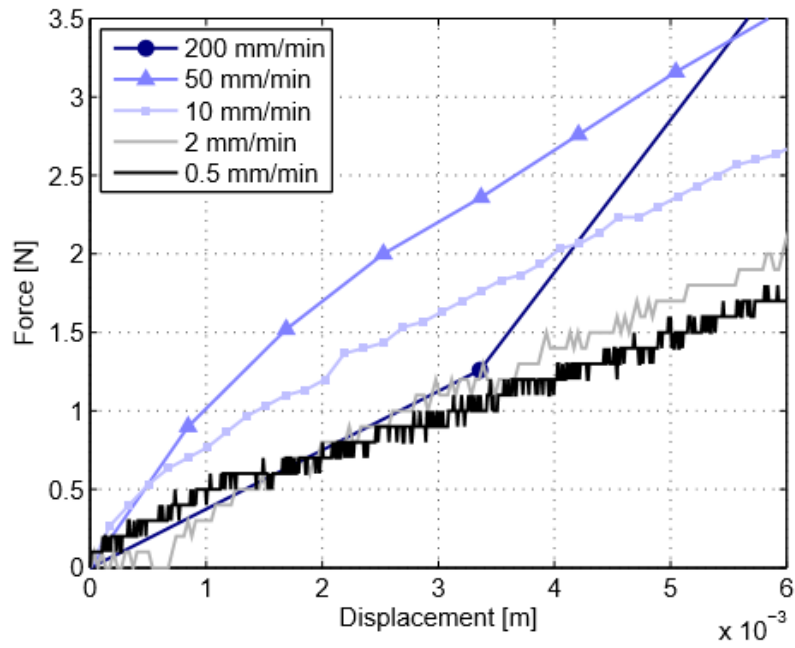
รูปที่ 2-28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล [15]

Fors [16] ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลที่มีความหนาและชนิดต่างกัน โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ที่อัตรา 200, 50, 10, 2 และ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS ในการเปรียบเทียบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มและเปลี่ยนแปลงระยะเวลาของแรงกระทำ โดยการจำลองฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลขนาด 60 x 20 x 0.76 มิลลิเมตร เป็น Solid Element Quadratic bricks (C3D20) ขนาด Mesh 0.001 x 0.001 มิลลิเมตร เนื่องจากฟิล์มมีคุณสมบัติยืดหยุ่นหนืด (Viscoelastic) ดังนั้นโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสเฉือนจึงขึ้นอยู่กัเวลา ซึ่งมีค่าคงที่ของโพรนี้ดังตารางที่ 2-9 ค่าคงที่ของโพรนี้

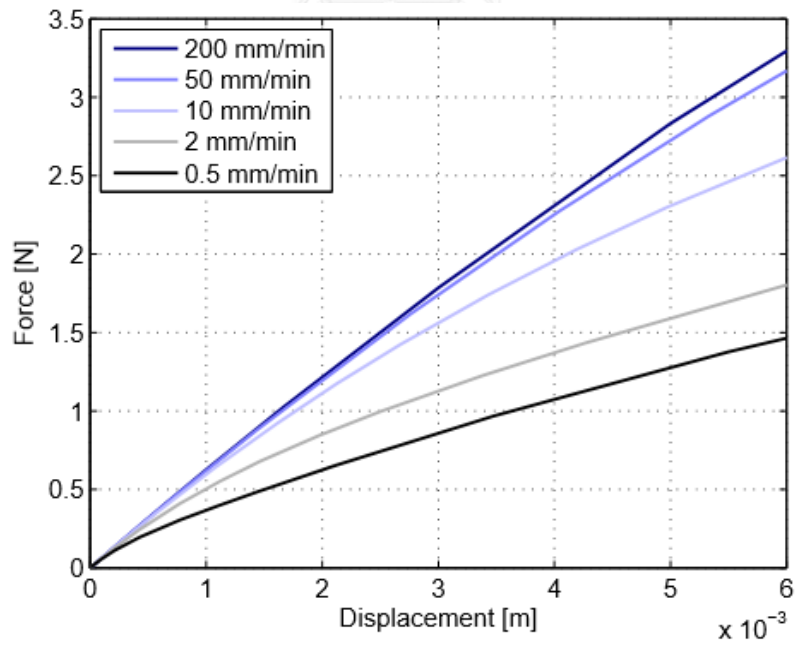
ตารางที่ 2-9 ค่าคงที่ของโพรนี้ [16]

	$g_i$	$k_i$	$\tau_i$
1	0.551	0.551	32.36
2	0.448	0.448	4164

ผลวิจัยสรุปว่าฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลที่มีความหนาและชนิดต่างกันได้ผลทดสอบที่ต่างกันและการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS มีผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง ดังรูปที่ 2-29 และรูปที่ 2-30



รูปที่ 2-29 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และน้ำหนักกระทำจากการทดลอง



รูปที่ 2-30 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และน้ำหนักกระทำจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

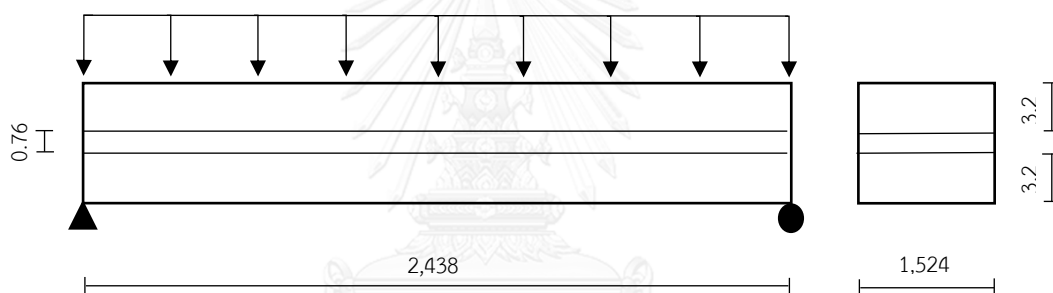


### บทที่ 3

#### การสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

##### 3.1 ขนาดและชนิดของวัสดุ

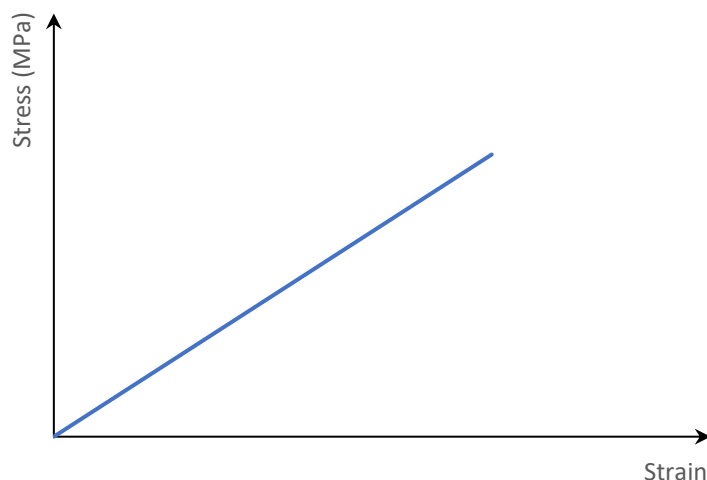
ขนาดและชนิดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้ จะใช้ขนาดตามงานวิจัยในอดีต [2, 3] คือ  $2,438 \times 1,524 \times 7.16$  มิลลิเมตร ประกอบด้วยกระจกธรรมดา (Annealed Glass) 2 ชั้น ความหนาชั้นละ 3.2 มิลลิเมตร ยึดติดกันด้วยฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลรัลความหนา 0.76 มิลลิเมตร ใช้น้ำหนักกระทำสม่ำเสมอ 5.17 กิโลปาสคาล โดยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 15 วินาที และใช้น้ำหนักกระทำสม่ำเสมอเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 1.4 กิโลปาสคาล ในเวลา 5 วินาที และลดน้ำหนักกระทำค้างไว้ต่อเนื่องเป็นเวลา 60 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 3-1 ลักษณะคานกระจกลามิเนตในแบบจำลอง

##### 3.2 การจำลองคุณสมบัติของกระจก

การจำลองพฤติกรรมของกระจก ในงานวิจัยนี้ใช้กระจกที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นตามกฎของฮุก (Hooke's law) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของกระจก

### 3.3 การจำลองคุณสมบัติของโพลีไวนิลบิวทิล

การศึกษาพฤติกรรมของโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น ในแบบจำลองนี้ทำการจำลองคุณสมบัติของโพลีไวนิลบิวทิลโดยพิจารณาให้มีคุณสมบัติยืดหยุ่นชนิดโดยใช้แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์

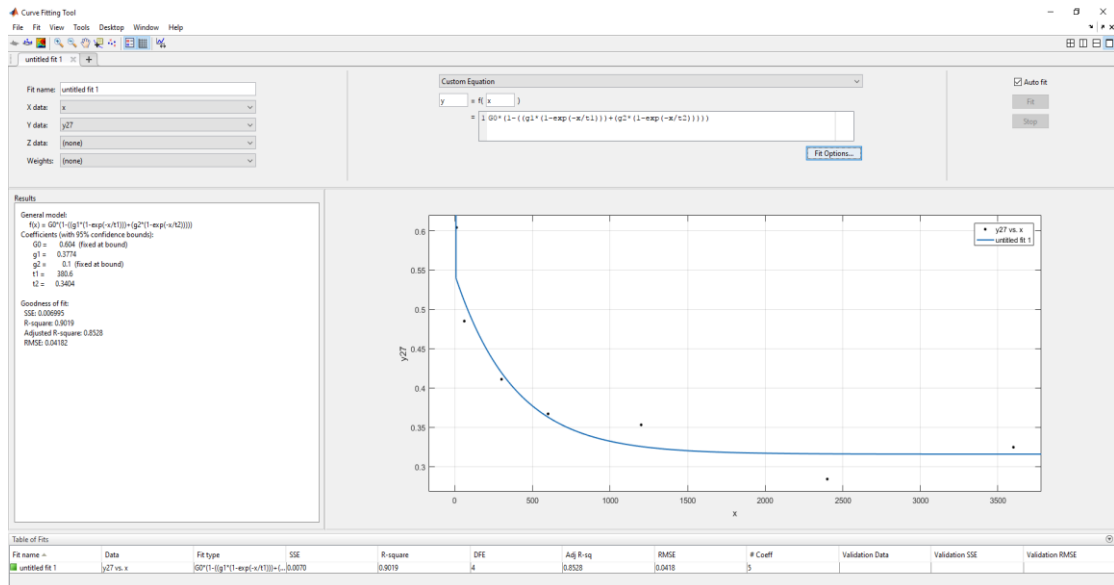
#### 3.3.1 แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์

โพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นชนิดสามารถอธิบายพฤติกรรมได้ด้วยแบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ดังสมการ 2.4 ซึ่งจากผลงานวิจัยของ Brackin [14] จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเชื่อมกับเวลาต่าง ๆ ได้ดังแสดงในสมการ 2.4 เมื่อกำหนดให้ใช้อุณหภูมิ 2 ชุด

$$G(t) = G_0[1 - (g_1(1 - e^{-t/\tau_1}) + g_2(1 - e^{-t/\tau_2}))] \quad (3.1)$$

#### 3.3.2 การหาค่าคงที่ของอนุกรมพอร์นีย์

การหาค่าคงที่ของอนุกรมพอร์นีย์  $g_i$  และ  $\tau_i$  จะใช้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเชื่อมกับเวลาจากงานวิจัยของ Brackin [14] ซึ่งจะสามารถหาค่าคงที่ของอนุกรมพอร์นีย์ได้โดยใช้วิธีเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve Fitting) โดยใช้โปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3-3 การเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลด้วยโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 3-1 ค่าคงที่ของอนุกรมพหุนามจากโปรแกรม MATLAB

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$g_1$	$g_2$	$\tau_1$	$\tau_2$
5	0.5396	0.1	85.26	0.4456
15	0.8166	0.1	65.26	1267
28	0.3774	0.1	380.6	0.3404
39	0.1	0.2323	0.2551	196.4
49	0.4111	0.1	285.3	2283

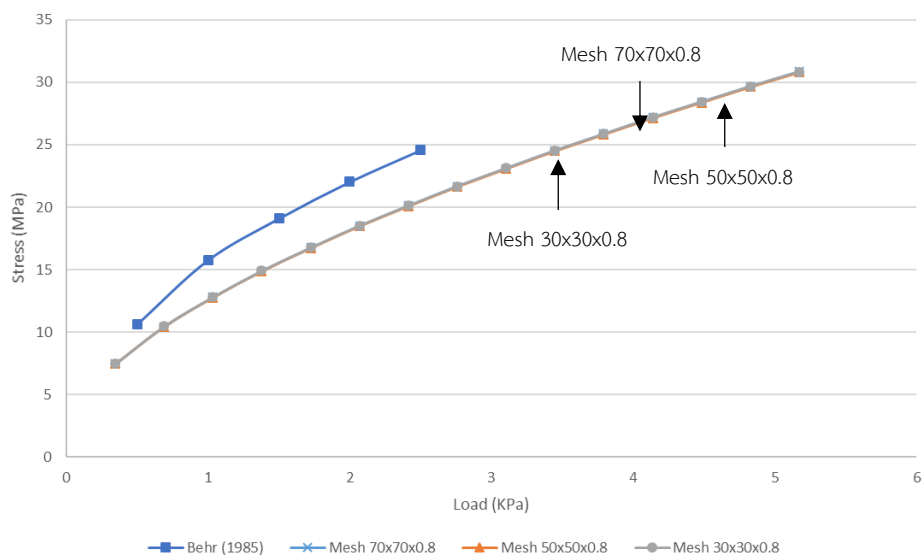
### 3.4 เงื่อนไขขอบเขต

แบบจำลองกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของกระจกลามิเนต ขอบด้านซ้ายของกระจกลามิเนตให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  เท่ากับ 0 ( $U_1, U_2, U_3=0$ ) และขอบกระจกลามิเนตด้านขวาและกระจกลามิเนตทั้งด้านซ้ายและขวา ให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน  $y$  และ  $z$  เท่ากับ 0 ( $U_2, U_3=0$ )

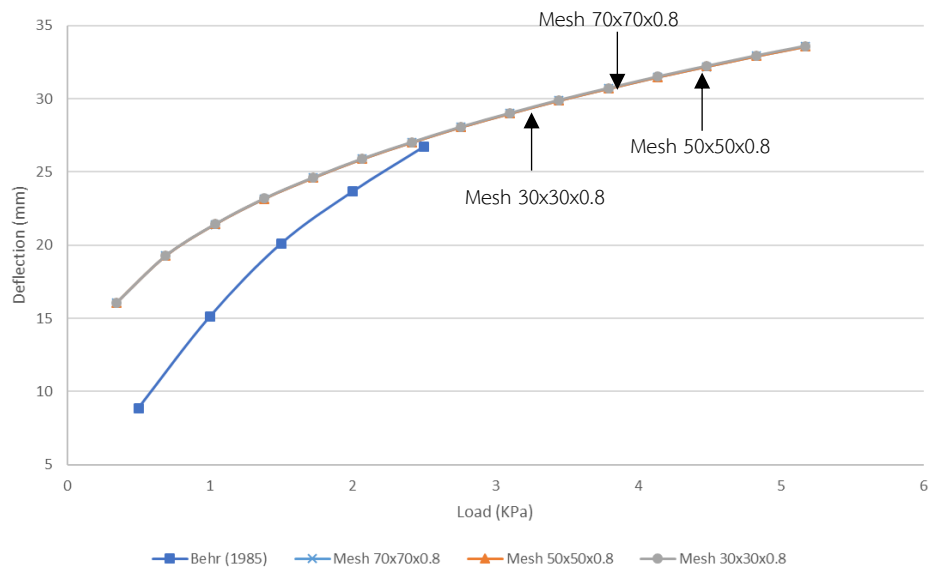
### 3.5 ชนิดของชิ้นส่วนและการแบ่งชิ้นส่วน

#### 3.5.1 การแบ่งขนาดชิ้นส่วน (Mesh)

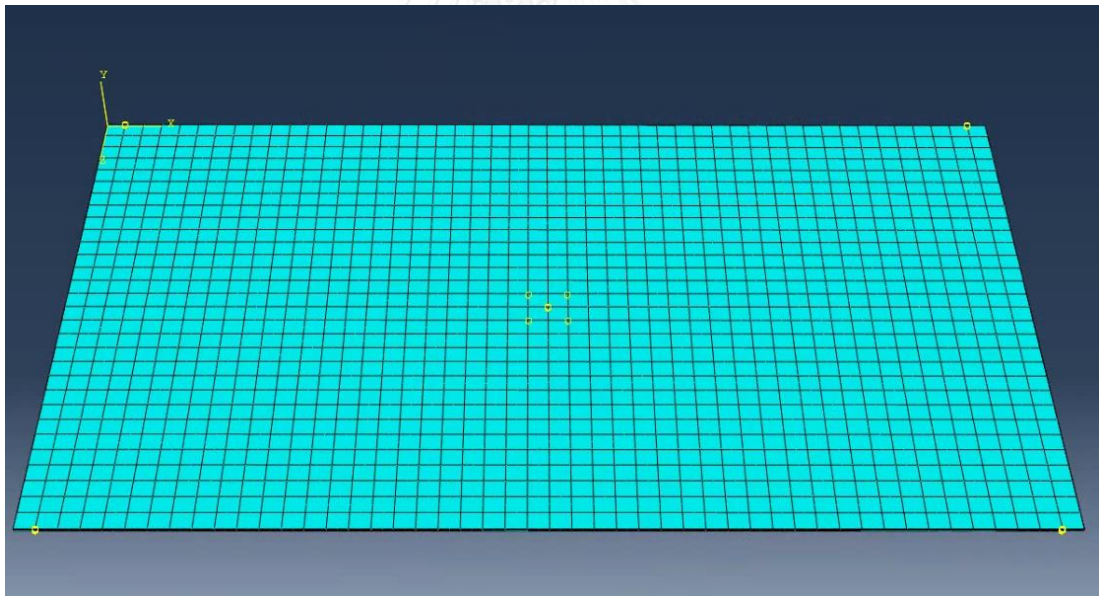
ในการกำหนดความหนาของชิ้นส่วนในแบบจำลอง งานวิจัยนี้ทำการแบ่งความหนาของชิ้นส่วนกระจกแต่ละชั้นออกเป็น 4 ส่วน ส่วนละ 0.8 มิลลิเมตร และความหนาของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทีรัลออกเป็น 1 ส่วน ความหนา 0.76 มิลลิเมตร และการกำหนดขนาดของชิ้นส่วน งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบขนาดของชิ้นส่วนจำนวน 3 ขนาด คือ 30x30x0.8, 50x50x0.8 และ 70x70x0.8 มิลลิเมตร เพื่อกำหนดขนาดของชิ้นส่วนให้เหมาะสมกับแบบจำลอง พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองในการจำลองด้วยชิ้นส่วนทั้ง 3 ขนาด มีค่าตอบใกล้เคียงกันมาก ในงานวิจัยนี้จึงเลือกชิ้นส่วนขนาด 50x50x0.8 มิลลิเมตร ในการสร้างแบบจำลอง



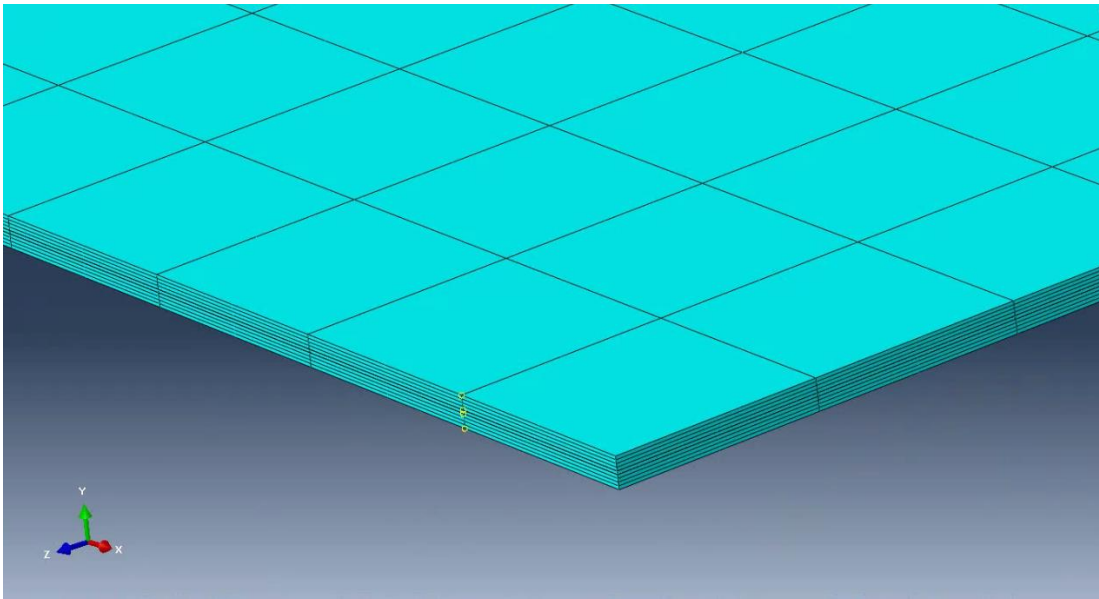
รูปที่ 3-4 การเปรียบเทียบขนาดของชิ้นส่วน



รูปที่ 3-5 การเปรียบเทียบขนาดของชิ้นส่วน



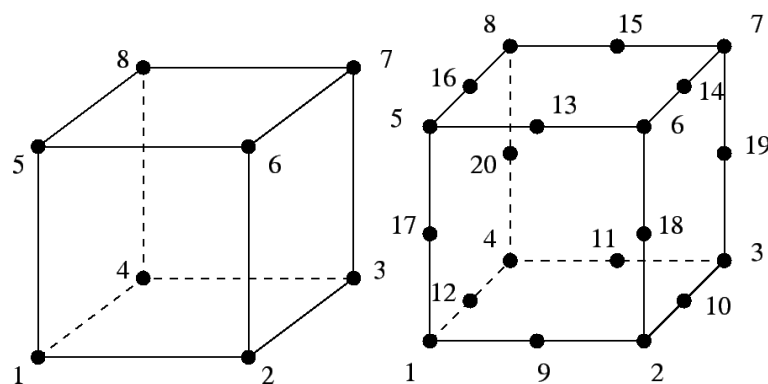
รูปที่ 3-6 การแบ่งขนาดของชิ้นส่วนในแบบจำลอง



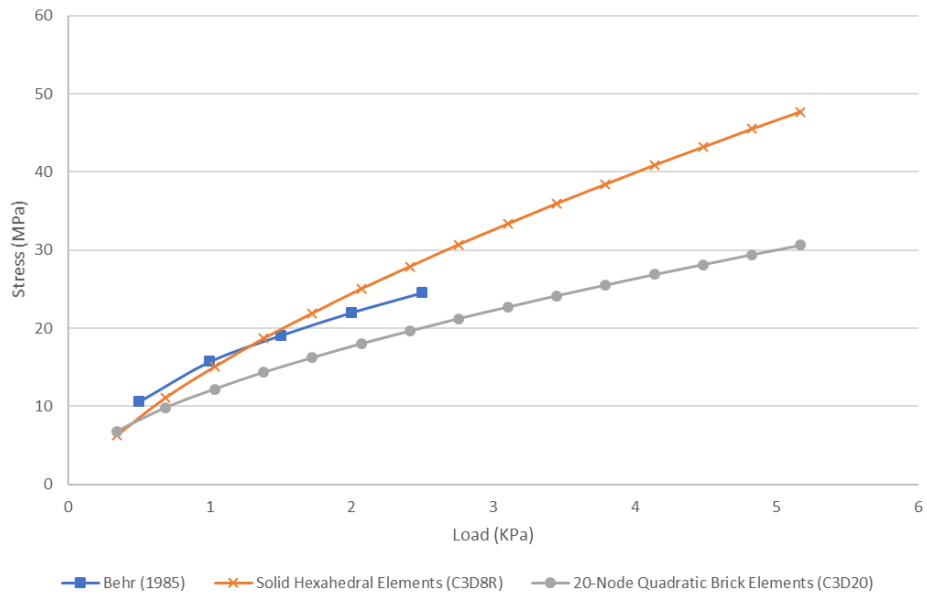
รูปที่ 3-7 การแบ่งความหนาของชั้นส่วนในแบบจำลอง

### 3.5.2 ชนิดของชั้นส่วน

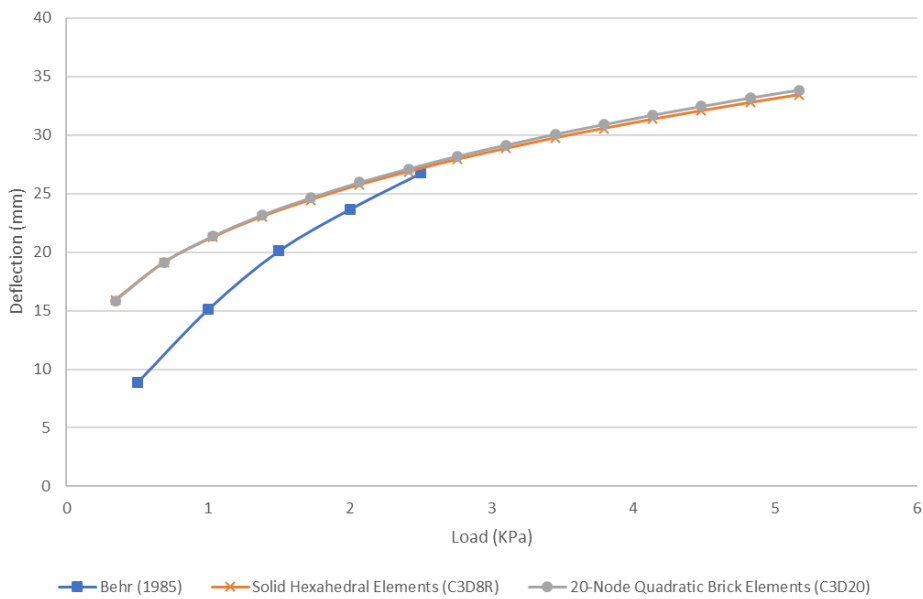
งานวิจัยนี้ทำการจำลองชั้นส่วนของกระจกลามิเนตและฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS ในรูปแบบ 3 มิติ โดยเปรียบเทียบชนิดของชั้นส่วน Solid Hexahedral Elements (C3D8R) กับ 20-Node Quadratic Brick Elements (C3D20) พบว่าชนิดของชั้นส่วนลูกบาศก์ที่ประกอบด้วย 20 จุด หรือ 20-Node Quadratic Brick Elements (C3D20) ได้ผลจากการจำลองชั้นส่วนใกล้เคียงกับผลจากงานวิจัยในอดีต [2] มากกว่าชนิดของชั้นส่วนลูกบาศก์ที่ประกอบด้วย 8 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3-9 การเปรียบเทียบชนิดของชั้นส่วน C3D8R กับ C3D20 รูปที่ 3-9 และรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-8 ชั้นส่วน Solid Hexahedral Elements (C3D8R) และ 20-Node Quadratic Brick Elements (C3D20)



รูปที่ 3-9 การเปรียบเทียบชนิดของชิ้นส่วน C3D8R กับ C3D20



รูปที่ 3-10 การเปรียบเทียบชนิดของชิ้นส่วน C3D8R กับ C3D20

### 3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต

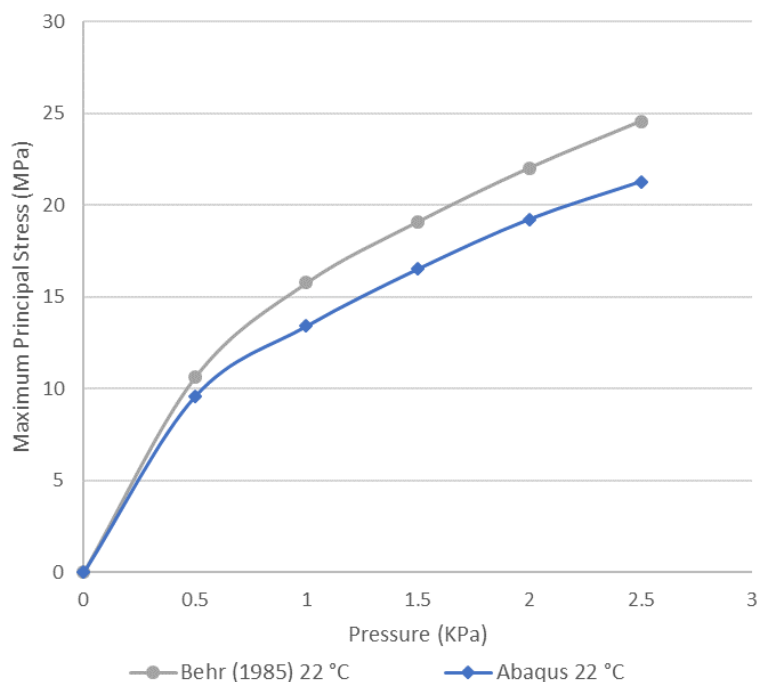
งานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเทียบกับงานวิจัยของ Behr et al. [2, 3] ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้น ซึ่งทำการทดลองคำนวณหาค่าความเค้นสูงสุดและการโก่งตัวของคาน

กระจกลามิเนตขนาด 1,524 x 2,438 x 7.16 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกระทำกระจายสม่ำเสมอระยะสั้น 15 วินาที และต่อเนื่อง 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 22 และ 49 องศาเซลเซียส

### 3.6.1 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับ Behr et al. (1985)

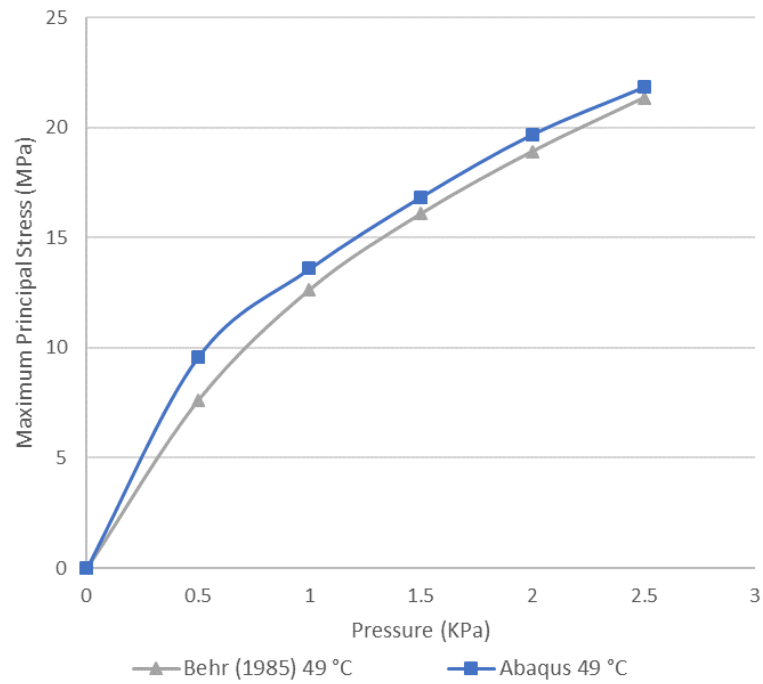
จากการเปรียบเทียบความเค้นและการโก่งตัวจากการทดสอบในอดีตกับผลที่ได้จากแบบจำลอง พบว่าความเค้นที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าความเค้นที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่ความเค้นที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียสของแบบจำลองกับการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน

ความเค้นจากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียสมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส ต่างกับความเค้นที่ได้จากการทดลอง ความเค้นที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียสมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส รูปที่ 3-11 ในขณะที่การเปรียบเทียบค่าการโก่งตัว ค่าการโก่งตัวที่ได้จากแบบจำลองทั้งที่อุณหภูมิ 22 และ 49 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังรูปที่ 3-12 ซึ่งสามารถหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของทั้งความเค้น และค่าการโก่งตัวได้ดังตารางที่ 3-2 ถึงตารางที่ 3-5

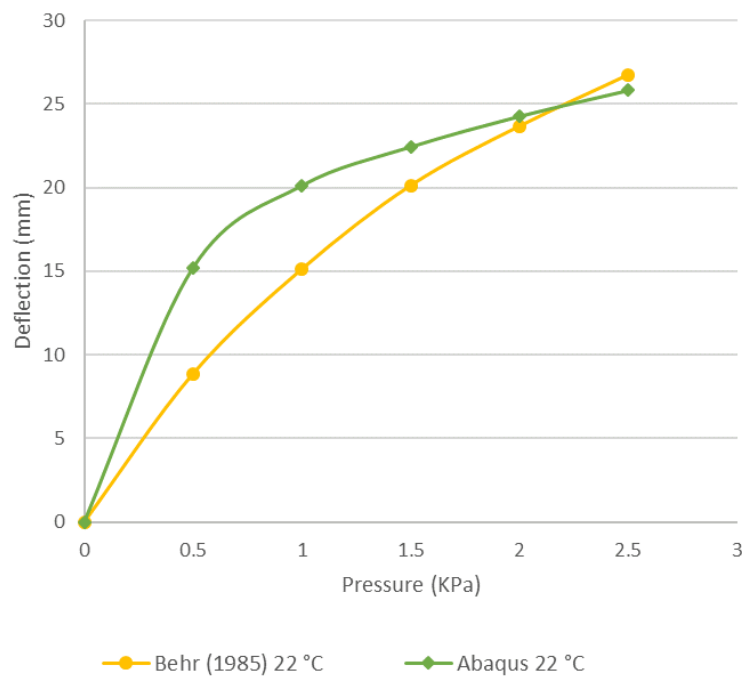


รูปที่ 3-11 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต

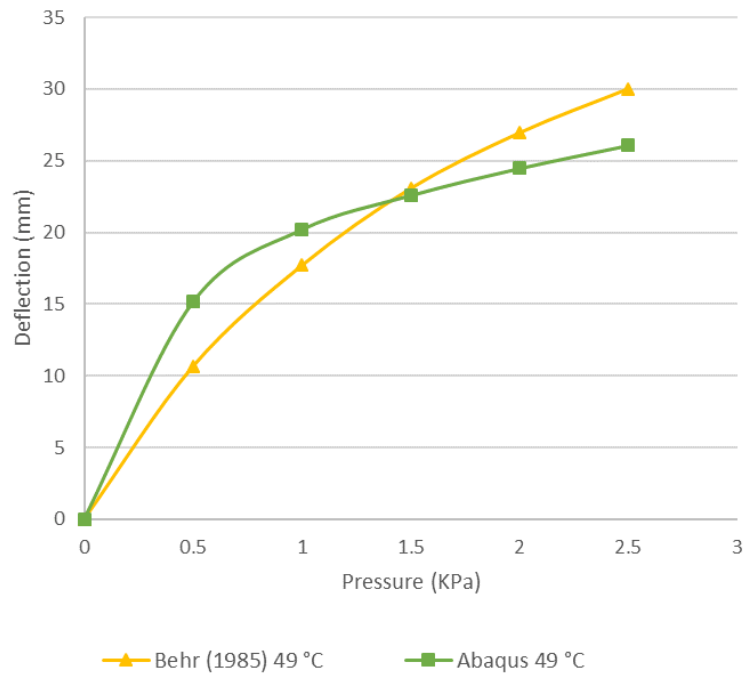




รูปที่ 3-12 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต



รูปที่ 3-13 การเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต



รูปที่ 3-14 การเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต

ตารางที่ 3-2 เปอร์เซนต์ความแตกต่างของความเค้น ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

แรง (KPa)	ความเค้นจากการทดสอบ	ไฟไนต์เอลิเมนต์	% ความแตกต่าง
0.5	10.62	9.57	9.79
1	15.76	13.39	14.99
1.5	19.09	16.49	13.56
2	22.03	19.21	12.78
2.5	24.57	21.25	13.48

ตารางที่ 3-3 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้น ที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส

แรง (KPa)	การทดสอบ	ไฟไนต์เอลิเมนต์	% ความแตกต่าง
0.5	7.62	9.59	25.76
1	12.65	13.59	7.46
1.5	16.10	16.85	4.69
2	18.92	19.69	4.09
2.5	21.35	21.84	2.29

ตารางที่ 3-4 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างค่าการโก่งตัว ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

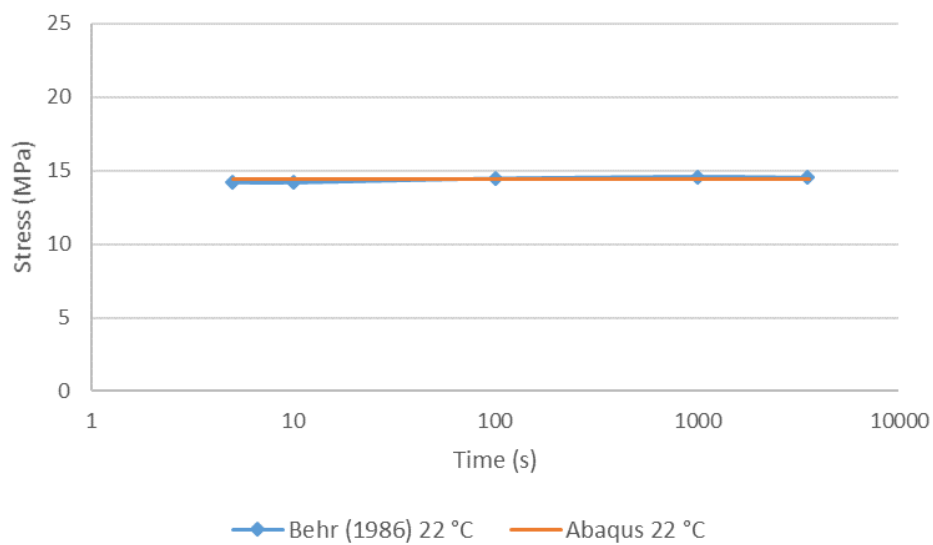
แรง (KPa)	การทดสอบ	ไฟไนต์เอลิเมนต์	% ความแตกต่าง
0.5	8.86	15.22	71.64
1	15.12	20.13	33.10
1.5	20.12	22.44	11.51
2	23.67	24.27	2.55
2.5	26.74	25.82	3.44

ตารางที่ 3-5 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างค่าการโก่งตัว ที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส

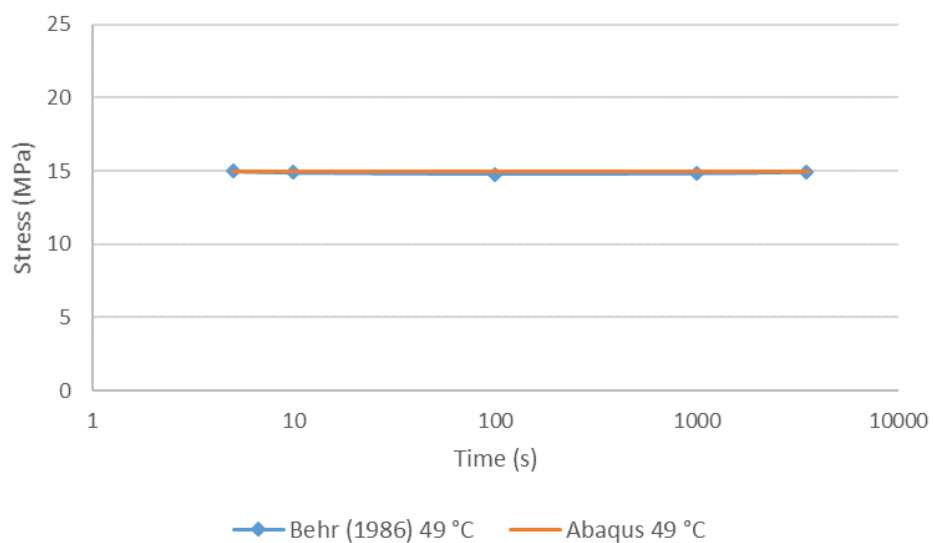
แรง (KPa)	การทดสอบ	ไฟไนต์เอลิเมนต์	% ความแตกต่าง
0.5	10.66	15.17	42.33
1	17.69	20.22	14.25
1.5	23.07	22.60	2.04
2	26.95	24.49	9.13
2.5	30.03	26.09	13.12

### 3.6.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับ Behr et al. (1986)

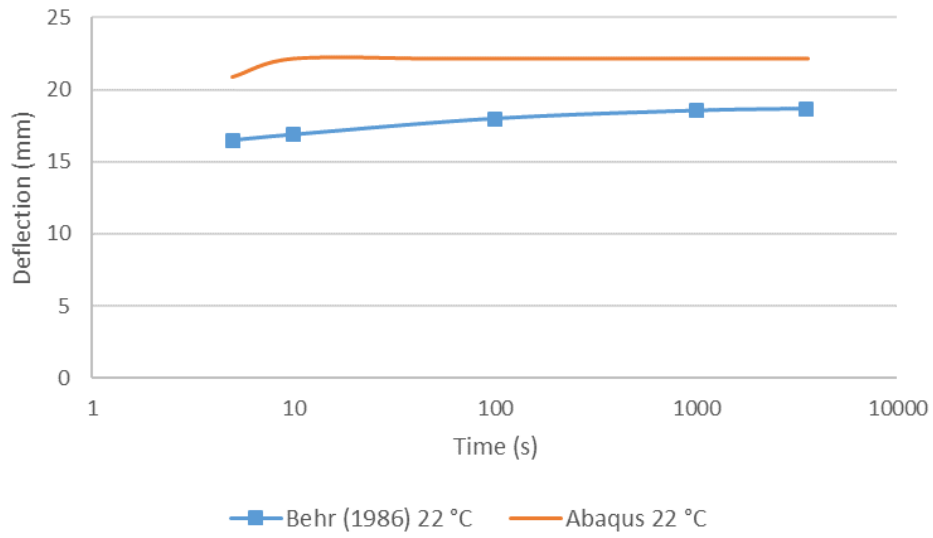
จากการเปรียบเทียบความเค้นและการโก่งตัวจากการทดสอบในอดีตกับผลที่ได้จากแบบจำลอง พบว่าความเค้นจากแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อุณหภูมิ 22 และ 49 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลองมาก ดังรูปที่ 3-15 และรูปที่ 3-16 ในขณะที่ผลค่าการโก่งตัวที่ได้จากแบบจำลอง มีค่ามากกว่าค่าการโก่งตัวที่ได้จากการทดลอง ดังรูปที่ 3-17 และรูปที่ 3-18 และสามารถหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างได้ดังตารางที่ 3-6 ถึงตารางที่ 3-9



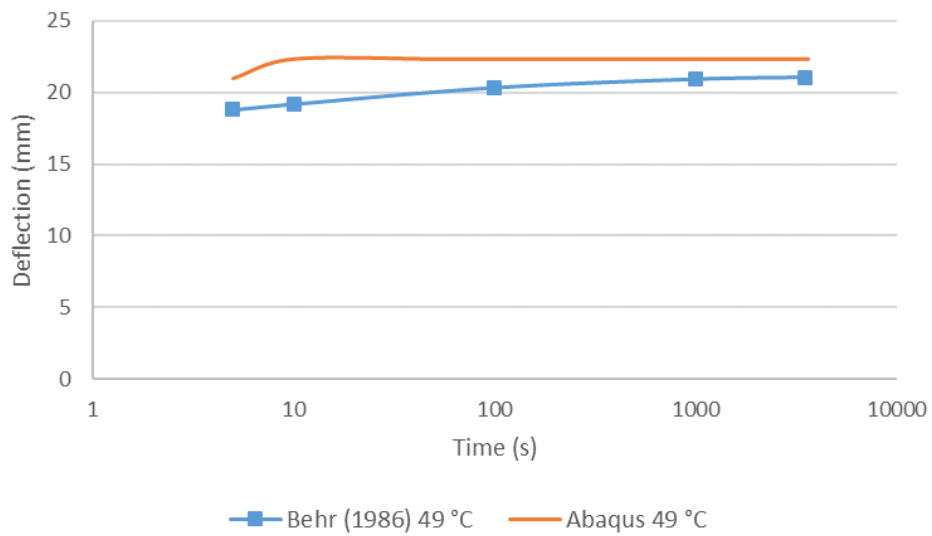
รูปที่ 3-15 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต



รูปที่ 3-16 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต



รูปที่ 3-17 การเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต



รูปที่ 3-18 การเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต

ตารางที่ 3-6 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้น ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	ความเค้นจากการทดสอบ	ไฟไนต์เอลิเมนต์	% ความแตกต่าง
5	14.17	14.41	1.67
10	14.17	14.41	1.67
100	14.44	14.41	0.21
1000	14.55	14.41	0.98
3500	14.50	14.41	0.61

ตารางที่ 3-7 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้น ที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	ความเค้นจากการทดสอบ	ไฟไนต์เอลิเมนต์	% ความแตกต่าง
5	14.99	14.95	0.29
10	14.88	14.95	0.45
100	14.77	14.95	1.17
1000	14.82	14.95	0.81
3500	14.94	14.95	0.07

ตารางที่ 3-8 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าการโก่งตัว ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	ความเค้นจากการทดสอบ	ไฟไนต์เอลิเมนต์	% ความแตกต่าง
5	16.47	19.28	14.57
10	16.86	20.84	19.12
100	17.97	22.16	18.91
1000	18.52	22.16	16.42
3500	18.65	22.16	15.83

ตารางที่ 3-9 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างค่าการโค้งตัว ที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	ความเค้นจากการทดสอบ	ไฟไนต์เอลิเมนต์	% ความแตกต่าง
5	18.82	19.36	2.78
10	19.21	20.98	8.45
100	20.35	22.36	8.98
1000	20.94	22.36	6.35
3500	21.07	22.36	5.76

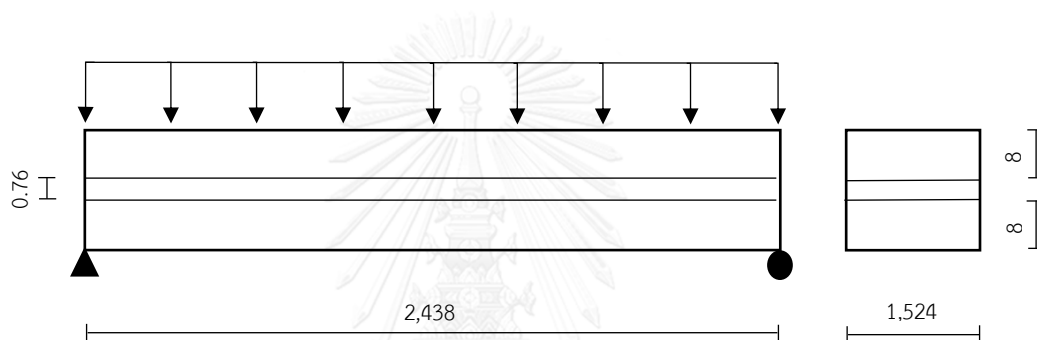


## บทที่ 4

### การสร้างแบบจำลองตามกรณีศึกษา

#### 4.1 ขนาดและชนิดของวัสดุ

ในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS ตามกรณีศึกษา จะทำการจำลองคานกระจกลามิเนตช่วงเดียว (Simply Supported) ขนาด  $2,438 \times 1,524 \times 16.76$  มิลลิเมตร ประกอบด้วยกระจกธรรมดา (Annealed Glass) 2 ชั้น ความหนาชั้นละ 8 มิลลิเมตร ยึดติดกันด้วยฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลรัลความหนา 0.76 มิลลิเมตร โดยมีแรงลมกระทำตามมาตรฐานการคำนวณแรงลม [9] ซึ่งคำนวณแรงลมที่กระทำต่อผนังภายนอกได้เท่ากับ 1,570 นิวตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4-1 ลักษณะคานกระจกลามิเนตในแบบจำลองตามกรณีศึกษา

#### 4.2 ตัวแปรและกรณีศึกษา

จากงานวิจัยในอดีตพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการรับแรงเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของกระจกลามิเนต [2, 13] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาตัวแปรคือระยะเวลาที่แรงกระทำ ระยะสั้น 60 วินาที และระยะเวลาที่แรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที ที่อุณหภูมิ 5, 15, 28, 39 และ 49 องศาเซลเซียส รวมไปถึงศึกษาตัวแปรเพิ่มเติมนอกเหนือจากข้อมูลจากผลการทดลอง คือที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส จากแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนและอุณหภูมิ สรุปได้ดังตารางที่ 4-1



ตารางที่ 4-1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ระยะเวลาในการรับแรง	อุณหภูมิ (°C)						
	1 นาที	5	15	28	39	49	60
60 นาที	5	15	28	39	49	60	70

### 4.3 เงื่อนไขขอบเขต

แบบจำลองกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของกระจาลามิเนต ที่ขอบด้านซ้ายของกระจกชั้นล่างให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  เท่ากับ 0 ( $U_1, U_2, U_3=0$ ) และขอบด้านขวาของกระจกชั้นล่างให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน  $y$  และ  $z$  เท่ากับ 0 ( $U_2, U_3=0$ )

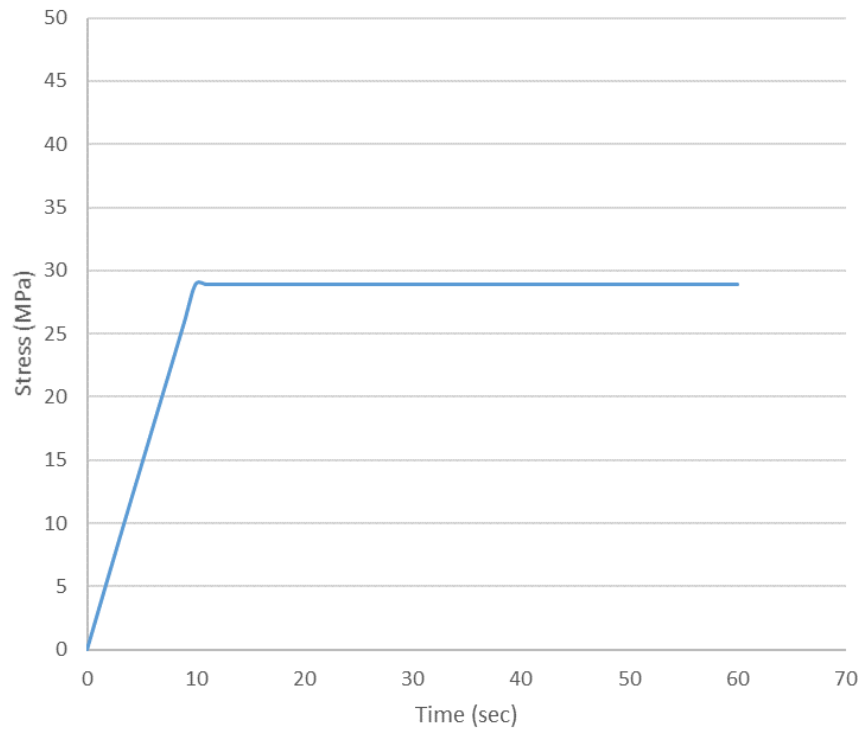
### 4.4 ชนิดของชิ้นส่วนและการแบ่งชิ้นส่วน

ในการสร้างแบบจำลองตามกรณีศึกษา จะใช้ชิ้นส่วนลูกบาศก์ที่ประกอบด้วย 20 จุด หรือ 20-Node Quadratic Brick Elements (C3D20) และในการแบ่งชิ้นส่วนจะแบ่งความหนาของชิ้นส่วนกระจกแต่ละชั้นออกเป็น 4 ส่วน ส่วนละ 2 มิลลิเมตร และความหนาของฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลรอลออกเป็น 1 ส่วน ความหนา 0.76 มิลลิเมตร

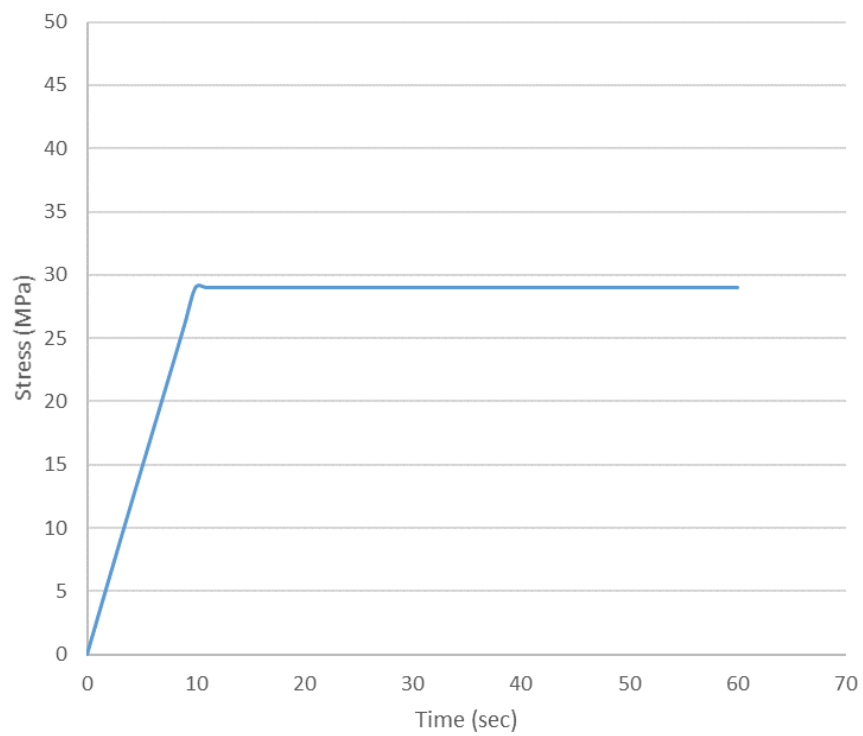
### 4.5 ผลที่ได้จากแบบจำลอง

#### 4.5.1 ระยะเวลาที่แรงกระทำระยะสั้น 1 นาที

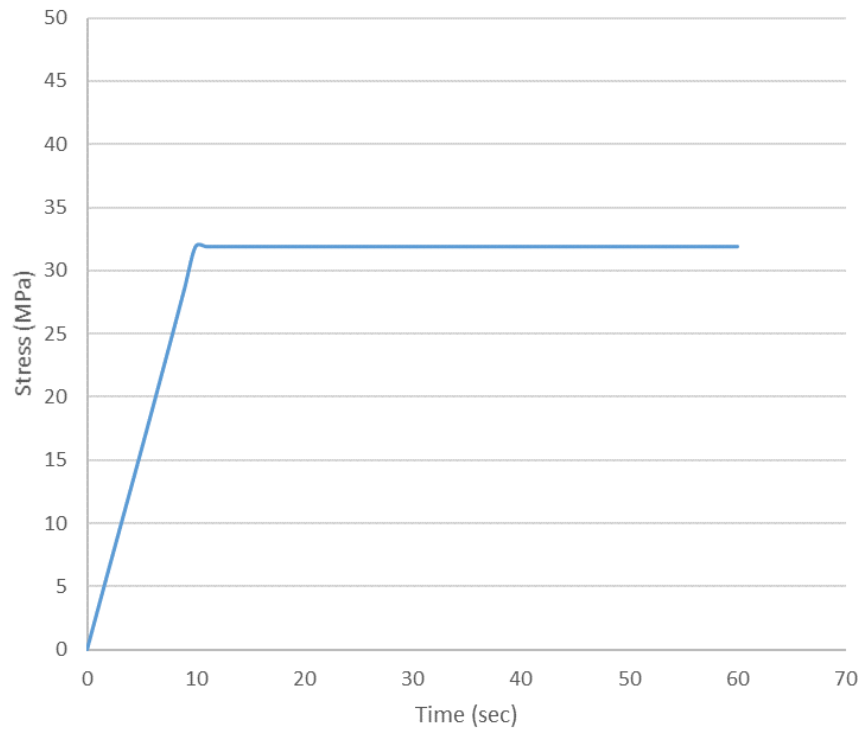
ผลที่ได้จากแบบจำลองสำหรับกรณีแรงกระทำต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 นาที ที่อุณหภูมิ 5, 15, 28, 39, 49, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ได้ผลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูปที่ 4-2 ถึงรูปที่ 4-8, ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูปที่ 4-10 ถึงรูปที่ 4-16 และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่หน้าตัดกับความหนาของคานกระจกลามิเนต ดังรูปที่ 4-18 ถึงรูปที่ 4-24



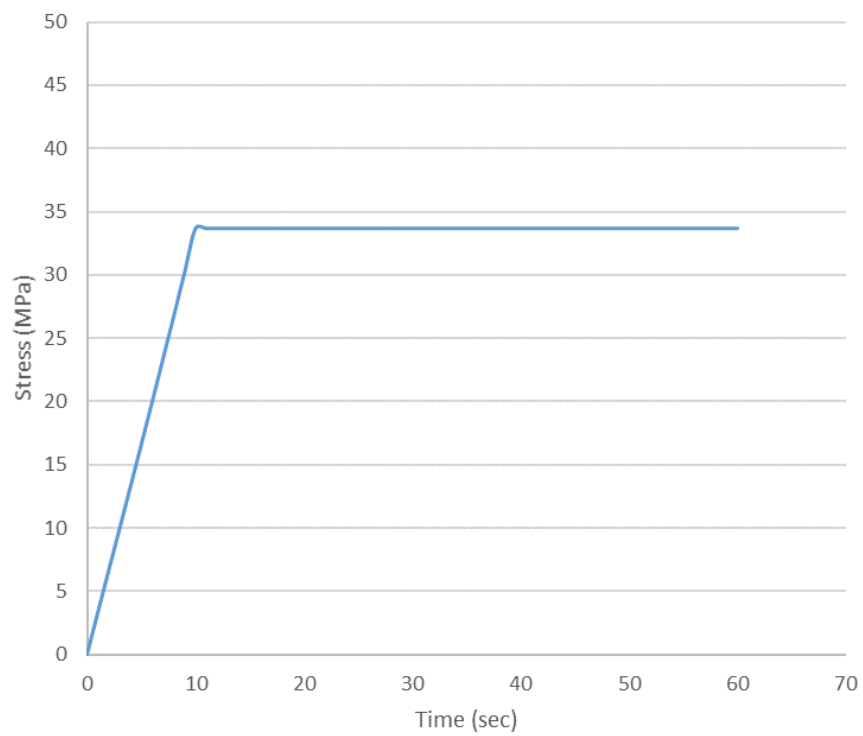
รูปที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิตั้งที่ 5 องศาเซลเซียส



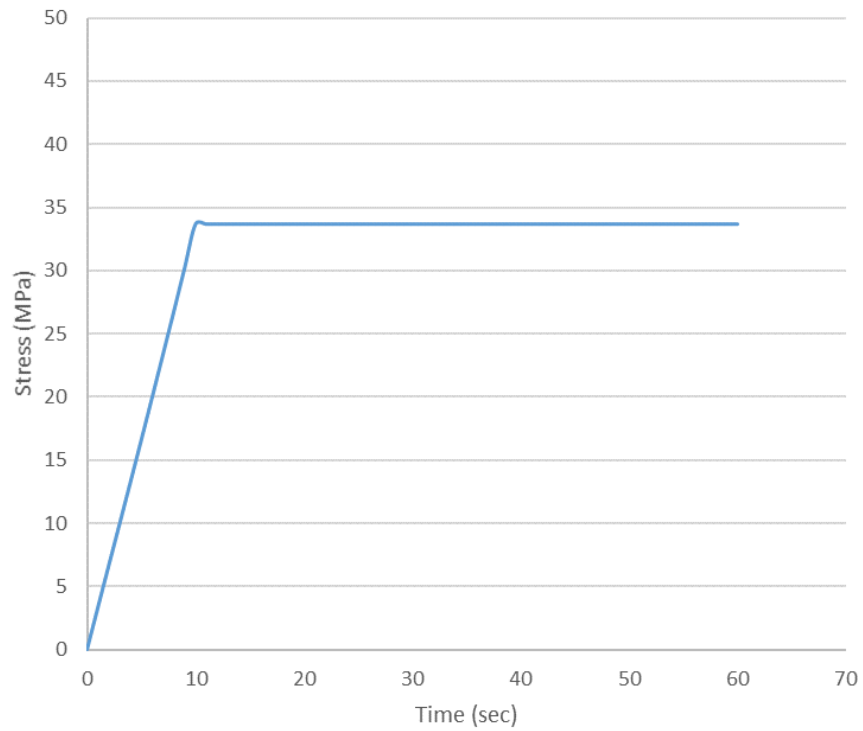
รูปที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิตั้งที่ 15 องศาเซลเซียส



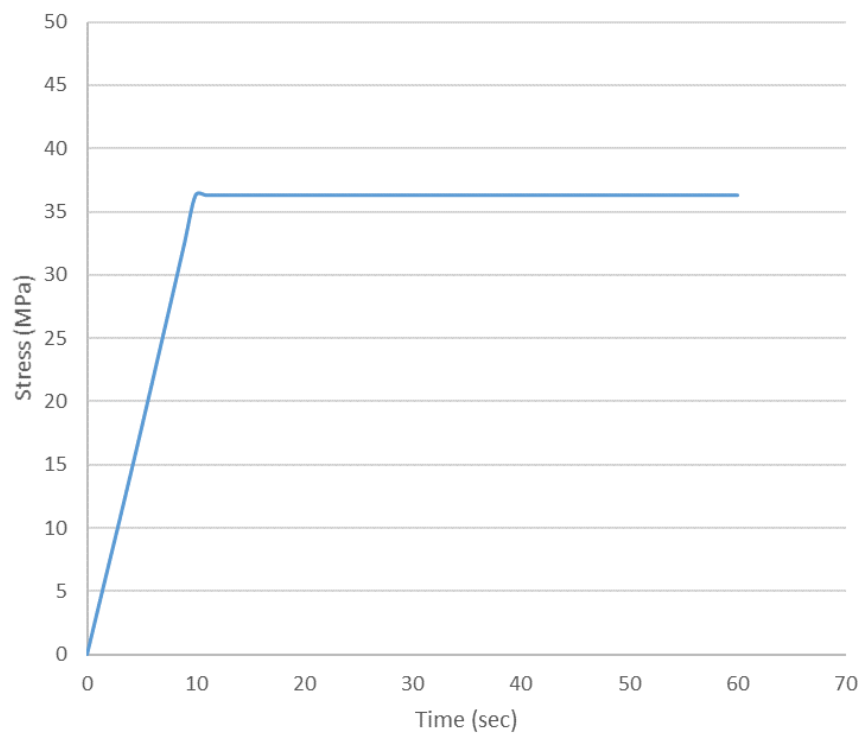
รูปที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่ำ 28 องศาเซลเซียส



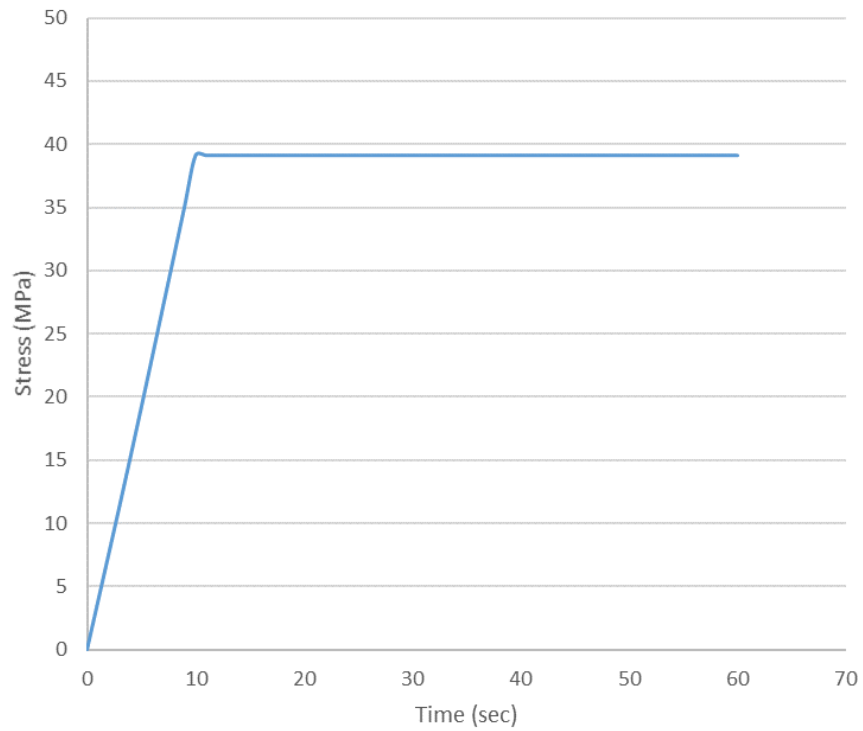
รูปที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่ำ 39 องศาเซลเซียส



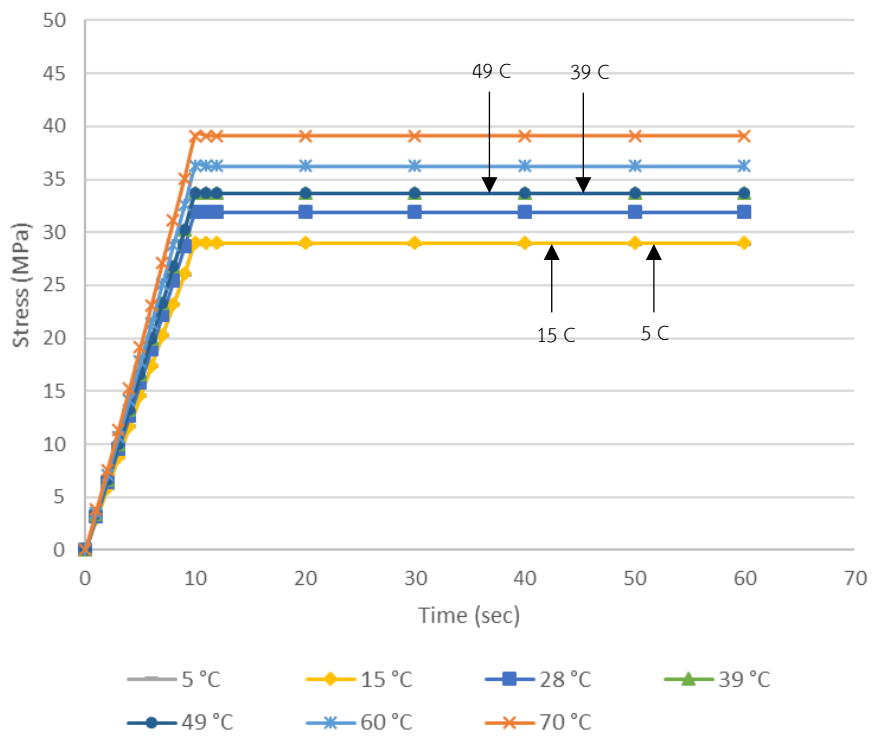
รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่ำ 49 องศาเซลเซียส



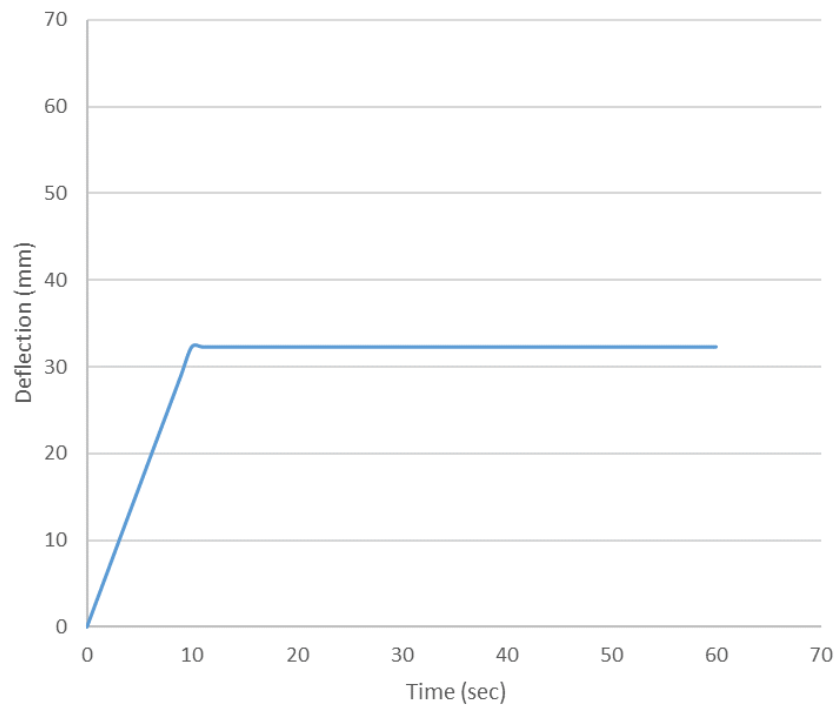
รูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่ำ 60 องศาเซลเซียส



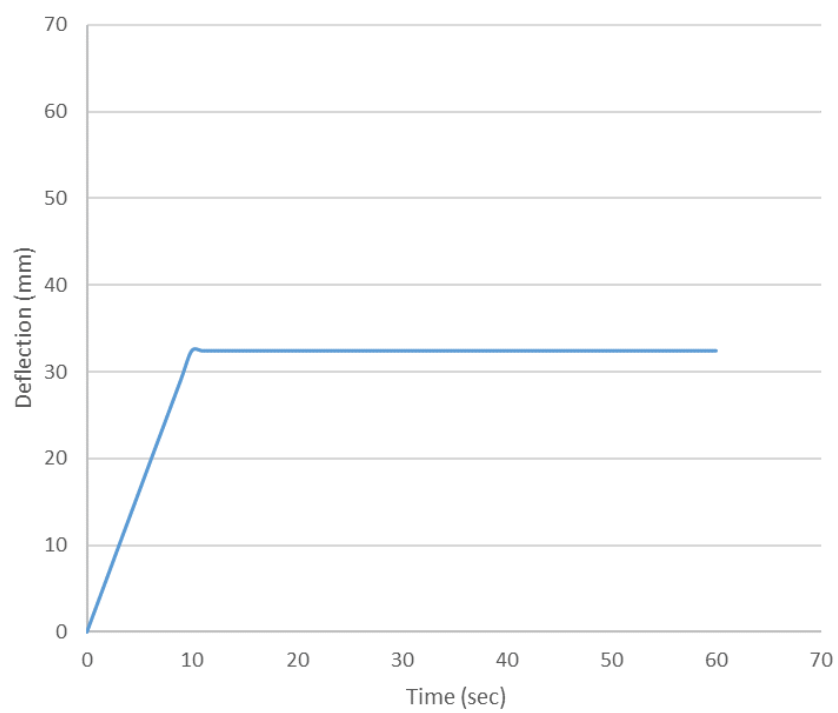
รูปที่ 4-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



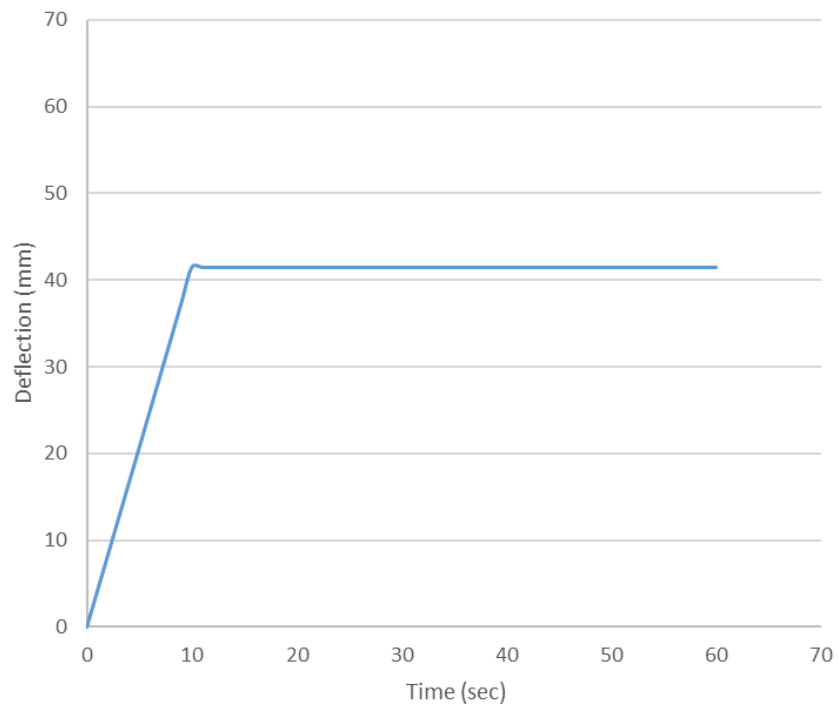
รูปที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่าง ๆ



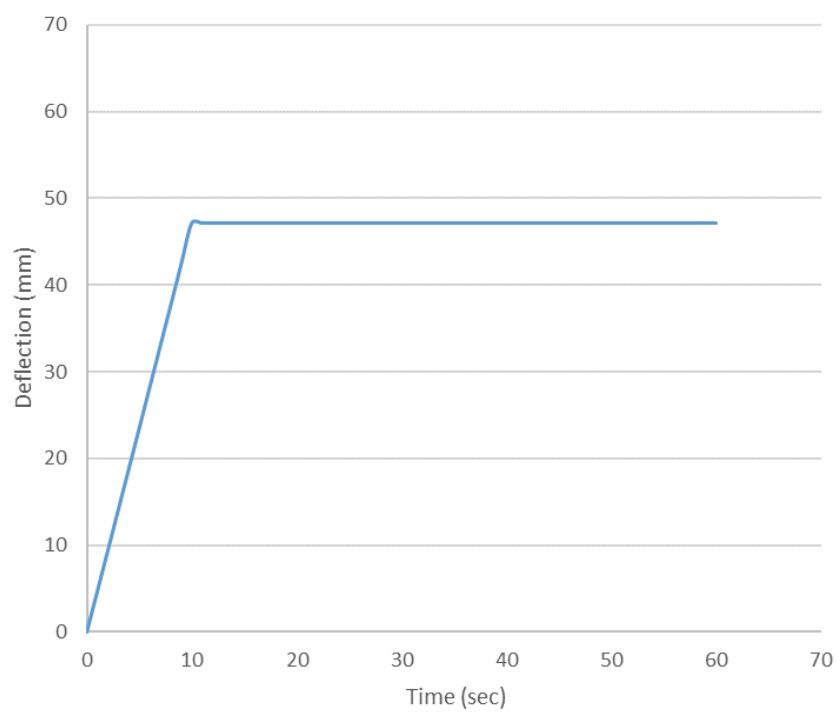
รูปที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



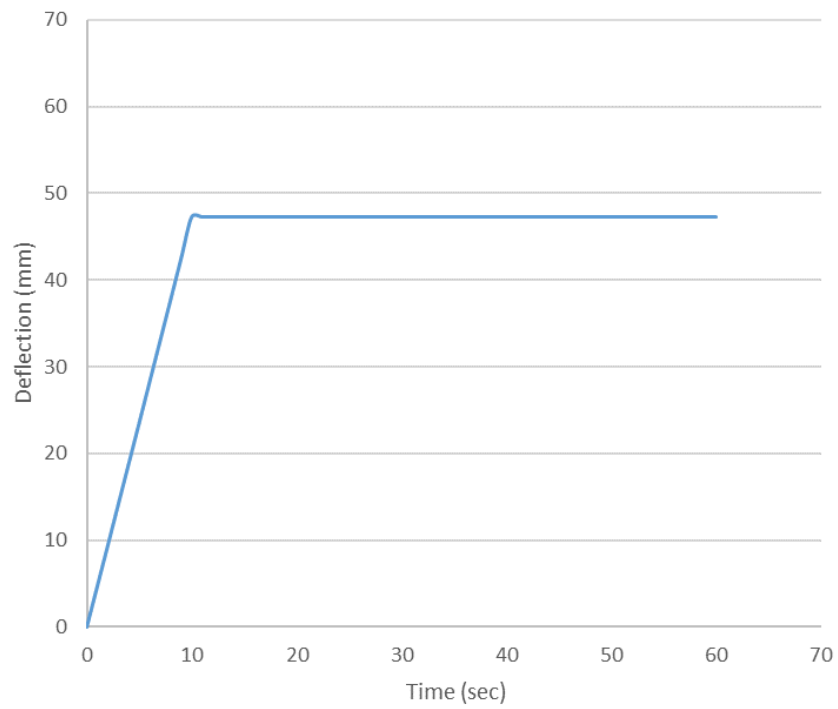
รูปที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส



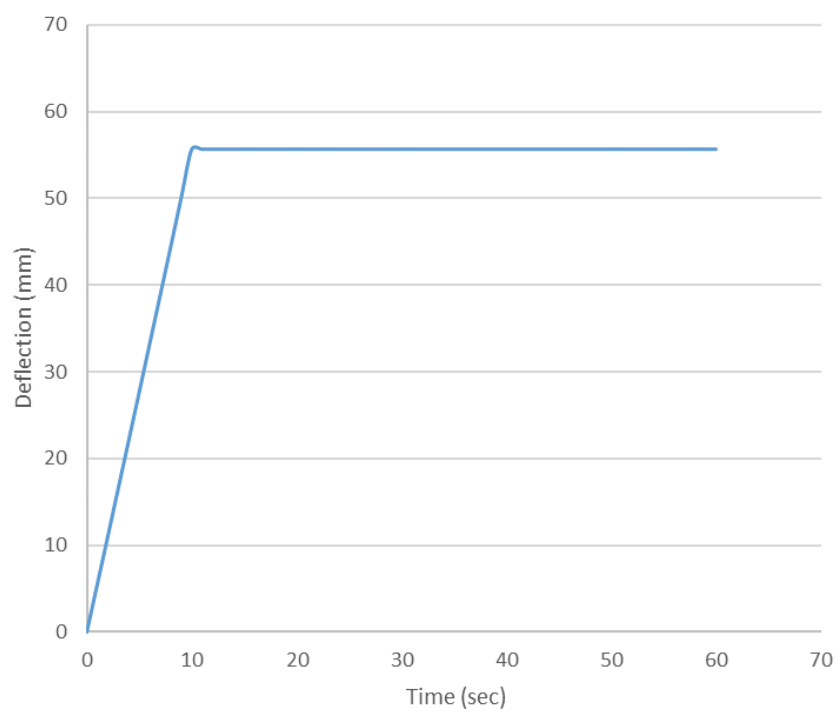
รูปที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

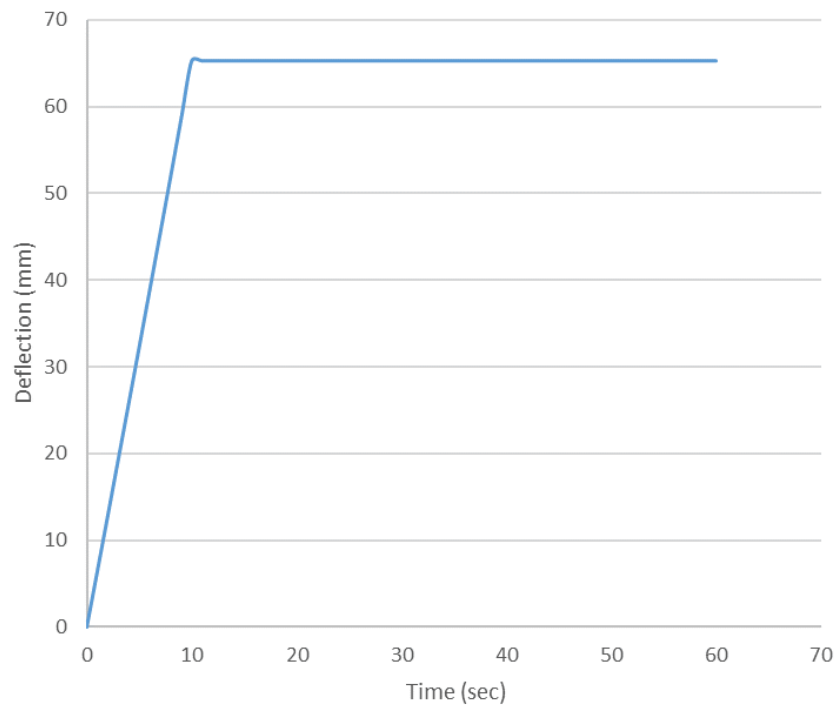


รูปที่ 4-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส

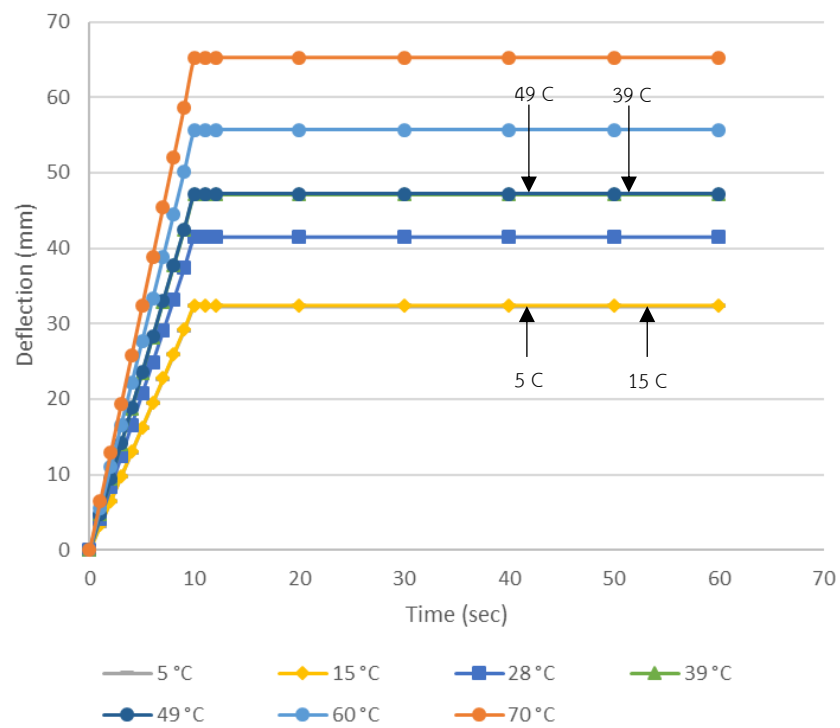


รูปที่ 4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส





รูปที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

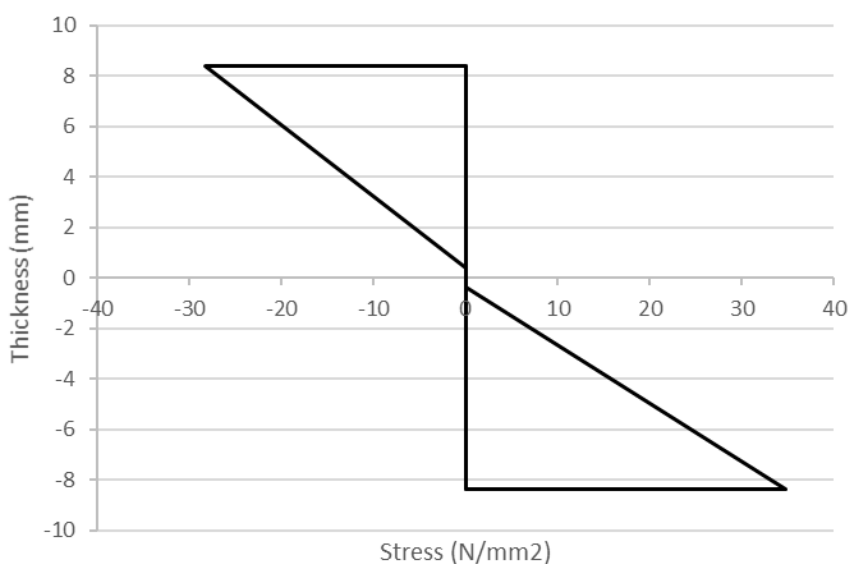


รูปที่ 4-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

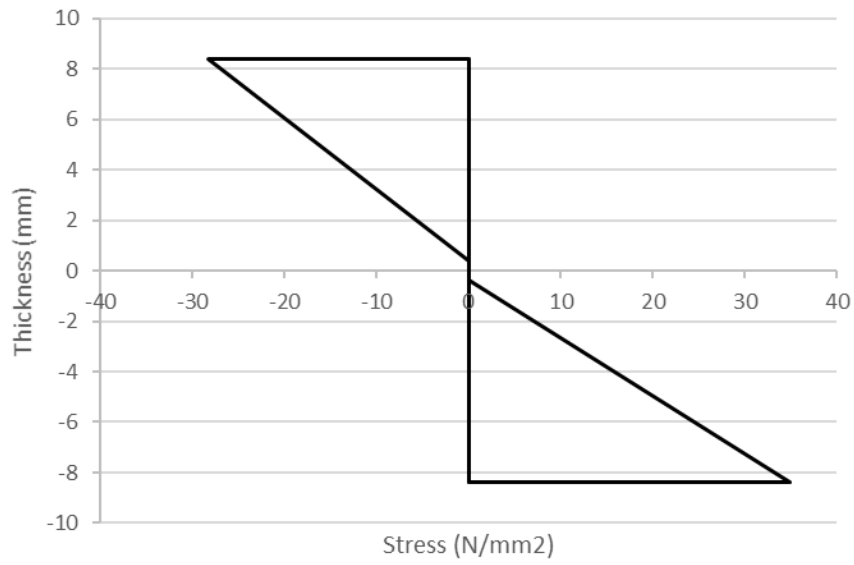
จากการจำลองกระจกลามิเนตด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและระยะเวลาที่แรงกระทำ ที่แรงกระทำต่อเนื่องระยะสั้นเป็นเวลา 1 นาที พบว่าความเค้นที่กึ่งกลางคานของทุกอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น และลักษณะของกราฟของทุกอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ความเค้นที่อุณหภูมิต่ำมีค่าน้อยและเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ในขณะที่การโก่งตัวของกระจกลามิเนตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่องระยะสั้น 1 นาที ที่อุณหภูมิต่ำการโก่งตัวของกระจกลามิเนตจะมีค่าน้อยและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกระจกจะสามารถรับน้ำหนักกระทำได้น้อยลง เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลต่อพฤติกรรมของโพลีไวนิลบิวทิล ทำให้โพลีไวนิลบิวทิลมีประสิทธิภาพน้อยลง

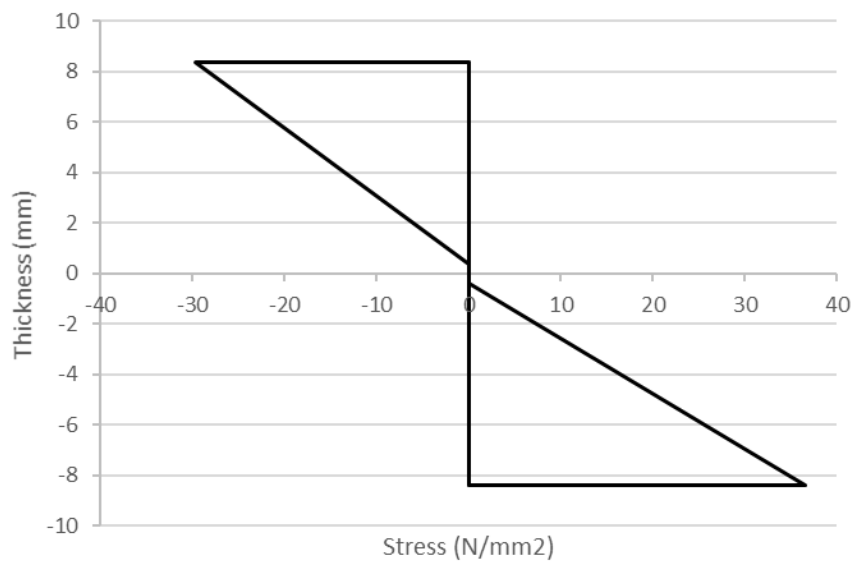
นอกจากนี้ผลจากการจำลองคานกระจกลามิเนตพบว่า ความเค้นที่หน้าตัดของกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส มีการกระจายความเค้น (Stress Distribution) เสมือนกระจกชั้นเดียว (Monolithic Glass) ดังรูปที่ 4-18 และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นที่ 15, 28, 39 และ 49 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตเริ่มมีพฤติกรรมเข้าใกล้พฤติกรรมเสมือนกระจกแยกชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4-19 ถึงรูปที่ 4-22 ในขณะที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมเสมือนกระจกแยกชั้นมากขึ้น สังเกตได้จากการกระจายความเค้นที่หน้าตัดดังรูปที่ 4-23 และรูปที่ 4-24



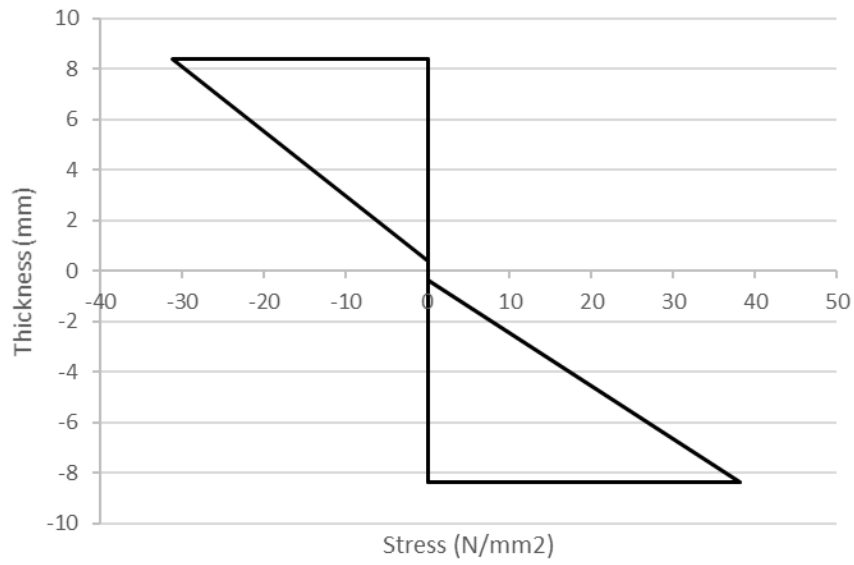
รูปที่ 4-18 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



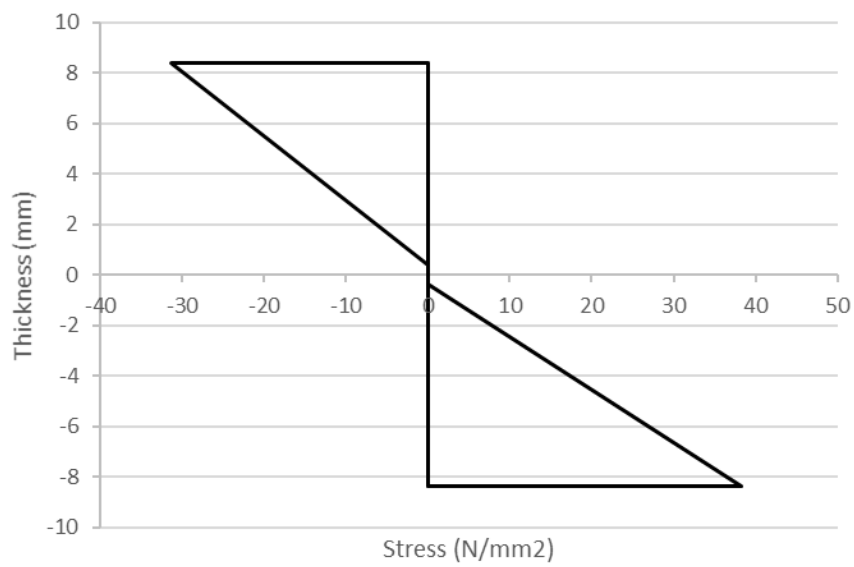
รูปที่ 4-19 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส



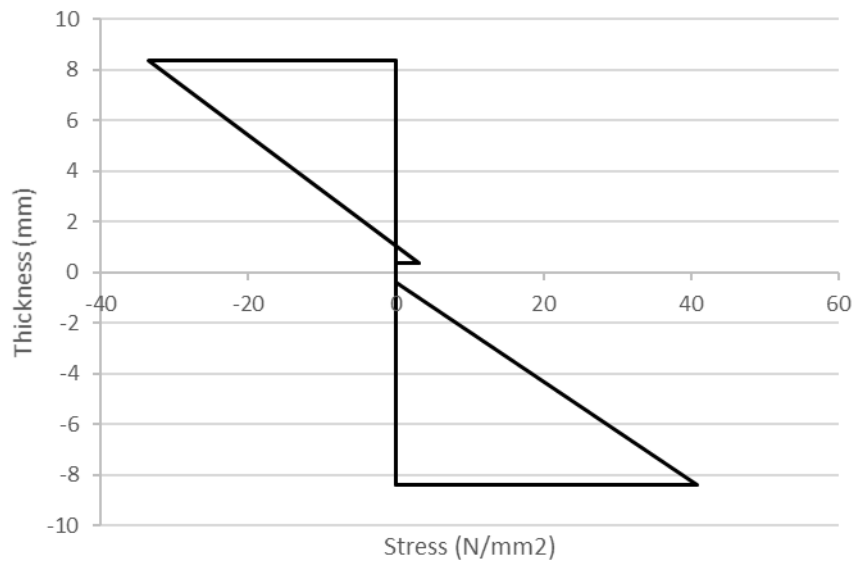
รูปที่ 4-20 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส



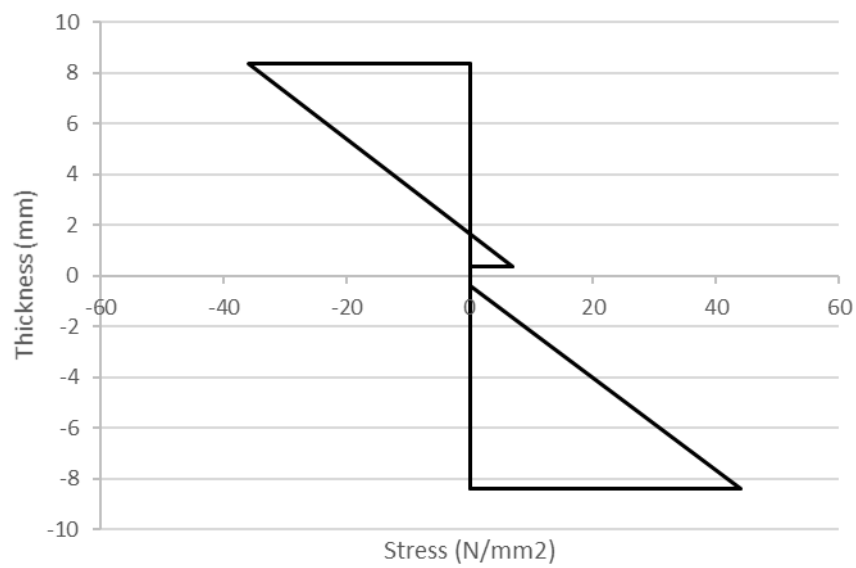
รูปที่ 4-21 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-22 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส



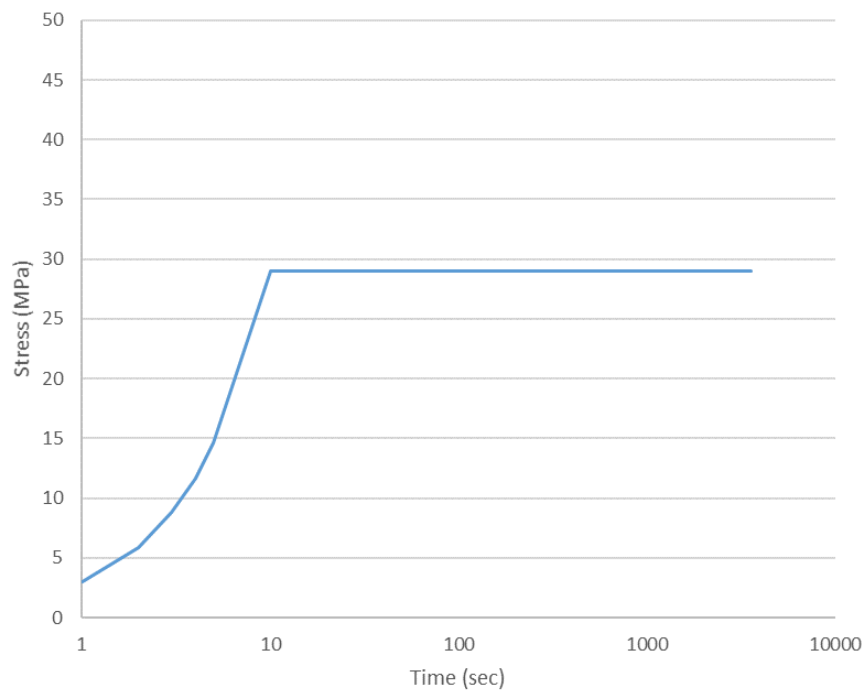
รูปที่ 4-23 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิตั้งที่ 60 องศาเซลเซียส



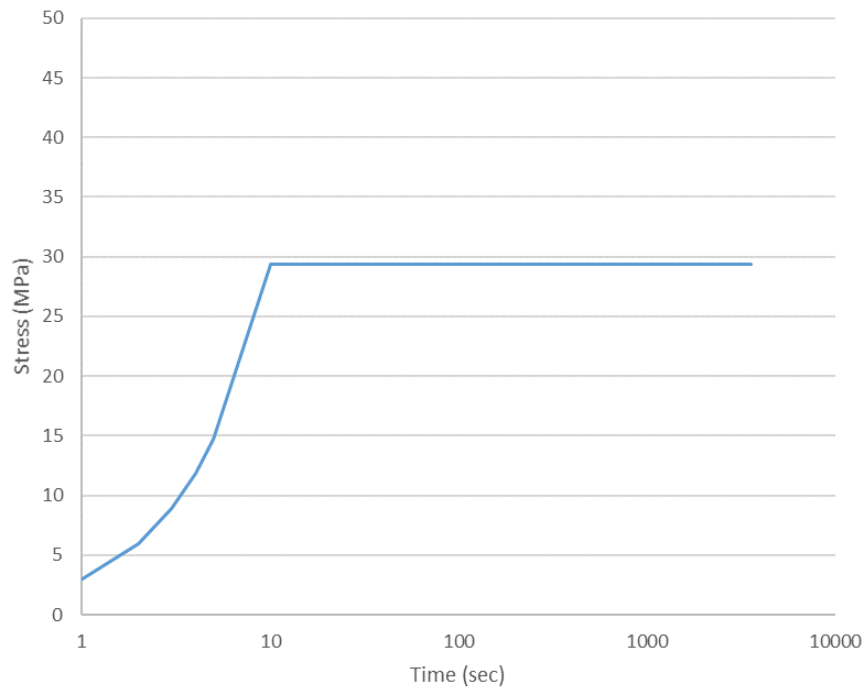
รูปที่ 4-24 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิตั้งที่ 70 องศาเซลเซียส

#### 4.5.2 ระยะเวลาที่แรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที

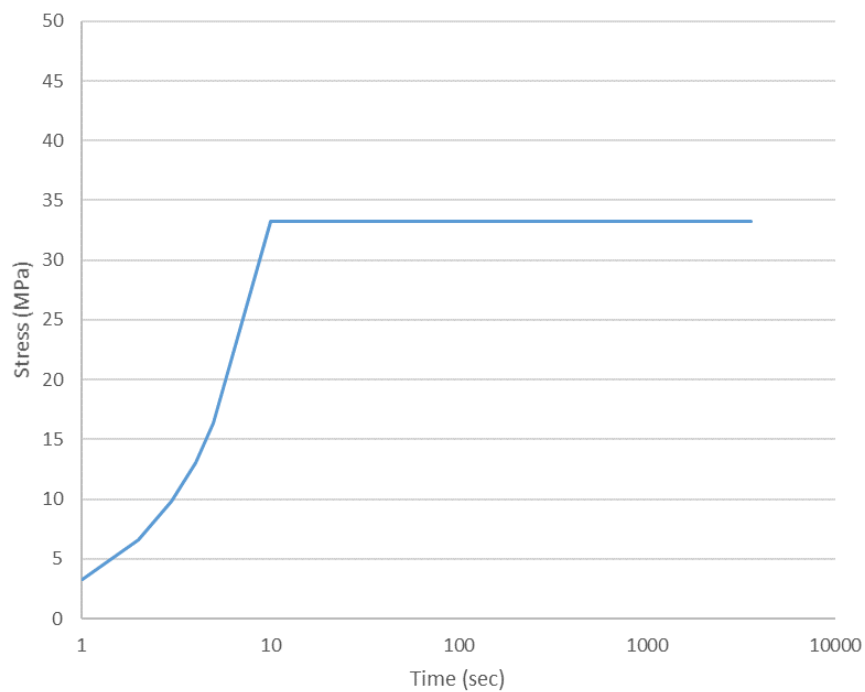
ผลที่ได้จากแบบจำลองสำหรับกรณีแรงกระทำต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 5, 15, 22, 39, 49, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ได้ผลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูปที่ 4-25 ถึงรูปที่ 4-31 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูปที่ 4-33 ถึงรูปที่ 4-39 และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่หน้าตัดกับความหนาของคานกระจกلاميเนต ดังรูปที่ 4-41 ถึงรูปที่ 4-47



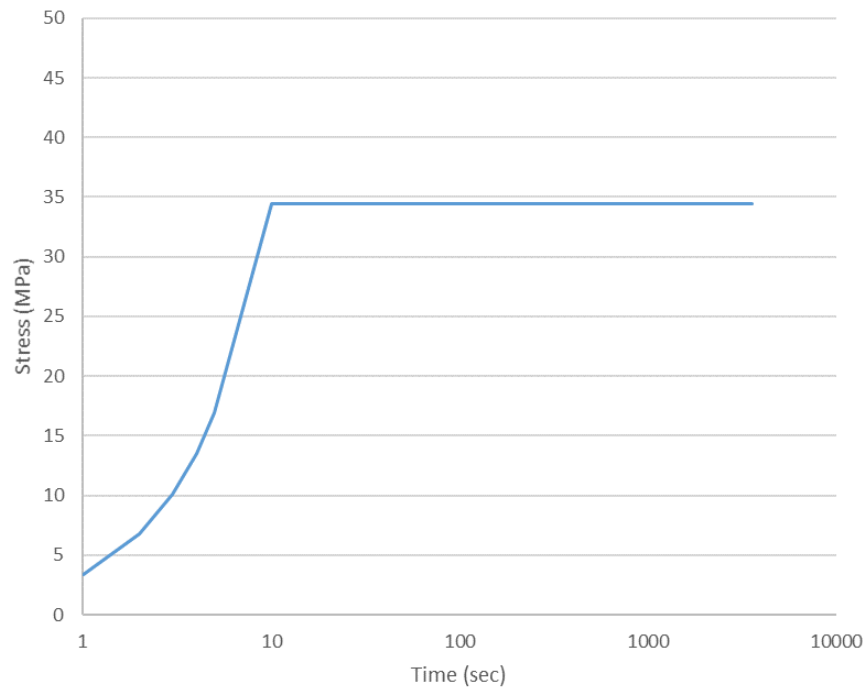
รูปที่ 4-25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



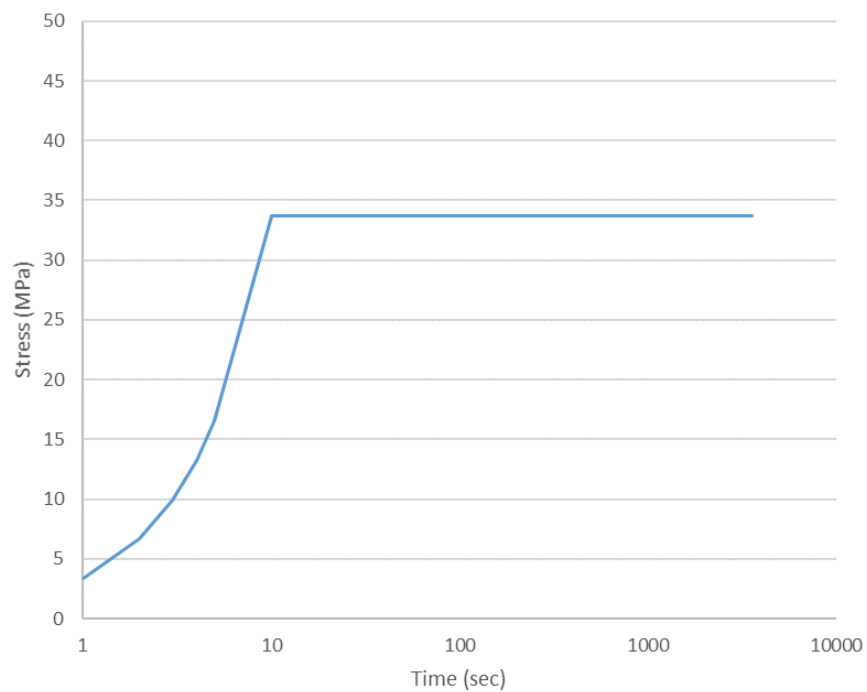
รูปที่ 4-26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

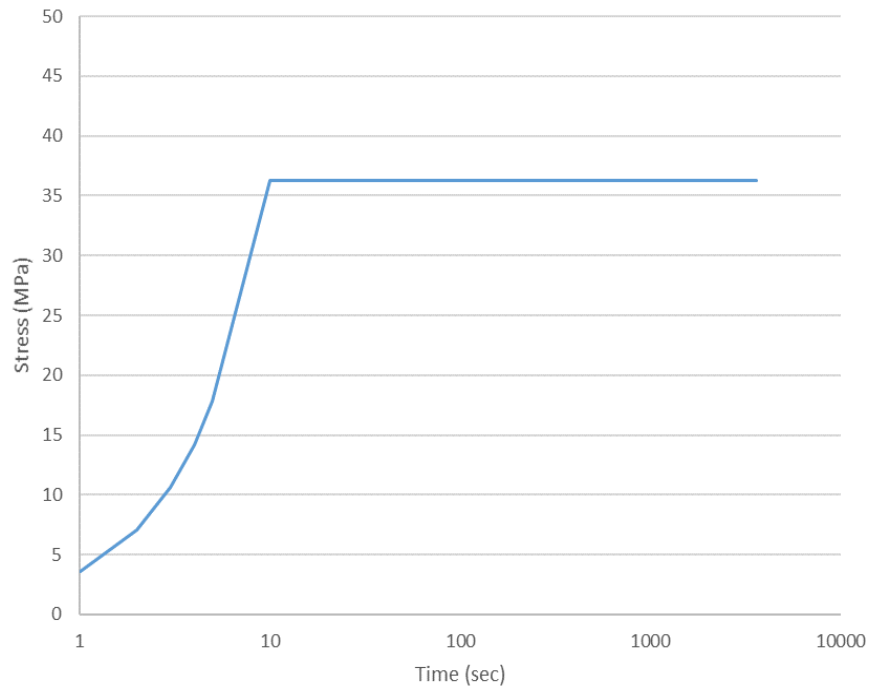


รูปที่ 4-28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

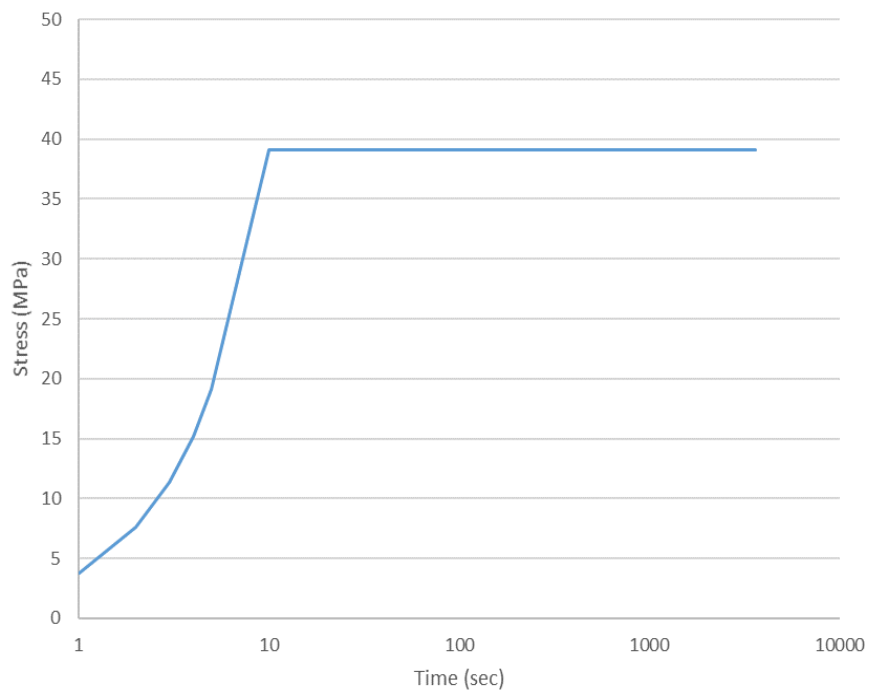


รูปที่ 4-29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส

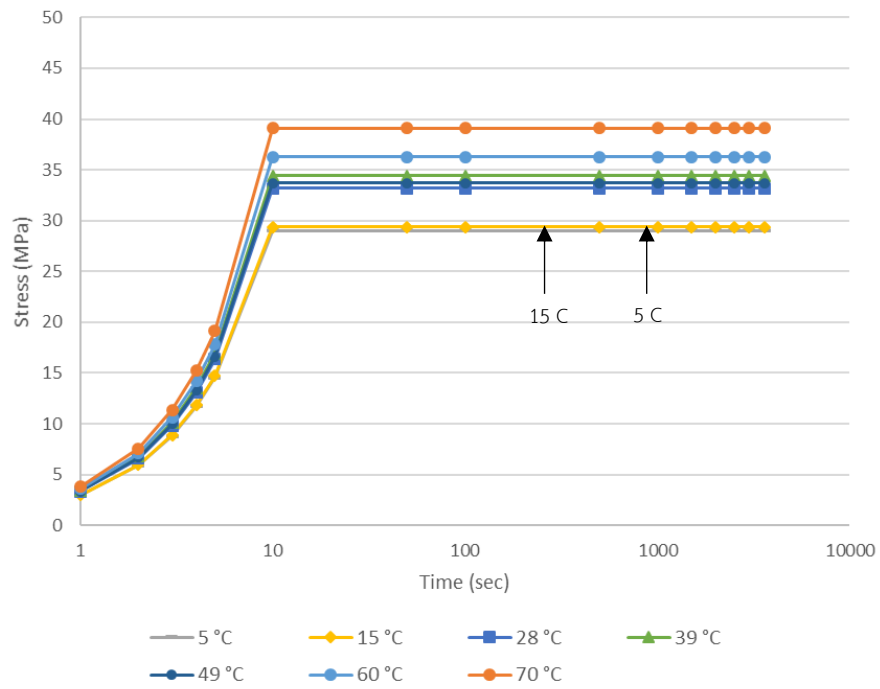




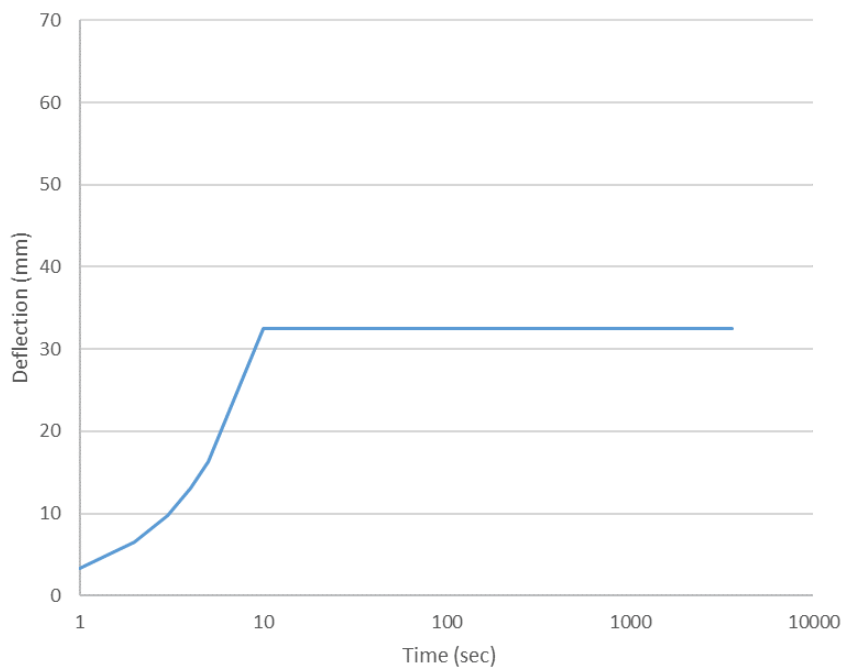
รูปที่ 4-30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิตั้งที่ 60 องศาเซลเซียส



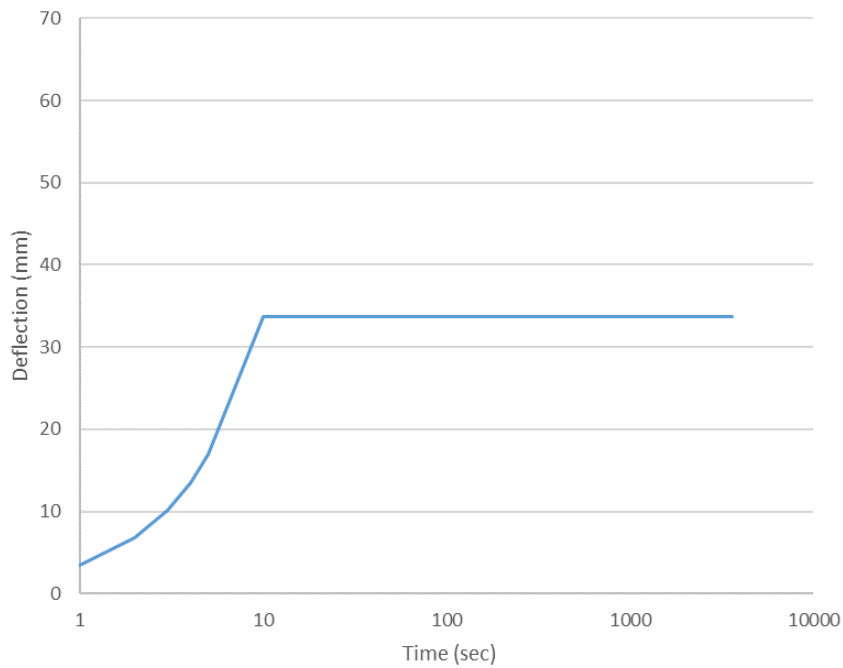
รูปที่ 4-31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิตั้งที่ 70 องศาเซลเซียส



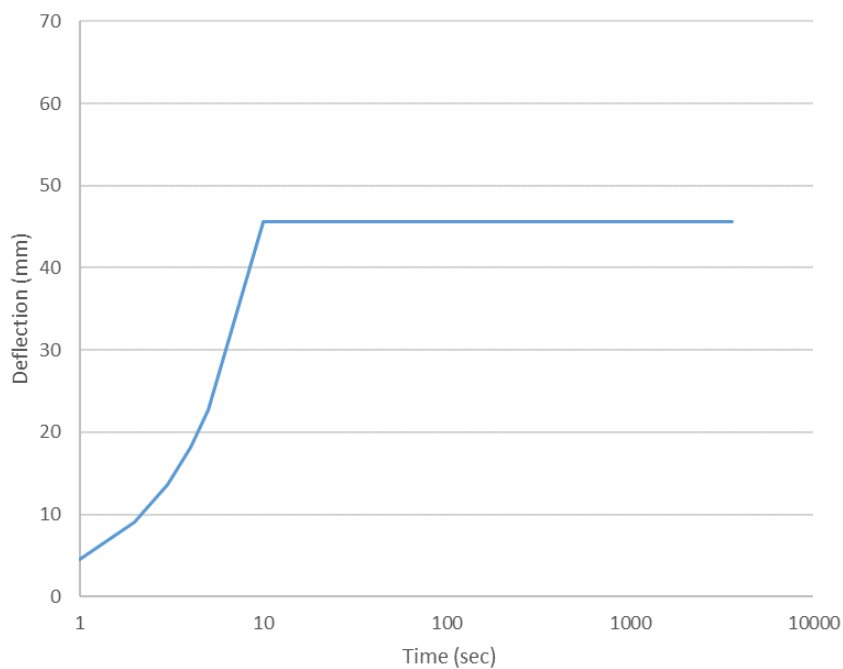
รูปที่ 4-32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่าง ๆ



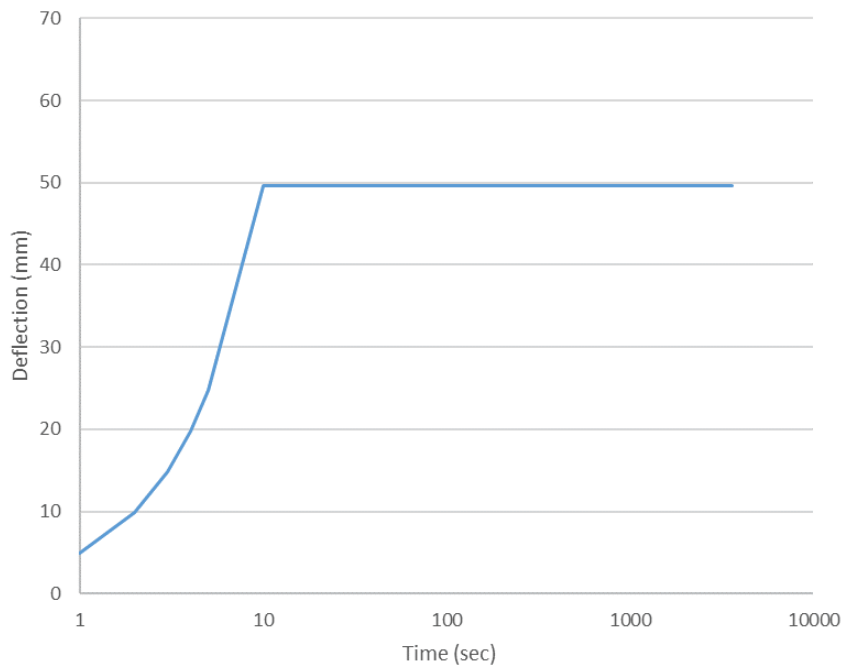
รูปที่ 4-33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



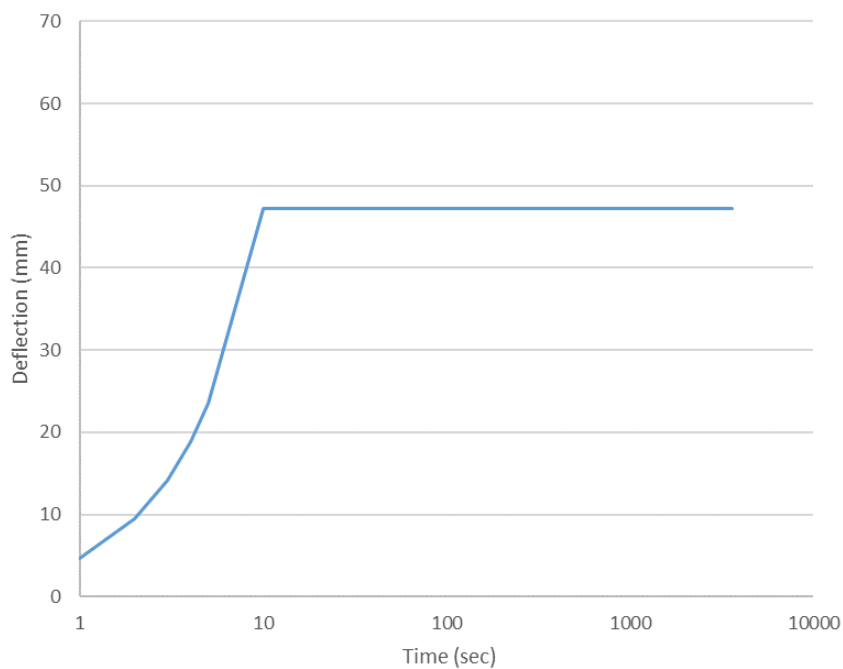
รูปที่ 4-34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส



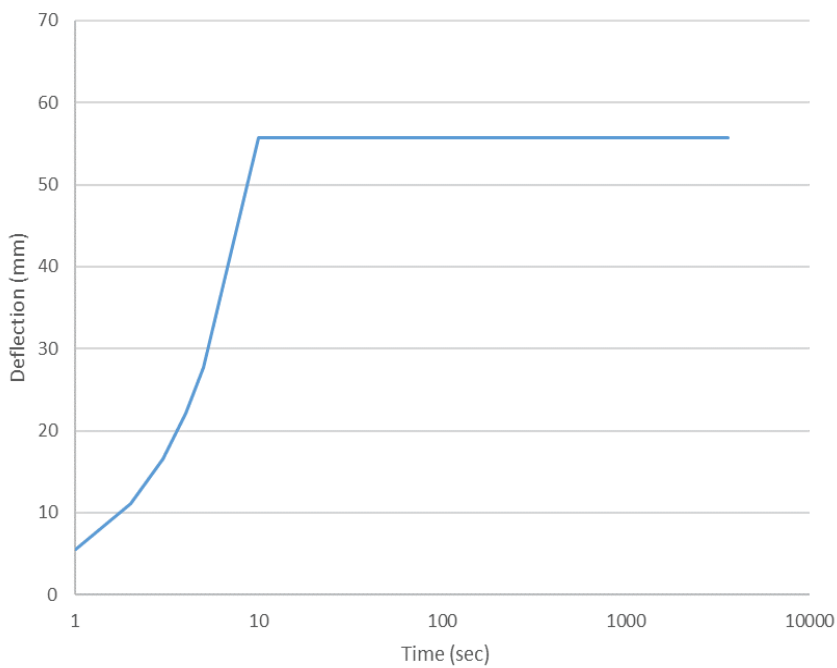
รูปที่ 4-35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส



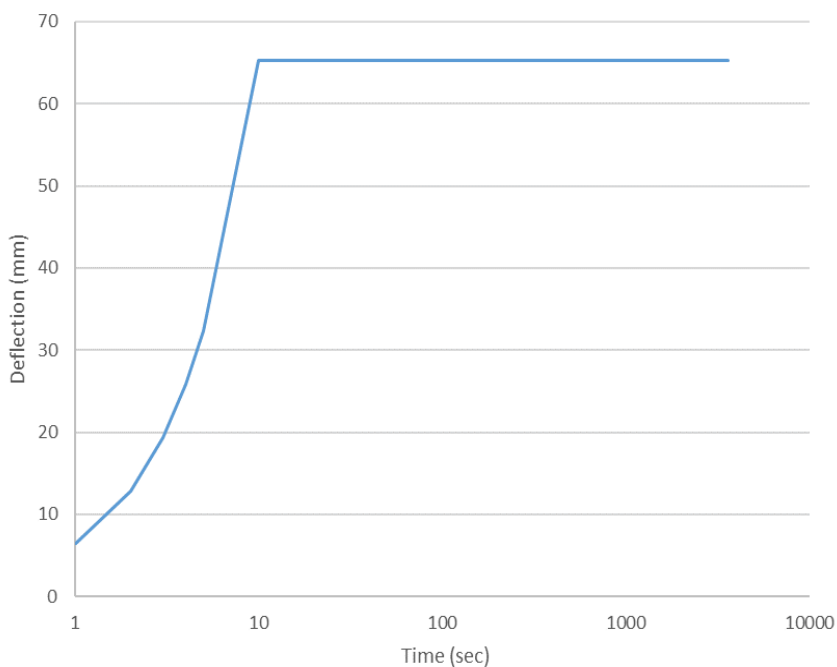
รูปที่ 4-36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส



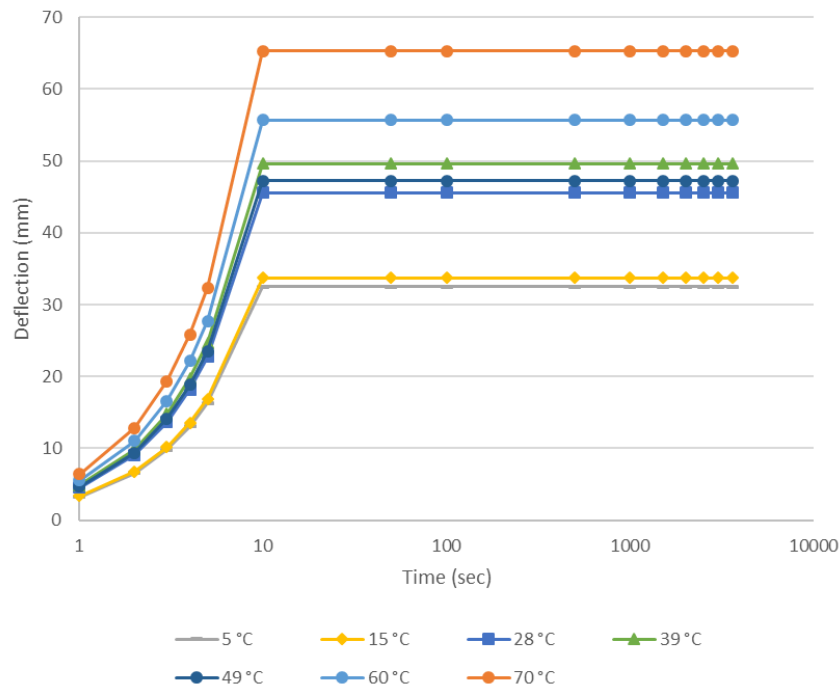
รูปที่ 4-37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

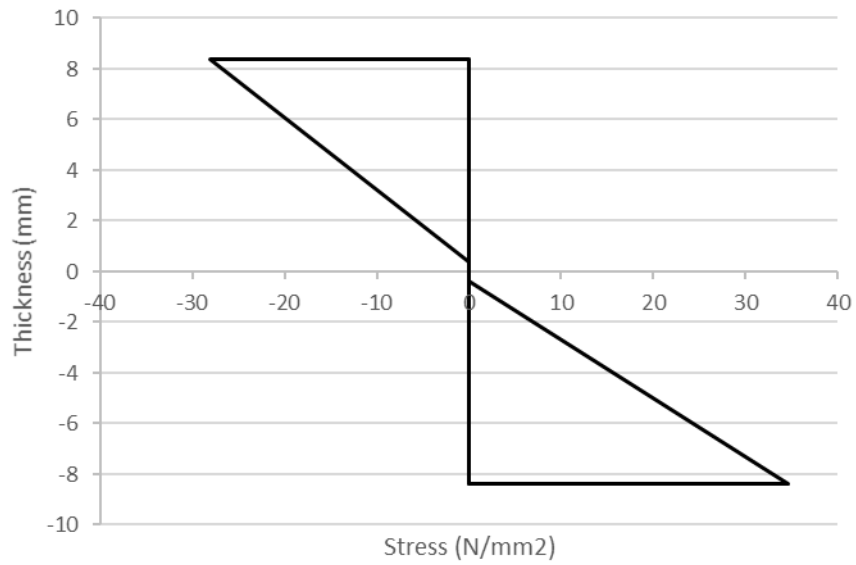


รูปที่ 4-40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและเวลาที่แรงกระทำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

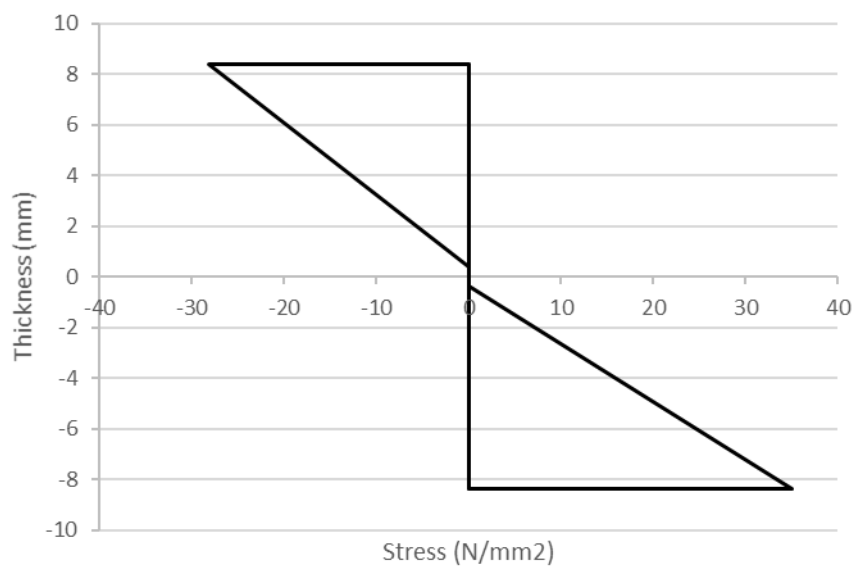
จากผลที่ได้จากแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระจกลามิเนต เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่อง 60 นาที พบว่าความเค้นที่กึ่งกลางคานกระจกลามิเนตเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาทีที่มีค่าสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยมีลักษณะของกราฟความเค้นกับอุณหภูมิที่แต่ละอุณหภูมิใกล้เคียงกัน

ในขณะที่การโก่งตัวของกระจกลามิเนตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่อง 60 นาที ที่อุณหภูมิต่ำการโก่งตัวของกระจกลามิเนตจะมีค่าน้อยและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

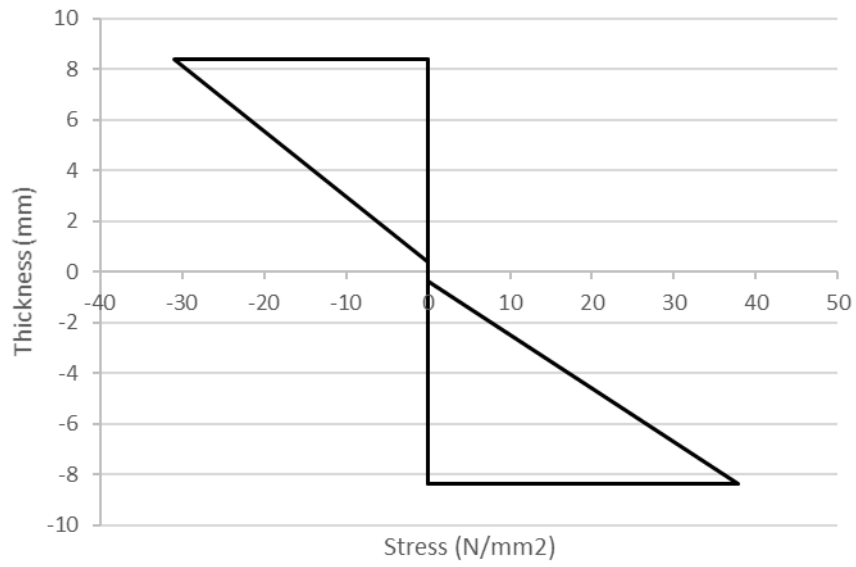
นอกจากนี้ผลจากการจำลองคานกระจกลามิเนตพบว่า ความเค้นที่หน้าตัดของกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส มีการกระจายความเค้น (Stress Distribution) เสมือนกระจกชั้นเดียว (Monolithic Glass) ดังรูปที่ 4-41 และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นที่ 15, 28, 39 และ 49 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตเริ่มมีพฤติกรรมเข้าใกล้พฤติกรรมเสมือนกระจกแยกชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4-42 ถึงรูปที่ 4-45 ในขณะที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมเสมือนกระจกแยกชั้นมากขึ้น สังเกตได้จากการกระจายความเค้นที่หน้าตัดดังรูปที่ 4-46 และรูปที่ 4-47



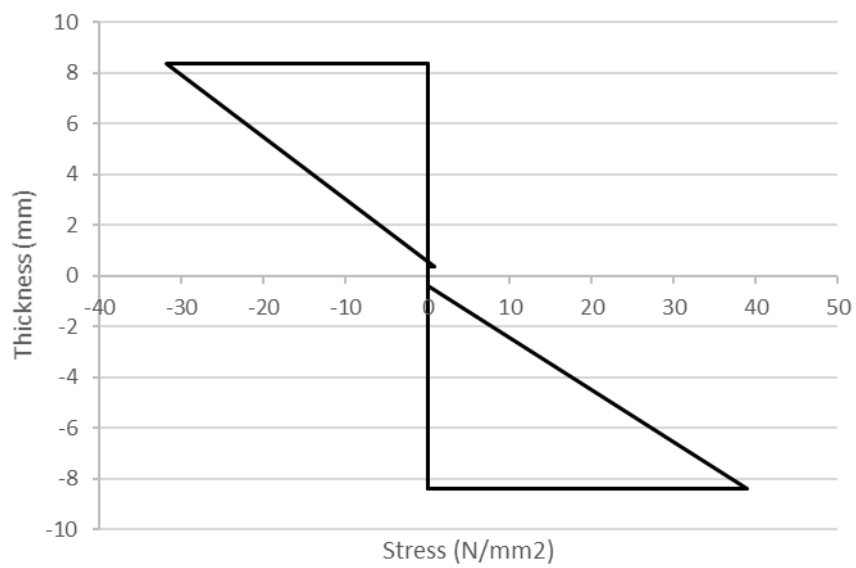
รูปที่ 4-41 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิตั้งที่ 5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-42 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิตั้งที่ 15 องศาเซลเซียส

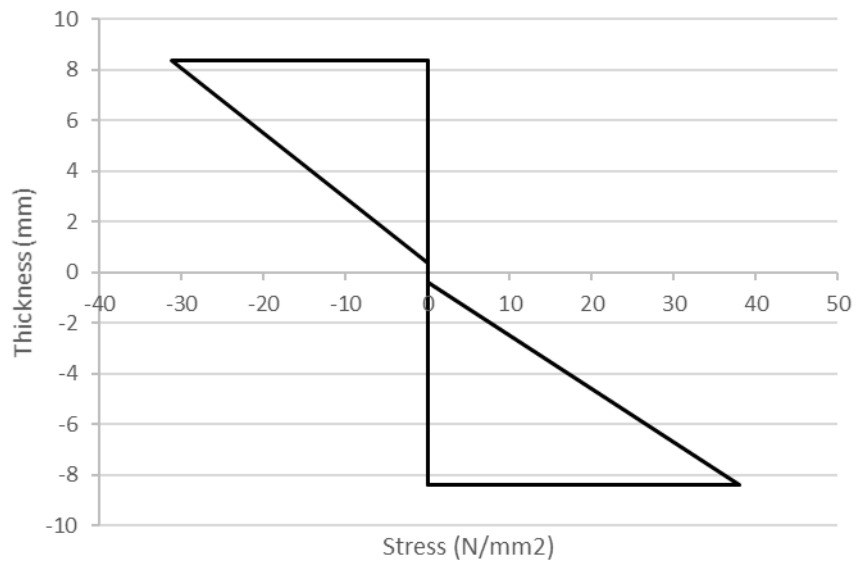


รูปที่ 4-43 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

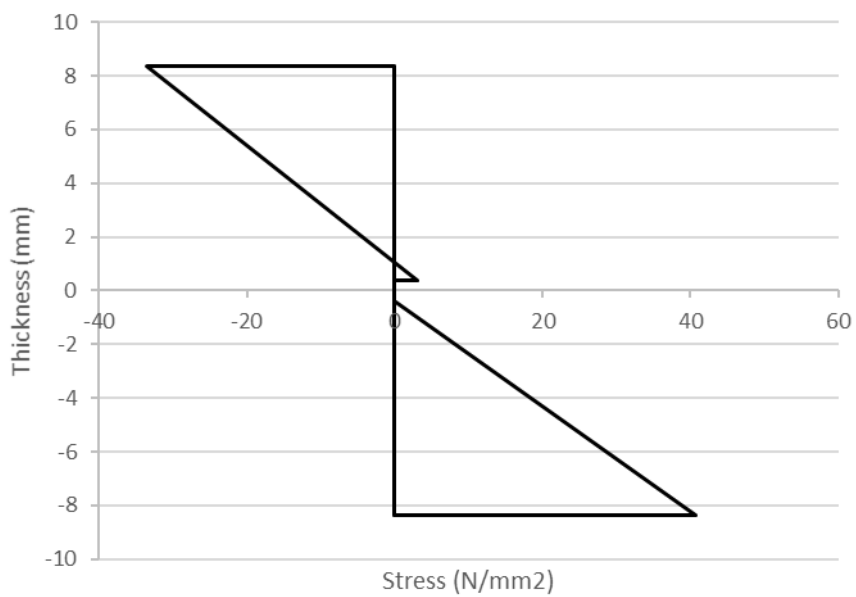


รูปที่ 4-44 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

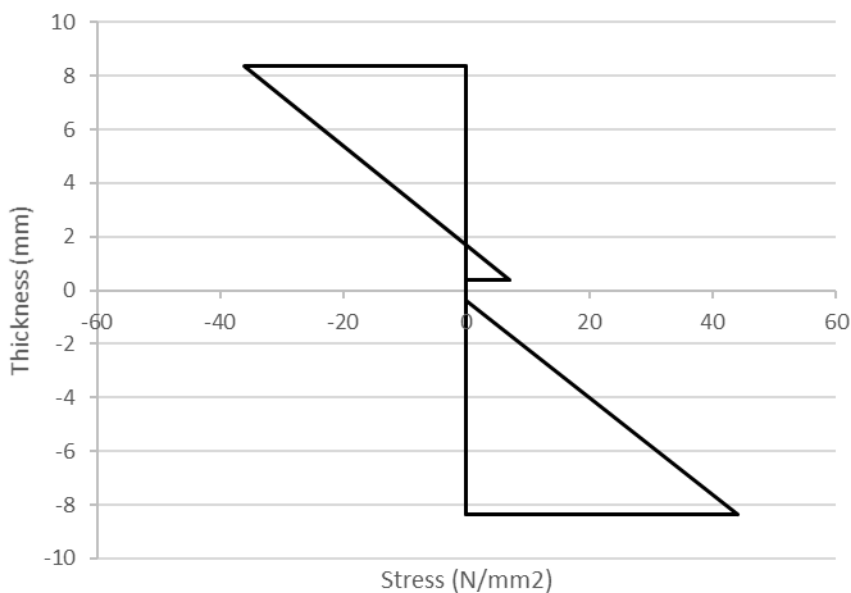




รูปที่ 4-45 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิตั้งที่ 49 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-46 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกلاميเนตที่อุณหภูมิตั้งที่ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-47 กราฟแสดงความเค้นที่หน้าตัดคานกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

งานวิจัยทำการสร้างแบบจำลองกระจกลามิเนตด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่อง 1 นาที และ 60 นาที โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับอุณหภูมิ 5, 15, 28, 39 และ 49 องศาเซลเซียส จากงานวิจัยในอดีตในการจำลองคุณสมบัติของโพลีไวนิลบิวทิล และ นอกจากนี้ยังใช้แนวโน้มของเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับอุณหภูมิ เพื่อหาโมดูลัสเฉือนที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิสูงชัน นอกเหนือจากการทดลอง

การเปรียบเทียบโดยพิจารณาผลของระยะเวลาที่แรงกระทำ เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่อง 1 นาที และ 60 นาที พบว่าความเค้นและการโก่งตัวของกระจกลามิเนตเมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่อง 60 นาที มีค่ามากกว่าเมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่องระยะสั้น 1 นาทีเล็กน้อย และจากการกระจายตัวของความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ พบว่ากระจกลามิเนตจะมีพฤติกรรมแบบกระจกขึ้นเดียวที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงชันกระจกลามิเนตจะมีพฤติกรรมเข้าใกล้กระจกแยกชั้นมากขึ้น สำหรับระยะเวลาที่แรงกระทำ 1 นาที กระจกลามิเนตเริ่มมีพฤติกรรมเข้าใกล้กระจกแยกชั้น ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และมีพฤติกรรมคล้ายกระจกแยกชั้นมากขึ้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และสำหรับระยะเวลาที่แรงกระทำ 60 นาที กระจกลามิเนตเริ่มมีพฤติกรรมเข้าใกล้กระจกแยกชั้น ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส และมีพฤติกรรมคล้ายกระจกแยกชั้นมากขึ้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

### การเปรียบเทียบค่าที่ใช้ในการออกแบบกับมาตรฐานการออกแบบ

งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบค่าที่ใช้ในการออกแบบคือ โมเมนต์ความเฉื่อยและค่าการโก่งตัว จากมาตรฐานการออกแบบ ASTM E 1300-09 และจากโปรแกรมสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS โดยจากมาตรฐานการออกแบบสามารถคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยได้จากสมการ 2.12 และ 2.13 ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น และสามารถคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้จากการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน

#### 5.1 การคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยจากแบบจำลอง

การคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล (Effective Moment of inertia) จากแบบจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS สามารถคำนวณได้จากผลการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน โดยใช้สมการการคำนวณการโก่งตัวของคานช่วงเดียวธรรมดา (Simply Supported Beam) ดังสมการ 5.1

$$\Delta = \frac{5}{384} \frac{wl^4}{EI} \quad (5.1)$$

ตารางที่ 5-1 โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 1 นาทิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าการโก่งตัว (mm)	โมเมนต์ความเฉื่อย (mm <sup>4</sup> )
5	32.32	619,682
15	36.18	617,869
28	42.67	469,407
39	47.10	425,253
49	47.21	424,275
60	55.67	359,793
70	65.27	306,900

ตารางที่ 5-2 โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ค่าการโก่งตัว (mm)	โมเมนต์ความเฉื่อย (mm <sup>4</sup> )
5	32.52	616,006
15	41.42	483,565
28	45.59	439,407
39	49.59	403,902
49	51.15	384,747
60	65.51	309,854
70	69.75	289,112

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือนของกระจกลามิเนต ( $\kappa$ ) จากแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับโมเมนต์ความเฉื่อยเมื่อกระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบกระจกชั้นเดียวและกระจกแยกชั้น ดังสมการ 5.2

$$\kappa = 1 - \left( \frac{I_{mono} - I}{I_{mono} - I_{layered}} \right) \quad (5.2)$$

ซึ่งค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือน  $\kappa$  จะเท่ากับ 1 เมื่อกระจกมีพฤติกรรมแบบกระจกชั้นเดียว และเท่ากับ 0 เมื่อกระจกมีพฤติกรรมแบบกระจกแยกชั้น ดังแสดงในตารางที่ 5-3 และตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-3 ค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือนเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 1 นาที

อุณหภูมิ (°C)	โมเมนต์ความเฉื่อย (mm <sup>4</sup> )	$I_{mono}$ (mm <sup>4</sup> )	$I_{layered}$ (mm <sup>4</sup> )	ค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือน ( $\kappa$ )
5	619,682	597,840	130,048	1.05
15	553,658	597,840	130,048	0.91
28	469,407	597,840	130,048	0.73
39	425,253	597,840	130,048	0.63
49	424,274	597,840	130,048	0.63
60	359,792	597,840	130,048	0.49
70	306,899	597,840	130,048	0.38

ตารางที่ 5-4 ค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือนเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที

อุณหภูมิ (°C)	โมเมนต์ความเฉื่อย (mm <sup>4</sup> )	I <sub>mono</sub> (mm <sup>4</sup> )	I <sub>layered</sub> (mm <sup>4</sup> )	ค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือน (K)
5	616,006	597,840	130,048	1.04
15	483,565	597,840	130,048	0.76
28	439,407	597,840	130,048	0.66
39	403,902	597,840	130,048	0.59
49	384,747	597,840	130,048	0.54
60	309,854	597,840	130,048	0.38
70	289,112	597,840	130,048	0.34

## 5.2 การคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยจากมาตรฐานการออกแบบ ASTM E 1300-09

การคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยจากมาตรฐานการออกแบบ ASTM E 1300-09 เพื่อนำไปคำนวณหาค่าการโก่งตัว สามารถหาได้จากสมการ 2.12 และ 2.13 ได้ผลดังตารางที่ 5-5 และ

ตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5-5 โมเมนต์ความเฉื่อยเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 1 นาที

อุณหภูมิ (°C)	โมดูลัสเฉือน (N/mm <sup>2</sup> )	ค่าคงที่การส่งผ่านแรงเฉือน (Γ)	โมเมนต์ความเฉื่อย (mm <sup>4</sup> )	ค่าการโก่งตัว (mm)
5	24.0688	0.98	591,254	33.89
15	3.3470	0.91	554,277	36.14
28	0.4850	0.59	403,826	49.60
39	0.3670	0.52	371,613	53.90
49	0.2665	0.44	334,353	59.91
60	0.2000	0.37	302,126	66.30
70	0.1500	0.30	272,177	73.59

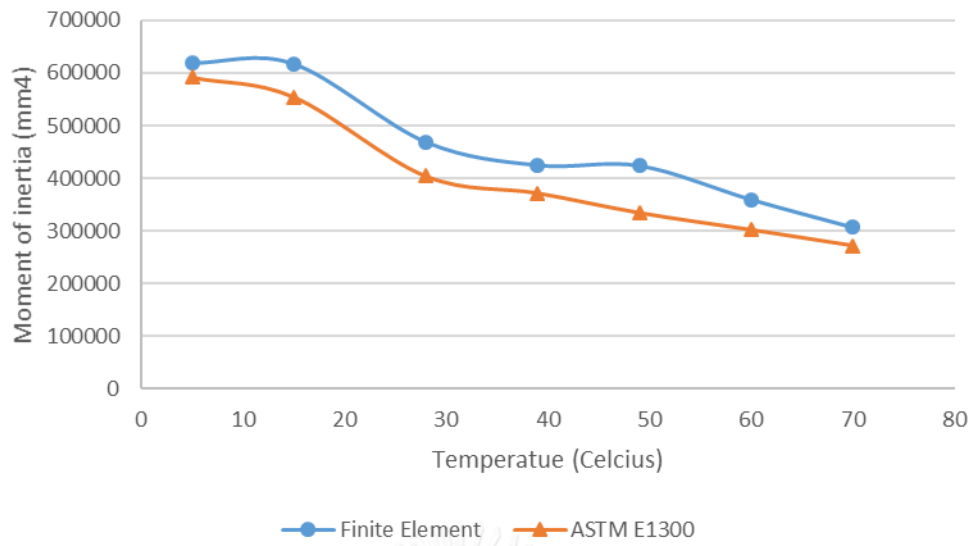
ตารางที่ 5-6 โมเมนต์ความเฉื่อยเมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที

อุณหภูมิ (°C)	โมดูลัสเฉือน (N/mm <sup>2</sup> )	ค่าคงที่การส่ง ผ่านแรงเฉือน ( $\Gamma$ )	โมเมนต์ความเฉื่อย (mm <sup>4</sup> )	ค่าการโก่งตัว (mm)
5	10.2300	0.97	582,634	34.38
15	0.5005	0.59	407,388	49.17
28	0.3245	0.49	357,224	56.07
39	0.3070	0.47	350,753	57.11
49	0.1447	0.30	268,643	74.56
60	0.0800	0.19	218,373	97.73
70	0.0500	0.13	189,458	105.72

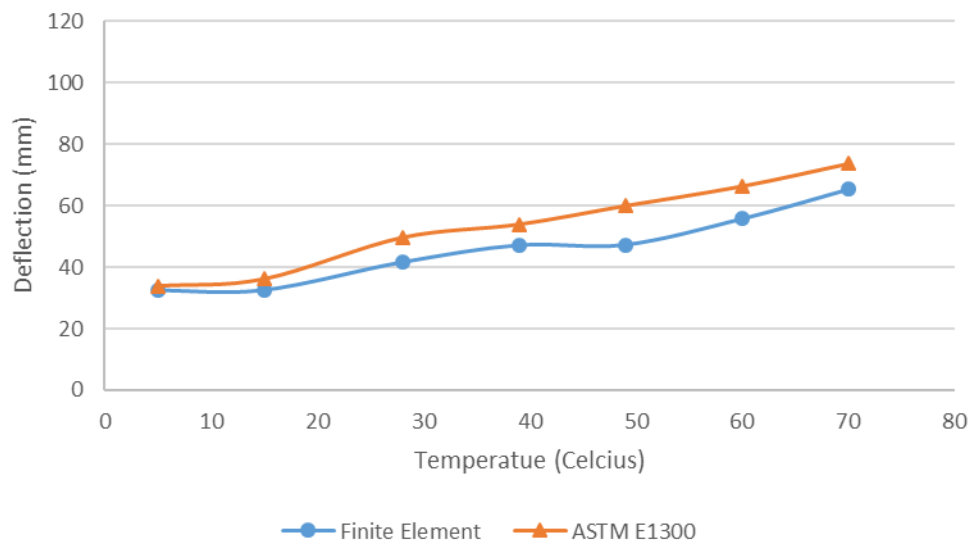
### 5.3 การเปรียบเทียบค่าที่ใช้ในการออกแบบ

การเปรียบเทียบโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าการโก่งตัวจากมาตรฐานการออกแบบ ASTM E 1300-09 กับโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าการโก่งตัวที่ได้จากแบบจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS พบว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจากโปรแกรม ABAQUS มีค่ามากกว่าจากมาตรฐานการออกแบบเล็กน้อย ดังนั้นค่าการโก่งตัวจากโปรแกรม ABAQUS จึงน้อยกว่ามาตรฐานการออกแบบเล็กน้อยเช่นกัน โดยมีร้อยละความแตกต่าง ดังแสดงในตารางที่ 5-7 และตารางที่ 5-8 สำหรับน้ำหนักกระทำต่อเนื่องระยะสั้น 1 นาที และตารางที่ 5-9 และตารางที่ 5-10 สำหรับน้ำหนักกระทำต่อเนื่อง 60 นาที

ความแตกต่างระหว่างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับมาตรฐานการออกแบบที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่ามีร้อยละความแตกต่างมากเนื่องจากการจำลองคุณสมบัติของโพลีไวนิลบิวทิลที่อุณหภูมินี้มาจากแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนและอุณหภูมิ ในการหาค่าคงที่ของอนุกรมโพร์นี้จากวิธีการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลได้เส้นกราฟที่ไม่ตรงกับข้อมูลมากนัก จึงอาจทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนได้



รูปที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยกับอุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื้อ 1 นาท



รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับอุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื้อ 1 นาท

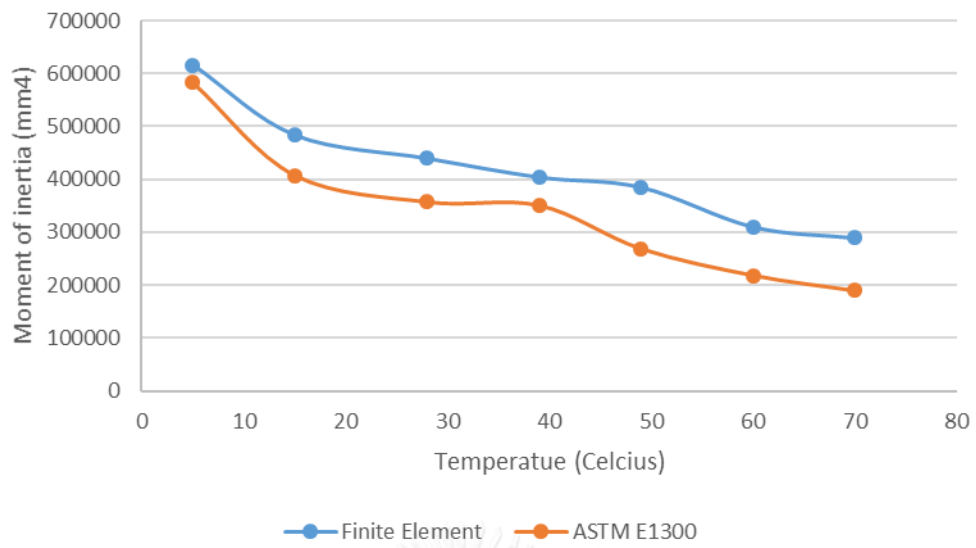
ตารางที่ 5-7 การเปรียบเทียบโมเมนต์ความเฉื่อยจากมาตรฐานการออกแบบกับแบบจำลอง  
เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 1 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ไฟไนต์เอลิเมนต์ (mm <sup>4</sup> )	มาตรฐานการออกแบบ (mm <sup>4</sup> )	% ความแตกต่าง
5	619,682	591,254	4.58
15	617,866	554,277	10.29
28	482,540	403,826	16.31
39	425,253	371,613	12.61
49	424,274	334,353	21.19
60	359,792	302,126	16.03
70	306,899	272,177	11.31

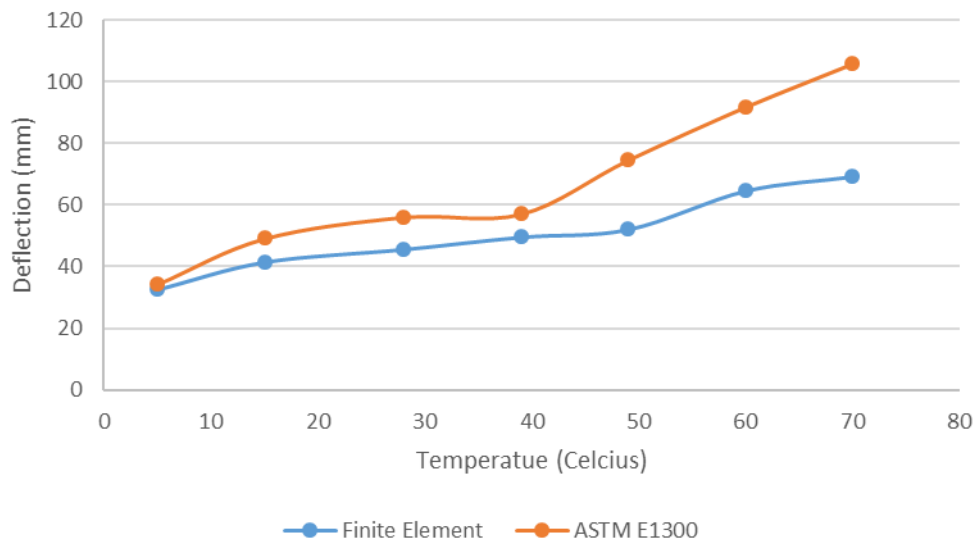
ตารางที่ 5-8 การเปรียบเทียบการโก่งตัวจากมาตรฐานการออกแบบกับแบบจำลอง  
เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 1 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ไฟไนต์เอลิเมนต์ (mm)	มาตรฐานการออกแบบ (mm)	% ความแตกต่าง
5	32.32	33.88	4.58
15	32.42	36.14	10.29
28	41.51	49.60	16.31
39	47.10	53.90	12.61
49	47.21	59.91	21.19
60	55.67	66.30	16.03
70	65.27	73.59	11.31





รูปที่ 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยกับอุณหภูมิต่าง ๆ  
เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที



รูปที่ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับอุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที

ตารางที่ 5-9 การเปรียบเทียบโมเมนต์ความเฉื่อยจากมาตรฐานการออกแบบกับแบบจำลอง  
เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ไฟไนต์เอลิเมนต์ (mm <sup>4</sup> )	มาตรฐานการออกแบบ (mm <sup>4</sup> )	% ความแตกต่าง
5	616,006	582,634	5.42
15	593,658	407,388	31.38
28	439,407	357,224	18.70
39	403,902	350,753	13.16
49	424,274	268,643	36.68
60	359,792	218,373	39.31
70	306,899	189,458	38.28

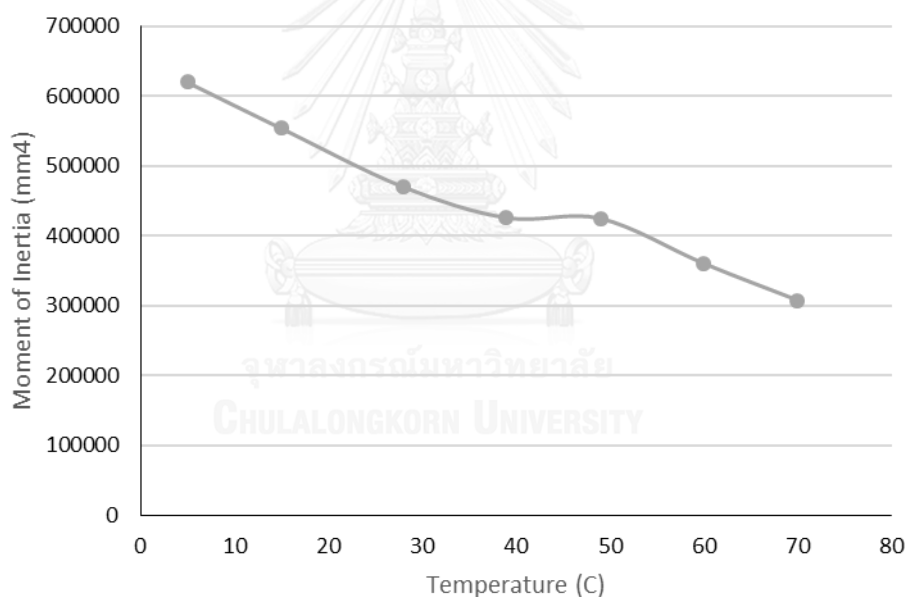
ตารางที่ 5-10 การเปรียบเทียบการโก่งตัวจากมาตรฐานการออกแบบกับแบบจำลอง  
เมื่อมีแรงกระทำต่อเนื่อง 60 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ไฟไนต์เอลิเมนต์ (mm)	มาตรฐานการออกแบบ (mm)	% ความแตกต่าง
5	32.52	34.38	5.42
15	33.74	49.17	31.38
28	45.59	56.07	18.70
39	49.59	57.11	13.16
49	47.21	74.56	36.68
60	55.67	91.73	39.31
70	65.27	105.73	38.27

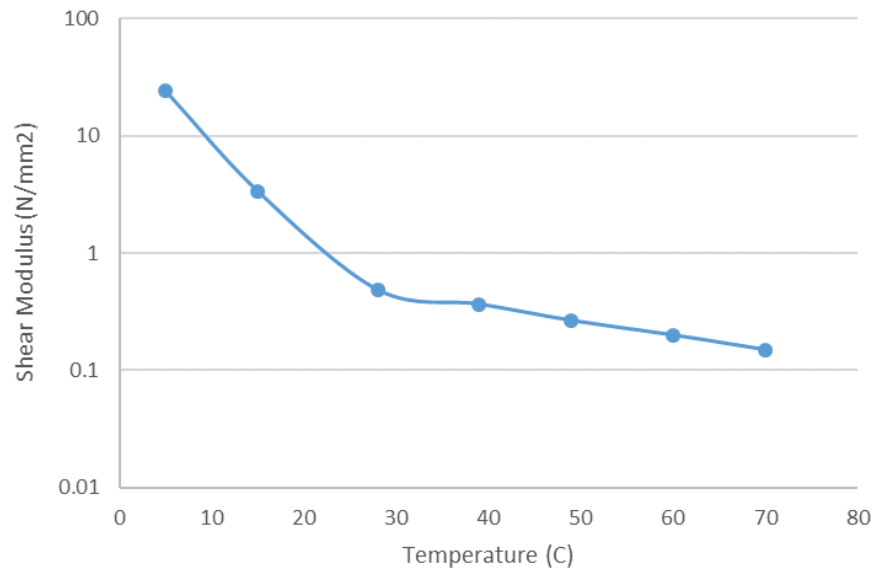
#### 5.4 การพัฒนาสมการการออกแบบเป็นกราฟสำหรับออกแบบกระจกลามิเนต

จากสมการการออกแบบกระจกลามิเนตจำเป็นต้องทราบข้อมูลคือ ขนาดของกระจกลามิเนต โมดูลัสยืดหยุ่นของกระจก และโมดูลัสเฉือนของโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ในการส่งถ่ายแรงเฉือนดังสมการ 2.13 ซึ่งจะนำไปคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยของกระจกลามิเนตดังสมการ 2.12 เพื่อใช้ในการหาค่าการโก่งตัวของกระจกลามิเนตต่อไป

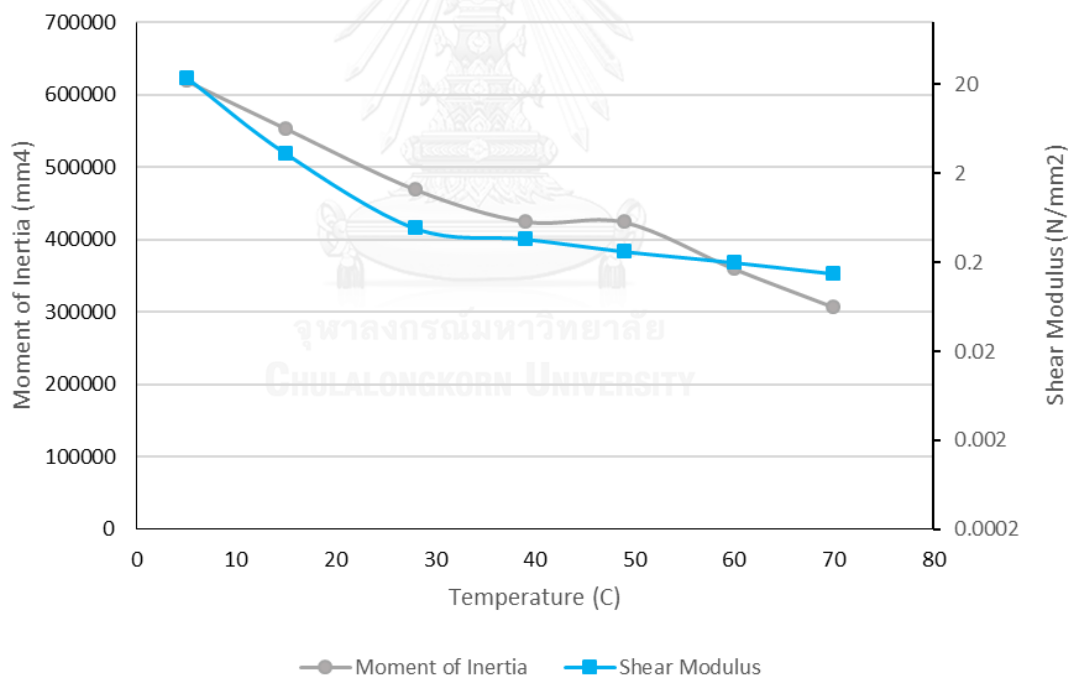
ในการพัฒนาสมการเป็นกราฟสำหรับการออกแบบกระจกลามิเนตที่มีชั้นฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล จากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS พบว่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกระจกลามิเนตขึ้นกับโมดูลัสเฉือนที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อขนาดและความหนาของกระจกลามิเนตมีค่าคงที่ โดยที่กราฟระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยกับอุณหภูมิ และกราฟระหว่างโมดูลัสเฉือนของโพลีเมอร์กับอุณหภูมิ มีความใกล้เคียงกันมาก ดังรูปที่ 5-5 ถึงรูปที่ 5-7 สำหรับเมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื้อ 1 นาที และรูปที่ 5-8 ถึงรูปที่ 5-10 สำหรับเมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื้อ 60 นาที



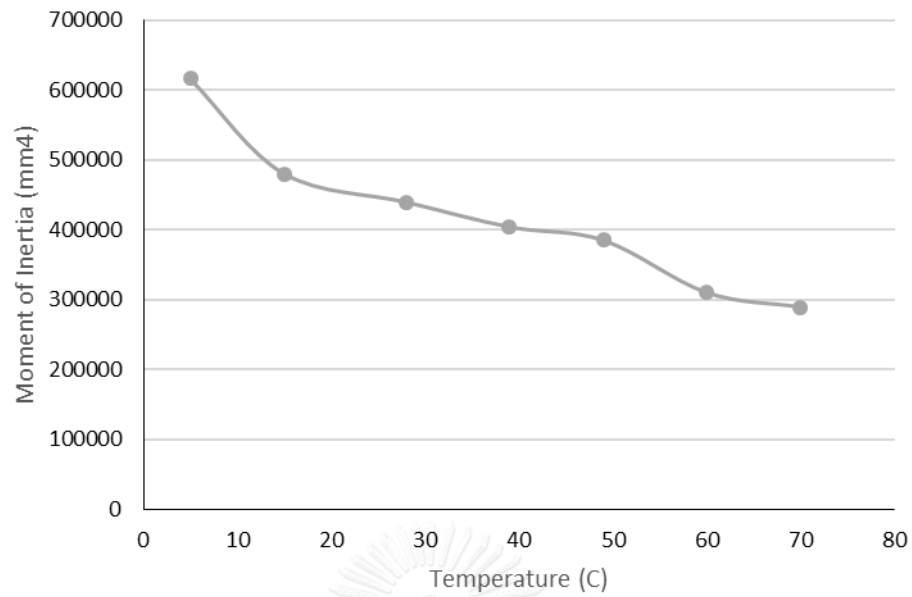
รูปที่ 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยกับอุณหภูมิ สำหรับระยะเวลาต่อเนื้อ 1 นาที



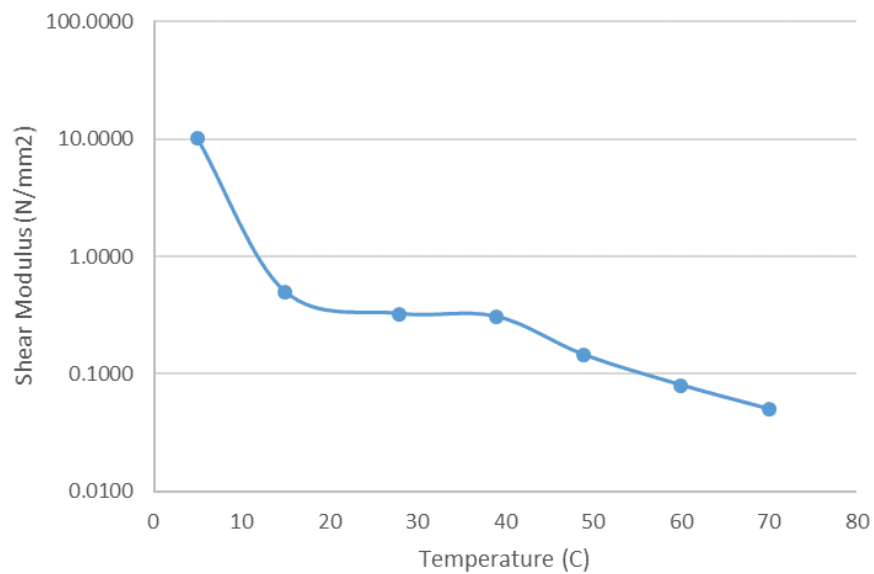
รูปที่ 5-6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับอุณหภูมิ สำหรับระยะเวลาต่อเนื่อง 1 นาที



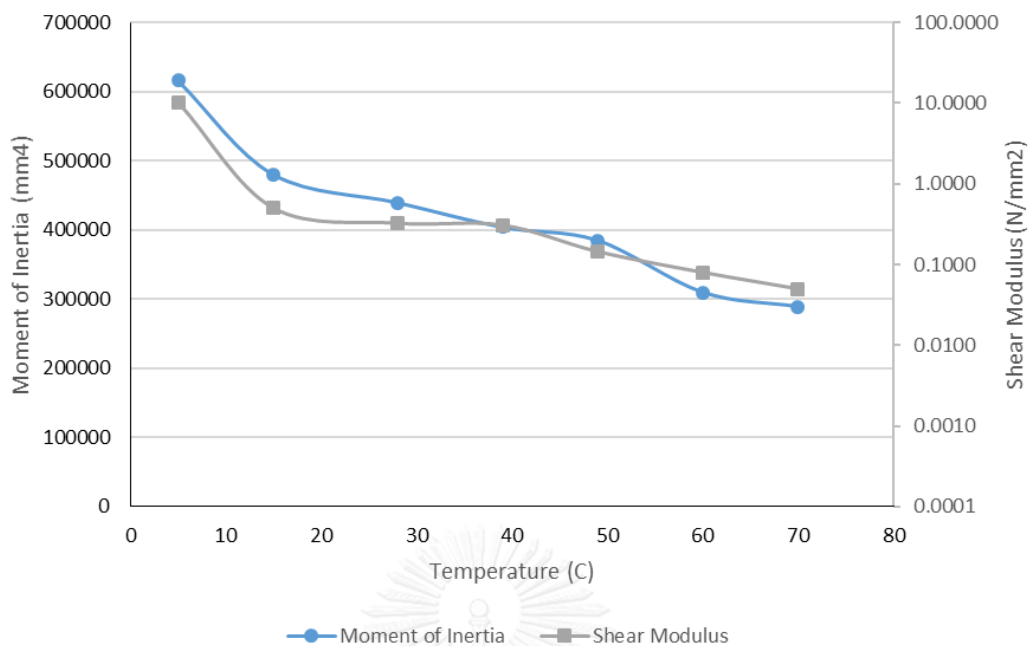
รูปที่ 5-7 การเปรียบเทียบโมเมนต์ความเฉื่อยและโมดูลัสเฉือน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับระยะเวลาต่อเนื่อง 1 นาที



รูปที่ 5-8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยกับอุณหภูมิ สำหรับระยะเวลาต่อเนื่อง 60 นาที



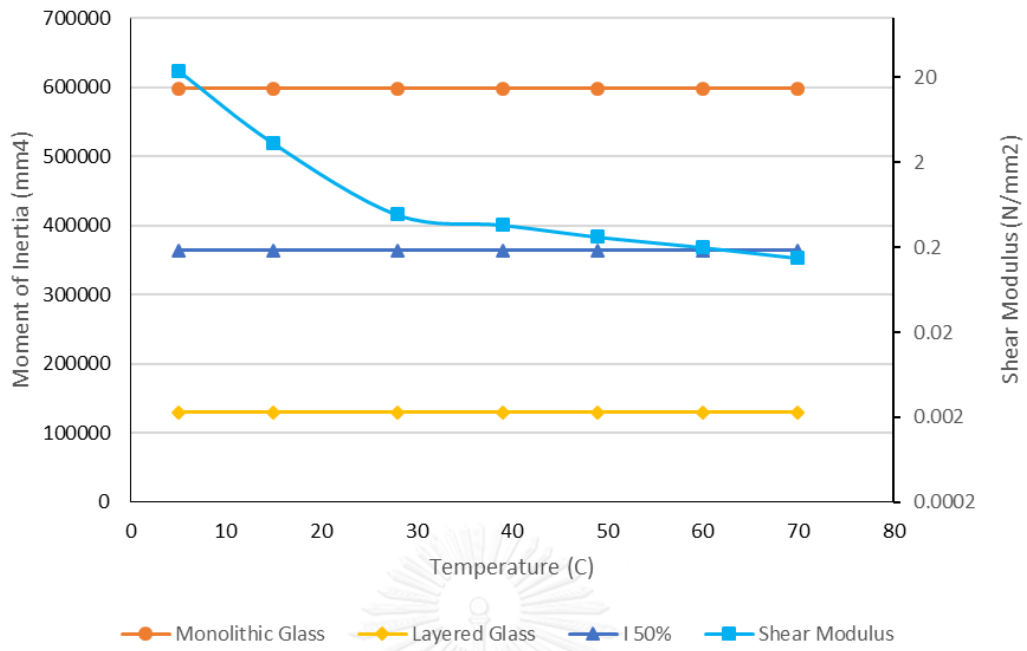
รูปที่ 5-9 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับอุณหภูมิ สำหรับระยะเวลาต่อเนื่อง 60 นาที



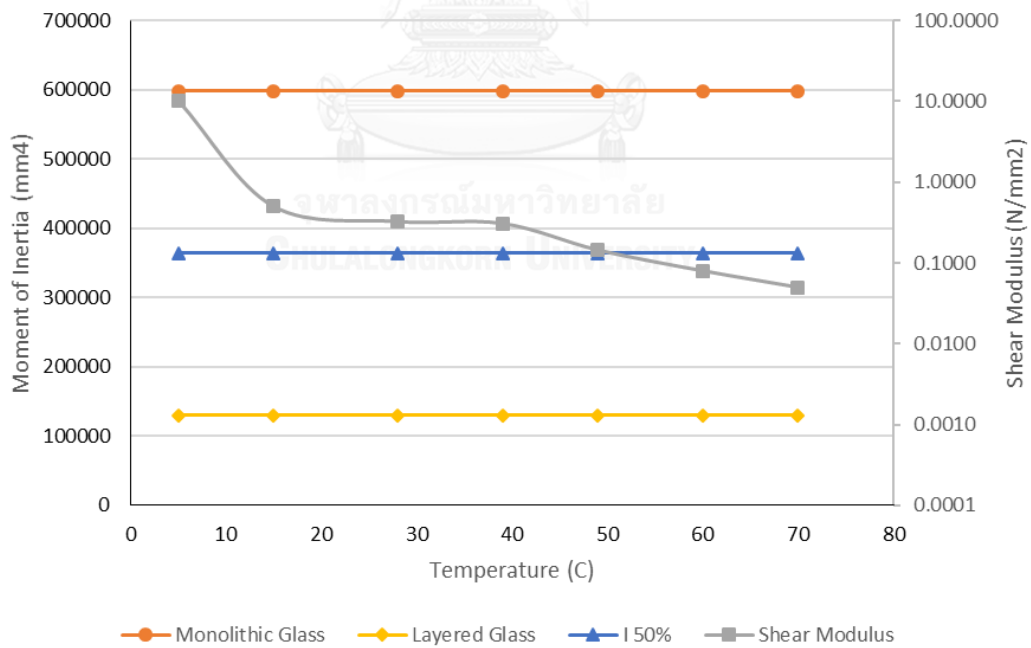
รูปที่ 5-10 การเปรียบเทียบโมเมนต์ความเฉื่อยและโมดูลัสเฉือน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับระยะเวลาต่อเนื่อง 60 นาที

จากข้อสังเกตนี้ทำให้สามารถสร้างกราฟเพื่อใช้ในการออกแบบเมื่อทราบพฤติกรรมของกระจกลามิเนตที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งจากงานวิจัยพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบกระจกชั้นเดียว ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมเข้าใกล้กระจกแยกชั้นมากขึ้น แต่ยังไม่พบอุณหภูมิที่กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบกระจกแยกชั้น

ในการสร้างกราฟสำหรับการออกแบบจะสามารถทำได้โดยการสร้างกราฟระหว่างโมดูลัสเฉือนกับอุณหภูมิต่าง ๆ จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จากนั้นทำการสร้างเส้นตรงโมเมนต์ความเฉื่อยที่กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบกระจกชั้นเดียว ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และสร้างเส้นตรงโมเมนต์ความเฉื่อยที่กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบกระจกแยกชั้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมระหว่างเส้น 2 เส้นนี้จะปฏิบัติตามกราฟระหว่างโมดูลัสเฉือนกับอุณหภูมิ ตั้งแต่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิที่ทำให้กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบกระจกแยกชั้น



รูปที่ 5-11 การสร้างกราฟเพื่อใช้ในการออกแบบกระจกลามิเนต  
เมื่อมีน้ำหนักระทำต่อเนื่อง 1 นาที



รูปที่ 5-12 การสร้างกราฟเพื่อใช้ในการออกแบบกระจกลามิเนต  
เมื่อมีน้ำหนักระทำต่อเนื่อง 60 นาที

## บทที่ 6

### สรุปผลงานวิจัย

#### 6.1 สรุปผลงานวิจัยการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้ทำการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและระยะเวลาที่มีแรงกระทำ ในการสร้างแบบจำลองของวัสดุที่ใช้จะพิจารณาให้กระจกมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น และชั้นฟิล์มระหว่างกระจกหรือโพลีไวนิลบิวทิลมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นหนืด การจำลองพฤติกรรมยืดหยุ่นหนืดของโพลีไวนิลบิวทิลจะใช้แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ อนุกรมพอร์นี่ รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับอุณหภูมิในการสร้างแบบจำลอง โดยแบบจำลองนี้มีการตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับงานวิจัยในอดีต

การศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนต มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 5, 15, 28, 39, 49, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่มีแรงกระทำระยะสั้น 1 นาที และต่อเนื่อง 60 นาที ผลที่ได้จากแบบจำลองพบว่าเมื่อมีน้ำหนักรกระทำต่อเนื้อ 1 นาที ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบกระจกชั้นเดียว ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมเข้าใกล้กระจกแยกชั้นมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กระจกมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับกระจกแยกชั้นมากที่สุด ในขณะที่เมื่อมีน้ำหนักรกระทำต่อเนื้อ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบกระจกชั้นเดียว และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมเข้าใกล้กระจกแยกชั้นมากขึ้น และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กระจกมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับกระจกแยกชั้นมากที่สุด

สำหรับอาคารสูง 80 เมตร ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทย 40 องศาเซลเซียส กระจกลามิเนตจะมีพฤติกรรมอยู่ระหว่างกระจกชั้นเดียวและกระจกแยกชั้น โดยมีค่าคงที่การส่งถ่ายแรงเฉือนจากแบบจำลองเท่ากับ 0.6 ดังนั้นการออกแบบกระจกลามิเนตโดยพิจารณาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของกระจกลามิเนตจะช่วยลดค่าใช้จ่ายได้

#### 6.2 สรุปผลงานวิจัยการเปรียบเทียบค่าที่ใช้การออกแบบ

งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบค่าที่ใช้ในการออกแบบกระจกลามิเนตคือโมเมนต์ความเฉื่อย ประสิทธิภาพและการโก่งตัวจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS เทียบกับมาตรฐานการออกแบบ ASTM E1300-09 พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความถูกต้องใกล้เคียงกับมาตรฐานการออกแบบ



ดังนั้นมาตรฐานการออกแบบจากต่างประเทศสามารถใช้สำหรับการออกแบบกระจกลามิเนตในประเทศไทยได้อย่างปลอดภัย

นอกจากนี้ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทำให้งานวิจัยนี้สามารถเสนอเส้นกราฟสำหรับการออกแบบกระจกลามิเนต โดยการสร้างกราฟระหว่างโมดูลัสเฉือน อุณหภูมิ และโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล เพื่อใช้ในการออกแบบกระจกลามิเนตได้อย่างง่าย รวมถึงทราบแนวโน้มในการใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลในการออกแบบกระจกลามิเนตที่อุณหภูมินอกเหนือจากงานวิจัย

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตที่มีชั้นฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลเท่านั้น และจากการศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตยังไม่พบอุณหภูมิที่ทำให้กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบกระจกแตกชั้น ซึ่งจากงานวิจัยพบว่ากระจกลามิเนตจะมีพฤติกรรมแบบกระจกแตกชั้นที่อุณหภูมิมากกว่า 70 องศาเซลเซียส ทั้งระยะเวลาที่มีแรงกระทำ 1 และ 60 นาที ดังนั้นในงานวิจัยครั้งต่อไปเพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระจกลามิเนตที่มีพฤติกรรมแบบกระจกแตกชั้น ควรทำการศึกษาที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การพัฒนากราฟสำหรับการออกแบบกระจกลามิเนตที่มีชั้นฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล ยังต้องการทราบอุณหภูมิที่ทำให้กระจกลามิเนตมีพฤติกรรมแบบกระจกแตกชั้น เพื่อให้กราฟมีความสมบูรณ์และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] Hooper, J. On the bending of architectural laminated glass. International Journal of Mechanical Sciences 15(4) (1973): 309-323.
- [2] Behr, R., Minor, J., Linden, M., and Vallabhan, C. Laminated glass units under uniform lateral pressure. Journal of structural Engineering 111(5) (1985): 1037-1050.
- [3] Behr, R.A., Minor, J.E., and Linden, M.P. Load duration and interlayer thickness effects on laminated glass. Journal of Structural Engineering 112(6) (1986): 1441-1453.
- [4] ASTM. Standard practice for determining load resistance of glass in buildings. in *Annual Book of ASTM Standards, E 1300-07*. 2007.
- [5] Mehta, M., Scarborough, W., and Armpriest, D. Building construction: principles, materials, and systems. Pearson Prentice Hall Ohio, 2008.
- [6] AAMA. AAMA CW-DG-1 - 96 Editorial Revision. in *Curtain Wall Design Guide Manual*. 2005.
- [7] O'Regan, C. Structural use of glass in buildings. IStructE Ltd, 2014.
- [8] AS. Glass in building - Selection and installation. in *Australian Standard 1288*. 2006.
- [9] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร. 2550.
- [10] Bennison, S. and Stelzer, I. Structural properties of laminated glass. Short course, glass performance days, Tampere (Finland) (2009).
- [11] Calderone, I., Davies, P., Bennison, S.J., Xiaokun, H., and Gang, L. Effective laminate thickness for the design of laminated glass. Glass Performance Days, Tampere, Finland, June (2009): 12-15.
- [12] Newmark, N.M. Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction. Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis 9(1) (1951): 75-92.

- [13] Behr, R., Minor, J., and Norville, H. Structural behavior of architectural laminated glass. Journal of Structural Engineering 119(1) (1993): 202-222.
- [14] BRACKIN, M.S. Development of a Procedure to Evaluate the Shear Modulus of Laminated Glass Interlayers. Texas A&M University, 2010.
- [15] Molnár, G., Vigh, L.G., Stocker, G., and Dunai, L. Finite element analysis of laminated structural glass plates with polyvinyl butyral (PVB) interlayer. Periodica Polytechnica. Civil Engineering 56(1) (2012): 35.
- [16] Fors, C. Mechanical Properties of Interlayers in Laminated Glass-Experimental and Numerical Evaluation. TVSM (2014).





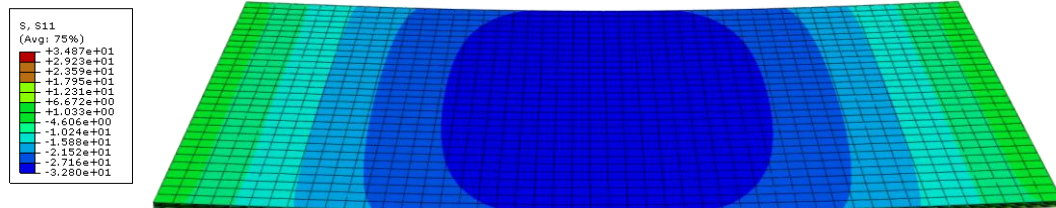
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

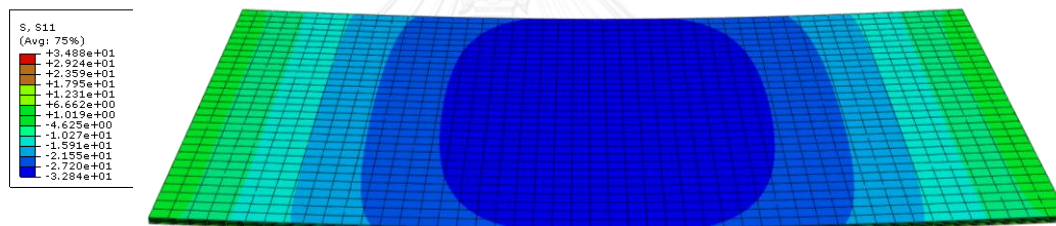
## ภาคผนวก ก.

ก.1 ผลจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่อง 1 นาที

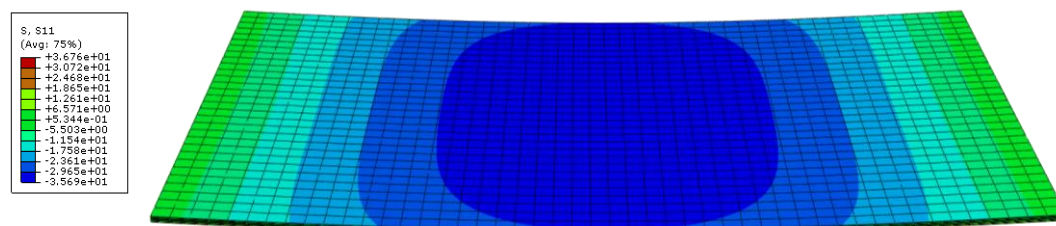
ก.1.1 ความเค้น (Stress)



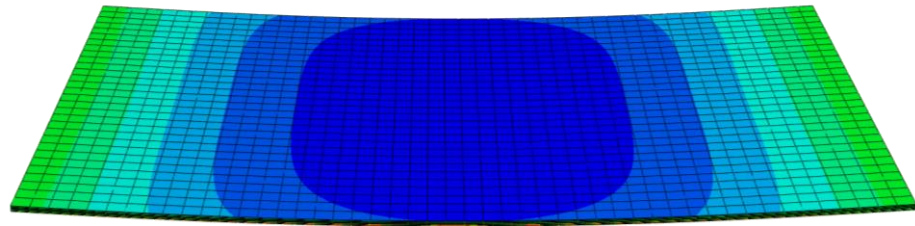
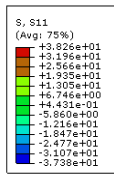
รูป ก-1 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



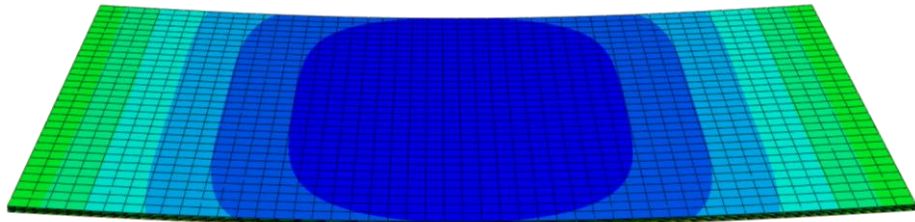
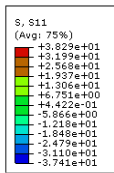
รูป ก-2 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส



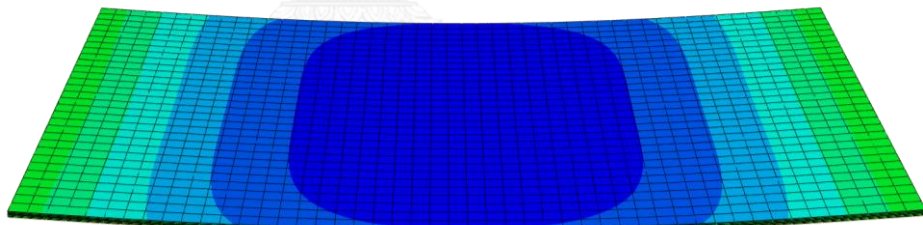
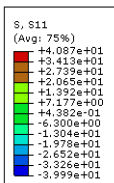
รูป ก-3 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส



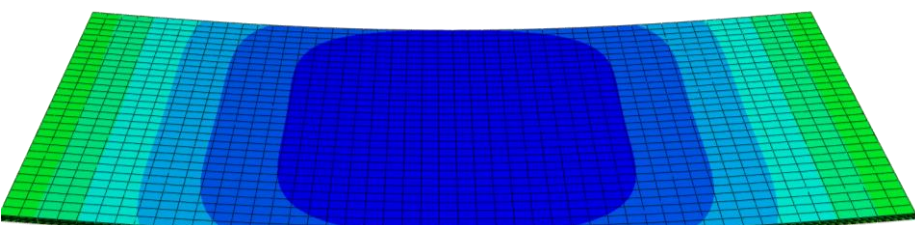
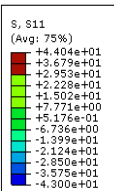
รูป ก-4 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส



รูป ก-5 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส

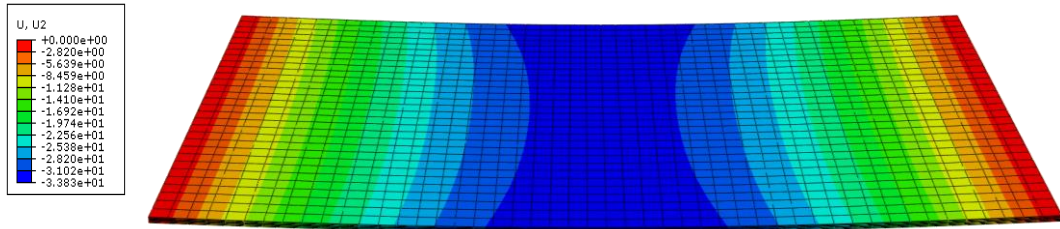


รูป ก-6 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

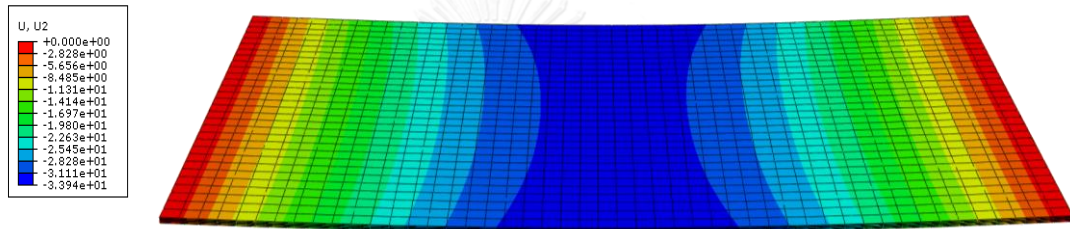


รูป ก-7 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

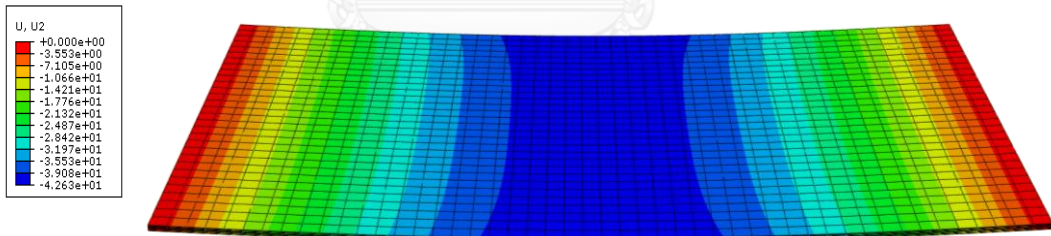
### ก.1.2 การโก่งตัว (Deflection)



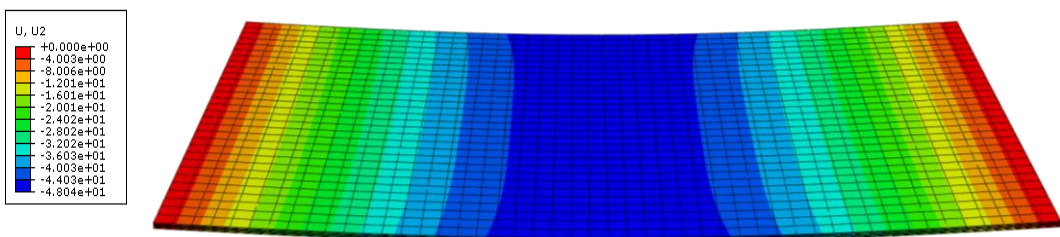
รูป ก-8 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งที่ 5 องศาเซลเซียส



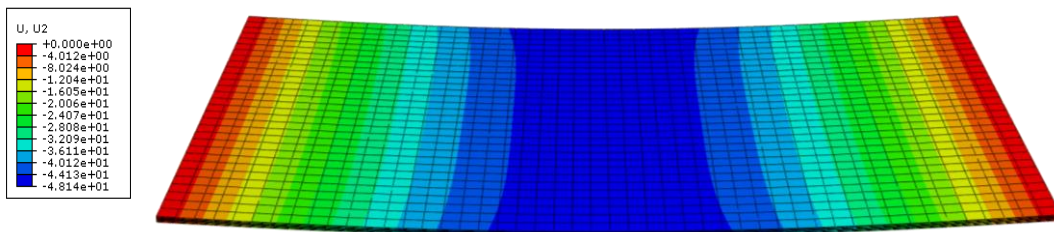
รูป ก-9 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งที่ 15 องศาเซลเซียส



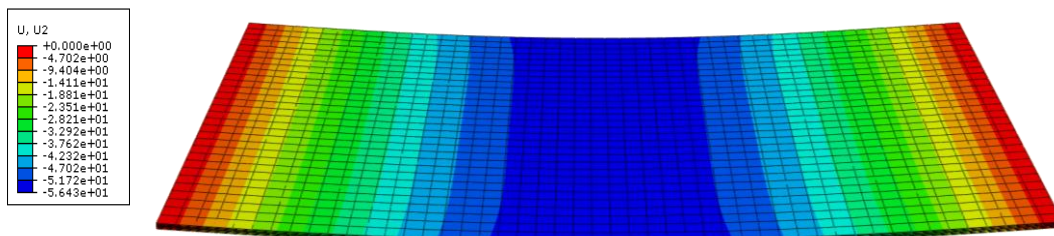
รูป ก-10 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งที่ 28 องศาเซลเซียส



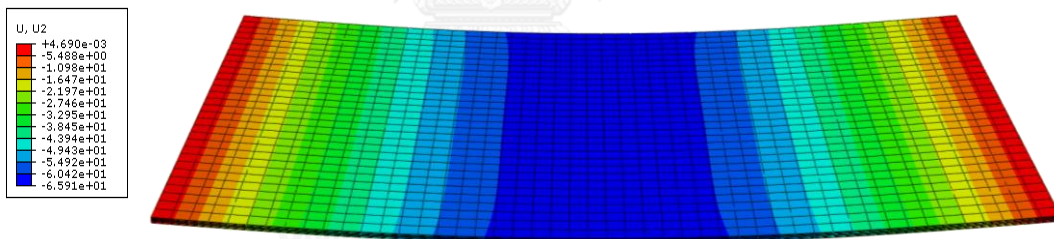
รูป ก-11 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งที่ 39 องศาเซลเซียส



รูป ก-12 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งที่ 49 องศาเซลเซียส



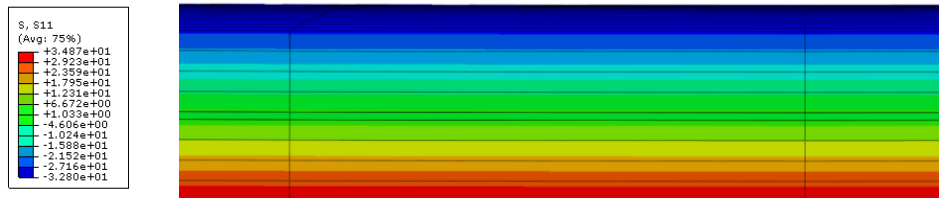
รูป ก-13 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งที่ 60 องศาเซลเซียส



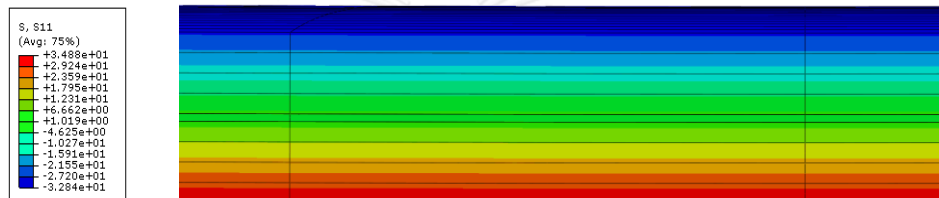
รูป ก-14 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งที่ 70 องศาเซลเซียส



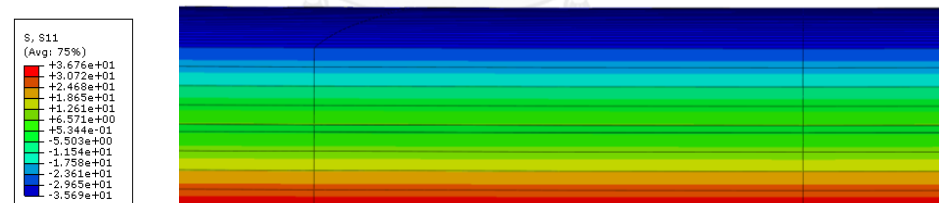
### ก.1.3 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ



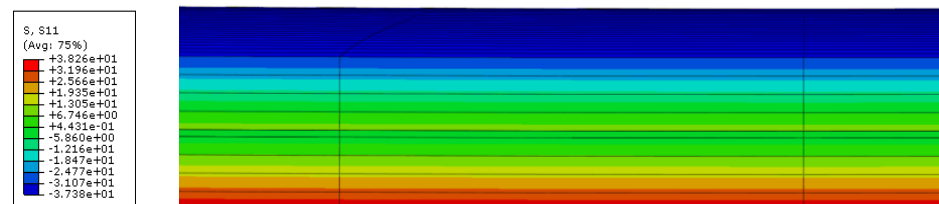
รูป ก-15 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้ง 5 องศาเซลเซียส



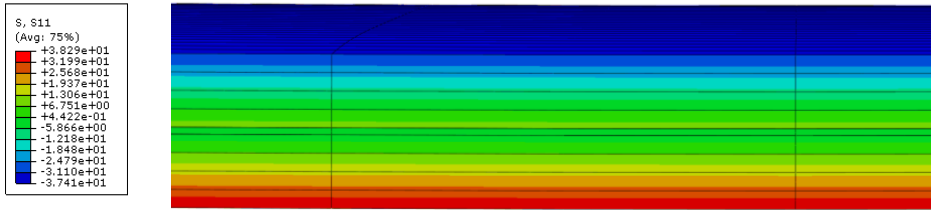
รูป ก-16 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้ง 15 องศาเซลเซียส



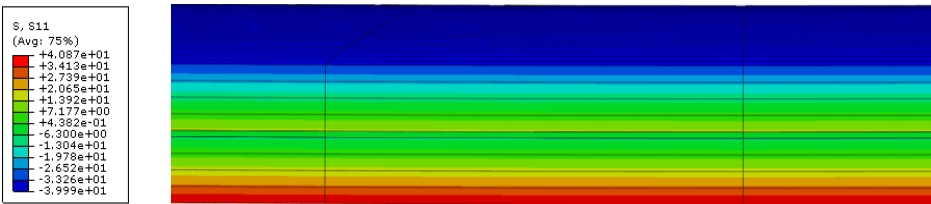
รูป ก-17 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้ง 28 องศาเซลเซียส



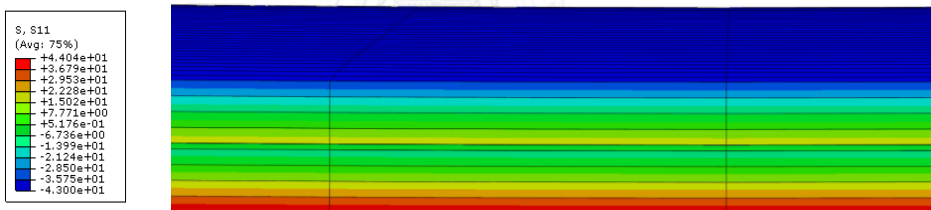
รูป ก-18 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้ง 39 องศาเซลเซียส



รูป ก-19 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 49 องศาเซลเซียส



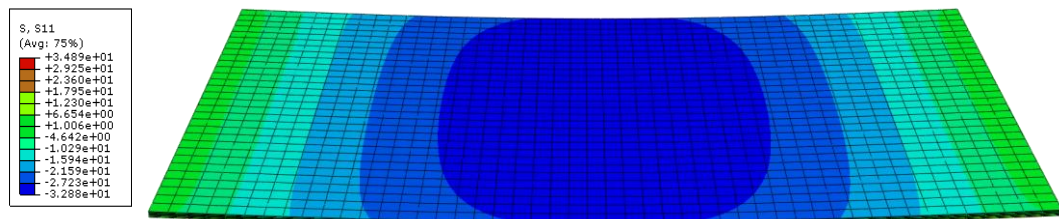
รูป ก-20 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 60 องศาเซลเซียส



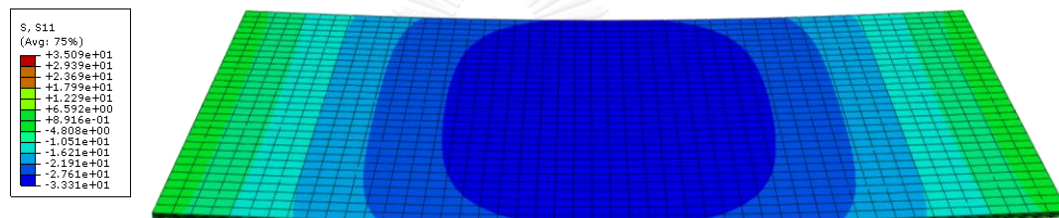
รูป ก-21 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 70 องศาเซลเซียส

ก.2 ผลจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่อง 60 นาที

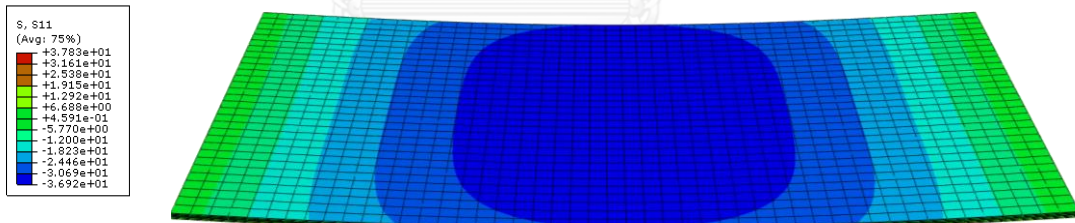
ก.2.1 ความเค้น (Stress)



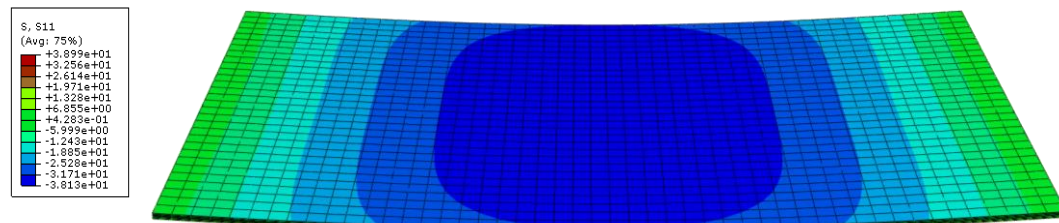
รูป ก-22 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



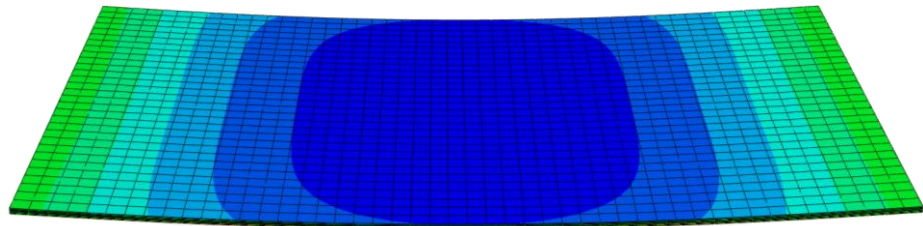
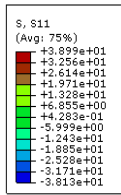
รูป ก-23 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส



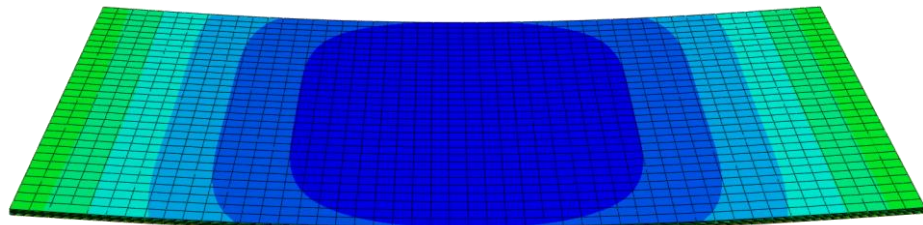
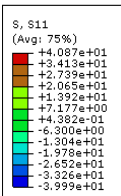
รูป ก-24 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส



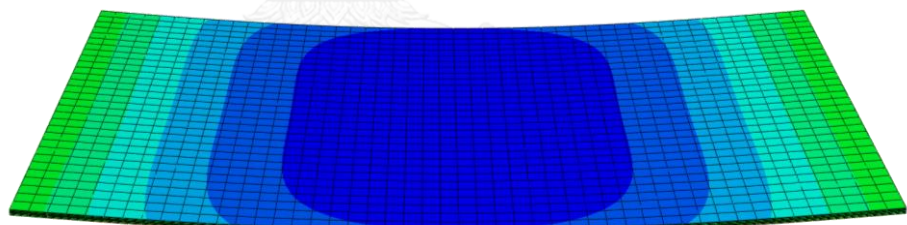
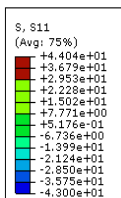
รูป ก-25 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส



รูป ก-26 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส

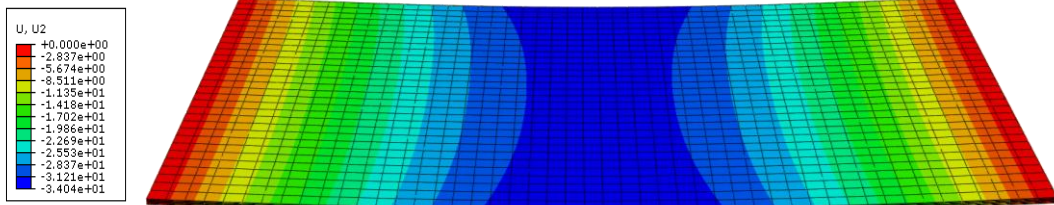


รูป ก-27 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

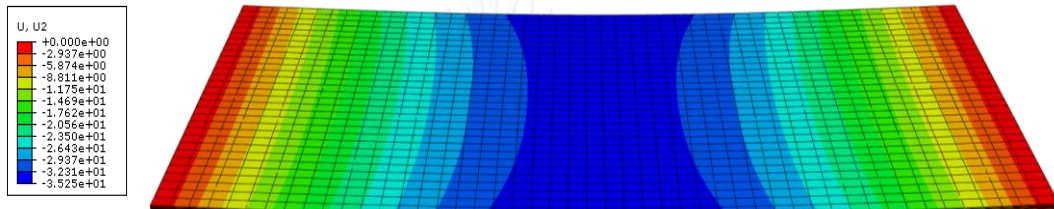


รูป ก-28 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

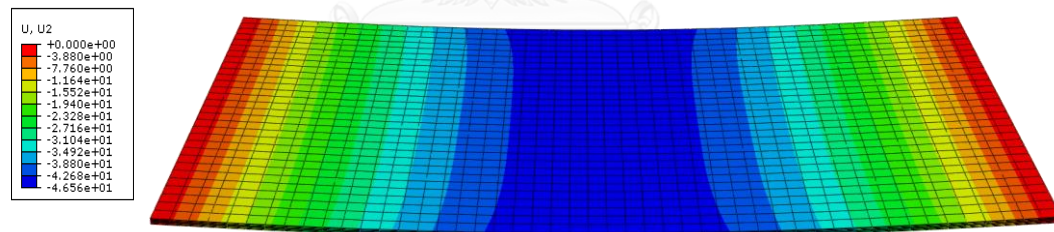
ก.2.2 การโก่งตัว (Deflection)



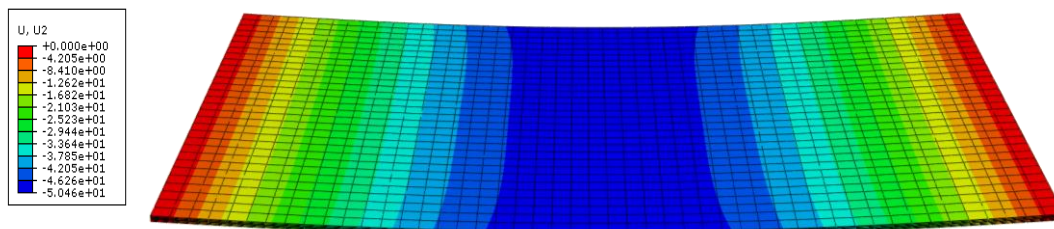
รูป ก-29 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



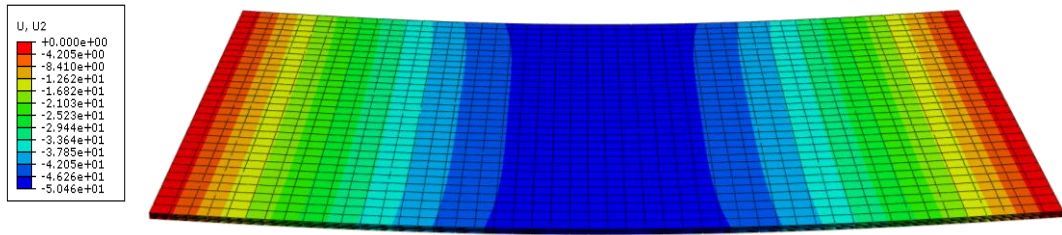
รูป ก-30 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส



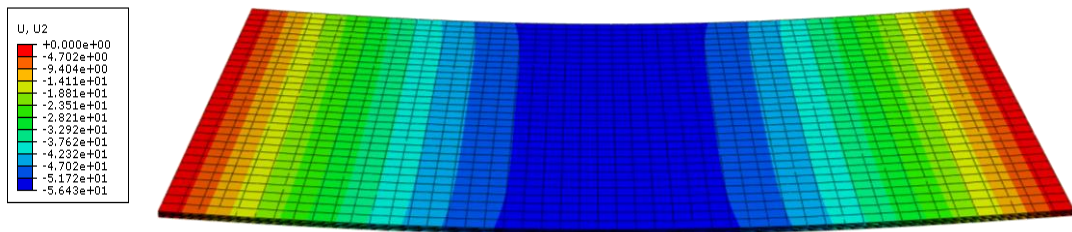
รูป ก-31 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส



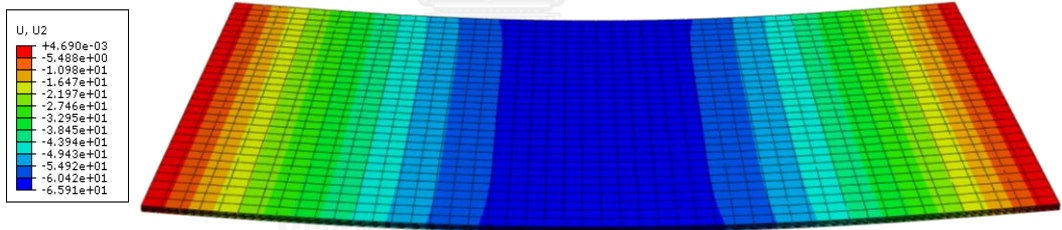
รูป ก-32 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส



รูป ก-33 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส

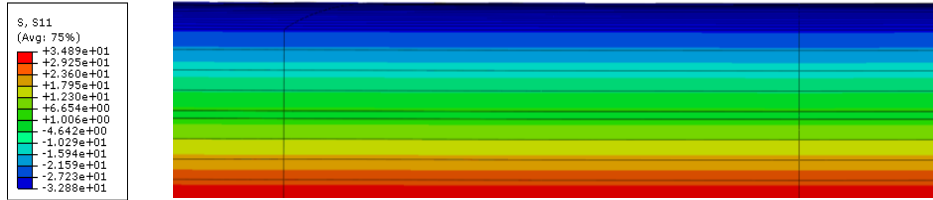


รูป ก-34 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

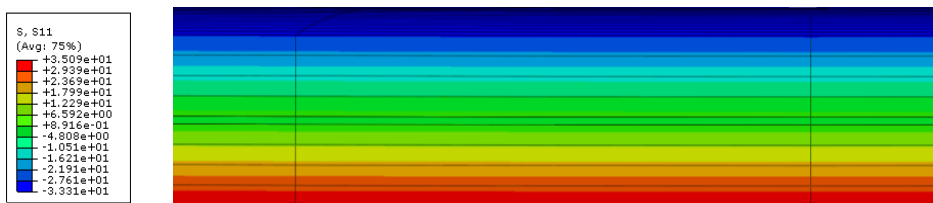


รูป ก-35 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

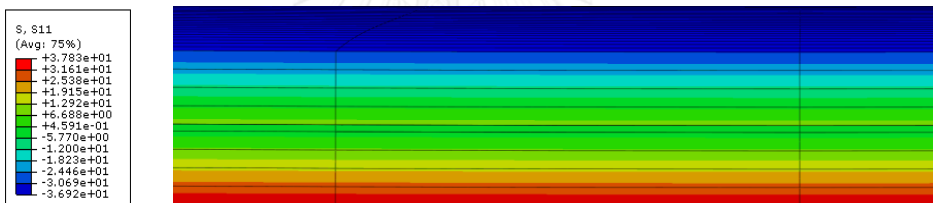
### ก.2.3 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ



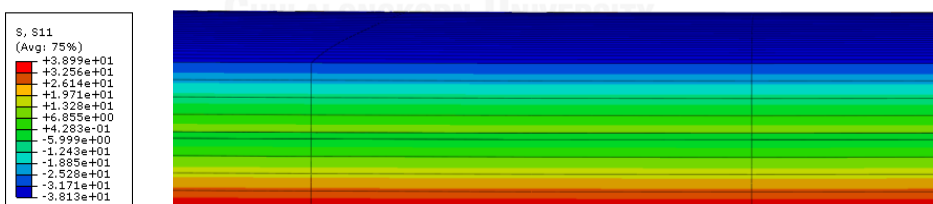
รูป ก-36 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 5 องศาเซลเซียส



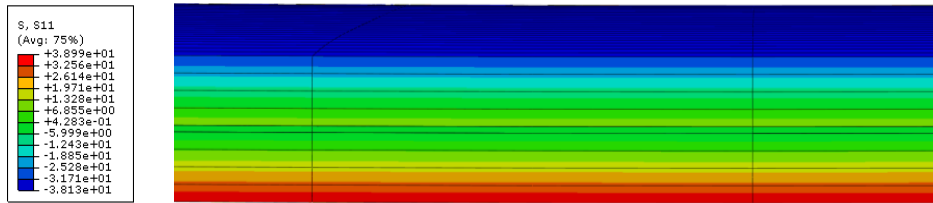
รูป ก-37 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 15 องศาเซลเซียส



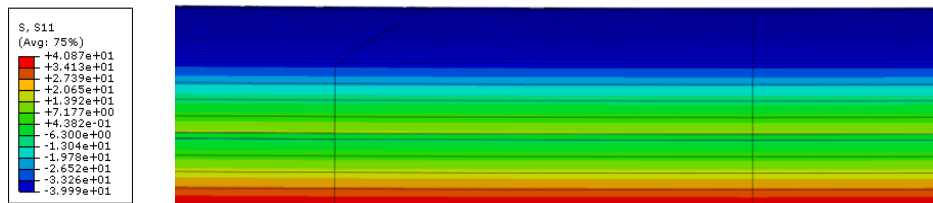
รูป ก-38 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 28 องศาเซลเซียส



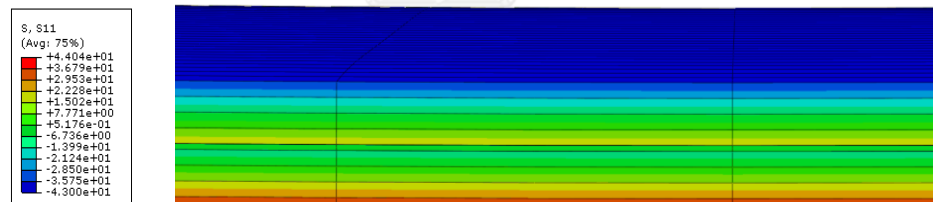
รูป ก-39 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 39 องศาเซลเซียส



รูป ก-40 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 49 องศาเซลเซียส



รูป ก-41 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 60 องศาเซลเซียส



รูป ก-42 ความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 70 องศาเซลเซียส



### ภาคผนวก ข.

การคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อย (I) และค่าการโก่งตัว ( $\Delta$ ) ของกระจกลามิเนตขนาด 2,438 x 1,524 x 16.76 มิลลิเมตร ประกอบด้วยกระจกธรรมดา 2 ชั้น ความหนาชั้นละ 8 มิลลิเมตร และฟิล์ม โพลีไวนิลบิวทิลความหนา 0.76 มิลลิเมตร

ตาราง ข-1 โมดูลัสเฉือนของโพลีไวนิลบิวทิลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	โมดูลัสเฉือน (MPa)	
	1 นาที	60 นาที
5	24.0688	10.2300
15	3.3470	0.5005
28	0.4850	0.3245
39	0.3670	0.3070
49	0.2265	0.1447

ข.1 การคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าการโก่งตัวจากแบบจำลอง ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่อง 1 นาที

$$\Delta = 32.3237 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$I = \frac{5}{384} \frac{wl^4}{E\Delta} = \frac{5 \times 0.002 \times 1,524 \times 2,438^4}{384 \times 70000 \times 32.3237} = 619,683 \text{ มิลลิเมตร}^4$$

ข.2 การคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าการโก่งตัวจากมาตรฐานการออกแบบ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อเนื่อง 1 นาที

$$H = t + \frac{h_1 + h_2}{2} = 0.76 + \frac{8 + 8}{2} = 8.76 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} bh_1^3 = \frac{1}{12} \times 1,524 \times 8^3 = 65,024 \text{ มิลลิเมตร}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} bh_2^3 = \frac{1}{12} \times 1,524 \times 8^3 = 65,024 \text{ มิลลิเมตร}^4$$

$$\Gamma = \frac{1}{1 + \beta \frac{Et}{Gbl^2} \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}} = \frac{1}{1 + 9.6 \left( \frac{70000 \times 0.76}{24.0688 \times 1,524 \times 2438^2} \right) \left( \frac{12,192 \times 12,192}{12,192 + 12,192} \right)}$$

$$\Gamma = 0.9859$$

$$\begin{aligned}
 I_{eq} &= I_1 + I_2 + \Gamma \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} H^2 \\
 &= 65,024 + 65,024 + 0.9859 \left( \frac{12,192 \times 12,192}{12,192 + 12,192} \right) (8.76^2) \\
 &= 591,254.49 \text{ มิลลิเมตร}^4 \\
 \Delta &= \frac{5}{384} \frac{wl^4}{EI} = \frac{5}{384} \times \frac{0.002 \times 1,524 \times 2,438^4}{70,000 \times 591,254.49} = 33.8788 \text{ มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววีระยา ปัญญาสรรเสริญ เกิดเมื่อวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดสมุทรปราการ เป็นบุตรคนที่ 3 จากจำนวนทั้งหมด 3 คน ของคุณพ่อมีชัย ปัญญาสรรเสริญ และคุณแม่สุวรรณี ช่อเหลี่ยม ได้เข้ารับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนสาธิตบางนา ส่วนในระดับมัธยมศึกษาได้เข้ารับการศึกษที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (โครงสร้าง) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558 จนถึงปัจจุบัน

