

การวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

Finite element analysis of tempered glass with safety film subjected to blast loading



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

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรง ระเบิดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
โดย	นายสิริวิชญ์ อัครสุด
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จงวิวัฒน์สกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)	
.....	กรรมการ
(ดร.ลาภยศ ประสิทธิ์ไศภิน)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ปัญญาวุธ จิรติลก)	

สิริวิษณุ อัครสุต : การวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดด้วย  
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ( Finite element analysis of tempered glass with  
safety film subjected to blast loading) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข

เหตุการณ์ระเบิดที่เกิดขึ้นตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันล้วนก่อให้เกิดความสูญเสียทั้งทาง  
ทรัพย์สินและชีวิต อันตรายจะเกิดมากยิ่งขึ้นหากบริเวณที่เกิดการระเบิดมีกระจก มีเหตุการณ์  
ระเบิดเกิดขึ้นที่กรุงออสโล ประเทศนอร์เวย์ ทำให้กระจกบริเวณอาคารราชการได้รับความเสียหาย  
แต่ไม่มีเศษกระจกที่ก่อให้เกิดอันตรายได้เนื่องจากมีการติดตั้งฟิล์มนิรภัยในบริเวณดังกล่าว ดังนั้น  
งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดด้วยระเบียบวิธี  
ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำนายพฤติกรรมของกระจกเทมเปอร์และสามารถจำลองพฤติกรรมกระจก  
เทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัย งานวิจัยเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองกระจกเทมเปอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟ  
ไนต์เอลิเมนต์เพื่อพิจารณาผลของน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ และแรงระเบิดและ  
ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต จากนั้นสร้างแบบจำลองกระจกเทม  
เปอร์ติดฟิล์มนิรภัยตามกรณีศึกษา โดยเริ่มจากระยะการระเบิด 1 m, 2 m และ 4 m โดยแรง  
ระเบิด TNT เริ่มที่ 1 kg และทำการเพิ่มแรงระเบิดขึ้นจนกว่าฟิล์มนิรภัยจะขาด เพื่อหาแรงระเบิด  
สูงสุดที่ฟิล์มสามารถทนได้ ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ที่ระยะระเบิด 2 m ฟิล์มจะ  
ขาดเมื่อระเบิดมีขนาด 2 kg และที่ระยะระเบิด 4 m ฟิล์มจะขาดเมื่อระเบิดมีขนาด 6 kg โดยมีค่า  
โก่งตัวที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจกอยู่ที่ประมาณ 140 mm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6270293421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Finite Element Method, Blast loading, Tempered glass, Safety film

Sirawit Agrasuta : Finite element analysis of tempered glass with safety film subjected to blast loading. Advisor: Assoc. Prof. WITHIT PANSUK, Ph.D.

Explosions from the past to the present have resulted in the loss of property and lives. More dangerous if the blasting area has glass. Government buildings in Oslo, Norway suffered glass damage because of an explosion, however, no dangerous glass fragments were present because the safety film was installed there. This research presents finite element analysis of tempered glass with safety film subjected to blast loading. To predict the behavior of tempered glass and be able to simulate the behavior of tempered glass with safety film. The research first develops the finite element model of tempered glass to determine the effect of uniform loading and blast loading. The results were validated by the previous experimental test. Then, the researcher developed the finite element model of tempered glass with safety film based on the case study. Starting from the explosion distance of 1 m, 2 m and 4 m using TNT explosive weighing starting at 1 kg and increasing the blast until the safety film is breaking. To determine the maximum strength of safety film. The results showed that at a standoff distance 2 m safety film breaks when TNT explosive weighing is 2 kg, and at a standoff distance 4 m safety film breaks when TNT explosive weighing to 6 kg with a deflection at the center of glass about 140 mm.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาให้ความรู้และคำแนะนำในการทำวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, ดร.ลาภยศ ประสิทธิ์โสภิน และ ดร.ปัญญาวุธ จิรติลก ที่ให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ และคำแนะนำเพื่อใช้ในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ไม่ได้ออกนามทุกคนคอยให้ความช่วยเหลือคำแนะนำในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาทำวิทยานิพนธ์จนสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นายมานัส อัครสุต และ นางพรทิพา อัครสุต ที่ให้ความอุปการะและเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สิริวิษณุ อัครสุต

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ .....	1
สารบัญตาราง.....	5
บทที่ 1 บทนำ .....	6
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	6
1.2 วัตถุประสงค์ .....	7
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	8
2.1 ประเภทของกระจกที่ใช้กับงานอาคาร.....	8
2.1.1 กระจกแผ่น (Sheet Glass).....	9
2.1.2 กระจกโฟลต (Float Glass) .....	10
2.1.3 กระจกอบความร้อน (Heat Treated Glass).....	11
2.1.4 กระจกเคลือบผิว (Surface Coated Glass).....	13
2.1.5 กระจกดัดแปลง (Processed Glass) .....	13
2.1.6 กระจกอื่น ๆ .....	14
2.2 มาตรฐาน ASTM E1300 [2] .....	15
2.3 คุณสมบัติของกระจก .....	16



2.4	มาตรฐาน ASTM D882 [4] .....	16
2.5	คุณสมบัติฟิล์มนิรภัย .....	17
2.6	แรงระเบิด (Blast Load) .....	18
2.6.1	ชนิดของวัตถุระเบิด .....	18
2.6.2	ค่าเปรียบเทียบกำลัง (Relative Effectiveness Factors) .....	18
2.6.3	พฤติกรรมของการระเบิด .....	21
2.6.4	ประเภทของแรงระเบิด .....	22
2.6.5	พฤติกรรมของคลื่นแรงระเบิด .....	23
2.6.6	การคำนวณแรงกระทำเนื่องจากการระเบิด .....	25
2.7	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	30
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	32
2.8.1	การวิจัย ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรม การทดสอบของกระจก และการทดสอบระเบิด....	32
2.8.2	การวิจัย ศึกษาเกี่ยวกับ การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	44
บทที่ 3	ระเบียบวิธีวิจัย .....	48
3.1	รวบรวมงานวิจัยในอดีต .....	48
3.1.1	การจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอต่อเนื่อง [13]	48
3.1.2	การจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด [11] .....	50
3.2	การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	51
3.2.1	การแบ่งขนาดชิ้นส่วน .....	51
3.3	คุณสมบัติของวัสดุ .....	53
3.3.1	คุณสมบัติกระจก .....	53
3.3.2	คุณสมบัติฟิล์มนิรภัย .....	54
3.4	เงื่อนไขขอบเขต .....	54
3.5	ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง .....	54

3.6 วิเคราะห์กระจกติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด .....	55
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	56
4.1 แบบจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ.....	56
4.2 แบบจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด.....	60
4.3 การวิเคราะห์กระจกติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด .....	64
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัยการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	69
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก. ....	73
ก.1 ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS กระจกเทมเปอร์ภายใต้น้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ.....	73
ก.2 ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS กระจกเทมเปอร์ภายใต้แรงระเบิด .....	76
ก.3 ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด .....	81
ภาคผนวก ข. ....	87
ประวัติผู้เขียน.....	88

## สารบัญภาพ

### หน้า

รูปที่ 2- 1 การแบ่งประเภทของกระจก [1].....	9
รูปที่ 2- 2 กระจกแผ่น (Sheet Glass) ( <a href="https://www.sinoruntai.com/clearsheetglass.html">https://www.sinoruntai.com/clearsheetglass.html</a> ) .....	10
รูปที่ 2- 3 กระจกโฟลต (Float Glass) ( <a href="https://www.wazzadu.com/article/1299">https://www.wazzadu.com/article/1299</a> ).....	10
รูปที่ 2- 4 กระจกเทมเปอร์ (Tempered Glass) ( <a href="http://glassed.vitroglazings.com/topics/heat-strengthened-vs-tempered-glass">http://glassed.vitroglazings.com/topics/heat-strengthened-vs-tempered-glass</a> ).....	12
รูปที่ 2- 5 กระจกฮีตสเตรงเทน (Heat-Strengthened Glass) ( <a href="http://glassed.vitroglazings.com/topics/heat-strengthened-vs-tempered-glass">http://glassed.vitroglazings.com/topics/heat-strengthened-vs-tempered-glass</a> ).....	13
รูปที่ 2- 6 กราฟแสดงการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของ กระจกโฟลตใสหนา 6.0 mm [2] .....	15
รูปที่ 2- 7 คุณสมบัติของเหล็กและกระจก [3].....	16
รูปที่ 2- 9 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันระเบิด ณ จุดใด ๆ จากจุดศูนย์กลางระเบิด [7].....	24
รูปที่ 2- 10 กราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงของแรงดันกับตัวแปรต่าง ๆ [7] .....	25
รูปที่ 2- 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดและเวลาของการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ.....	26
รูปที่ 2- 12 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดช่วงบวกละระยะปรับทอนของการระเบิดกลาง อากาศ [8].....	27
รูปที่ 2- 13 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดช่วงบวกละระยะปรับทอนของการระเบิดบนพื้น [8] .....	28
รูปที่ 2- 14 การเปรียบเทียบค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดระหว่างการระเบิดบนพื้นดิน (hemispherical waves) และการระเบิดกลางอากาศ (spherical waves) [8] .....	29
รูปที่ 2- 15 ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหนึ่งในวิธีการนำมาวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม.....	30
รูปที่ 2- 16 รูปแบบ ชิ้นส่วนชนิดต่าง ๆ [9].....	32
รูปที่ 2- 17 ภาพตัวอย่างการทดสอบแรงระเบิดกับกระจก [10].....	33
รูปที่ 2- 18 การติดตั้งการทดสอบ [10].....	33
รูปที่ 2- 19 เศษกระจกที่เกิดขึ้นด้านหน้าบานกระจก .....	34

รูปที่ 2- 20	เศษกระจกที่เกิดขึ้นหลังบานกระจก .....	35
รูปที่ 2- 21	กราฟแสดงแรงดันและการโก่งตัวของกระจก Pane 3-1-2.....	35
รูปที่ 2- 22	กระจกฝ้า กระจกเคลือบ กระจกใส ตามลำดับ [12].....	37
รูปที่ 2- 23	ชิ้นส่วนของกระจกที่นำมาทดสอบรับแรงดึง [12].....	37
รูปที่ 2- 24	เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Heating Chamber) [12].....	38
รูปที่ 2- 25	เครื่องมือทำการทดสอบ [12].....	38
รูปที่ 2- 26	กราฟอุณหภูมิกับแรงดึงสูงสุดที่ทำให้กระจกเกิดการวิบัติ .....	40
รูปที่ 2- 27	ขนาดและตำแหน่งรูเจาะของกระจกที่ใช้ในการทดสอบ [13] .....	41
รูปที่ 2- 28	ตัวอย่างตัวยึดกระจกรูเจาะขนาดใหญ่.....	41
รูปที่ 2- 29	ตัวอย่างตัวยึดกระจกรูเจาะขนาดเล็ก .....	42
รูปที่ 2- 30	การตั้งค่าการทดสอบ.....	43
รูปที่ 2- 31	การทดสอบในเวลา 3.975 ms .....	43
รูปที่ 2- 32	แบบจำลองกระจกด้วยโปรแกรม Ansys [15] .....	44
รูปที่ 2- 33	กราฟเส้นโค้งแรงดันระเบิดและเวลาโดย free field blast test ของ Kranzer et al. [17].....	45
รูปที่ 2- 34	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	45
รูปที่ 2- 35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ ความเค้น-ความเครียด ของ PVB.....	46
รูปที่ 2- 36	ตัวอย่างการทดสอบของ Kranzer [17] .....	47
รูปที่ 2- 37	stress ที่เกิดขึ้นกระจกขึ้นล่งในเวลา 3 ms และ 4 ms .....	47
รูปที่ 3- 1	ขนาดและตำแหน่งรูเจาะ .....	48
รูปที่ 3- 2	ตัวอย่างการจำลองน้ำหนักกระทำแบบแผ่นกระจายสมำ่เสมอกับกระจกเทมเปอร์ในโปรแกรม ABAQUS .....	49
รูปที่ 3- 3	ขนาดความกว้างยาวของกระจก [11] .....	50
รูปที่ 3- 4	ตัวอย่างการจำลองแรงระเบิดในโปรแกรม ABAQUS.....	51

รูปที่ 3- 5 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×1200mm รูเจาะขนาด 18 mm.....	51
รูปที่ 3- 6 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×1200mm รูเจาะขนาด 38 mm.....	52
รูปที่ 3- 7 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×2400mm รูเจาะขนาด 38 mm.....	52
รูปที่ 3- 8 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×1500 mm.....	52
รูปที่ 3- 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของกระจก .....	53
รูปที่ 3- 10 फिल्मนิรภัยและกระจกเทมเปอร์.....	55
รูปที่ 3- 11 แบบจำลองกระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด .....	55
รูปที่ 4- 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อเนื่องกับค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจก ของกระจกขนาด 1200×1200 mm รูเจาะ 18 mm .....	57
รูปที่ 4- 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อเนื่องกับความเครียดที่จุดกึ่งกลาง ระหว่าง 2 ตัวยึด ของกระจกขนาด 1200×1200 mm รูเจาะ 18 mm .....	57
รูปที่ 4- 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อเนื่องกับค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจก ของกระจกขนาด 1200×1200 mm รูเจาะ 38 mm .....	58
รูปที่ 4- 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อเนื่องกับความเครียดที่จุดกึ่งกลาง ระหว่าง 2 ตัวยึด ของกระจกขนาด 1200×1200 mm รูเจาะ 38 mm .....	58
รูปที่ 4- 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อเนื่องกับค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจก ของกระจกขนาด 1200×2400 mm รูเจาะ 38 mm .....	59
รูปที่ 4- 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อเนื่องกับความเครียดที่จุดกึ่งกลาง ระหว่าง 2 ตัวยึด ของกระจกขนาด 1200×2400 mm รูเจาะ 38 mm .....	59
รูปที่ 4- 7 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกของกระจกตัวอย่างที่ 3 .....	61
รูปที่ 4- 8 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกของกระจกตัวอย่างที่ 9 .....	61
รูปที่ 4- 9 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกของกระจกตัวอย่างที่ 10 .....	62
รูปที่ 4- 10 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกของกระจกตัวอย่างที่ 11.....	62
รูปที่ 4- 11ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกของกระจกตัวอย่างที่ 12.....	63
รูปที่ 4- 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลา ของกระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะ ขนาด 18 mm ระยะระเบิด 1 m.....	64

รูปที่ 4- 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโค้งตัวและเวลา ของกระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะ ขนาด 18 mm ระยะระเบิด 2 m.....	65
รูปที่ 4- 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโค้งตัวและเวลา ของกระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะ ขนาด 18 mm ระยะระเบิด 4 m.....	65
รูปที่ 4- 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโค้งตัวและเวลา ของกระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะ ขนาด 38 mm ระยะระเบิด 1 m.....	66
รูปที่ 4- 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโค้งตัวและเวลาของ กระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะ ขนาด 38 mm ระยะระเบิด 2 m.....	66
รูปที่ 4- 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโค้งตัวและเวลาของ กระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะ ขนาด 38 mm ระยะระเบิด 4 m.....	67
รูปที่ 4- 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโค้งตัวกับขนาดระเบิดTNT ของกระจกขนาด 1200×1200 mm รูเจาะขนาด 18 mm.....	67
รูปที่ 4- 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโค้งตัวกับขนาดระเบิดTNT ของกระจกขนาด 1200×1200 mm รูเจาะขนาด 38 mm.....	68

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2- 1 ตัวคูณปรับค่าตามชนิดของกระจก [2].....	15
ตารางที่ 2- 2 คุณสมบัติของกระจก.....	16
ตารางที่ 2- 3 คุณลักษณะและคุณสมบัติของฟิล์มนิรภัย PROFILON® ER1 [5].....	17
ตารางที่ 2- 4 ตามมาตรฐาน EN 13541 (NS) [6].....	17
ตารางที่ 2- 5 คุณสมบัติฟิล์มนิรภัย .....	18
ตารางที่ 2- 6 ความหนาแน่นและค่าเปรียบเทียบกำลัง (R.E. Factor) สำหรับวัตถุระเบิดแต่ละชนิด [7].....	18
ตารางที่ 2- 7 ประเภทของแรงระเบิด.....	22
ตารางที่ 2- 8 การทดสอบของ Zhang, X., H. Hao, and Z. Wang [10] .....	34
ตารางที่ 2- 9 ขนาดของเศษชิ้นส่วนกระจกหลังจากการทดสอบ .....	35
ตารางที่ 2- 10 ผลการทดสอบ Zhang, X., H. Hao, and Z. Wang [11].....	36
ตารางที่ 2- 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของกระจกใส กระจกเคลือบ และกระจกฝ้า .....	39
ตารางที่ 2- 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของกระจกใสที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	39
ตารางที่ 2- 13 ลักษณะทางกายภาพของตัวยึด 2 ผลิตภัณฑ์.....	42
ตารางที่ 2- 14 คุณสมบัติของวัสดุ.....	46
ตารางที่ 3- 1 ความหนา ขนาดของระเบิด และระยะระเบิดของการทดสอบ [11].....	50
ตารางที่ 3- 2 คุณสมบัติกระจก .....	53
ตารางที่ 3- 3 คุณสมบัติฟิล์มนิรภัย .....	54
ตารางที่ 4- 1 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจก .....	60
ตารางที่ 4- 2 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดของกระจก .....	60
ตารางที่ 4- 3 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจก .....	63

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

กระจก คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติโปร่งใส ทำให้ผู้ใช้งานสามารถมองเห็นทัศนียภาพผ่านไปสู่ภายนอกได้ อีกทั้งกระจกยังสามารถเพิ่มความสวยงามให้กับโครงสร้างของอาคารต่าง ๆ ได้อีกด้วย ด้วยความที่กระจกมีคุณสมบัติดังกล่าว กระจกจึงถูกนำไปใช้ในการทำผนังภายนอกอาคาร กระจกเป็นวัสดุสำเร็จรูปที่ติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็วมากกว่าการก่อผนัง ปัจจุบันจึงนิยมนำกระจกไปใช้ในงานก่อสร้าง

เหตุการณ์ระเบิดเป็นเหตุการณ์ที่ก่อให้เกิดความสูญเสียทั้งทางทรัพย์สินและชีวิต อันตรายจะมากยิ่งขึ้นหากบริเวณที่เกิดระเบิดมีกระจกแตกอาจทำให้ทีมแข่งร่างกายได้ ซึ่งมีเหตุการณ์ระเบิดเกิดขึ้นที่ กรุงออสโล ประเทศนอร์เวย์ มีการก่อการร้ายเกิดขึ้นโดยเป็นการก่อการร้ายจากระเบิดติดรถยนต์จนทำให้พื้นที่เขตราชาการได้รับความเสียหายและถูกทำลายจนเกือบหมด ระเบิดในครั้งนี้คือระเบิด ANFO ขนาด 950 kg แรงระเบิดทำลายส่วนภายนอกของอาคารในวิถี 1 km ทำให้กระจกบริเวณอาคารราชการได้รับความเสียหาย แต่ไม่มีเศษกระจกที่ก่อให้เกิดอันตรายได้เนื่องจากมีการติดตั้งฟิล์มนิรภัย ในบริเวณดังกล่าว

ทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจการวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เนื่องจากกระจกเทมเปอร์มีความแข็งแรงมากกว่ากระจกธรรมดา 3-5 เท่า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถทำนายพฤติกรรมของกระจกเทมเปอร์และจำลองพฤติกรรมของฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดเพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ทำการทดสอบต่อไปในอนาคต โดยงานวิจัยนี้สามารถทำให้ผู้ที่ทำการทดสอบในอนาคตสามารถประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายได้ และยังสามารถเป็นแนวทางในการออกแบบกระจกและฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดได้



## 1.2 วัตถุประสงค์

1. สร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถทำนายพฤติกรรมของกระจกเทมเปอร์
2. จำลองพฤติกรรมกระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้สำหรับการระเบิดแบบอิสระ (Free air burst)
2. หน่วยความเค้นสูงสุดของกระจกที่ยอมให้ มีค่าเท่ากับ 73 MPa ตามมาตรฐานกระจกเทมเปอร์ ASTM E1300
3. กระจกที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ กระจกเทมเปอร์
4. ระเบิดที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ระเบิด TNT
5. ระยะระเบิดที่ใช้ในการวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัย คือ ระยะ 1 m, 2 m และ 4 m
6. ฟิล์มที่นำมาวิเคราะห์ คือ ฟิล์ม PROFILON® ER1

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ทำการทดสอบแรงระเบิดต่อไปในอนาคต โดยข้อมูลนี้สามารถทำให้ผู้ที่นำไปทดสอบสามารถประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย
2. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ สามารถเป็นแนวทางในการออกแบบกระจกและการออกแบบฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดได้

## บทที่ 2

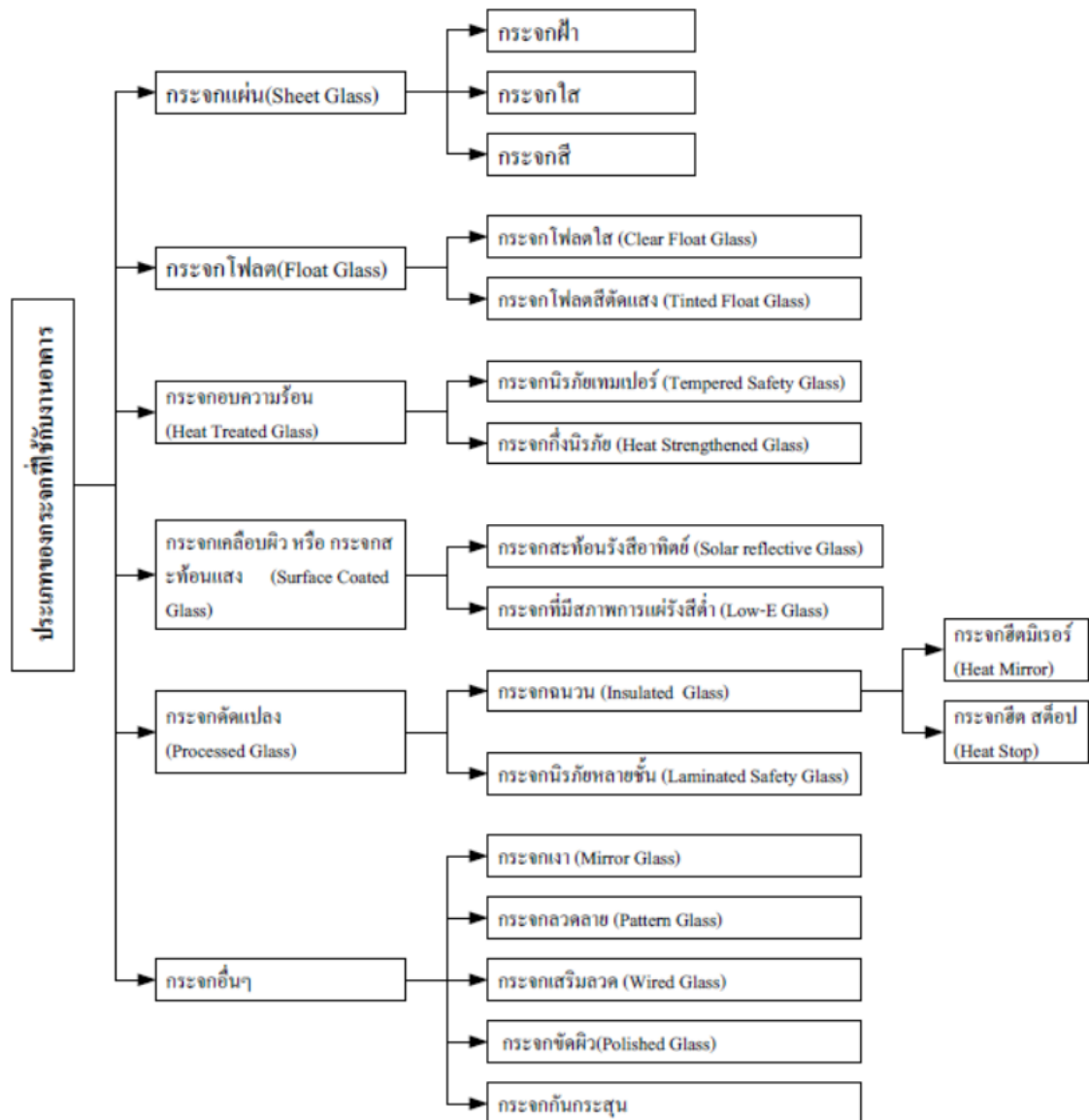
### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ประเภทของกระจกที่ใช้กับงานอาคาร

ปัจจุบันมีการใช้กระจกในการก่อสร้างบ้าน อาคาร เป็นจำนวนมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะติดตั้งบริเวณที่เป็นทางผ่านของลม ความร้อน และแสงจากภายนอก ทำให้ผู้อาศัยสามารถเห็นทัศนียภาพภายนอกได้และยังให้ความสวยงามต่อโครงสร้างเมื่อมองมาจากภายนอก กระจกถือเป็นวัสดุก่อสร้างที่สามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว และสะดวกเมื่อเทียบกับการก่อผนังทึบด้วยคอนกรีต และมีประโยชน์ในเรื่องของการประหยัดพลังงาน คือสามารถป้องกันความร้อนได้ดีและยอมให้แสงผ่านเข้ามา กระจกจึงถือเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในช่วงระยะกว่า 10 ปีที่ผ่านมา

การเลือกใช้กระจกอย่างถูกประเภท จึงมีความสำคัญในการปรับใช้งานกระจกให้เข้ากับลักษณะหรืออาคารนั้น เพราะหากมีการใช้กระจกที่ผิดประเภทไม่ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานจะทำให้กระจกไม่สามารถใช้งานให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุดและความไม่ปลอดภัยอาจเกิดขึ้นกับผู้ใช้งานได้ โดยสามารถแบ่งกระจกออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 6 ประเภท คือ

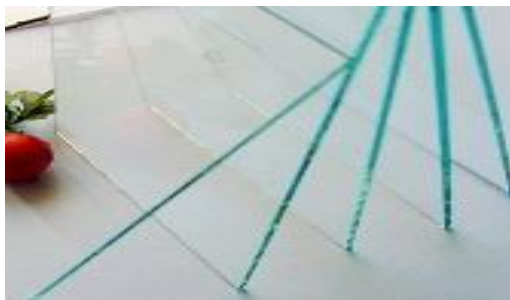
1. กระจกแผ่น (Sheet Glass)
2. กระจกโฟลต (Float Glass)
3. กระจกอบความร้อน (Heat Treated Glass)
4. กระจกเคลือบผิวหรือกระจกสะท้อนแสง (Surface Coated Glass)
5. กระจกดัดแปลง (Processed Glass)
6. กระจกอื่นๆ



รูปที่ 2- 1 การแบ่งประเภทของกระจก [1]

### 2.1.1 กระจกแผ่น (Sheet Glass)

คือ กระจกที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานที่สุดและเป็นที่นิยมมากที่สุด โดยกระจกชนิดนี้นำมาทำหน้าต่างบ้านที่อยู่อาศัย งานทำเครื่องเรือนและงานจำพวกกรอบรูป และมีการนำกระจกแผ่นมาผลิตเป็น กระจกใส กระจกสี และกระจกฝ้า เพื่อเป็นการนำกระจกแผ่นไปใช้งานต่าง ๆ ได้มากขึ้น เช่น ฝากั้นห้อง ประตู



รูปที่ 2- 2 กระจกแผ่น (Sheet Glass)

(<https://www.sinoruntai.com/clearsheetglass.html>)

### 2.1.2 กระจกโฟลต (Float Glass)

คือ กระจกที่ผลิตด้วยระบบโฟลต (Float Process) ทำให้กระจกมีความโปร่งแสง ผิวทั้งสองด้านของกระจกมีลักษณะที่ขนานกันและเรียบสนิท การมองเห็นชัดเจน ให้ภาพสะท้อนที่สมบูรณ์ไม่มีความบิดเบี้ยว ทนต่อการขีดข่วนทำให้เกิดรอยได้อย่างดี กระจกโฟลตมีตำหนิน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตกระจกแผ่น กระจกโฟลตพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการในงานก่อสร้างและผู้ใช้ในวงการกระจกได้มากกว่ากระจกแผ่น เช่น กระจกโฟลตสามารถต้านทานต่อแรงลมได้ดีกว่ากระจกแผ่น ใช้ในการก่อสร้างห้องแสดงสินค้า ตู้โชว์ กระจกเงา สามารถทำให้ผู้มองเห็นสบายตาและดูสวยงาม ใช้ในการผลิตกระจกนิรภัยที่ใช้กับอาคาร ทั้งนี้กระจกโฟลตสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ กระจกโฟลตใส และกระจกโฟลตสีตัดแสง



รูปที่ 2- 3 กระจกโฟลต (Float Glass)

(<https://www.wazzadu.com/article/1299>)

### 2.1.3 กระจกอบความร้อน (Heat Treated Glass)

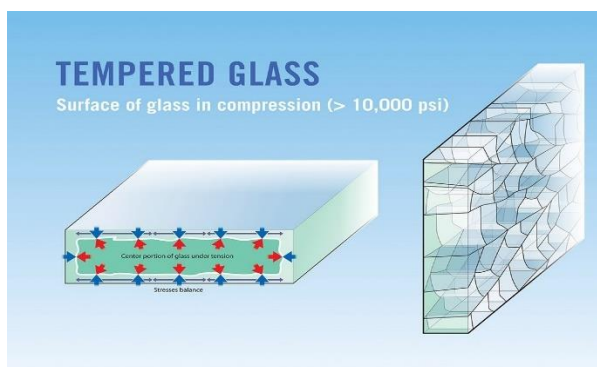
คือ กระจกที่เกิดจากการนำกระจกแผ่นหรือกระจกโพลต์ไปผ่านกระบวนการปรับแต่งคุณภาพเนื้อกระจกหรือแปรรูป เพื่อให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากยิ่งขึ้น รับแรงที่มากกระทำได้เพิ่มขึ้น ปัจจุบันนิยมนำกระจกโพลต์มาผลิตกระจกอบความร้อน เนื่องจากมีคุณสมบัติเมื่อผ่านกระบวนการอบร้อนแล้ว จะเกิดความเสียหายน้อยกว่ากระจกแผ่น กระจกอบร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กระจกนิรภัยเทมเปอร์ และกระจกฮีตสเตรงเทน

กระจกนิรภัยเทมเปอร์ (Tempered Safety Glass) คือ การนำกระจกพื้นฐานหรือกระจกเคลือบผิวไปผ่านกระบวนการเทมเปอร์ (Tempering) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยใช้หลักการเดียวกับคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete) คือ การทำให้เกิดชั้นของแรงอัด (Compressive Stress) ขึ้นที่ผิวกระจกเพื่อด้านแรงจากภายนอกโดยให้ความร้อนกับกระจกที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดอ่อนตัว (Softening Point) ของกระจกเล็กน้อยที่อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 650-700 องศาเซลเซียส และทำให้ผิวกระจกเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการใช้ลมเป่าให้กระจกเย็นตัวลง (Air Quenching) ที่ผิวของกระจกทั้ง 2 ด้าน ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกระจกกับส่วนกลางของกระจกทำให้เกิดเป็นชั้นอัดแรงขึ้นที่ผิวกระจกทั้ง 2 ด้าน โดยจะประกบชั้นส่วนกลางมีลักษณะคล้ายแกนดิวซ์และชั้นที่ผิวนี้จะช่วยต้านแรงจากภายนอก ทำให้เกิดสมดุลกัน

คุณสมบัติของกระจกเทมเปอร์

1. ค่าความแข็งแรงของแรงดึงและแรงที่ทำให้เกิดการงอ (Bending Strength) เมื่อเทียบกับกระจกธรรมดาที่ความหนา 5 มิลลิเมตรเท่ากัน กระจกธรรมดามีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงที่ทำให้กระจกหักงอเท่ากับ 500-650 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ส่วนกระจกเทมเปอร์มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงที่ทำให้กระจกหักงอสูงถึง 1500 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
2. การต้านทานน้ำหนัก (Loading Resistance) คือ ค่าความต้านทานต่อแรงกระทบกระแทก จะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ
  - การต้านทานแรงกระทบ (Static Load Resistance) กระจกเทมเปอร์สามารถทนต่อแรงกระทบได้มากกว่ากระจกธรรมดาประมาณ 3-5 เท่า
  - การต้านทานแรงกระแทก (Impact Load Resistance) กระจกเทมเปอร์สามารถรับแรงกระทบได้มากกว่ากระจกธรรมดาประมาณ 4 เท่า
3. การแตกของกระจกเทมเปอร์จะแตกกระจายออกเป็นเม็ดเล็ก ๆ คล้ายเมล็ดข้าวโพด มีความคมน้อย จึงทำให้มีความปลอดภัยมากกว่ากระจกธรรมดา

4. การต้านทานความร้อน (Heat Resistance) คือ ความทนทานของกระจกเมื่อสภาวะแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งที่ความหนา 5 มิลลิเมตรเท่ากัน กระจกเทมเปอร์สามารถทนต่ออุณหภูมิได้มากกว่ากระจกธรรมดาประมาณ 170 องศาเซลเซียสและจะเริ่มแตกที่อุณหภูมิประมาณ 220 องศาเซลเซียส



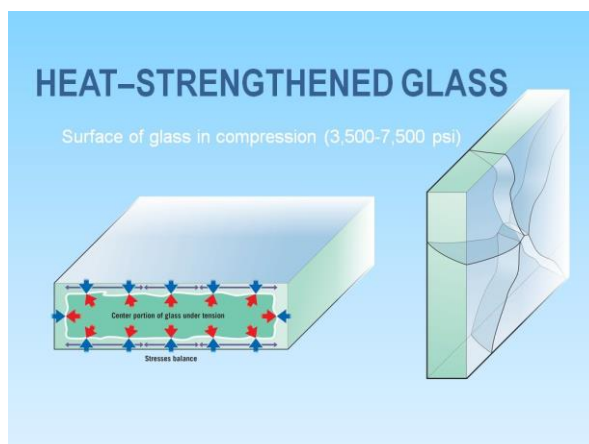
รูปที่ 2- 4 กระจกเทมเปอร์ (Tempered Glass)

(<http://glassed.vitroglazings.com/topics/heat-strengthened-vs-tempered-glass>)

กระจกฮีตสเตรงเทน (Heat Strengthen Glass) คือ กระจกที่ผ่านกระบวนการผลิตคล้ายกระจกเทมเปอร์ คือ ให้ความร้อนกับกระจกพื้นฐานหรือกระจกเคลือบผิวประมาณ 700 องศาเซลเซียสแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง แต่แตกต่างกันตรงที่กระจกฮีตสเตรงเทนจะปล่อยให้กระจกเย็นตัวลงอย่างช้าๆ

คุณสมบัติของกระจกฮีตสเตรงเทน

1. มีความแข็งแรงกว่ากระจกพื้นฐานประมาณ 2 เท่า
2. เหมาะสำหรับการป้องกันการแตกของกระจกจากความร้อน
3. ลักษณะการแตกเหมือนกระจกพื้นฐาน



รูปที่ 2- 5 กระจกฮีตสเตรงเทน (Heat-Strengthened Glass)

(<http://glassed.vitroglazings.com/topics/heat-strengthened-vs-tempered-glass>)

#### 2.1.4 กระจกเคลือบผิว (Surface Coated Glass)

คือ กระจกที่ได้จากการนำกระจกโพลต์หรือกระจกโพลต์สีตัดแสง ไปผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยออกไซด์ของโลหะบนผิวกระจกเพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงและความร้อน สำหรับการนำไปใช้งานสามารถใช้งานเหมือนกระจกโพลต์แต่มีประสิทธิภาพมากกว่าในเรื่องของการประหยัดพลังงาน

#### 2.1.5 กระจกดัดแปลง (Processed Glass)

คือ กระจกที่ได้จากกระจกชนิดต่าง ๆ ที่นำมาดัดแปลงด้วยกระบวนการต่าง ๆ เพื่อตอบสนองการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป

1. กระจกฉนวน (Insulated Glass) คือ กระจกที่ได้จากการนำกระจกโพลต์หรือกระจกเทมเปอร์อย่างน้อย 2 แผ่น ตัดให้ได้ขนาดตามต้องการมาประกบกันโดยมีอะลูมิเนียมสเปเซอร์ (Aluminium Spacer) ซึ่งบรรจุสารดูดซึมความชื้น (Desiccant) คั่นกลาง หลังจากนั้นจะปิดรอยด้วยสารชนิดพิเศษ (Sealant) ทำให้ช่องว่างระหว่างกระจกมีลักษณะคล้ายสุญญากาศ ซึ่งกระจกฉนวนมีสมบัติเฉพาะในการกันความร้อน นิยมนำกระจกชนิดนี้ไปใช้กับอาคารประหยัดพลังงาน อาคารในแถบเมืองหนาว อาคารสนามบิน ห้องบันทึกเสียง เป็นต้น กระจกฉนวนจะช่วยป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากอาคาร ทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเครื่องปรับอากาศ ช่วยลดเสียงรบกวนมากกว่ากระจกธรรมดา สามารถรับแรงลมได้เพิ่มขึ้น และยังช่วยไม่ให้เกิดฝ้าหรือหยดน้ำเกาะกระจก

2. กระจกฮีทมิเรอร์ (Heat Mirror Glass) คือ กระจก 2 ชั้นที่เคลือบสารที่มีสภาวะการแผ่รังสีต่ำทั้ง 2 ด้านของฟิล์มที่อยู่ระหว่างช่องอากาศ โดยที่ช่องว่างทั้งสองข้างจะกลายเป็นช่องว่างอากาศสะท้อนรังสี โดยกระจกชนิดนี้สามารถสะท้อนความร้อนออกจากกระจกได้มากถึง 80 % หรือยอมให้ความร้อนส่งผ่านเพียง 10 % อีก 10 % จะถูกดูดกลืนเข้ากระจก ยอมให้แสงสว่างผ่านเข้ามาได้ดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทำเลที่เลือกใช้ของกระจกและฟิล์ม และยังช่วยป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้สูงถึง 98 %
3. กระจกฮีทสตอป (Heat Stop Glass) คือ กระจกที่มีลักษณะ 2 ชั้น ประกอบขึ้นด้วยกระจกสะท้อนแสงที่เคลือบด้วยสารที่ทำให้เกิดสภาวะการแผ่รังสีต่ำเป็นกระจกด้านนอก ส่วนด้านในเป็นกระจกใส สารเคลือบนั้นสามารถป้องกันความร้อนให้ผ่านเข้ามาได้เพียง 5 % ช่องว่างตรงกลางใส่ก๊าซอาร์กอน ลักษณะเด่นของกระจกชนิดนี้ คือ สะท้อนความร้อนออกไปจากกระจกได้มาก ยอมให้แสงผ่านกระจกได้เพียง 60 % และป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ประมาณ 95 %
4. กระจกนิรภัยหลายชั้น (Laminated Safety Glass) คือ การนำกระจกใด ๆ ตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไปมาผนึกเข้าด้วยกันโดยมีแผ่นฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล (Polyvinyl Butyral) มีลักษณะที่เหนียวและแข็งแรงซ้อนอยู่ระหว่างกลาง พร้อมใช้แรงอัดอากาศ และอุณหภูมิประมาณ 120-130 องศาเซลเซียส แผ่นฟิล์มนี้จะทำหน้าที่ยึดกระจกให้ติดกันเมื่อกระจกชนิดนี้ถูกแรงกระทำจนแตก แผ่นฟิล์มจะช่วยยึดไม่ให้เศษกระจกหลุดกระจาย จะมีเพียงรอยแตกหรือรอยร้าวคล้ายใยแมงมุมเท่านั้น กระจกชนิดนี้นิยมในอาคารสถานที่ต่าง ๆ เช่น หลังคาโดมกระจกผนังกระจกของอาคารสูง ราวกันตกที่เป็นแผ่นกระจก เป็นต้น

#### 2.1.6 กระจกอื่น ๆ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. กระจกเงา (Mirror Glass) คือ กระจกที่นำกระจกโพลิตผ่านกรรมวิธีเคลือบเงาด้วยเครื่องจักร 4 ชั้นตอน คือ เคลือบวัสดุเงิน เคลือบวัสดุทองแดงบริสุทธิ์ เคลือบวัสดุอย่างดีชั้นแรก เคลือบวัสดุอย่างดีชั้นสอง ทำให้ได้กระจกเงาที่ทนทานไม่หลุดลอกง่ายส่วนมากจะใช้งานตกแต่งภายในเพื่อความสวยงามดูทันสมัย
2. กระจกลวดลาย (Pattern Glass) คือ กระจกที่นำกระจกโพลิต หรือกระจกแผ่น ในกระบวนการผลิตที่ยังไม่แข็งตัวเข้าไปสู่แถวของลูกกลิ้ง เพื่อให้ได้ความหนาที่ต้องการ และพิมพ์ลวดลายซึ่งติดกับลูกกลิ้งลงบนผิวด้านใดด้านหนึ่งของกระจกหรือทั้ง 2 ด้านทำให้เกิดรอยนูนขึ้นที่กระจกจะใช้งานตกแต่งอาคารส่วนต่าง ๆ เช่น หน้าต่าง ช่องแสงเหนือประตูหน้าต่าง ฉากกันห้อง โคมไฟ เป็นต้น
3. กระจกเสริมลวด (Wired Glass) คือ กระจกที่มีการนำแผงตาข่ายลวดลงในกระจกขณะที่กระจกหลอมเหลว เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กระจก



4. กระจกกันกระสุน คือ กระจกที่นำกระจกนิรภัยชนิดพิเศษมาติดกับกระจกนิรภัยหลายชั้น โดยมีแผ่นฟิล์มพลาสติกชั้นกลาง จัดเป็นสินค้ายุทธภัณฑ์ที่อยู่ในความควบคุมของกระทรวงกลาโหม การผลิตหรือนำเข้ามาจำหน่ายต้องได้รับอนุญาต เทคโนโลยีในการผลิตยังถือเป็นความลับ ยังไม่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย

## 2.2 มาตรฐาน ASTM E1300 [2]

คือ มาตรฐานสำหรับการออกแบบ คำนวณความต้านทานของกระจกสำหรับอาคาร โดยได้กำหนดให้มีการปรับค่าตัวคูณเพิ่มลด (Factor) สำหรับกระจกชนิดต่าง ๆ และมีระยะเวลาที่แรงกระทำต่อกระจกเป็นเวลาต่าง ๆ ดังตารางที่ 2-1 และตัวอย่างการหาค่ากำลังแรงต้านทานของกระจกดังรูปที่ 2-6

ตารางที่ 2- 1 ตัวคูณปรับค่าตามชนิดของกระจก [2]

ชนิดกระจก	Short Duration load	Long duration load
กระจกโฟลตใส	1.0	0.5
กระจกอบร้อน	2.0	1.3
กระจกเทมเปอร์	4.0	3.0

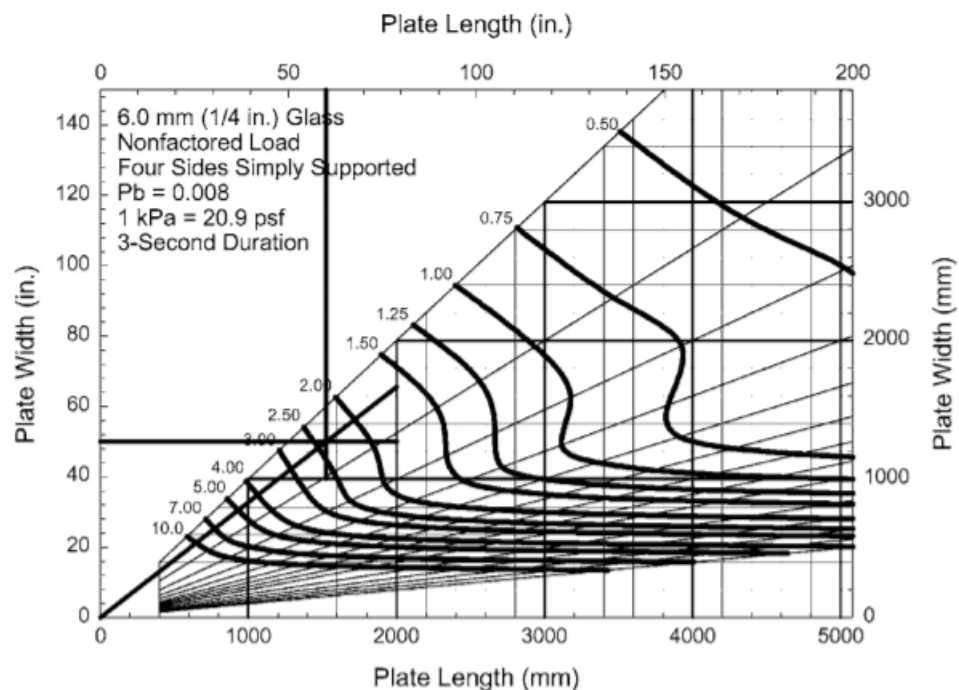
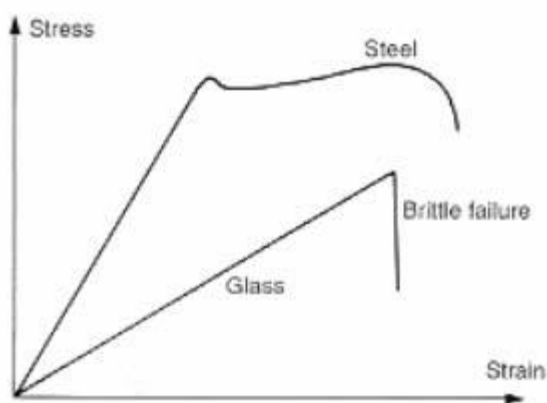


FIG. A2.2 Non-Factored Load Chart for 6.0 mm (1/4 in.) Glass

รูปที่ 2- 6 กราฟแสดงการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของ กระจกโฟลตใสหนา 6.0 mm [2]

### 2.3 คุณสมบัติของกระจก

กระจกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติ ยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) เส้นตรงในช่วงแรกมีลักษณะที่คล้ายกับคุณสมบัติของเหล็กซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถอธิบายคุณสมบัตินี้ได้ตามกฎหมายของฮุก (Hooke's law) ตามรูปที่ 2-7



รูปที่ 2- 7 คุณสมบัติของเหล็กและกระจก [3]

ตารางที่ 2- 2 คุณสมบัติของกระจก

โมดูลัสความยืดหยุ่น	70,000 N/mm <sup>2</sup>
อัตราส่วนปัวซอง	0.22
ความหนาแน่น	2500 kg/m <sup>3</sup>

### 2.4 มาตรฐาน ASTM D882 [4]

คือ มาตรฐานสำหรับทดสอบการทนต่อแรงดึงของแผ่นพลาสติกและฟิล์มบาง รวมถึงความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) โดยการเตรียมชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบต้องมีความยาวอย่างน้อย 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ความกว้างของชิ้นงานอย่างน้อย 5 – 25 มิลลิเมตร (0.2-1 นิ้ว) ความหนาของชิ้นงานมีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตร สภาวะทดสอบการเตรียมชิ้นงานหลังทำการตัดชิ้นงานทดสอบควรทิ้งชิ้นงานทดสอบไว้ที่สภาวะทดสอบ คือที่ อุณหภูมิ 23±2 C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 % อย่างน้อย 40 ชั่วโมง

จำนวนชิ้นงานทดสอบ แบ่งได้เป็น 2 กรณี

1. ถ้าชิ้นงานเป็นแบบ isotropic ให้เตรียมชิ้นงานในการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นงาน
2. ถ้าชิ้นงานเป็นแบบ anisotropic ให้เตรียมชิ้นงานในการทดสอบอย่างน้อย 10 ชิ้นงาน

## 2.5 คุณสมบัติฟิล์มนิรภัย

คือ ฟิล์มนิรภัยที่ประกอบด้วยฟิล์มซ้อนกันหลายชั้นจนมีความหนา 0.5 มิลลิเมตร เมื่อติดตั้งฟิล์มนิรภัย PROFILON® ER1 [5] กับกระจกทำให้กระจกกลายเป็นกระจกนิรภัย ที่สามารถต้านทานแรงกระแทกได้ คุณสมบัติและคุณสมบัติของฟิล์มนิรภัย PROFILON® ER1 แสดงในตารางที่ 2-3 ตารางที่ 2-3 คุณลักษณะและคุณสมบัติของฟิล์มนิรภัย PROFILON® ER1 [5]

สี/เคลือบสี	สีใส
ความหนา	~ 0.5 มิลลิเมตร
สารที่ใช้ยึดติด	อะคริลิก
ส่วนประกอบ	ฟิล์มซ้อนกันหลายชั้น ผ่านกระบวนการด้วยเครื่อง Sandglider
การเคลือบผิว	เคลือบแข็งด้วย DURITAL - ฟินผิว sr; ค่าแสงกระจายเพิ่มขึ้น 2.5% อ้างอิงจากผลการทดสอบการสึกกร่อนด้วยเครื่อง Taber
ค่าการผ่านของแสง	84% (สามารถมองเห็นได้)
การดูดซับรังสี UV	> 99% (300 – 380 nm)
การต้านทานไฟ	ระดับ B1 ตามมาตรฐาน DIN 4102 ส่วน 1
ระดับความต้านทาน	ระดับ ER 1 ตามมาตรฐาน EN 13541 (NS) (แสดงในตารางที่ 2-5) ระดับ A1 ตามมาตรฐาน 52 290 (การต้านทานแรงกระแทก) ระดับ P2A ตามมาตรฐาน EN 356

ตารางที่ 2- 4 ตามมาตรฐาน EN 13541 (NS) [6]

การต้านทานของ มาตรฐาน EN 13541	Pressure Loading (Kpa)	Positive specific impulse (kPa-ms)	Duration of positive phase (ms)
ER 1	>50 < 100	370 - 900	≥ 20
ER 2	>100 < 150	900 -1500	≥ 20
ER 3	>150 < 200	1500 - 2200	≥ 20
ER 4	>200 < 250	2200 - 3200	≥ 20

ตารางที่ 2- 5 คุณสมบัติฟิล์มนิรภัย

โมดูลัสความยืดหยุ่น	2.4 GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.4
ความหนาแน่น	1300 kg/m <sup>3</sup>

## 2.6 แรงระเบิด (Blast Load)

### 2.6.1 ชนิดของวัตถุระเบิด

1. Trinitrotoluene (TNT) ใช้เป็นวัตถุระเบิดในยุทธโศภกรณ์กระสุนและดินทำลาย สามารถใช้เป็นดินขยายการระเบิดได้โดยอัดเป็นแท่งใช้ร่วมกับวัตถุระเบิดอื่น ๆ
2. Ammonium Nitrate and Fuel Oil (ANFO) ใช้เป็นสารออกซิไดเซอร์ คือ ดินระเบิดหลุม สามารถทำให้หินแตกกร้าว และสามารถใส่สารชนิดนี้เป็นส่วนผสมกับวัตถุระเบิดอื่น
3. Composition 4 (C4) ใช้เป็นสรรพาวุธใต้น้ำและดินระเบิดทำลาย
4. ยูเรียไนเตรต (Urea Nitrate) ถูกใช้ทดแทนแอมโมเนียไนเตรตในการประกอบระเบิดแสวงเครื่องขนาดใหญ่ เนื่องจากวัสดุหาง่ายและไวต่อการระเบิดมากกว่าแอมโมเนียไนเตรต
5. Triacetone Triperoxide (TATP) ถูกใช้เป็นส่วนประกอบหลักในระเบิดแสวงเครื่องขนาดเล็ก เนื่องจากวัตถุดิบความไม่เสถียรสูง

### 2.6.2 ค่าเปรียบเทียบกำลัง (Relative Effectiveness Factors)

คือ ค่าที่แสดงกำลังการระเบิดของวัตถุระเบิดชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับวัตถุระเบิดมาตรฐานจำนวนหนึ่งหน่วยมวล โดยวัตถุมาตรฐานนั้น คือ TNT ซึ่งถูกกำหนดให้มีค่าเปรียบเทียบกำลังเท่ากับ 1.0 ดังแสดงในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2- 6 ความหนาแน่นและค่าเปรียบเทียบกำลัง (R.E. Factor) สำหรับวัตถุระเบิดแต่ละชนิด [7]

ชนิดวัตถุระเบิด	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	R.E. Factor
Amatol (50% TNT + 50% AN)	1.50	0.91
Amatol (80% TNT + 20% AN)	1.55	1.10
Ammonium nitrate (AN + <0.5% H <sub>2</sub> O)	1.12	0.42

ชนิดวัตถุระเบิด	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	R.E. Factor
ANFO (94% AN + 6% fuel oil)	0.92	0.74
ANNMAL (67% AN + 25% NM + 5% Al + 3% C)	1.15	0.87
Black powder (75% KNO <sub>3</sub> + 19% C + 6% S)	1.65	0.55
C-3 (78% RDX)	1.60	1.33
C-4 (91% RDX)	1.59	1.33
Composition B (63% RDX + 36% TNT)	1.72	1.18
DADNE (1,1-Diamino-2,2-dinitroethene)	1.86	N/A
DDF (4,4'-Dinitro-3,3'-diazenofuroxan)	1.98	1.95
Diethylene glycol dinitrate (DEGDN)	1.38	1.17
Dinitrobenzene (DNB)	1.50	0.60
Erythritol tetranitrate (ETN)	1.60	1.60
Ethylene glycol dinitrate (EGDN)	1.49	1.66
Gelatine (92% NG + 7% Nitrocellulose)	1.60	1.60
Heptanitrocubane (HNC)	1.92	N/A
Hexamine dinitrate (HDN)	1.30	0.60
Hexanitrobenzene (HNB)	1.97	1.85
Hexanitrostilbene (HNS)	1.70	1.05
Hexogen (RDX)	1.78	1.60
HMTD (Hexamine peroxide)	0.88	0.74
HNIW (CL-20)	1.97	1.80
Hydrazine mononitrate	1.59	1.42
Hydromite® 600 (AN water emulsion) commercial	1.24	0.80

ชนิดวัตถุระเบิด	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	R.E. Factor
product		
MEDINA (Methylene dinitroamine)	1.65	1.93
Mixture: 24% Nitrobenzene + 76% TNM	1.48	1.50
Nitrocellulose (13.5% N, NC)	1.60	1.10
Nitroglycerin (NG)	1.59	1.54
Nitroguanidine	1.32	0.95
Nitromethane (NM)	1.13	1.10
Nitrourea	1.54	1.05
Nobel's Dynamite (75% NG + 23% Diatomite)	1.48	1.25
NTO (Nitrotriazolon)	1.87	1.60
Octanitrocubane (ONC)	1.95	2.38
Octogen (HMX grade B)	1.86	1.70
Octol (80% HMX + 19% TNT + 1% DNT)	1.83	1.54
Penthrite (PETN)	1.71	1.66
Pentolite (56% PETN + 44% TNT)	1.66	1.33
Picric acid (TNP)	1.71	1.20
RISAL P (51%IPN + 28%RDX + 14%Al + 4%Mg + 0.7%Zr + 2%NC)*	1.38	1.50
Semtex 1A (76% PETN + 6% RDX)	1.55	1.35
Tanerit Simply® (93% granulated AN + 6% Red P + 1% C)	0.90	0.55
TATP (Acetone peroxide)	1.18	0.80

ชนิดวัตถุระเบิด	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	R.E. Factor
Tetryl	1.71	1.25
Tetrytol (70% Tetryl + 30% TNT)	1.60	1.20
TNAZ (Trinitroazetidine)	1.88	1.70
Tovex® Extra (AN water gel) commercial product	1.33	0.80
Triaminotrinitrobenzene (TATB)	1.80	1.17
Trinitrobenzene (TNB)	1.60	1.20
Trinitrotoluene (TNT) ***High Energetic Explosives >4 MJ/kg***	1.60	1.00
Tritonal (80% TNT + 20% Aluminium)*	1.70	1.00

โดยทั่วไปการคำนวณแรงระเบิดจะพิจารณาจากน้ำหนักของวัตถุระเบิดชนิด TNT เป็นหลัก ดังนั้นหากเป็นวัตถุระเบิดชนิดอื่น ผู้ออกแบบต้องคำนวณหาน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า (Effective Charge Weight) โดยได้ดังสมการนี้

น้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า = R.E.Factor ของวัตถุระเบิดที่พิจารณา × น้ำหนักวัตถุระเบิดนั้น ๆ

### 2.6.3 พฤติกรรมของการระเบิด

การที่วัตถุระเบิดแรงสูงไม่มีวัสดุห่อหุ้มจะเกิดการระเบิดได้ต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีจากการสลายตัววัตถุระเบิดที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่า การปะทุ และความเร็วของการปะทุต้องมีความเร็วมากกว่าเสียง ความเร็วในการปะทุโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 6,700–8,500 เมตรต่อวินาที เมื่อเกิดการปะทุแล้ววัตถุระเบิดที่เป็นของแข็งหรือของเหลวจะมีการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซ แรงดันสูงที่มีความร้อนและความหนาแน่นสูงขยายตัวออกจากจุดศูนย์กลางระเบิด ก่อให้เกิดคลื่นที่รุนแรงหรือเรียกว่า คลื่นกระแทก (Shock Wave) เคลื่อนที่ผ่านอากาศ โดยแรงดันที่เกิดขึ้นในทันทีที่ด้านหน้าของคลื่นกระแทก (Shock Front) มีค่าตั้งแต่ 19,000-34,000 เมกาปาสกาล ระหว่างการระเบิดของวัตถุระเบิดแรงสูงส่วนมาก หนึ่งในสามของพลังงานเคมีจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการระเบิดจะถูกปล่อยออกมาในขั้นตอนของการปะทุ ส่วนพลังงานที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ของวัตถุระเบิดเมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศซึ่งเกิดขึ้นหลังการปะทุ

ในระหว่างที่ระเบิดมีการขยายตัว คลื่นจะมีความรุนแรง ความเร็วของระเบิดจะลดลงเมื่อมีระยะเวลาที่มากขึ้นและหากมีสิ่งกีดขวางทางระเบิด แรงดันระเบิด (Blast Pressure) จะปกคลุมโครงสร้างเมื่อโดนคลื่นกระแทก โดยความรุนแรงของระเบิดจะขึ้นอยู่กับ สมบัติของระเบิด ระยะห่างระหว่างโครงสร้างกับระเบิด และการขยายของแรงดันระเบิด

#### 2.6.4 ประเภทของแรงระเบิด

แรงระเบิดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างแบ่งตามลักษณะของการปิดล้อมการระเบิดที่เกิดขึ้นโดยแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก 6 ประเภทย่อย ตามตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2- 7 ประเภทของแรงระเบิด

การปิดล้อม	ประเภท
ไม่ปิดล้อม (unconfined explosion)	1. ระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ
	2. ระเบิดกลางอากาศ
	3. ระเบิดบนพื้น
ปิดล้อม (confined explosion)	4. ระเบิดในสภาพที่มีช่องเปิด
	5. ระเบิดแบบปิดล้อมบางส่วน
	6. ระเบิดแบบปิดล้อมทั้งหมด

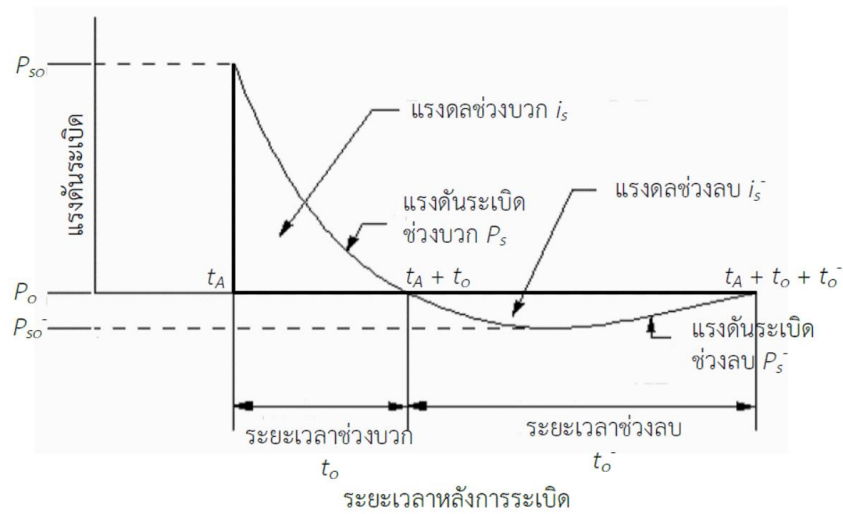
1. การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ (Free Air Explosion) คือ การที่จุดศูนย์กลางของการระเบิดเกิดคลื่นกระแทก (Shock Wave) และแรงที่กระทบต่อโครงสร้างจะไม่มีการขยายค่าเพิ่มขึ้นระหว่างเกิดแรงระเบิด ดังนั้นแรงระเบิดที่ทำต่อโครงสร้างจะมีเพียงแรงดันระเบิดโดยตรง (Incident Pressure)
2. การระเบิดกลางอากาศ (Air Burst Explosion) คือ การระเบิดที่จุดศูนย์กลางของการระเบิดอยู่บนอากาศ ในตำแหน่งที่มีความใกล้กับโครงสร้างและพื้นดิน ทำให้คลื่นของแรงระเบิดเกิดการขยายค่าขึ้นเนื่องจากเกิดการผสมกันระหว่างคลื่นที่สะท้อนกับพื้นก่อนกระทบกับโครงสร้าง โดยเรียกคลื่นชนิดนี้ว่า คลื่นมัค (Mach Wave)
3. การระเบิดบนพื้นดิน (Surface Burst Explosion) คือ การระเบิดที่เฉพาะผิวดินจะส่งผลให้ระเบิดเกิดการขยายค่า ค่ากำลังของคลื่นที่สะท้อนมาจากพื้นดินจะถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นมัคตั้งแต่จุดศูนย์กลางของระเบิด ดังนั้นแรงดันระเบิดของการระเบิดชนิดนี้จะมีเพียงคลื่นมัคเท่านั้น



4. การระเบิดในพื้นที่ที่มีช่องเปิด (Fully Vented Explosion) คือ การระเบิดพื้นที่ภายในที่ติดกับโครงสร้างโดยมีแผงกันอยู่ โดยแรงระเบิดที่เกิดขึ้นจะมีการขยายค่าจากการสะท้อนกลับของคลื่นระเบิดที่กระทบกับโครงสร้างแผงกัน และสุดท้ายจะถูกระบายออกสู่ภายนอกของโครงสร้างในรูปแบบ แรงดันรั่วไหล (Leakage Pressure)
5. การระเบิดแบบปิดล้อมบางส่วน (Partially Confined Explosion) คือ การระเบิดภายในพื้นที่ที่มีช่องเปิดบางส่วนหรือมีช่องเปิดอยู่อย่างจำกัดอยู่ การระเบิดชนิดนี้จะก่อให้เกิดแรงดันรั่วในชั่วขณะหนึ่ง ในเวลาเดียวกันพื้นที่ภายในจะเกิดการสะสมของแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันกึ่งสถิตกระทำต่อโครงสร้างซึ่งถ้าเทียบกับแรงดันกระแทกแล้ว แรงดันชนิดนี้จะเกิดขึ้นในระยะเวลาที่นานกว่า
6. การระเบิดแบบปิดล้อมทั้งหมด (Fully Confined Explosion) คือ การระเบิดแบบปิดพื้นที่ภายในทั้งหมดไม่สามารถระบายแรงกระแทกสู่ภายนอกได้ โดยแรงดันรั่วไหลของการระเบิดชนิดนี้จะมีค่าต่ำมาก และจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างอื่น ๆ ที่อยู่ภายนอกโครงสร้างปิดล้อมนี้เท่านั้น

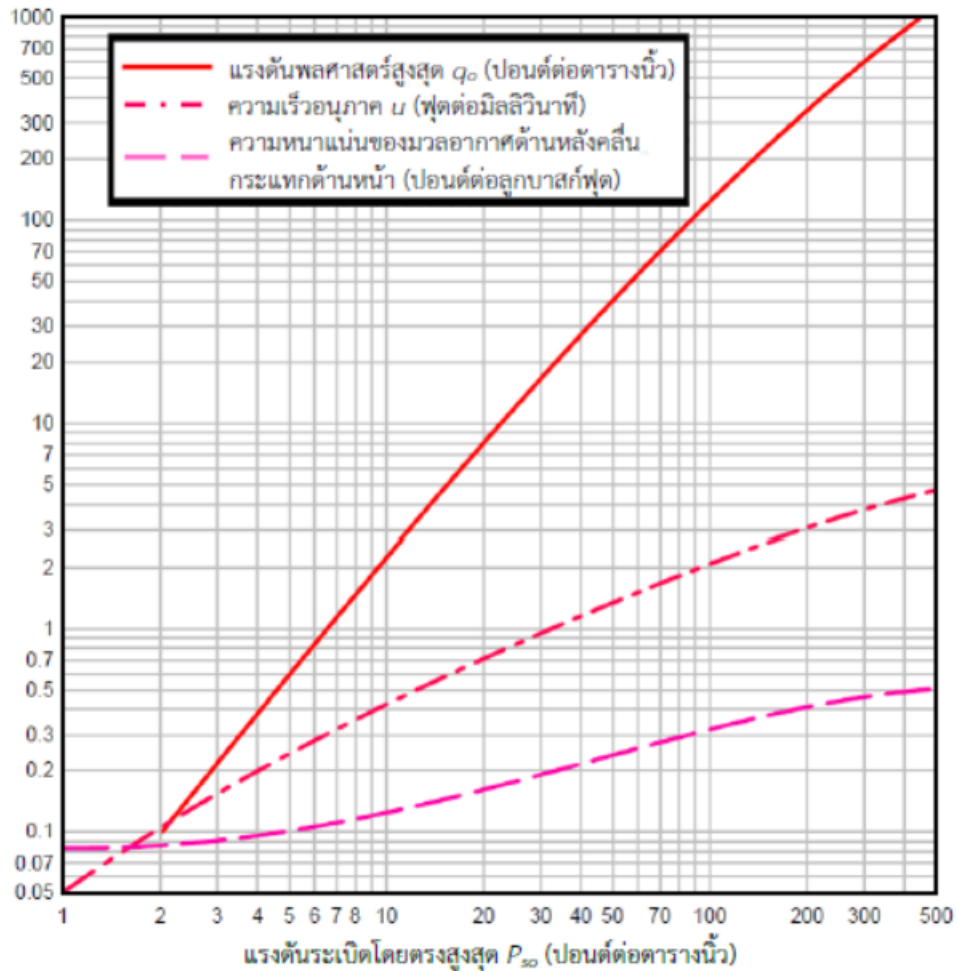
#### 2.6.5 พฤติกรรมของคลื่นแรงระเบิด

การที่ระเบิดก่อให้เกิดความเสียหายเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของวัตถุระเบิดจากภาวะของแข็งหรือของเหลวถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซที่มีแรงดันและอุณหภูมิสูง ก๊าซที่ได้เปลี่ยนสถานะมาจะแพร่กระจายออกไปทุกทิศทางในอากาศโดยรอบในลักษณะของคลื่นกระแทก ซึ่งคลื่นกระแทกด้านหน้าจะมีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงดันจากระดับแรงดันบรรยากาศ จนถึงค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุด โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันระเบิด ณ จุดใด ๆ จากจุดศูนย์กลางระเบิดแสดงดัง รูปที่ 2-9 โดยมีการเริ่มต้นจากคลื่นกระแทกมาที่จุดใด ๆ ที่เวลา  $t_A$  แรงดันที่จุดนั้น ๆ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าแรงดันระเบิดที่สูงที่สุด หลังจากใช้เวลาผ่านไปแรงดันระเบิดจะมีค่าลดลงไปเรื่อย ๆ จนเทียบเท่าแรงดันบรรยากาศที่เวลา  $t_0$  โดยเราจะเรียกช่วงเวลาในช่วงแรกเริ่มนี้ว่า ช่วงบวก (Positive Phase) จากนั้นแรงดันจะมีค่าลดลงจนติดลบไปจนถึงแรงดันลบสูงสุด ซึ่งจุดนี้เป็นจุดที่ก่อให้เกิดอนุภาคของอากาศเริ่มเกิดการไหลกลับมา แรงดันจึงปรับเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่จุดที่แรงดันสมดุล แรงดันระเบิดที่มีค่าความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศจะเรียกว่า ช่วงลบ (Negative Phase) ซึ่งปกติแล้วช่วงลบจะมีระยะเวลาที่ยาวนานกว่าช่วงบวกมาก แต่เราจะไม่นำช่วงลบมาพิจารณาการออกแบบในโครงสร้าง เนื่องจากเมื่อนำช่วงลบมาเทียบกับช่วงบวกแล้วถือว่ามิผลกระทบต่อที่น้อยมาก



รูปที่ 2- 8 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันระเบิด ณ จุดใด ๆ จากจุดศูนย์กลางระเบิด [7]

เมื่อคลื่นกระแทกด้านหน้าเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางของระเบิดในทุก ๆ ทิศทาง คลื่นกระแทกจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ลดลงเรื่อย ๆ แต่ความเร็วยังคงมากกว่าความเร็วเสียง โมเลกุลของก๊าซที่อยู่ด้านหลังคลื่นกระแทกด้านหน้าจะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่น้อยกว่า เรียกว่า ความเร็วอนุภาค  $u$  โมเลกุลของก๊าซที่มีการเคลื่อนที่นี้จะก่อให้เกิดแรงดันที่เรียกว่า แรงดันพลศาสตร์ (Dynamic Pressure) มีค่าสูงสุดเทียบเท่ากับ  $q_0$  ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันตามรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-9 กราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงของแรงดันกับตัวแปรต่าง ๆ [7]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

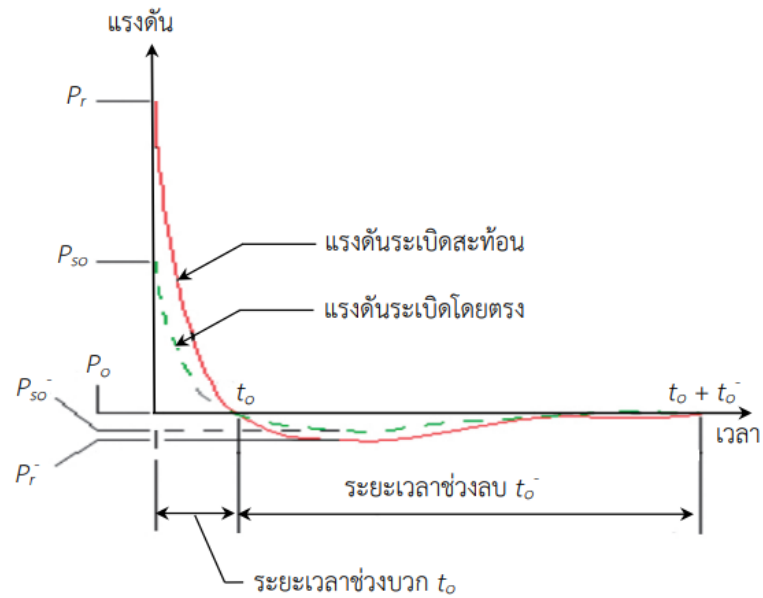
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 2.6.6 การคำนวณแรงกระทำเนื่องจากการระเบิด

ในการออกแบบอาคารต้านทานแรงระเบิด สิ่งที่มีผลกระทบโดยตรง คือ แรงระเบิด สะเก็ดระเบิด และคลื่นกระแทกที่ส่งผ่านอากาศหรือพื้นดิน โดยแรงดันระเบิดเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลกระทบต่ออาคาร ขนาดของแรงระเบิดขึ้นอยู่กับปริมาณวัตถุระเบิด ซึ่งโดยทั่วไปจะมีปริมาณเทียบเท่ากับระเบิด TNT และระยะห่างระหว่างอาคารและจุดศูนย์กลางระเบิด

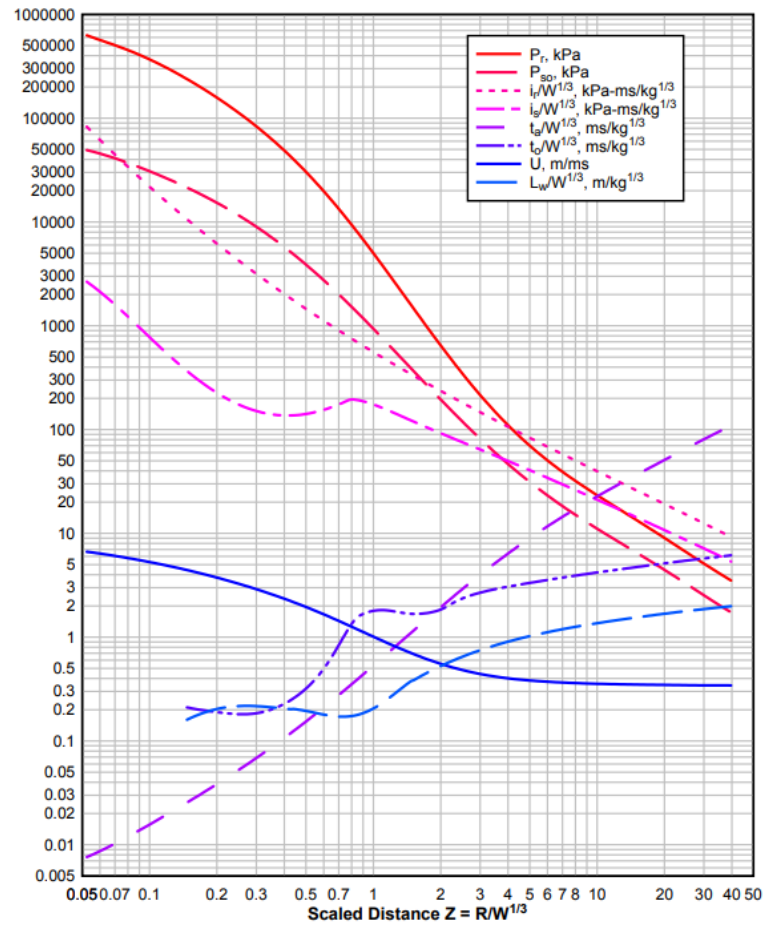
การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ คือ การระเบิดที่เหนือโครงสร้างอาคารโดยไม่เกิดการขยายขนาดของคลื่นระเบิดโดยตรง (incident blast wave) ระหว่างที่คลื่นระเบิดเดินทางจากจุดศูนย์กลางระเบิดไปยังโครงสร้างอาคาร แรงดันระเบิดโดยตรง (incident blast pressure) หรือ  $P_s$  และแรงดลโดยตรง (incident impulse) หรือ  $i_s$  จะเป็นไปตามรูปที่ 2-9 แต่เมื่อคลื่นกระทบกับอาคารแรงดันระเบิดโดยตรงและแรงดลโดยตรงจะมีการเสริมแรงจากคลื่นระเบิดที่ตามมาทีหลังและ

เกิดการสะท้อนกลับเรียกว่า แรงดันระเบิดสะท้อน (reflected pressure) หรือ  $P_r$  โดยค่าแรงดันระเบิดสะท้อนจะมีค่าสูงกว่าแรงดันระเบิดโดยตรง ตามรูปที่ 2-11



รูปที่ 2- 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดและเวลาของการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ

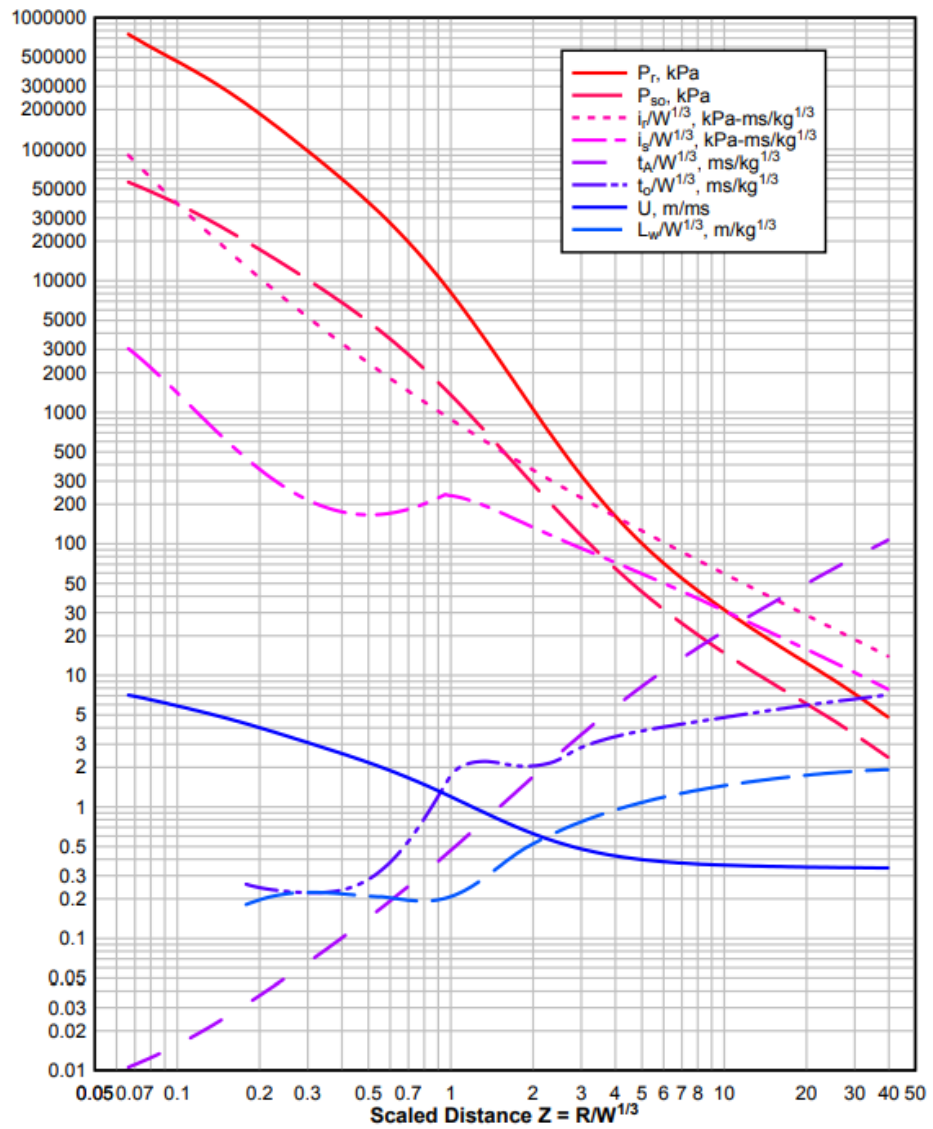
ค่าตัวแปรแรงระเบิดต่าง ๆ ตามที่แสดงในรูป 2-11 จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของระเบิดและรากที่สามของระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด โดยอัตราส่วนนี้ถูกเรียกว่า  $Z$  โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรระเบิดและค่า  $Z$  จะเป็นไปตามรูปที่ 2-12



รูปที่ 2- 11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดช่วงบวกและระยะปรับทอนของการระเบิดกลาง

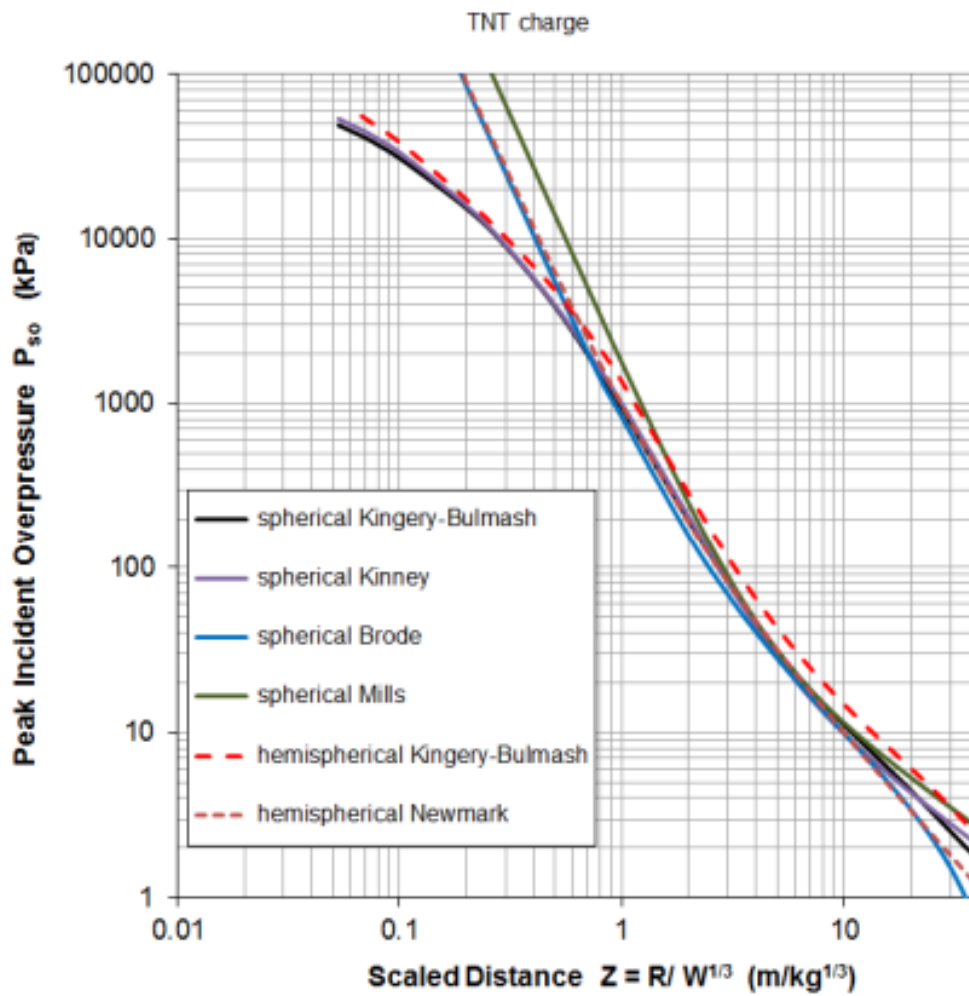
อากาศ [8]

- การระเบิดบนพื้น คือ การระเบิดที่เกิดขึ้นใกล้พื้นหรือบนพื้น คลื่นระเบิดโดยตรงจากการสะท้อนจากพื้นและเกิดการเสริมแรงก่อให้เกิดคลื่นมีคัทันที่เมื่อเกิดการระเบิด การหาค่าของตัวแปรแรงระเบิดต่าง ๆ ของการระเบิดบนพื้นสามารถหาค่าการระเบิดช่วงบวกได้จากรูปที่ 2-13 โดยการระเบิดบนพื้นดินและการระเบิดกลางอากาศสามารถเปรียบเทียบได้ตามรูปที่ 2-14



รูปที่ 2- 12 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดช่วงบวกและระยะปรับทอนของการระเบิดบนพื้น

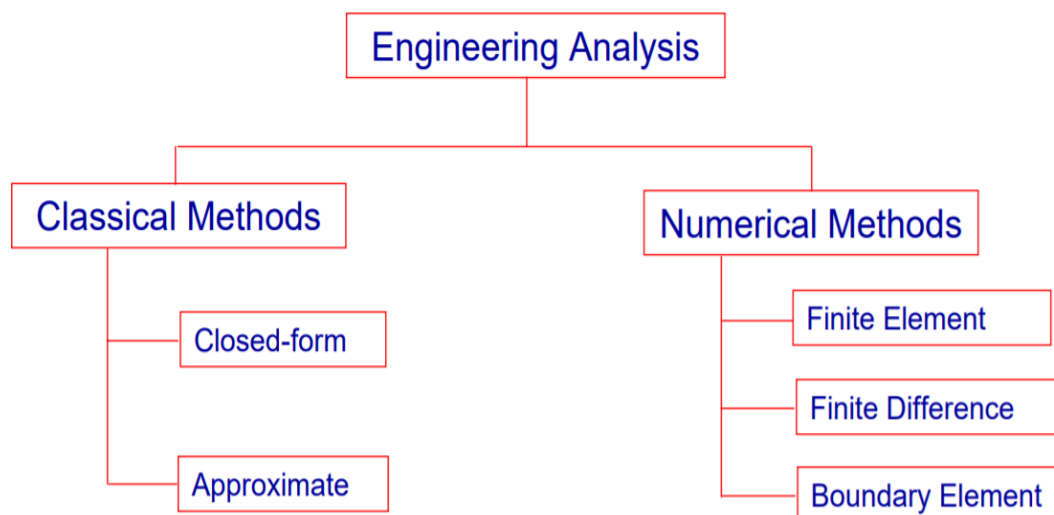
[8]



รูปที่ 2- 13 การเปรียบเทียบค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดระหว่างการระเบิดบนพื้นดิน (hemispherical waves) และการระเบิดกลางอากาศ (spherical waves) [8]

## 2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

คือ การวิเคราะห์เทคนิคเชิงตัวเลขทำการหาคำตอบโดยการหาค่าที่จุดเชื่อมต่อต่าง ๆ หรือเรียกว่า node และที่จุดเชื่อมต่อเราจะใช้สมการพหุนาม (Polynomial) ในอันดับต่าง ๆ ในการหาคำตอบ โดยที่ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีพื้นฐานมาจากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์อย่างสมบูรณ์ หรือการปรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ให้กลายเป็นระบบโดยประมาณของสมการอนุพันธ์สามัญ ซึ่งเป็นเทคนิคการใช้มาตรฐานของคณิตศาสตร์ เริ่มจากการนำโครงสร้าง หรือวัตถุต่าง ๆ ในระบบใหญ่นำมาแบ่งเป็นชั้นย่อย และนำส่วนของชั้นย่อยนั้นมาคำนวณประมาณค่า เมื่อคำนวณค่าในชั้นย่อยแล้วจึงนำชั้นย่อยเหล่านั้นมารวมกันเป็นชั้นใหญ่ เพื่อให้ได้คำตอบของระบบใหญ่ ข้อดีของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ มีความรวดเร็วกว่าการคำนวณค่าต่าง ๆ โดยตรง แต่ข้อเสีย คือ จะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นเสมอ แต่ค่าผิดพลาดจะลดลงหากแบ่งชั้นส่วนย่อยมากขึ้น ยิ่งแบ่งชั้นส่วนย่อยมากค่าความผิดพลาดจะแปรผกผันตามชั้นส่วนย่อยที่ได้ทำการแบ่ง โดยมีวิธีหลัก ๆ อยู่ 2 ลักษณะ คือ แบ่งชั้นส่วนเป็นส่วนย่อย ๆ (Number) และกำหนดจำนวนจุดต่าง ๆ ของชั้นส่วนย่อยที่เราแบ่งให้มีอันดับ (Order)



รูปที่ 2- 14 ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหนึ่งในวิธีการนำมาวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม

ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

1. ขั้นตอนการเตรียมแบบจำลอง (Preprocessing phase)
  - การสร้างรูปร่างของแบบจำลอง (Geometric construction)
  - การแบ่งชั้นส่วนหลักของแบบจำลองออกเป็นชั้นส่วนย่อย ๆ ต่อกัน โดยแต่ละชั้นส่วนย่อยประกอบไปด้วยโนด (Discretization)
  - การกำหนด Shape Function ซึ่งจะแสดงถึงพฤติกรรมทางกายภาพของชั้นส่วนย่อยหรือผลเฉลย โดยค่าที่ได้ออกมาจะเป็นค่าประมาณ



- สร้างสมการสำหรับชิ้นส่วนย่อย
  - กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น สภาวะโหนดและสภาวะขอบให้กับปัญหา
  - กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties)
2. ขั้นตอนการหาคำตอบ (Solution Phase) คือ การแก้สมการเพื่อหาคำตอบของสมการซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นหรือสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งคำตอบ คือ ค่าการกระจัดที่โนดต่าง ๆ
  3. การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Postprocessing Phase) คือ การวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ที่เราสนใจเพิ่มเติม

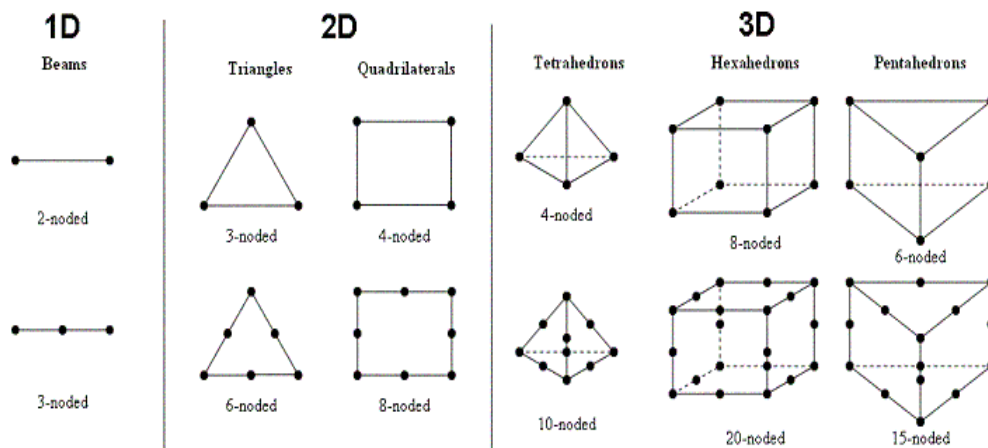
การแบ่งชิ้นส่วนย่อยของระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์มี 3 แบบ คือ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยวัตถุ 1 มิติ คือ การแบ่งวัตถุที่มีความแปรผัน 1 ทิศทาง เช่น แรงที่เกิดขึ้นในโครงถัก (Truss) แรงในสายเคเบิล แรงในท่อ โดยจะทำการคำนวณแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนย่อยที่แบ่งไว้ และนำค่าที่คำนวณได้จากชิ้นส่วนย่อยมารวมกัน

การแบ่ง 2 มิติ คือ การแบ่งวัตถุที่มีความแปรผันใน 2 ทิศทาง เช่น การหาระยะที่แผ่นเหล็กสามารถยืดออก โดยการแบ่งชิ้นส่วนแบบ 2 มิติสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ

1. แบบสามเหลี่ยม (Triangular) เช่น เอลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง 3 node Triangular เอลิเมนต์อันดับที่สอง 6 node Triangular
2. แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Quadrilaterals) เช่น เอลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง 4 node Quadrilaterals เอลิเมนต์อันดับที่สอง 8 node Quadrilaterals

การแบ่ง 3 มิติ คือ การแบ่งวัตถุที่มีความแปรผันใน 3 ทิศทาง เช่น การแบ่งคานเสาเพื่อหาหน่วยแรงภายใน ณ ตำแหน่งใด ๆ โดยการแบ่งชิ้นส่วนแบบ 3 มิติสามารถแบ่งได้อีก 3 รูปแบบ

1. แบบสามเหลี่ยม (Tetrahedral) เช่น เอลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง 4 node Tetrahedral เอลิเมนต์อันดับที่สอง 10 node Tetrahedral
2. แบบสี่เหลี่ยม (Hexahedral) เช่น เอลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง 8 node Hexahedral เอลิเมนต์อันดับที่สอง 20 node Hexahedral
3. แบบปริซึมสามเหลี่ยม (Pentahedrons) เช่น เอลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง 6 node Hexahedral เอลิเมนต์อันดับที่สอง 15 node Hexahedral

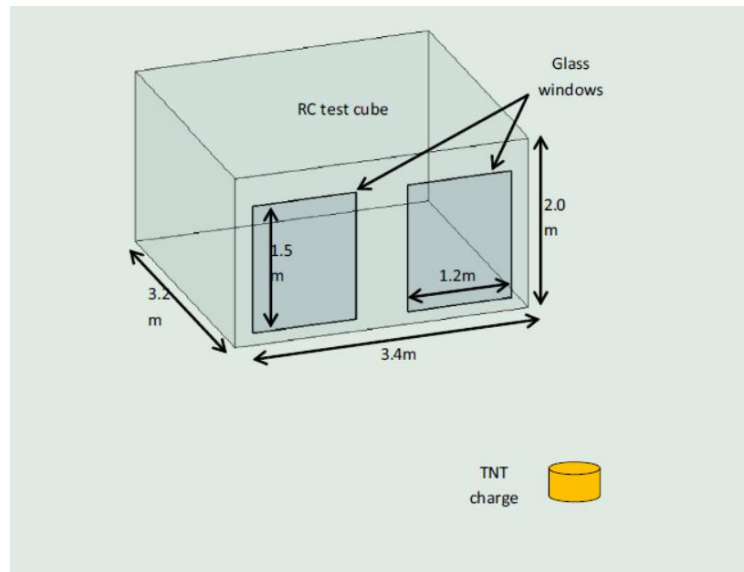


รูปที่ 2- 15 รูปแบบ ชิ้นส่วนชนิดต่าง ๆ [9]

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 การวิจัย ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรม การทดสอบของกระຈก และการทดสอบระเบิด

การศึกษาของ Zhang, X., H. Hao, and Z. Wang [10] ได้ทำการทดสอบทดสอบกระຈก เหมเปอร์กับแรงระเบิดและวิเคราะห์เศษกระຈกที่แตกเป็นเสี่ยง ๆ หลังการระเบิดเพื่อเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ใช้งานกระຈกโดยทำการทดสอบใช้กระຈกที่มีขนาด 1500 mm x 1200 mm โดยใช้ 2 ความหนา คือ 6 mm และ 10 mm ทำการทดสอบด้วยระเบิดขนาด 5 kg และ 10 kg TNT ระยะห่างอยู่ในช่วง 4.5-12.3 m ใช้กล้อง high-speed ในการถ่ายภาพการทดสอบและทำการนับเศษกระຈกที่กระเด็นออกไปเป็นระยะทางต่าง ๆ ความใหญ่ของเศษกระຈก ดังรูปที่ 2-17 และ 2-18 ขนาดของกระຈกที่นำมาทดสอบเป็นไปตาม ตารางที่ 2-8 หลังจากทดสอบจะเกิดเศษกระຈกจำนวนมากที่ด้านหน้าของหน้าต่าง ดังรูปที่ 2-19 แต่เศษกระຈกที่หลังหน้าต่างกลับพบได้ไม่มากเมื่อเทียบกับเศษกระຈกที่เกิดขึ้นด้านหน้า ดังรูปที่ 2-20 จะเห็นได้ว่าเมื่อกระຈกเกิดการเสียรูปจะเริ่มจากแรงดันในทางด้านบวกก่อน (Positive pressure) และเกิดการซ้กลับของแรงดันด้านลบ (Negative pressure) ส่งผลให้เกิดเศษกระຈกที่ด้านหน้าของหน้าต่างมากกว่าหลังหน้าต่าง การโก่งตัวที่เกิดขึ้นกับกระຈก pane 3-1-2 ดูได้จากกราฟใน รูปที่ 2-21 และเกิดขนาดของเศษชิ้นส่วนของกระຈก ตาม ตารางที่ 2-9



รูปที่ 2- 16 ภาพตัวอย่างการทดสอบแรงระเบิดกับกระจก [10]



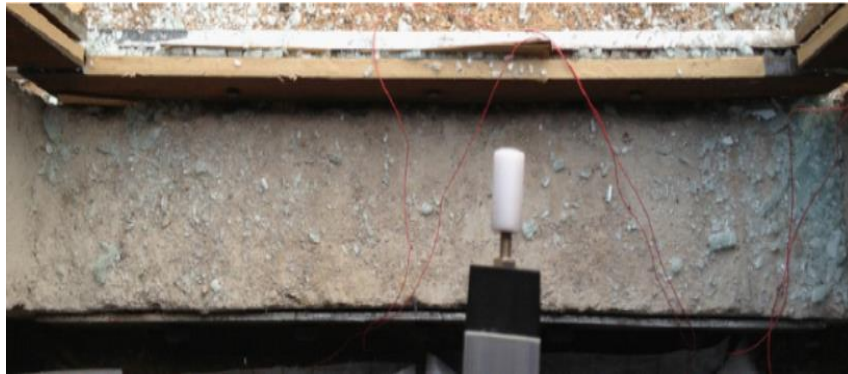
รูปที่ 2- 17 การติดตั้งการทดสอบ [10]

ตารางที่ 2- 8 การทดสอบของ Zhang, X., H. Hao, and Z. Wang [10]

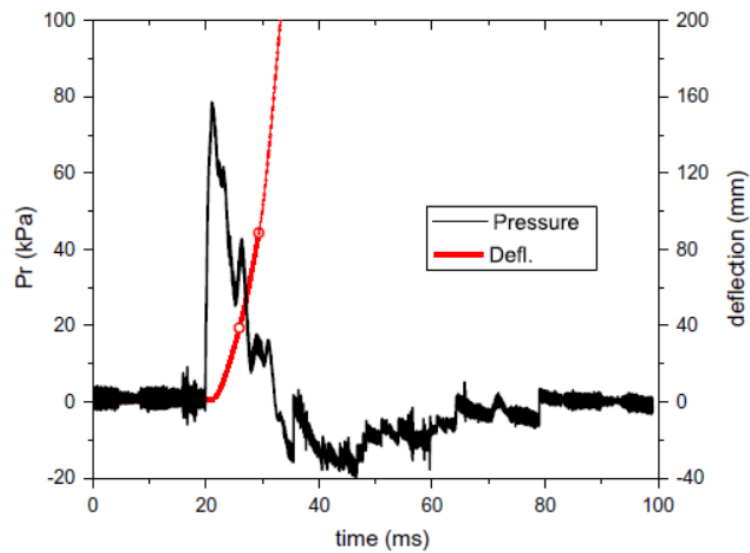
Test no.	Pane no.	Boundary condition	Thickness (mm)	Size (mm×mm)	W (kg)	R (m)
3	3-1-2	Fixed	6	1500×1200	10	12.3
5-2	5-2-1	Fixed	10	1500×1200	5	4.5
5-2	5-2-2	Fixed	10	1500×1200	5	4.5
9	9-1-1	Fixed	10	1500×1200	5	6
9	9-1-2	Fixed	6	1500×1200	5	6
10	10-1-1	Fixed	10	1500×1200	5	8
10	10-1-2	Fixed	10	1500×1200	5	8
11	11-1-1	Fixed	10	1500×1200	10	12
11	11-1-2	Fixed	10	1500×1200	10	12
12	12-1-1	Fixed	10	1500×1200	10	9
12	12-2-2	Fixed	10	1500×1200	10	9
13	13-1-1	Fixed	6	1500×1200	10	12



รูปที่ 2- 18 เศษกระจกที่เกิดขึ้นด้านหน้าบานกระจก



รูปที่ 2- 19 เศษกระจกที่เกิดขึ้นหลังบานกระจก



รูปที่ 2- 20 กราฟแสดงแรงดันและการโก่งตัวของกระจก Pane 3-1-2

ตารางที่ 2- 9 ขนาดของเศษชิ้นส่วนกระจกหลังจากการทดสอบ

Size (mm × mm)	Number
120 × 120	1
80 × 80	6
80 × 40	0
40 × 40	11
30 × 30	10
70 × 10	4
50 × 10	1

20 × 20	0
30 × 10	0
≤ 15 × 15	802

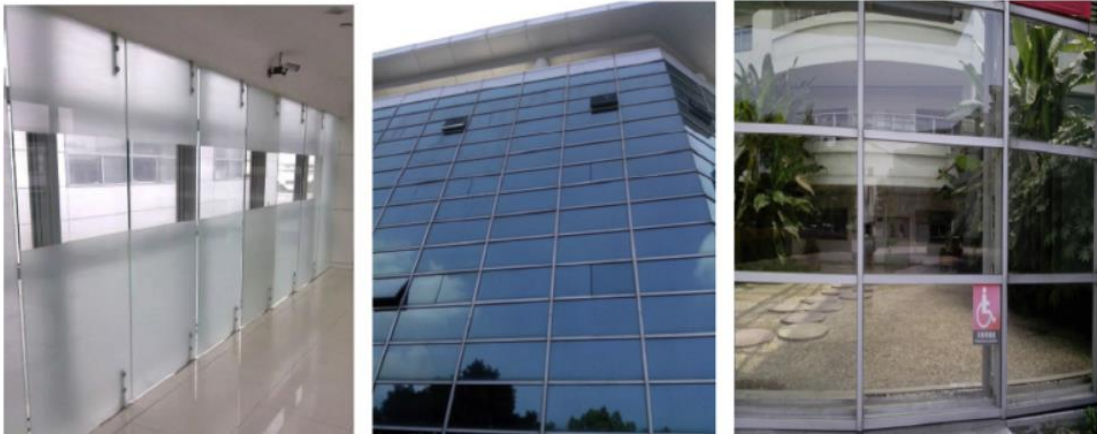
ผลการวิจัยได้ข้อสรุปว่า การที่เศษกระจกแตกเกิดจากแรงระเบิดกระจายอยู่ด้านหน้าของหน้าต่างเกิดจากแรงดันด้านลบ (Negative pressure) ซึ่งเห็นผลอย่างชัดเจนกับเศษกระจกที่มีขนาดเล็ก และการทดสอบนี้สามารถยืนยันได้ว่า กระจกเทมเปอร์ภายใต้แรงระเบิดจะไม่สร้างเศษกระจกขนาดเล็กเพียงอย่างเดียวแต่จะสร้างเศษกระจกที่มีขนาดใหญ่และแหลมคมได้อีกด้วย โดยทั่วไปแล้วระเบิดขนาดเล็กจะก่อให้เกิดชิ้นส่วนน้อยชิ้นแต่ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับระเบิดขนาดใหญ่

การศึกษาของ Zhang, X., H. Hao, and Z. Wang [11] ทำการตรวจสอบหน้าต่างกระจกเทมเปอร์ภายใต้แรงระเบิดโดยทดสอบกระจกขนาด 1500 mm × 1200 mm โดยวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการทดสอบโดยผลการทดสอบ แสดงในตารางที่ 2-10 โดยที่ Z คือ ระยะปรับทอน ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะจุดศูนย์กลางระเบิด (R) และรากที่สามของน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า (W),  $disp_c$  คือ ระยะโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจก ณ เวลาที่เกิดการแตกของกระจก,  $P_r$  คือ แรงระเบิดสะท้อนช่วงบวก และ  $I_r$  คือ แรงดลสะท้อนสูงสุดช่วงบวก

ตารางที่ 2- 10 ผลการทดสอบ Zhang, X., H. Hao, and Z. Wang [11]

ตัวอย่างที่	ความหนา mm	Z m/kg <sup>1/3</sup>	$disp_c$ mm	$P_r$ kPa	$I_r$ kPa ms
3-1-1	6	5.71	38.76	82.20	413.25
9-1-2	6	3.51	42.40	219.99	363.86
10-1-1	10	4.68	22.20	130.12	377.73
11-1-2	10	5.57	18.15	84.69	296.78
12-1-1	10	4.18	21.87	141.47	459.35

Wang Yu และคณะ [12] ทำการทดสอบศึกษาเกี่ยวกับแรงต้านทานการแตกและอุณหภูมิ โดยทำการทดสอบกระจก 3 ชนิด คือ กระจกใส กระจกเคลือบ และกระจกฝ้า ที่อุณหภูมิห้องและทำการดึงกระจกเพื่อหาหน่วยแรงดึงสูงสุดในกระจก 1500 mm × 1200 mm



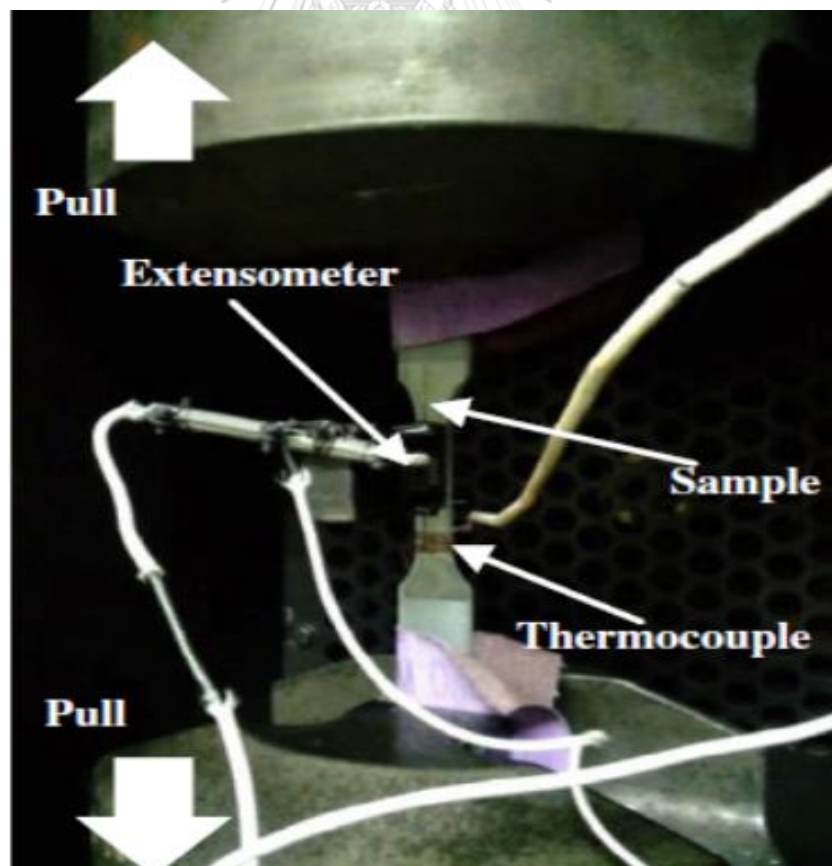
รูปที่ 2- 21 กระจกฝ้า กระจกเคลือบ กระจกใส ตามลำดับ [12]



รูปที่ 2- 22 ชิ้นส่วนของกระจกที่นำมาทดสอบรับแรงดึง [12]



รูปที่ 2- 23 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Heating Chamber) [12]



รูปที่ 2- 24 เครื่องมือทำการทดสอบ [12]



ตารางที่ 2- 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของกระจกใส กระจกเคลือบ และกระจกฝ้า

ชนิด	Critical Breaking Stress (MPa)							Min (MPa)	Average (MPa)
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7		
กระจกใส	36.75	33.61	34.30	36.61	35.96	36.76	36.07	33.61	35.72
กระจกเคลือบ	32.36	33.59	-	31.59	32.81	-	34.20	31.59	32.91
กระจกฝ้า	-	31.30	29.58	33.89	28.76	-	31.42	28.76	30.99

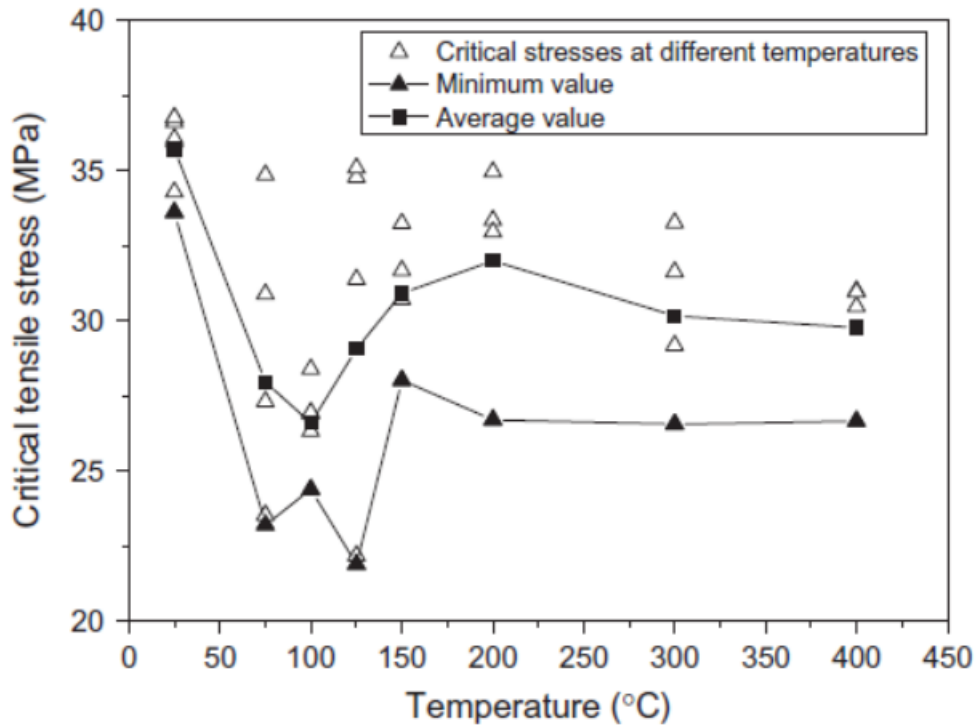
จากตารางที่ 2-11 จะเห็นได้ว่ากระจกใส มีค่าหน่วยแรงดึงสูงที่สุด โดยถ้าเทียบเป็น % จะสูงกว่ากระจกเคลือบ 8.5% และมากกว่ากระจกฝ้า 15.3%

เมื่อทดสอบกระจกที่อุณหภูมิห้องไปแล้วจึงนำกระจกใสมาทดสอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 75 องศาเซลเซียสจนถึง 400 องศาเซลเซียส ได้ผลตามตารางที่ 2-12

ตารางที่ 2- 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของกระจกใสที่อุณหภูมิต่าง ๆ

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

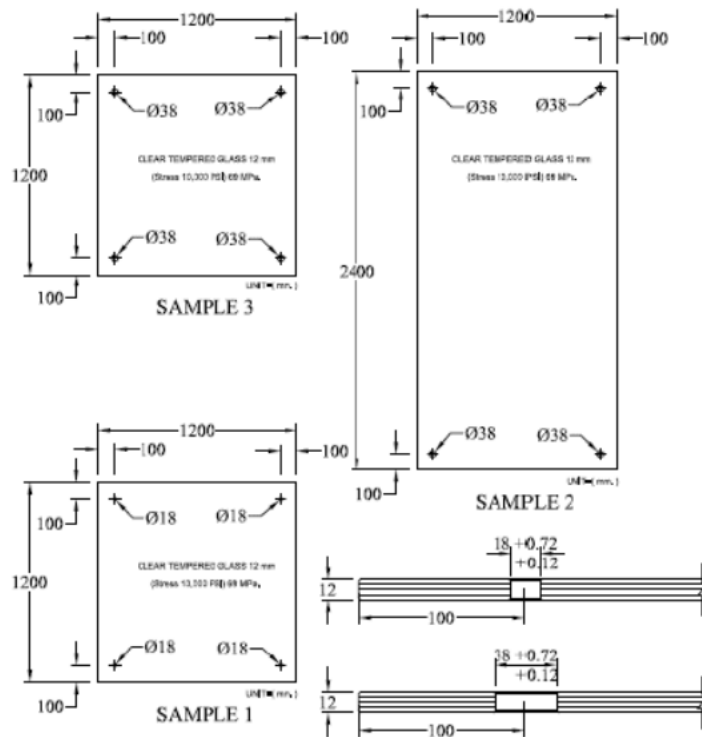
จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงของกระจกจะมีค่าลดลง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสมีกำลังเฉลี่ยที่ประมาณ 26.60 องศาเซลเซียส และกำลังรับแรงดึงจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ จะเริ่มมีกำลังรับแรงดึงคงที่ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2-26



รูปที่ 2- 25 กราฟอุณหภูมิกับแรงดึงสูงสุดที่ทำให้กระจกเกิดการวิบัติ

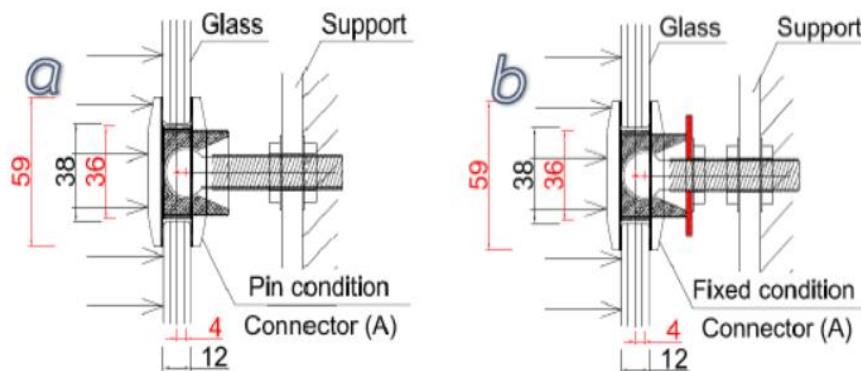
จากการวิจัยสรุปได้ว่า ค่าแรงดึงสูงสุดของกระจกใสมีค่าประมาณ 35.7 MPa ณ อุณหภูมิห้อง เมื่อให้อุณหภูมิในการทดสอบที่สูงขึ้นกำลังรับแรงดึงมีค่าลดลงจนถึงต่ำสุดที่ 100 องศาเซลเซียสโดยมีค่ารับแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 26.60 MPa จากนั้นกำลังรับแรงดึงจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนคงที่ ณ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีค่ารับดึงอยู่ที่ 32.00 MPa

Sopon [13] ทำการทดสอบกระจกเทมเปอร์กับโหลดสม่ำเสมอ (Uniform load) ทำการทดสอบกระจก 2 ขนาด คือ 1200×1200 mm และ 1200×2400 mm โดยทั้ง 2 ขนาดหนา 12 mm และทำการเจาะที่บริเวณมุมกระจกทั้ง 4 มุมโดยแบ่งเป็น 3 ลักษณะ ดังรูปที่ 2-23

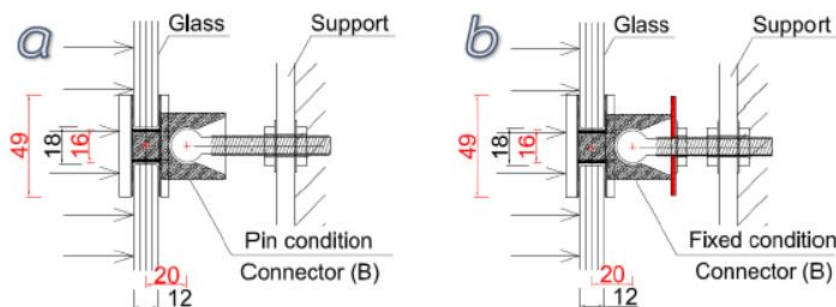


รูปที่ 2- 26 ขนาดและตำแหน่งรูเจาะของกระจกที่ใช้ในการทดสอบ [13]

ในการทดสอบใช้ตัวยึด 2 ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดรูเจาะที่ต่างกันและจะใช้ตัวยึดที่ 2 ลักษณะ คือ แบบแกนหมุน (Pin) และ แบบแกนยึด (Fix) ตามรูปที่ 2-28 และ 2-29 โดย 2 ผลิตภัณฑ์มีลักษณะทางกายภาพตามที่แสดงในตารางที่ 2-13



รูปที่ 2- 27 ตัวอย่างตัวยึดกระจกรูเจาะขนาดใหญ่



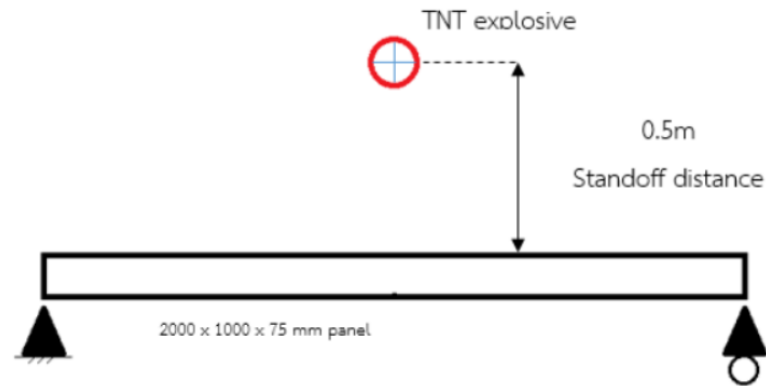
รูปที่ 2- 28 ตัวอย่างตัวยึดกระจกรูเจาะขนาดเล็ก

ตารางที่ 2- 13 ลักษณะทางกายภาพของตัวยึด 2 ผลิตภัณฑ์

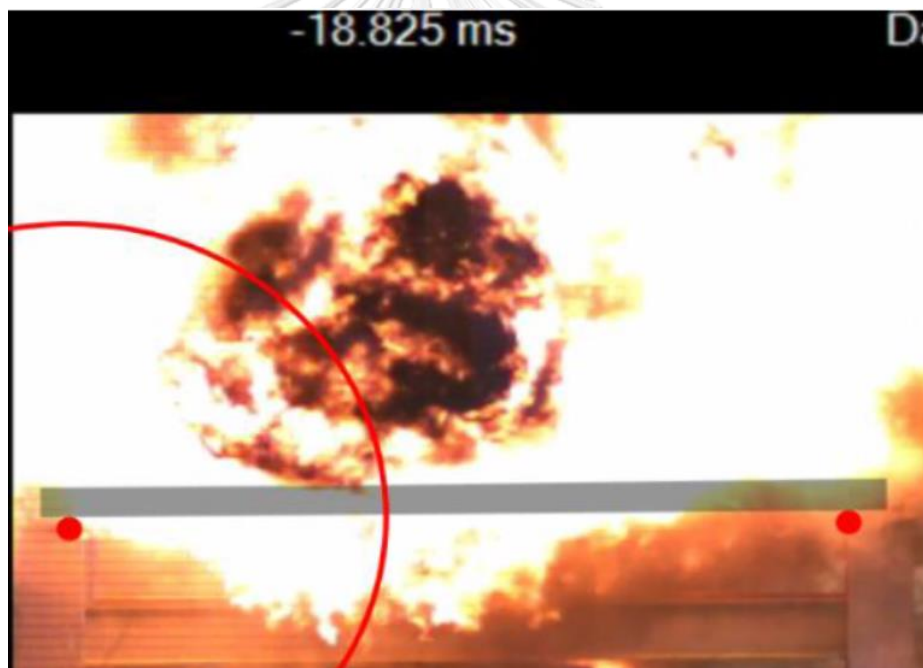
ชนิดของตัวยึด	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm)	แกนเหล็กตัวยึดต่อกระจก (mm)	ระยะจุดหมุนยึดต่อกระจกและแนวกึ่งกลางแผ่นกระจก (mm)
ขนาดใหญ่ A	59	36	16	4
ขนาดเล็ก B	49	16	13	20

จากงานวิจัยได้ผลสรุปว่า กระจกเทมเปอร์ขนาด 1200×1200×12 mm สามารถรับแรงได้ในช่วง 16700-19300 Pa และมีค่าการโก่งตัวที่ศูนย์กลางแผ่นกระจกประมาณ 24.8 – 25.5 mm ส่วนกระจกเทมเปอร์ขนาด 1200×2400×12 mm สามารถรับแรงได้ในช่วง 3200-3400 Pa และมีการโก่งตัวที่ศูนย์กลางแผ่นกระจกประมาณ 89 – 92 mm แสดงให้เห็นว่า ค่าการโก่งตัวแปรผันตามความสามารถในการรับแรงของกระจกที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง และผลของขนาดกระจกที่มีความกว้างต่อความยาวต่างกันส่งผลกระทบต่อการกระจายแรงในแผ่นกระจกมากโดยเฉพาะกึ่งกลางของจุดรับรอง (Middle span) โดยด้านที่ยาวจะเกิดความเค้นสูงกว่าและมีโอกาสที่กระจกจะแตกในบริเวณดังกล่าวมากกว่าจุดอื่น

งานวิจัยของ Sakkasem [14] ทำการทดลองสมรรถนะของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเปรียบเทียบกับแผ่นคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีการเสริมเส้นใยเหล็กเมื่อถูกกระทำด้วยแรงระเบิด มีการหล่อแผ่นคอนกรีตสองแผ่นต่อสัดส่วนเส้นใยเหล็กตั้งแต่ 0 (ไม่มีการเสริมเส้นใย) , 30 และ 60 kg/m<sup>3</sup> โดยควบคุมค่ากำลังอัดของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 55 – 60 MPa แผ่นคอนกรีตถูกกระทำโดยแรงระเบิด TNT ปริมาณ 1 lb และ 2 lb ที่ระยะ 0.5 m ดังรูปที่ 2-25 ในการทดสอบมีการตรวจวัดการเคลื่อนที่ของแผ่นคอนกรีตและอัตราเร่งของแผ่นคอนกรีต



รูปที่ 2- 29 การตั้งค่าการทดสอบ

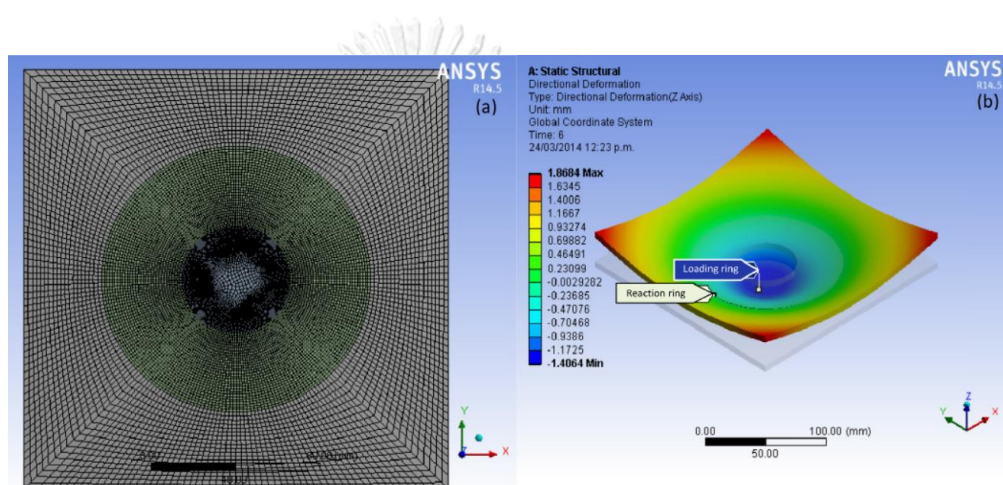


รูปที่ 2- 30 การทดสอบในเวลาที 3.975 ms

งานวิจัยสรุปได้ว่าการใส่ steel-fiber ไปในคอนกรีตช่วยให้มีค่าความต้านทานต่อแรงระเบิดเพิ่มมากขึ้นโดยระบุได้จากค่า maximum deflection และค่า residual deflection มีค่าน้อยลง และการเพิ่มขึ้น 2 เท่าของอัตราส่วนเหล็กและเส้นใย ( $30$  และ  $60 \text{ kg/m}^3$ ) ช่วยลดการตอบสนองต่อการเคลื่อนที่ แต่จะลดได้เพียงเล็กน้อยในกรณีของระเบิด  $2 \text{ lb}$  โดยที่สัดส่วนส่วนใหญ่ของคอนกรีตอยู่ในพฤติกรรมพลาสติก (Plastic behavior)

## 2.8.2 การวิจัย ศึกษาเกี่ยวกับ การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Olmos [15] ได้ทำการทดสอบกระจัดใหม่จากโรงงาน เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงของกระจกโดยใช้กระจกที่มีขนาด 200 mm × 200 mm ใช้วิธี Coaxial double ring (CDR) Test จำนวน 8 ขนาด คือ ความหนา 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 และ 19 mm อย่างละ 10 ชิ้น โดยใช้น้ำหนักกดทดสอบที่คงที่ที่อัตรา 79 kN/min หาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าโก่งตัว (deflection) และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยคำนวณและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Ansys ดังรูปที่ 2-32

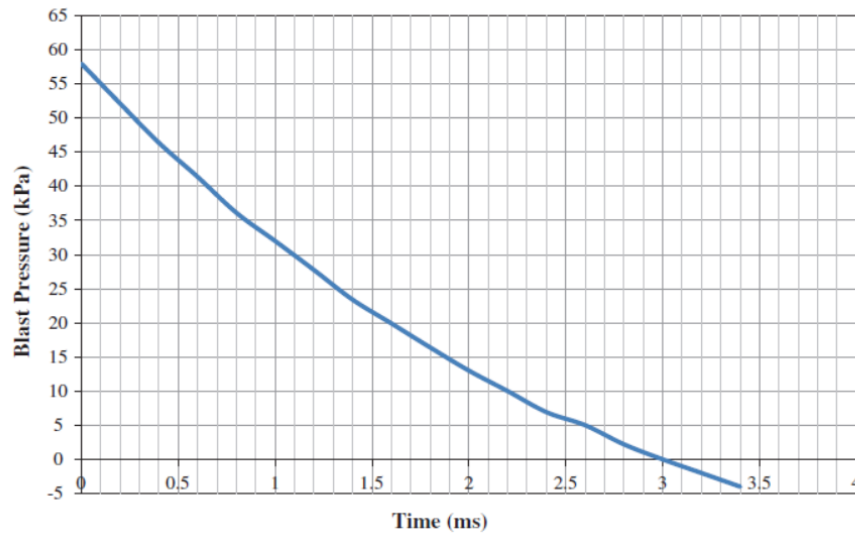


รูปที่ 2- 31 แบบจำลองกระจกด้วยโปรแกรม Ansys [15]

จากผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์มาเทียบกับมาตรฐาน ASTM E1300 ของกระจกเทมเปอร์ พบว่ารูปแบบของกราฟมีความคล้ายคลึงกัน แต่จะมีค่าแตกต่างกันในส่วนของกำลังที่กระจกสามารถรับแรงได้ของกระจกที่มีความหนาน้อย ค่ารับแรงจะเริ่มใกล้เคียงขึ้นเมื่อกระจกมีความหนาเพิ่มขึ้นทั้งนี้อาจเป็นเพราะค่า E ซึ่งในมาตรฐาน ASTM E1300 ใช้ค่า E = 71700 MPa แต่ค่า E ที่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS ใช้ค่า E = 74000 MPa แสดงให้เห็นว่าค่า E ที่ต่างกันจะมีผลกระทบต่อกระจกที่มีความหนาน้อยมากกว่ากระจกที่มีความหนา

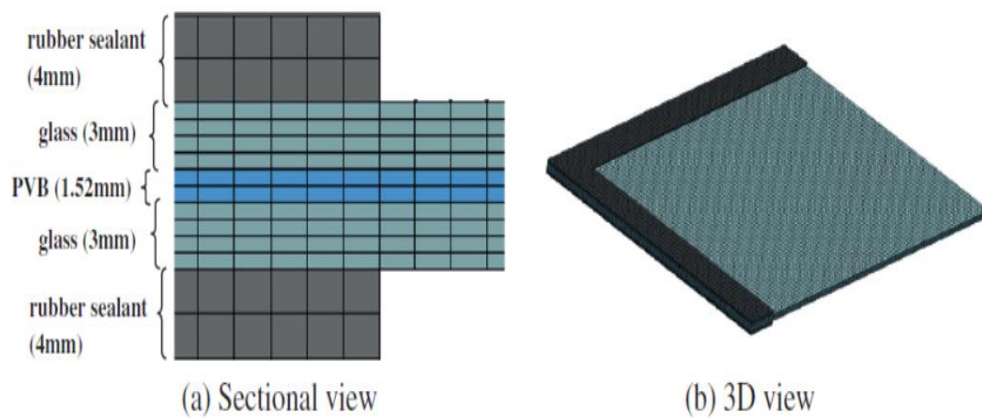
Hidallana-Gamage และคณะ [16] ได้ทำการวิเคราะห์กระจกลามิเนตภายใต้แรงระเบิดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นำการทดสอบในอดีตมาจาก Kranzer et al. [17] โดยใช้กระจกลามิเนตขนาด 1.1 m × 0.9 m × 7.5 mm โดยเป็นกระจกหนา 3 mm ประกอบกับ polyvinyl butyral (PVB) หนา 1.52 mm โดยการทดสอบแบบ free field test เมื่อค่าแรงดันระเบิดสูงสุดมีค่าประมาณ 58 kPa ตามรูปที่ 2-23 จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตามรูปที่ 2-34 โดย

คุณสมบัติของวัสดุจะเป็นไปตาม ตารางที่ 2-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด แสดงในรูปที่ 2-35



รูปที่ 2- 32 กราฟเส้นโค้งแรงดันระเบิดและเวลาโดย free field blast test ของ Kranzer et al.

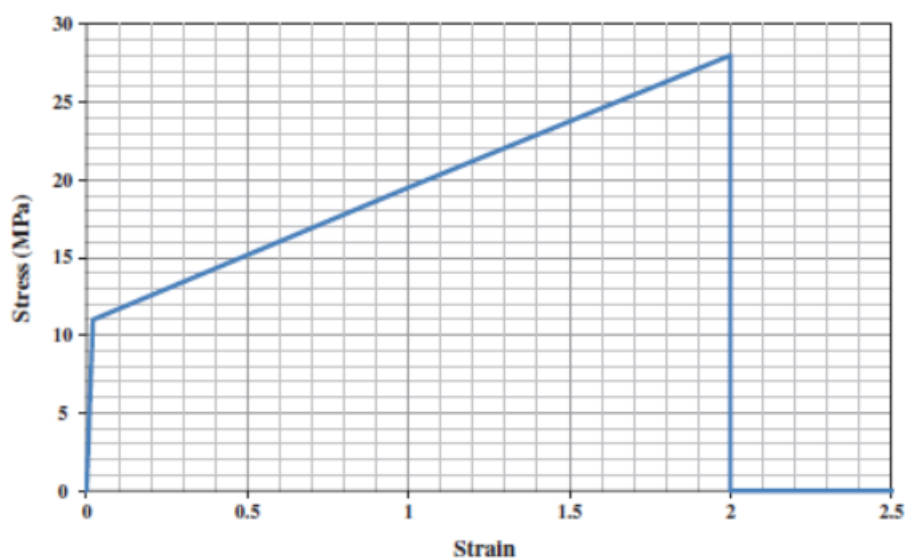
[17]



รูปที่ 2- 33 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 2- 14 คุณสมบัติของวัสดุ

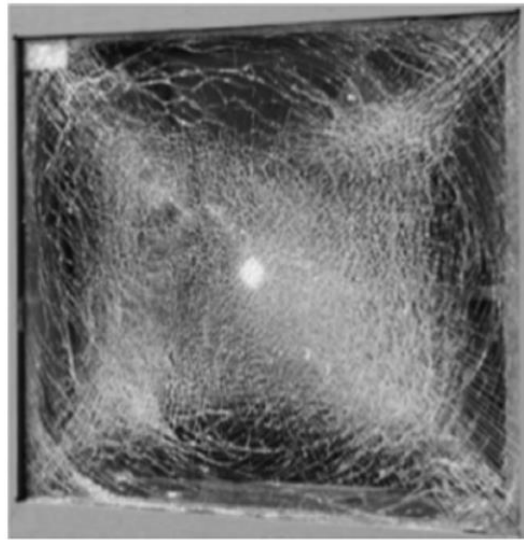
Material property	Glass	PVB	Rubber adhesive
Density	2500 kg/m <sup>3</sup>	1100 kg/m <sup>3</sup>	1100 kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus	72 GPa	530 MPa	2.3 MPa (50 IRHD)
Poisson's ratio	0.22	0.485	0.495
Yield stress	-	11 MPa	2.3 MPa
Failure stress	-	28 MPa	3.5 MPa
Failure strain	-	2	2.5



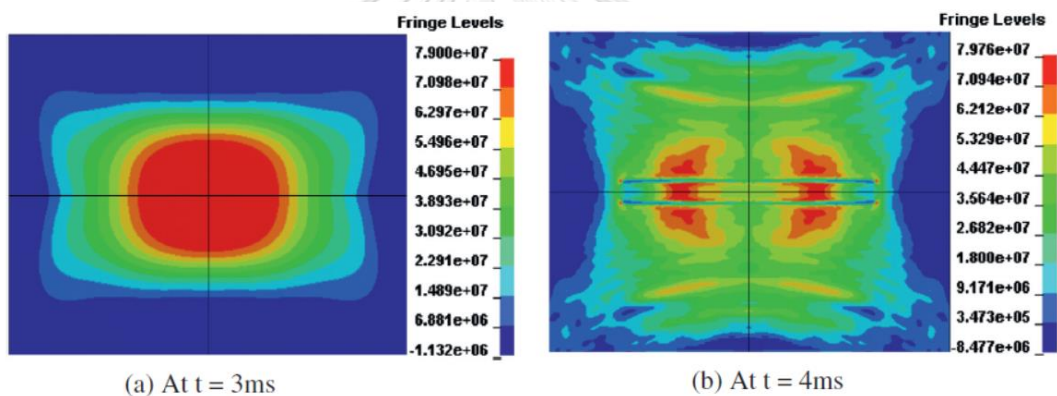
รูปที่ 2- 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ความเค้น-ความเครียด ของ PVB

Kranzer et al. [17] ได้กล่าวว่าทั้ง 2 ด้านของกระจกลามิเนตแตกออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ แต่จะถูกเชื่อมด้วยชั้น PVB ตามรูปที่ 2-36 จากนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตามรูปที่ 2-37





รูปที่ 2- 35 ตัวอย่างการทดสอบของ Kranzer [17]



รูปที่ 2- 36 stress ที่เกิดขึ้นกระจกชั้นล่างในเวลาที 3 ms และ 4 ms

## CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากผลการวิเคราะห์ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ค่า tensile strength ของกระจกมีความละเอียดอ่อนมากต้องระมัดระวังในการวิเคราะห์ ค่าโก่งตัวที่กึ่งกลางกระจก (mid-span deflection) เป็นไปตามการทดลองเมื่อค่า tensile strength ตั้งค่าไว้ที่ 61 MPa แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายรูปแบบของรอยแตกได้เมื่อมีค่า ความเครียดสูงสุด (maximum principal stress) เกินกว่า 60 MPa

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

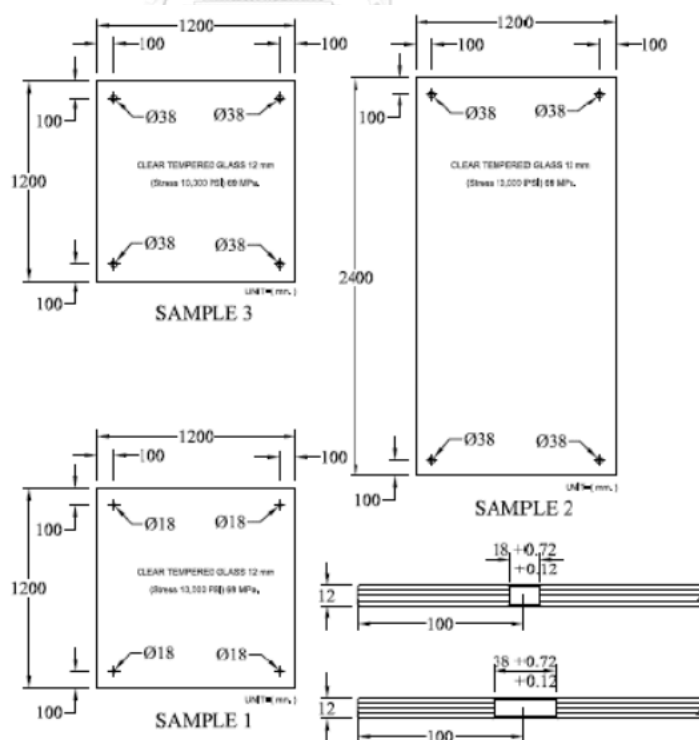
#### 3.1 รวบรวมงานวิจัยในอดีต

ขนาดของแบบจำลองจะใช้ขนาดเท่ากับงานวิจัยในอดีตซึ่งแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ การจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ [13] และการจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด [11]

3.1.1 การจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอต่อเนื่อง [13]

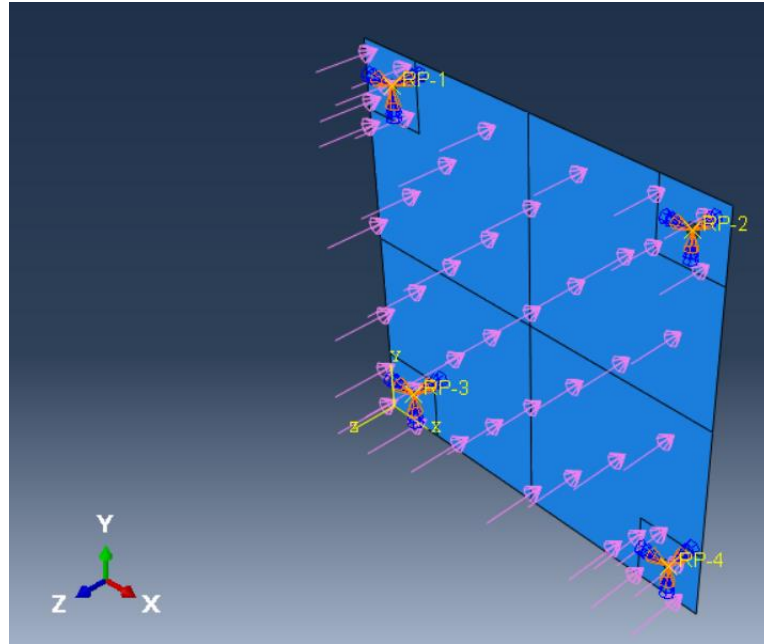
จำลองกระจกเทมเปอร์ 2 ขนาด 3 รูปแบบ คือ

1. กระจกขนาด 1200×1200 mm ความหนา 12 mm มีขนาดรูเจาะ 18 mm 4 มุม โดยมีระยะห่างจากมุมขอบทั้ง 4 ด้านเป็นระยะ 100 mm
2. กระจกขนาด 1200×2400 mm ความหนา 12 mm มีขนาดรูเจาะ 38 mm 4 มุม โดยมีระยะห่างจากมุมขอบทั้ง 4 ด้านเป็นระยะ 100 mm
3. กระจกขนาด 1200×2400 mm ความหนา 12 mm มีขนาดรูเจาะ 38 mm 4 มุม โดยมีระยะห่างจากมุมขอบทั้ง 4 ด้านเป็นระยะ 100 mm



รูปที่ 3- 1 ขนาดและตำแหน่งรูเจาะ

โดยกระจกขนาด  $1200 \times 1200$  mm ให้มีน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอเท่ากับ  $16700$  Pa กระจกขนาด  $1200 \times 2400$  mm ให้มีน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอเท่ากับ  $3200$  Pa



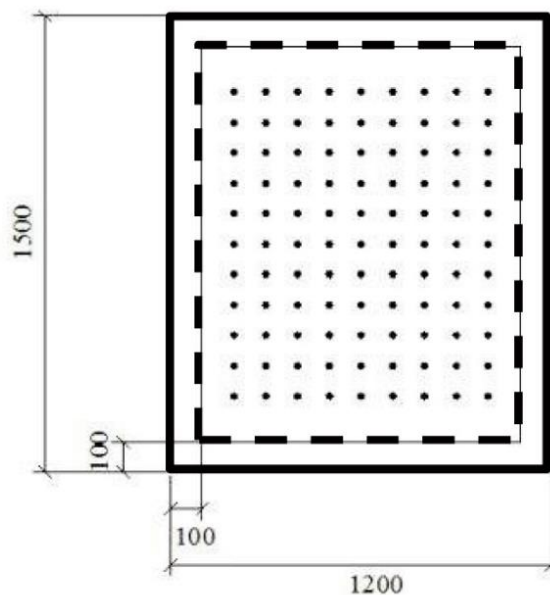
รูปที่ 3- 2 ตัวอย่างการจำลองน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอกับกระจกเทมเปอร์ใน

โปรแกรม ABAQUS

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.1.2 การจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด [11]

ใช้กระจกขนาด 1500×1200 mm ตามรูปที่ 3-2 โดยขนาดระเบิด ระยะระเบิด และความหนาของกระจกใช้ตามตารางที่ 3-1



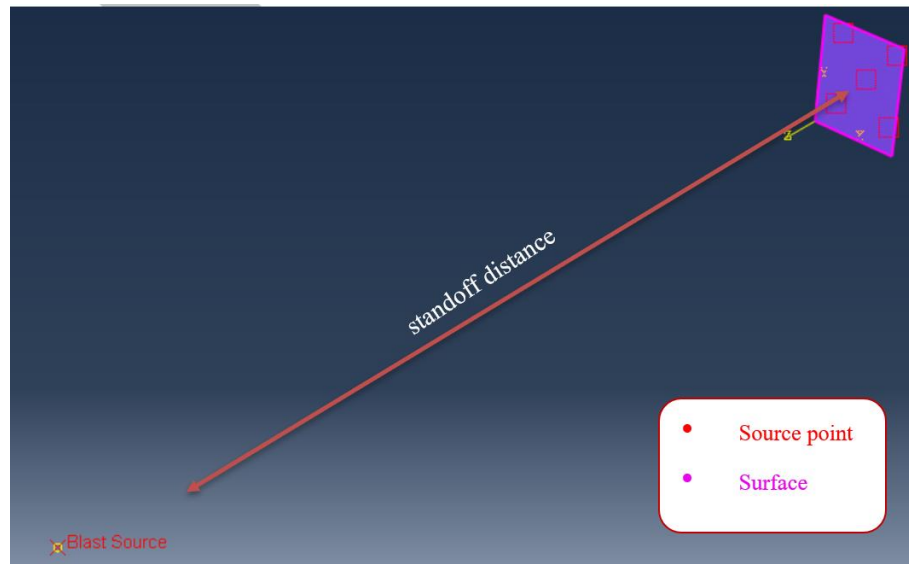
รูปที่ 3- 3 ขนาดความกว้างยาวของกระจก [11]

ตารางที่ 3- 1 ความหนา ขนาดของระเบิด และระยะระเบิดของการทดสอบ [11]

ตัวอย่างที่	ความหนาของกระจก (mm)	ขนาดของวัตถุระเบิด (kg)	ระยะระเบิด (m)
3	6	10	12.3
9	6	5	6
10	10	5	8
11	10	10	12
12	10	10	9

### การจำลองแรงระเบิดในโปรแกรม ABAQUS

การจำลองแรงดันระเบิดในแบบจำลองจะใช้ CONWEP function ของ ABAQUS โดยจำเป็นต้องมีตำแหน่งของระเบิด (Blast source location) และ พื้นที่ผิว (Surface area) ซึ่งเป็นส่วนที่รับผลกระทบจากแรงระเบิด



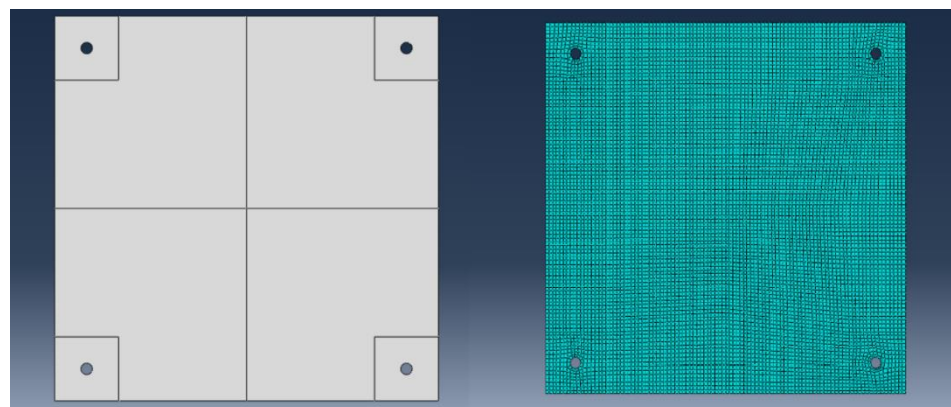
รูปที่ 3- 4 ตัวอย่างการจำลองแรงระเบิดในโปรแกรม ABAQUS

### 3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

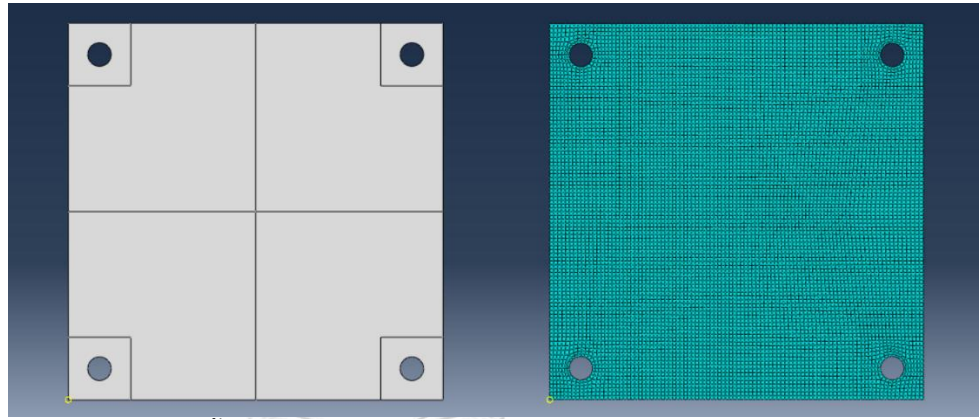
ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS ในการจำลองกระจกเทมเปอร์ โดยเลือกใช้ Shell element แบ่งขนาดชิ้นส่วน ดังนี้

#### 3.2.1 การแบ่งขนาดชิ้นส่วน

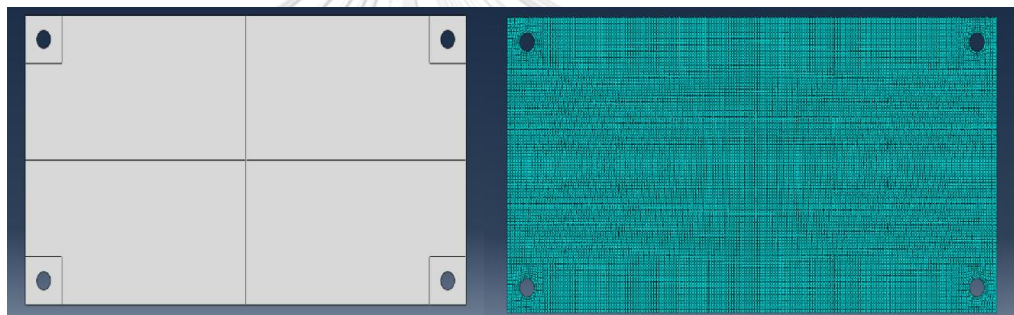
1. การจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด S4R แบ่งชิ้นส่วนเป็นขนาด  $12 \times 12$  mm ดังแสดงในรูปที่ 3-5 ถึง รูปที่ 3-7



รูปที่ 3- 5 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด  $1200 \times 1200$ mm รูเจาะขนาด 18 mm

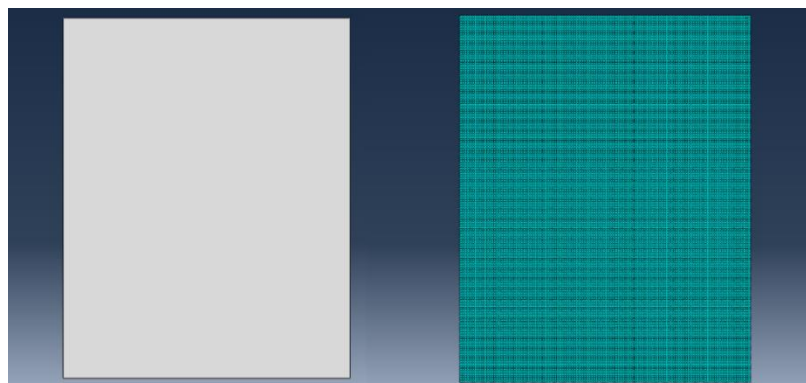


รูปที่ 3- 6 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×1200mm รูเจาะขนาด 38 mm



รูปที่ 3- 7 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×2400mm รูเจาะขนาด 38 mm

- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY
2. การจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิดเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด S4R แบ่งชิ้นส่วนเป็นขนาด 10×10 mm ดังแสดงในรูปที่ 3-8

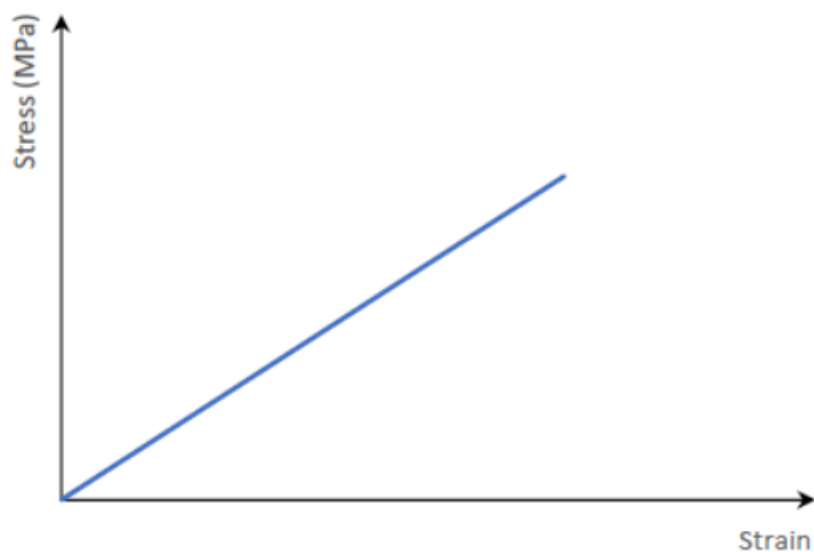


รูปที่ 3- 8 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×1500 mm

### 3.3 คุณสมบัติของวัสดุ

#### 3.3.1 คุณสมบัติการหักงอ

แบบจำลองการหักงอในงานวิจัยนี้จะใช้คุณสมบัติความยืดหยุ่นเชิงเส้นตามกฎของฮุก (Hooke's law) มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 3-9 โดยมีคุณสมบัติของการหักงอตามตารางที่ 3-2



รูปที่ 3- 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการหักงอ

ตารางที่ 3- 2 คุณสมบัติการหักงอ

โมดูลัสความยืดหยุ่น	70,000 N/mm <sup>2</sup>
อัตราส่วนปัวซอง	0.22
ความหนาแน่น	2500 kg/m <sup>3</sup>
Ultimate strength	73 MPa

### 3.3.2 คุณสมบัติฟิล์มนิรภัย

การจำลองฟิล์มนิรภัยใช้ความหนา 0.5 mm ติดกับกระจก มีคุณสมบัติของฟิล์มซึ่งมาจากการทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3- 3 คุณสมบัติฟิล์มนิรภัย

โมดูลัสความยืดหยุ่น	2,400 N/mm <sup>2</sup>
อัตราส่วนปัวซอง	0.4
ความหนาแน่น	1300 kg/m <sup>3</sup>
Ultimate strength	95 MPa

### 3.4 เงื่อนไขขอบเขต

แบบจำลองกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของกระจกเทมเปอร์ ดังนี้

1. การจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ ที่รูเจาะทั้ง 4 รูของกระจกให้มีการเคลื่อนที่และโมเมนต์ในแนวแกน x, y และ z เท่ากับ 0 ( $U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3 = 0$ )
2. การจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด ที่ขอบทั้ง 4 ด้านของกระจกให้มีการเคลื่อนที่และโมเมนต์ในแนวแกน x, y และ z เท่ากับ 0 ( $U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3=0$ )

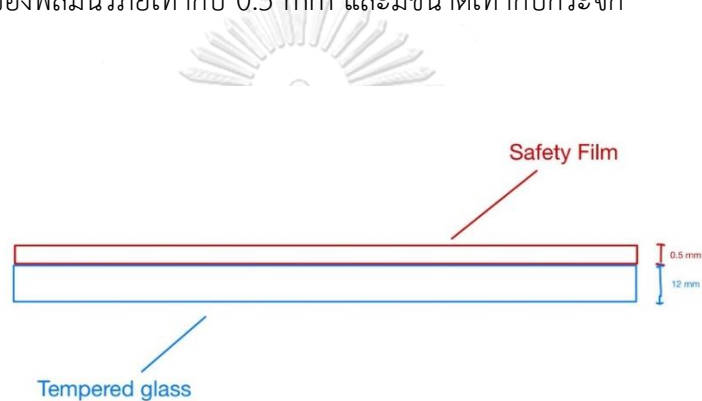
### 3.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

พิจารณาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต [13] สำหรับการจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ พิจารณาค่ารับแรงได้สูงสุดเมื่อผิวกระจกมีค่าความเค้นเท่ากับ 73 MPa ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ ASTM E1300 ยอมให้ และค่าโก่งตัวของกระจกมีค่าตรงกับงานวิจัยในอดีต สำหรับการจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด [11] ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของกระจก ณ เวลาที่กระจกแตก

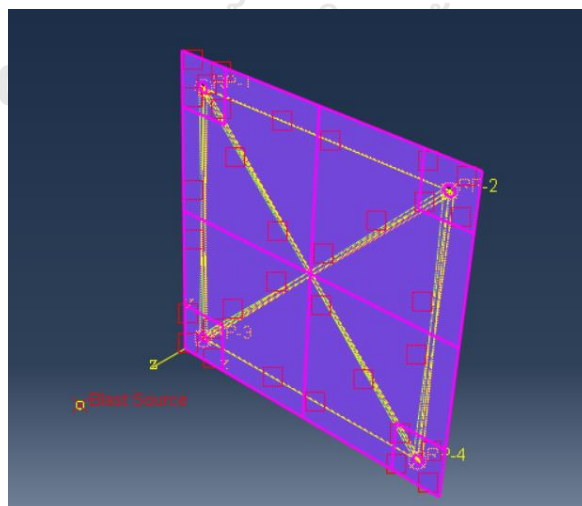


### 3.6 วิเคราะห์กระจกติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด

การจำลองกระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด โดยระเบิดที่ระยะ 1 m, 2 m และ 4 m ให้เป็นการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ (Free air blast) โดยเริ่มต้นที่ระยะระเบิด 1 m ใช้ขนาดระเบิด TNT เริ่มต้นที่ 0.5 kg เพิ่มน้ำหนักหนักระเบิดขึ้นจนกว่าฟิล์มจะขาด ที่ระยะระเบิด 2 m และ 4 m ใช้ขนาดระเบิด TNT เริ่มต้นที่ 1 kg เพิ่มน้ำหนักหนักระเบิดขึ้นจนกว่าฟิล์มจะขาด เพื่อวิเคราะห์ความทนทานของฟิล์มนิรภัย ขนาดของแบบจำลองจะใช้เหมือนงานวิจัยในอดีต [13] เนื่องจากเป็นความหนาทั่วไปของกระจกเทมเปอร์ที่ใช้ในประเทศไทย คือ ความหนา 12 mm ขนาดกระจก 1200×1200 mm รูเจาะขนาด 18 mm และ 38 mm ของบริเวณมุมกระจกทั้ง 4 ด้าน ความหนาของฟิล์มนิรภัยเท่ากับ 0.5 mm และมีขนาดเท่ากับกระจก



รูปที่ 3- 10 ฟิล์มนิรภัยและกระจกเทมเปอร์



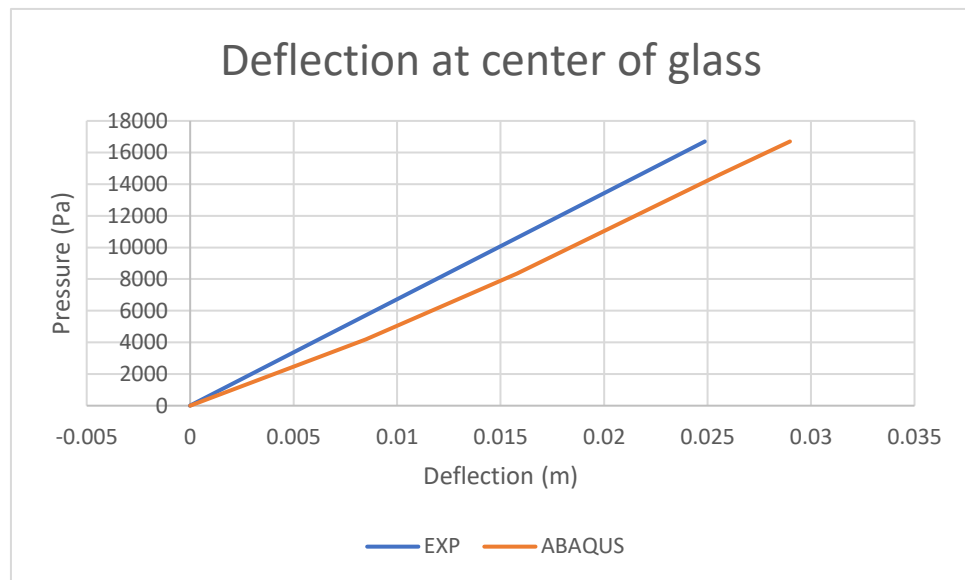
รูปที่ 3- 11 แบบจำลองกระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด

## บทที่ 4

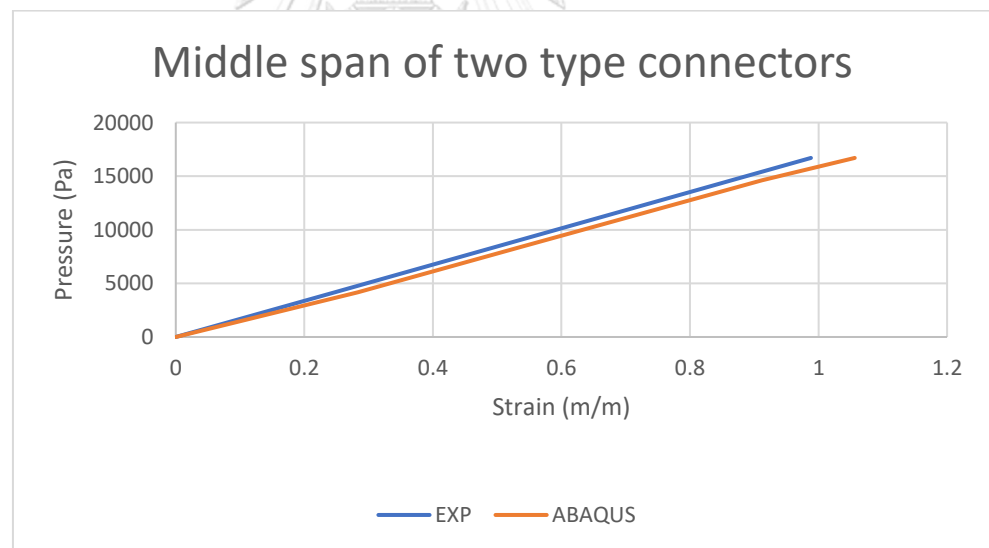
### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 แบบจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ

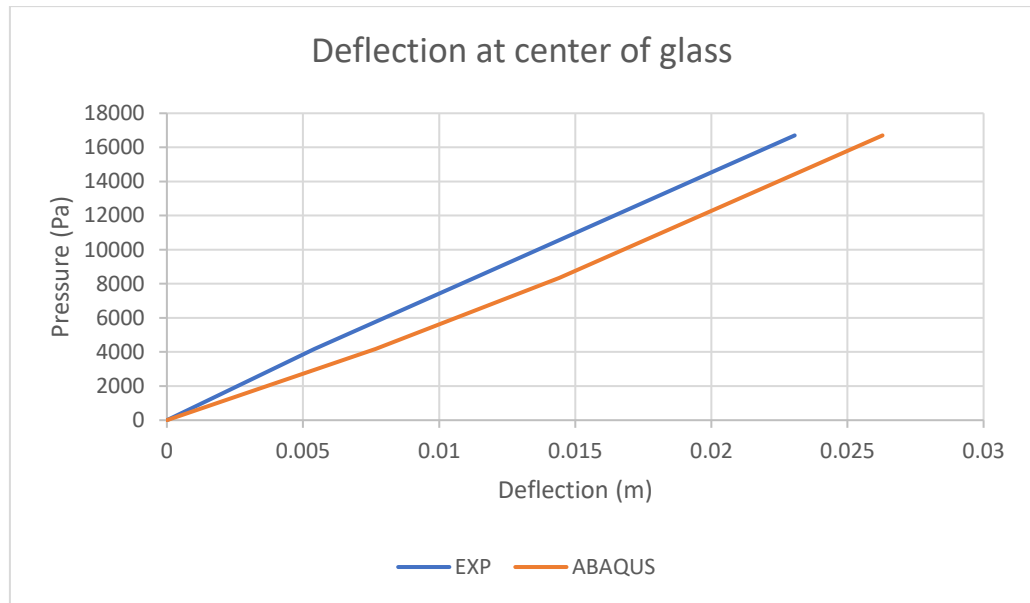
การวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอกับงานวิจัยในอดีต [13] กระจกขนาด 1200×1200 mm ขนาดรูเจาะ 18 mm ได้ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกเท่ากับ 28.98 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกของงานวิจัยในอดีต เท่ากับ 24.86 mm ค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดมีค่าเท่ากับ 1.121 m/m ค่าความเครียดจุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดของงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 0.988 m/m ตามรูปที่ 4-1 และ รูปที่ 4-2 กระจกขนาด 1200×1200 mm ขนาดรูเจาะ 38 mm ได้ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกเท่ากับ 29.08 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกของงานวิจัยในอดีต เท่ากับ 23.06 mm ค่าความเครียด ที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดมีค่าเท่ากับ 1.105 m/m ค่าความเครียดจุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดของงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 0.865 m/m ตามรูปที่ 4-3 และ รูปที่ 4-4 กระจกขนาด 1200×2400 mm ขนาดรูเจาะ 38 mm ได้ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกเท่ากับ 94.40 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกของงานวิจัยในอดีต เท่ากับ 83.53 mm ค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดมีค่าเท่ากับ 1.121 m/m ค่าความเครียดจุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดของงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 0.970 m/m ตามรูปที่ 4-5 และ รูปที่ 4-6 กระจกทั้ง 3 แบบ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกและค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดดังแสดงในตารางที่ 4-1 และ ตารางที่ 4-2



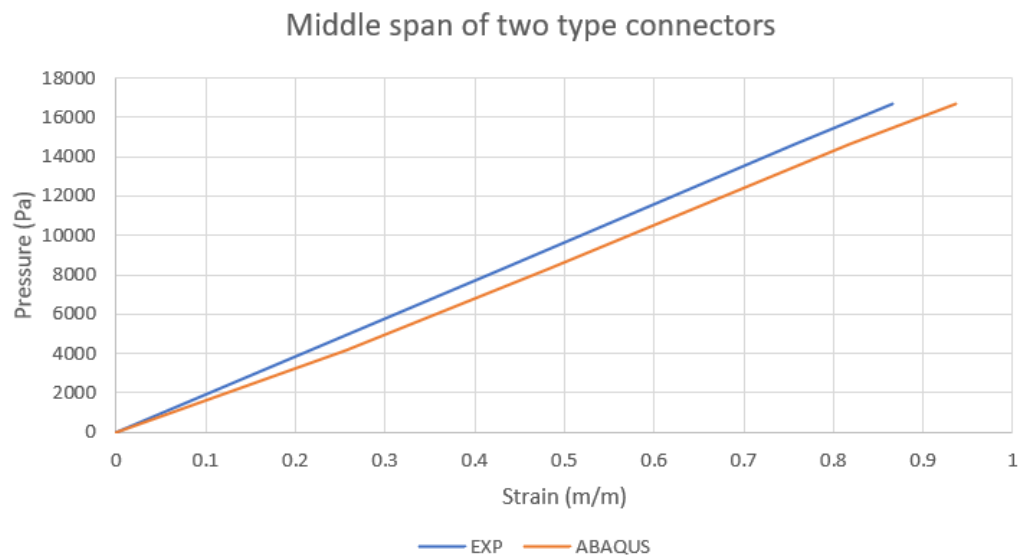
รูปที่ 4- 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อเนื้อกับค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกของกระจกขนาด 1200×1200 mm กระจก 18 mm



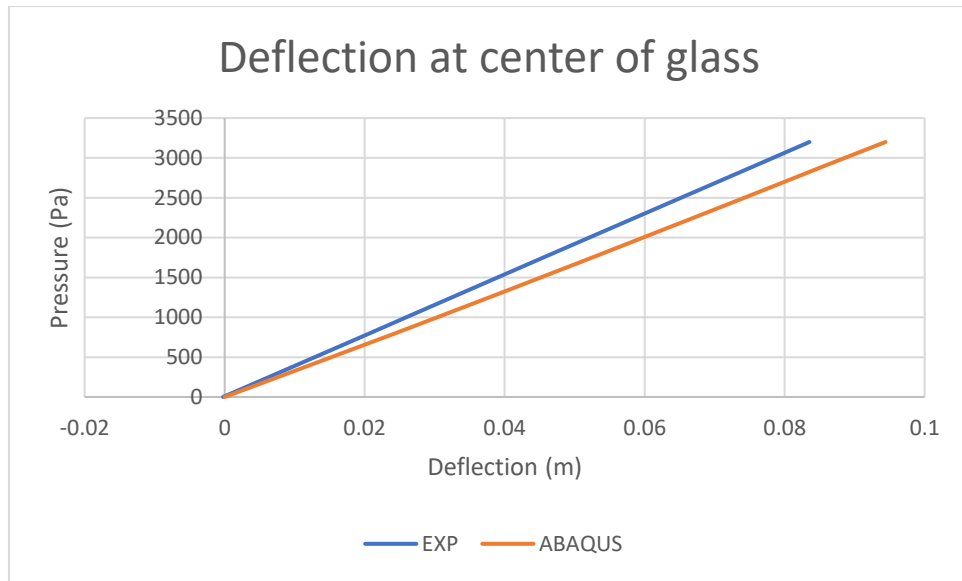
รูปที่ 4- 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อเนื้อกับความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึด ของกระจกขนาด 1200×1200 mm กระจก 18 mm



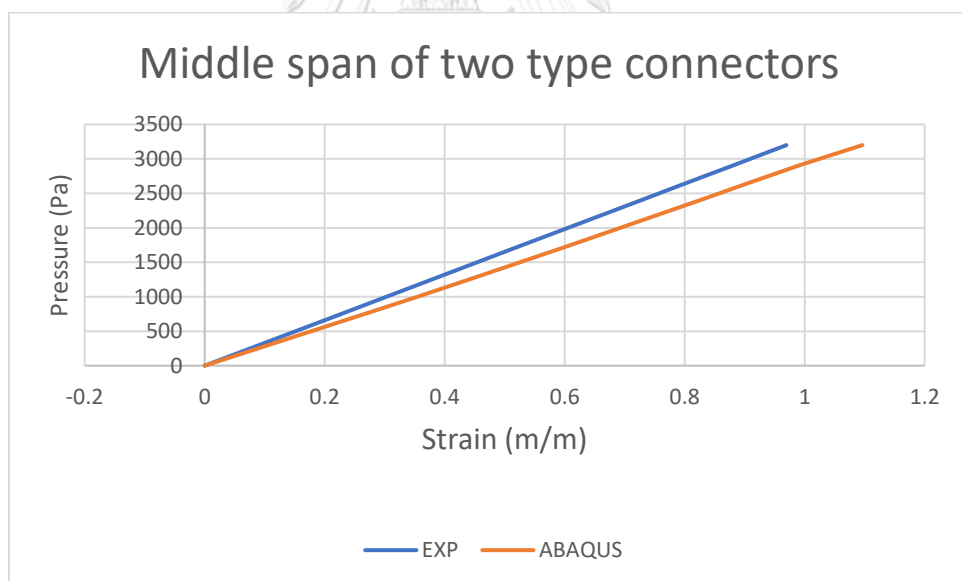
รูปที่ 4- 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อนึ่งกับค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกของกระจกขนาด 1200×1200 mm ฐเงาะ 38 mm



รูปที่ 4- 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อนึ่งกับความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึด ของกระจกขนาด 1200×1200 mm ฐเงาะ 38 mm



รูปที่ 4- 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อนึ่งกับค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจก  
ของกระจกขนาด 1200×2400 mm กระจก 38 mm



รูปที่ 4- 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำต่อนึ่งกับความเครียดที่จุดกึ่งกลาง  
ระหว่าง 2 ตัวยึด ของกระจกขนาด 1200×2400 mm กระจก 38 mm

ตารางที่ 4- 1 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจก

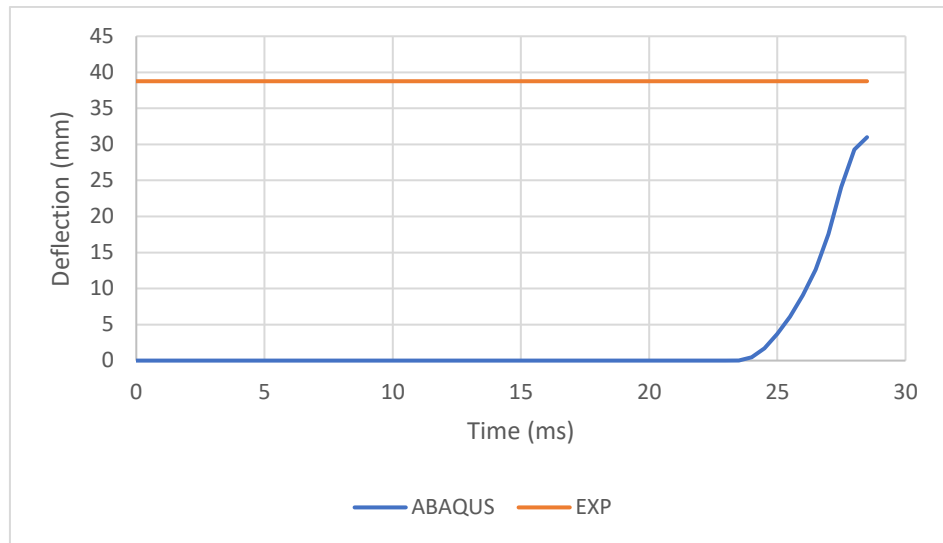
ลักษณะกระจก	งานวิจัยในอดีต	ABAQUS	% ความต่าง
1200×1200 รูเจาะ 18 mm	24.86 mm	28.98 mm	16.57 %
1200×1200 รูเจาะ 38 mm	23.06 mm	26.29 mm	14.01 %
1200×2400 รูเจาะ 38 mm	83.53 mm	94.40 mm	13.01 %

ตารางที่ 4- 2 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดของกระจก

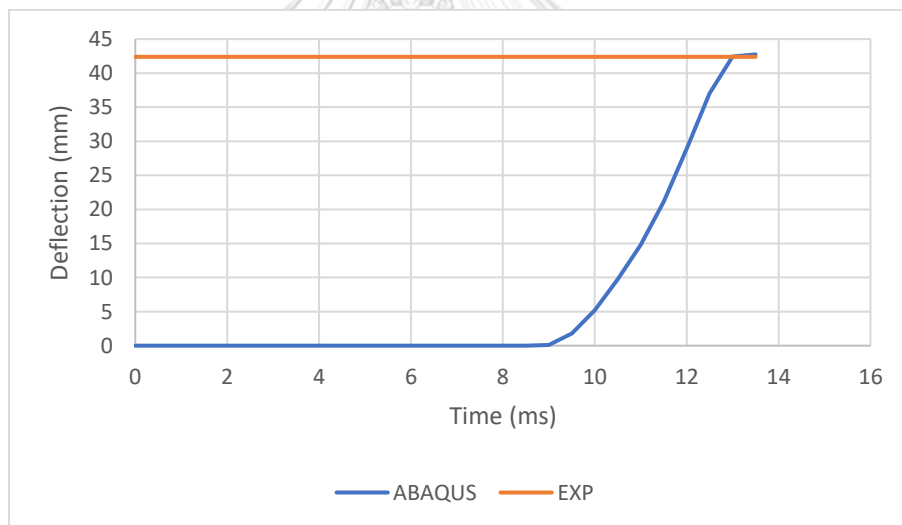
ลักษณะกระจก	งานวิจัยในอดีต	ABAQUS	% ความต่าง
1200×1200 รูเจาะ 18 mm	0.988 m/m	1.056 m/m	6.88 %
1200×1200 รูเจาะ 38 mm	0.865 m/m	0.937 m/m	8.32 %
1200×2400 รูเจาะ 38 mm	0.970 m/m	1.096 m/m	12.99 %

#### 4.2 แบบจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด

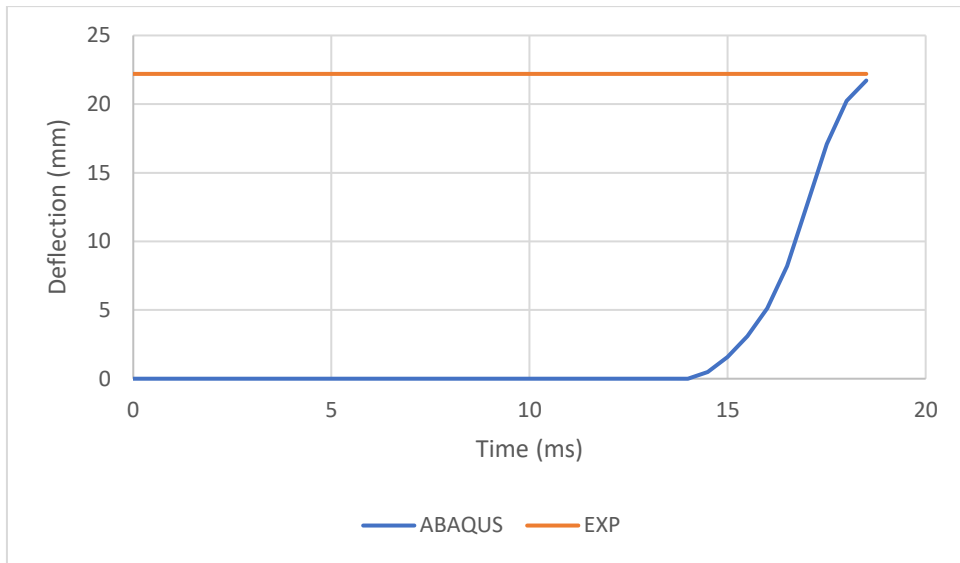
การวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ภายใต้แรงระเบิดกับงานวิจัยในอดีต [11] กระจกขนาด 1500×1200 mm สำหรับกระจกตัวอย่างที่ 3 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกมีค่าเท่ากับ 30.99 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกจากงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 38.76 mm กระจกตัวอย่างที่ 9 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกมีค่าเท่ากับ 42.75 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกจากงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 42.40 mm กระจกตัวอย่างที่ 10 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกมีค่าเท่ากับ 21.72 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกจากงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 22.20 mm กระจกตัวอย่างที่ 11 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกมีค่าเท่ากับ 19.90 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกจากงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 18.15 mm กระจกตัวอย่างที่ 12 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกมีค่าเท่ากับ 26.19 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกจากงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 21.87 mm ดังที่แสดงในรูป 4-7 ถึงรูปที่ 4-11 มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจก ดังแสดงในตารางที่ 4-3



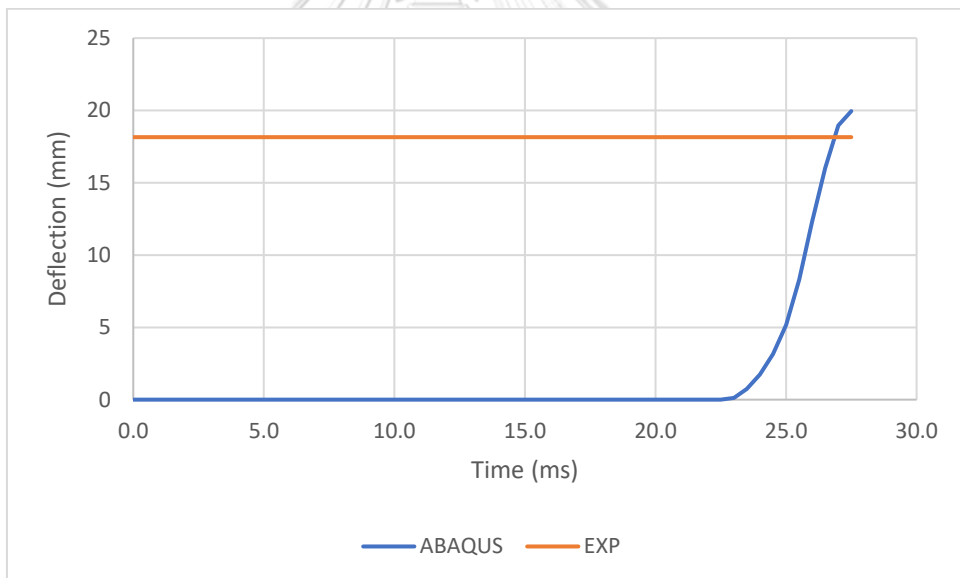
รูปที่ 4- 7 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกของกระจกตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 4- 8 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกของกระจกตัวอย่างที่ 9

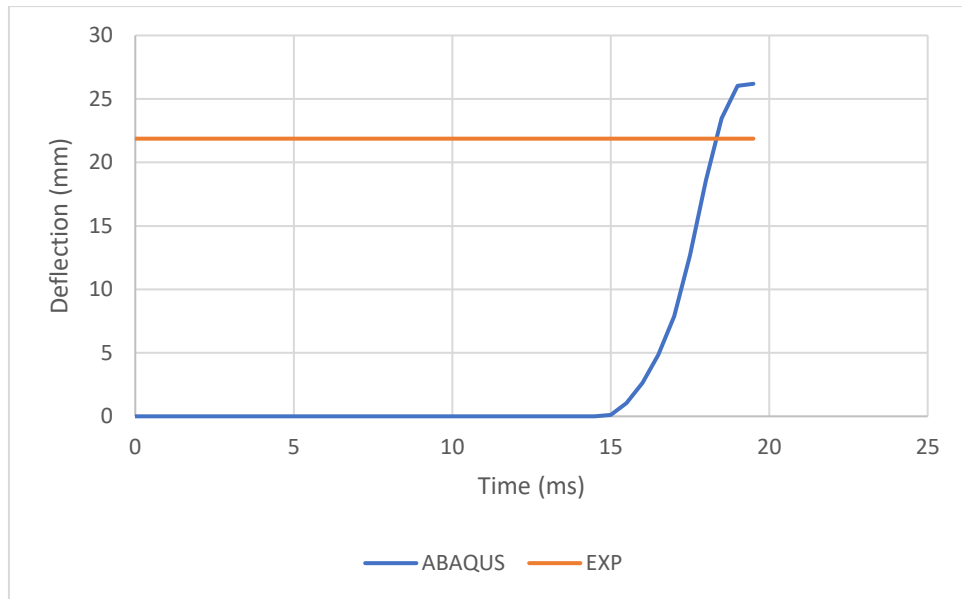


รูปที่ 4- 9 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกของกระจกตัวอย่างที่ 10



รูปที่ 4- 10 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกของกระจกตัวอย่างที่ 11





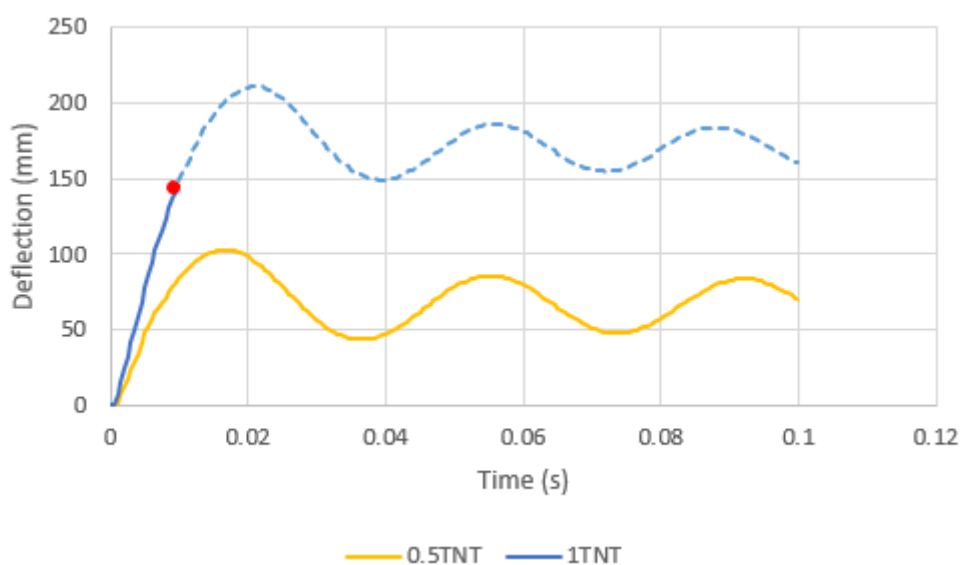
รูปที่ 4- 11 ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกของกระจกตัวอย่างที่ 12

ตารางที่ 4- 3 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจก

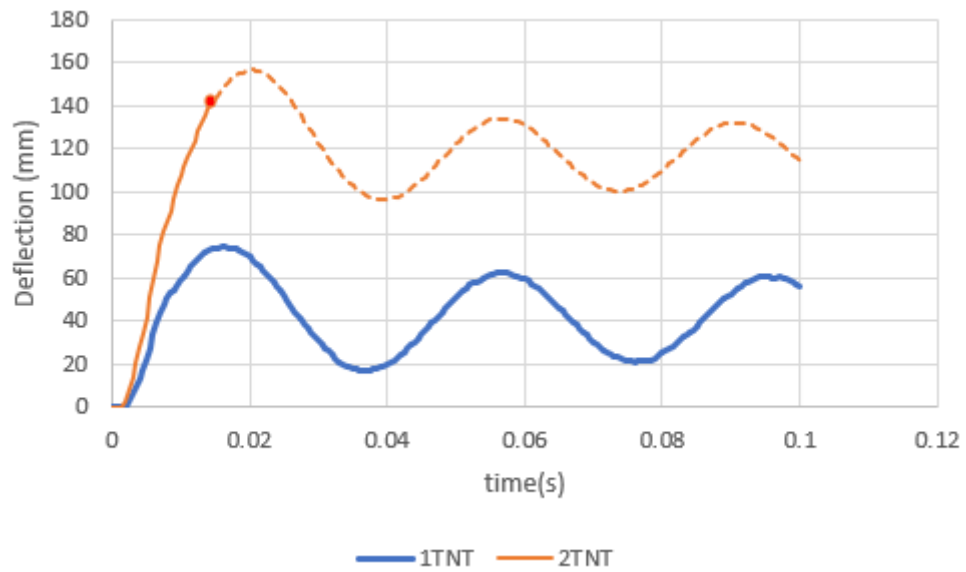
ตัวอย่างที่	การทดสอบ mm	ABAQUS mm	% ความแตกต่าง
3	38.76	30.99	20.05 %
9	42.40	42.75	0.83 %
10	22.20	21.72	2.18 %
11	18.15	19.90	9.92 %
12	21.87	26.19	19.77 %

### 4.3 การวิเคราะห์กระจกติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด

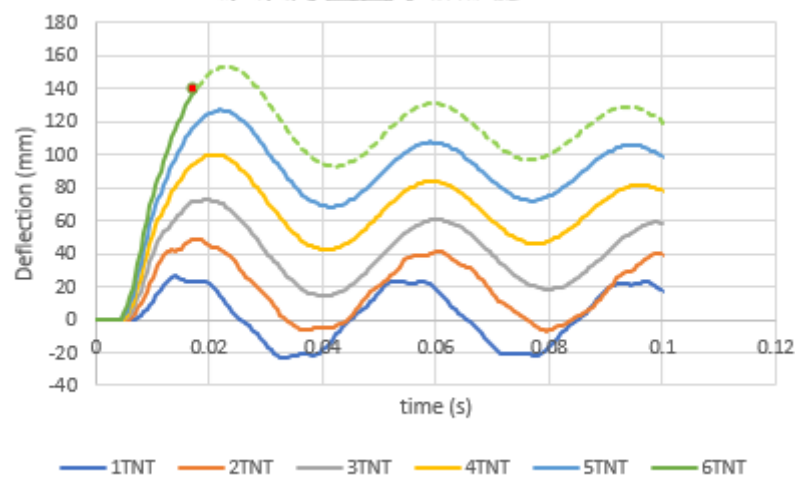
ผลการวิเคราะห์ระหว่างกระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด ผลที่ได้จากแบบจำลอง กระจกขนาด 1200×1200 mm รูเจาะขนาด 18 mm ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลาของระเบิดขนาดต่าง ๆ ดังรูปที่ 4-18 ถึงรูปที่ 4-20 กระจกขนาด 1200×1200 mm รูเจาะขนาด 38 mm ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวกับเวลาของระเบิดขนาดต่าง ๆ ดังรูปที่ 4-21 ถึงรูปที่ 4-23 ฟิล์มจะเริ่มขาดจากบริเวณขอบของกระจก โดยจุดที่ฟิล์มขาด คือ จุดสีแดงที่แสดงบนกราฟ



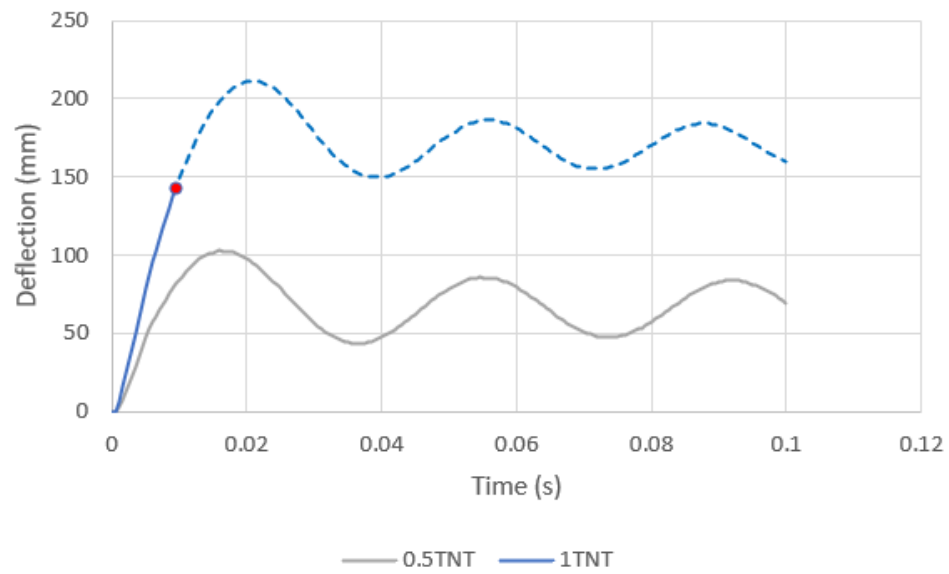
รูปที่ 4- 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลา ของกระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะขนาด 18 mm ระยะระเบิด 1 m



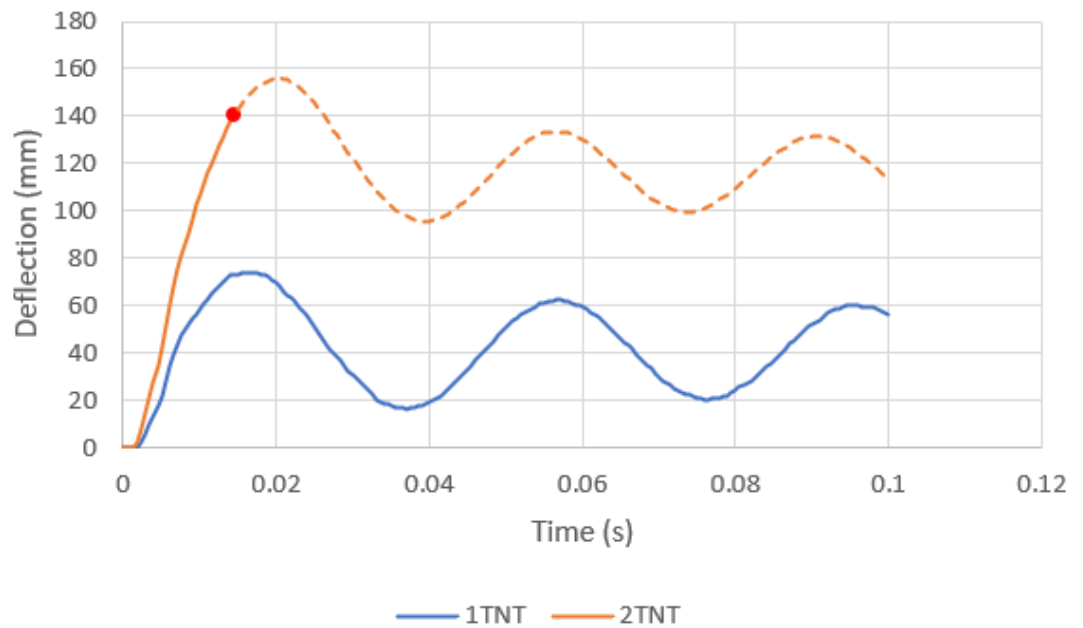
รูปที่ 4- 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลา ของกระจกขนาด $1200 \times 1200$  mm รูเจาะ  
ขนาด 18 mm ระยะระเบิด 2 m



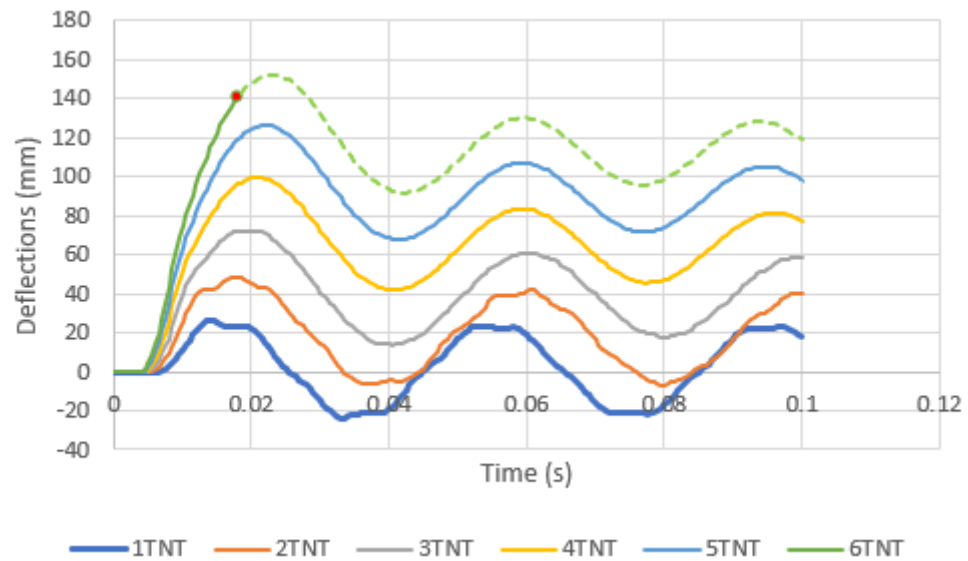
รูปที่ 4- 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลา ของกระจกขนาด $1200 \times 1200$  mm รูเจาะ  
ขนาด 18 mm ระยะระเบิด 4 m



รูปที่ 4- 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลา ของกระจกขนาด $1200 \times 1200$  mm รูเจาะ  
ขนาด 38 mm ระยะระเบิด 1 m

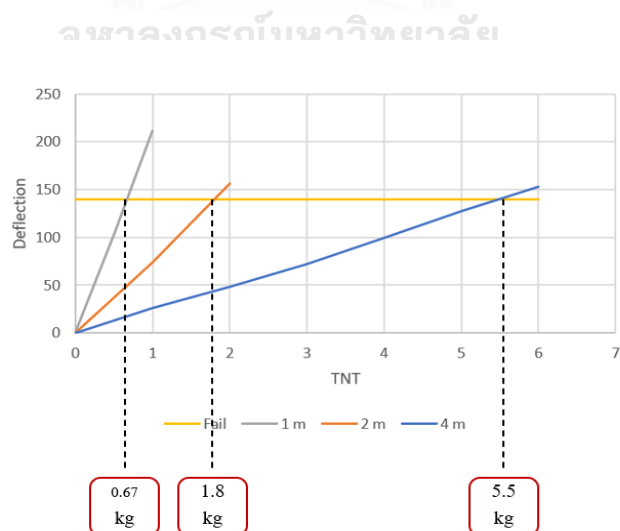


รูปที่ 4- 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลาของ กระจกขนาด $1200 \times 1200$  mm รูเจาะ  
ขนาด 38 mm ระยะระเบิด 2 m

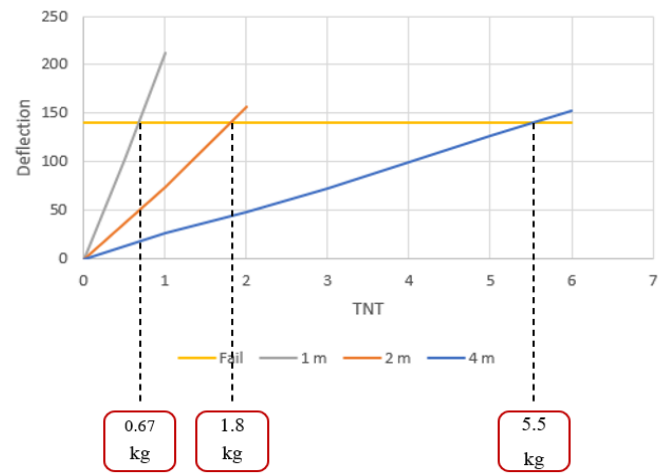


รูปที่ 4- 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลาของ กระจกขนาด $1200 \times 1200$  mm รูเจาะ  
ขนาด 38 mm ระยะระเบิด 4 m

จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลา ของระเบิดขนาดต่าง ๆ พบว่าเมื่อเพิ่มแรงระเบิดขึ้นค่าโก่งตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ทำให้ทราบว่าขนาดระเบิดสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาดพอดี ที่ระยะระเบิด 1 m, 2 m และ 4 m สำหรับกระจกขนาด  $1200 \times 1200$  mm รูเจาะขนาด 18 mm และ ขนาด 38 mm โดยที่ระยะ 1 m ใช้ระเบิด TNT 0.67 kg ที่ระยะ 2 m ใช้ระเบิด TNT 1.8 kg ที่ระยะ 4 m ใช้ระเบิด TNT 5.5 kg ได้ตามรูปที่ 4-24 และ 4-25



รูปที่ 4- 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวกับขนาดระเบิด TNT ของกระจกขนาด  
 $1200 \times 1200$  mm รูเจาะขนาด 18 mm



รูปที่ 4- 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวกับขนาดระเบิด TNT ของกระบอกขนาด 1200×1200 mm รูเจาะขนาด 38 mm



## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัยการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อวิเคราะห์กระจกติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเทียบกับงานวิจัยในอดีต สำหรับแบบจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระสุนแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ พบว่าค่าความเครียด (strain) มีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดซึ่งตรงกับการทดสอบในอดีต โดยค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจก (deflection) มีค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างอยู่ที่ 13-16 % และค่าความเครียด (strain) มีค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างอยู่ที่ 6-13 % ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต สำหรับแบบจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด พบว่าค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจก (deflection) ของกระจกมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต

การวิเคราะห์กระจกติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด สามารถวิเคราะห์แรงระเบิดสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาดที่ระยะระเบิด 1 m, 2 m และ 4 m ได้ โดยที่ฟิล์มนิรภัยจะเริ่มขาดจากจุดกึ่งกลางขอบกระจก เนื่องจากจุดดังกล่าวเป็นจุดที่เกิดความเค้นสูงสุด (stress) ค่าโก่งตัวที่เกิดขึ้นกับกระจกติดฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm มีค่าประมาณ 140 mm

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการจำลองการระเบิดในงานวิจัยเป็นการจำลองระเบิดแบบอิสระ (free air burst) ผู้ทำวิจัยเสนอให้มีการศึกษาการระเบิดแบบอื่นเพื่อสามารถวิเคราะห์การระเบิดในรูปแบบอื่นได้
2. วัสดุฟิล์มนิรภัยที่ได้จากการนำไปทดสอบมีเพียงค่า ความแข็งแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ที่นำมาวิเคราะห์ ผู้ทำวิจัยเสนอให้มีการทดสอบฟิล์มเพิ่มเติม เพื่อให้คุณสมบัติของฟิล์มมีความถูกต้องเพิ่มมากยิ่งขึ้น
3. ผู้ทำวิจัยเสนอให้มีการทดสอบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

## บรรณานุกรม

1. ยิ้มแย้ม, ณ. ประเภทของกระจก [Online]. 2020 25 November 2020]; Available from: <http://www.thanachai-glass.com/file/glass.pdf>.
2. Testing, A.S.f. and Materials, *Standard practice for determining load resistance of glass in buildings*. 2007: ASTM International.
3. Hamid, Y.S. and G. Parke. *Glass footbridge*. in *Global Civil Engineering Conference*. 2017. Springer.
4. ASTM, D., 882-02, *Standard Test Method for tensile properties of thin plastic sheeting*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2002.
5. Haverkamp, *PROFILON® ER1 explosion resistant security film*. 2018.
6. Bedon, C., et al., *A comparison of existing standards for testing blast resistant glazing and windows*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2014.
7. กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย, การคำนวณแรงระเบิดและผลกระทบจากแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคาร. 2559.
8. Karlos, V. and G. Solomos, *Calculation of blast loads for application to structural components*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
9. Moreno, R.A. *What does shape function mean in finite element formulation* [Online]. 2011 25 November 2020]; Available from: <https://www.studioseed.net/research/estructuras/calculo-dinamico/what-does-shape-function-mean-in-finite-element-formulation/>.
10. Zhang, X., H. Hao, and Z. Wang, *Experimental investigation of monolithic tempered glass fragment characteristics subjected to blast loads*. *Engineering Structures*, 2014. 75: p. 259-275.
11. Zhang, X., H. Hao, and Z. Wang, *Experimental investigation on monolithic tempered glass window responses to blast loads*. *International Journal of Protective Structures*, 2015. 6(2): p. 287-309.
12. Wang, Y., et al., *Experimental study on critical breaking stress of float glass*



- under elevated temperature*. *Materials & Design*, 2014. 60: p. 41-49.
13. Yossapong, S., *Behavior of tempered glass with drilled type connector*. 2018, Chulalongkorn University.
  14. Suwarnarat, S., *Behavior of steel fiber reinforced concrete under blast load*. 2015, Chulalongkorn University.
  15. Olmos, B.A., et al., *Methodology to develop design aids of simple supported glass panels based on a probabilistic approach and experimental tests*. *Engineering Structures*, 2016. 125: p. 92-106.
  16. Hidallana-Gamage, H.D., D.P. Thambiratnam, and N.J. Perera, *Failure analysis of laminated glass panels subjected to blast loads*. *Engineering Failure Analysis*, 2014. 36: p. 14-29.
  17. Kranzer, C., G. Gürke, and C. Mayrhofer. *Testing of bomb resistant glazing systems. Experimental investigation of the time dependent deflection of blast loaded 7.5 mm laminated glass*. in *Glass processing days*. 2005.



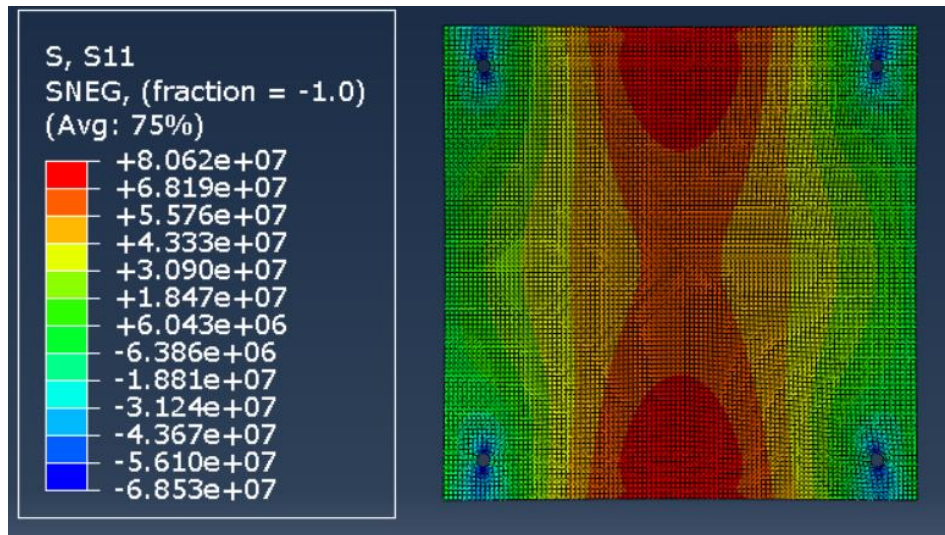
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

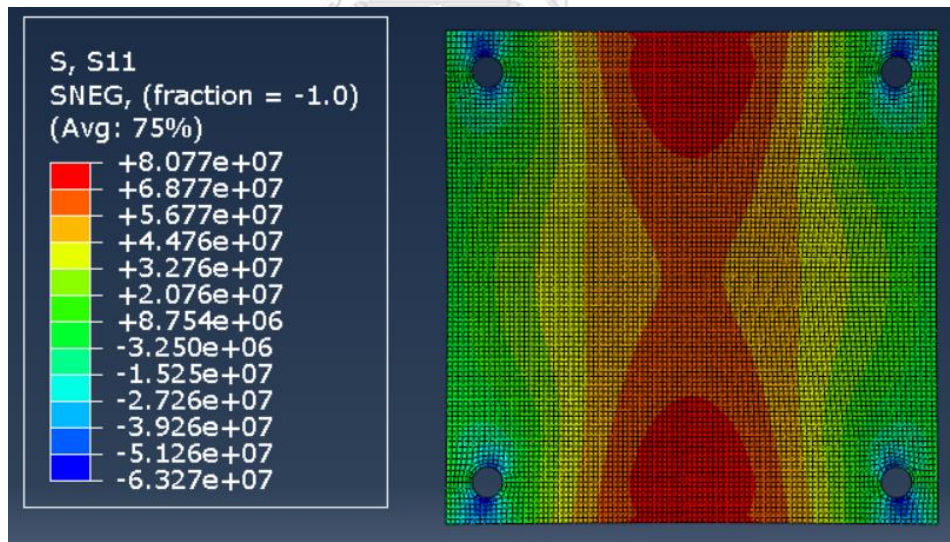
ภาคผนวก ก.

ก.1 ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS กระจกเทมเปอร์ภายใต้น้ำหนักกระทำแบบแผ่  
กระจายสม่ำเสมอ

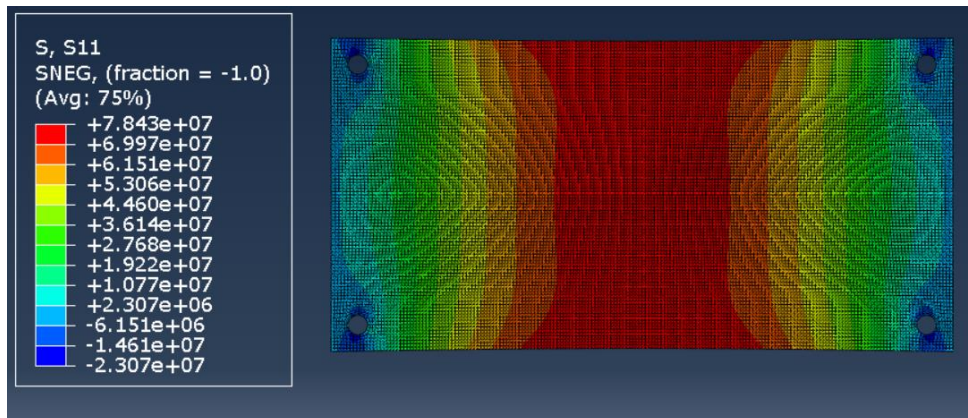
ก.1.1 ความเค้น (Stress)



รูป ก - 1 ความเค้นที่เกิดขึ้นของกระจกขนาด 1200×1200 mm หนา 12 mm รัศมี 18 mm

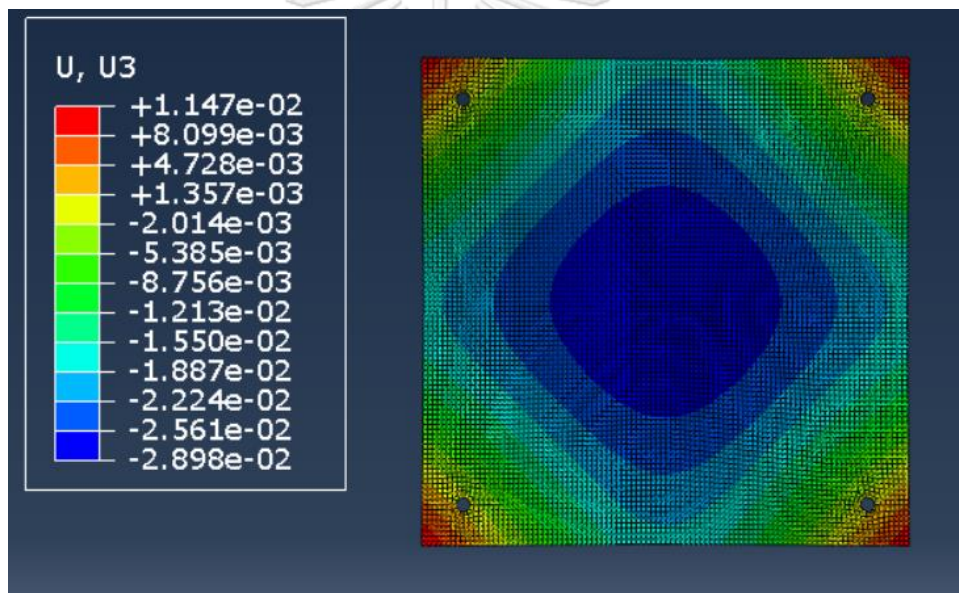


รูป ก - 2 ความเค้นที่เกิดขึ้นของกระจกขนาด 1200×1200 mm หนา 12 mm รัศมี 38 mm

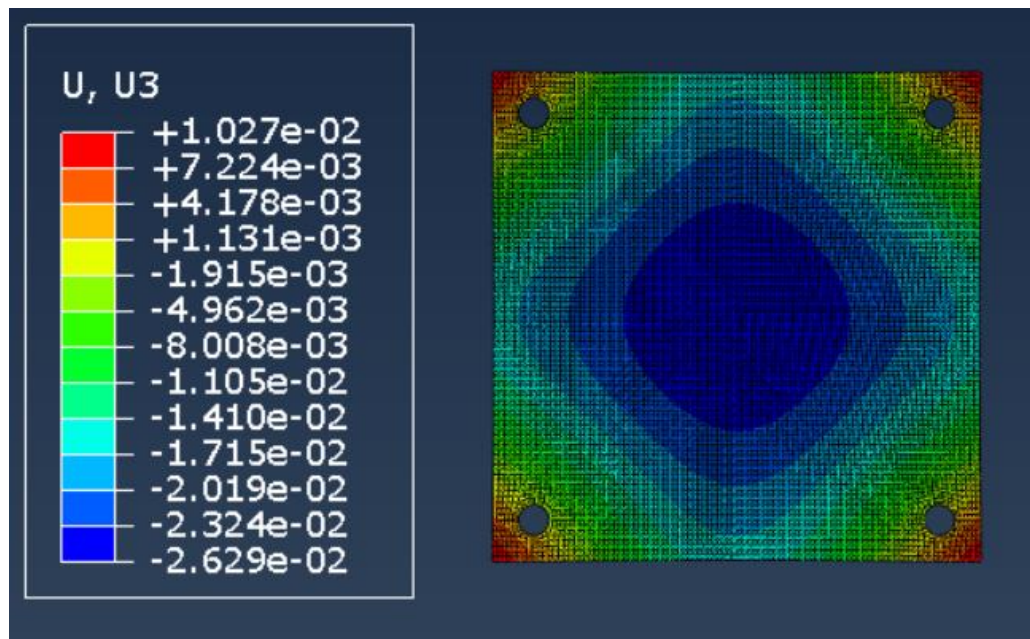


รูป ก - 3 ความเค้นที่เกิดขึ้นของกระจกขนาด 1200×2400 mm หนา 12 mm รูเจาะ 38 mm

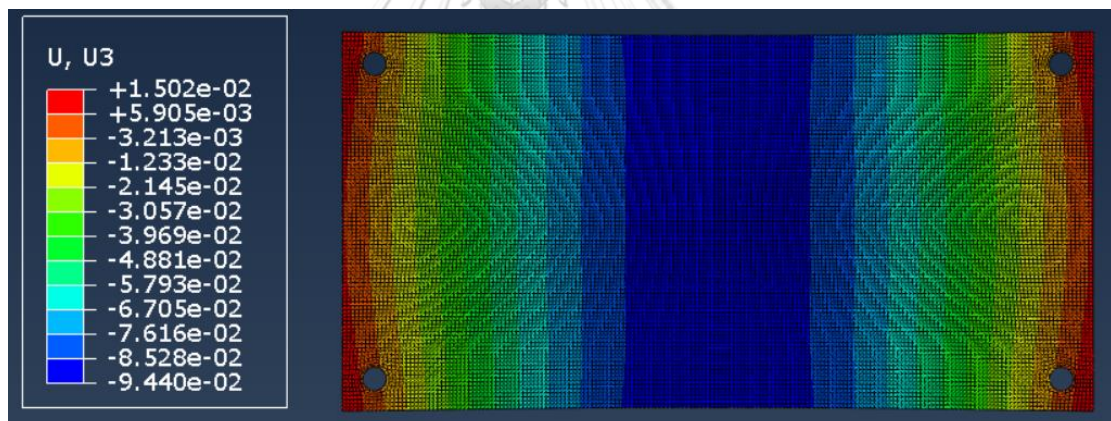
### ก.1.2 การโก่งตัว (Deflection)



รูป ก - 4 การโก่งตัวของกระจกขนาด 1200×1200 mm หนา 12 mm รูเจาะ 18 mm



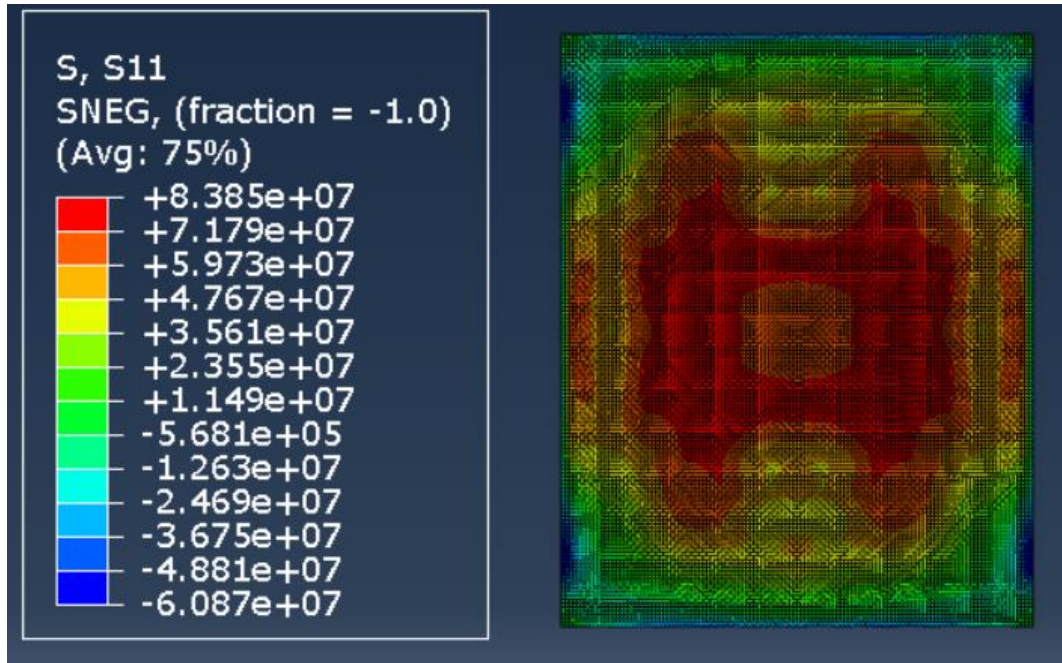
รูป ก - 5 การโก่งตัวของกระจกขนาด 1200×1200 mm หนา 12 mm รูเจาะ 38 mm



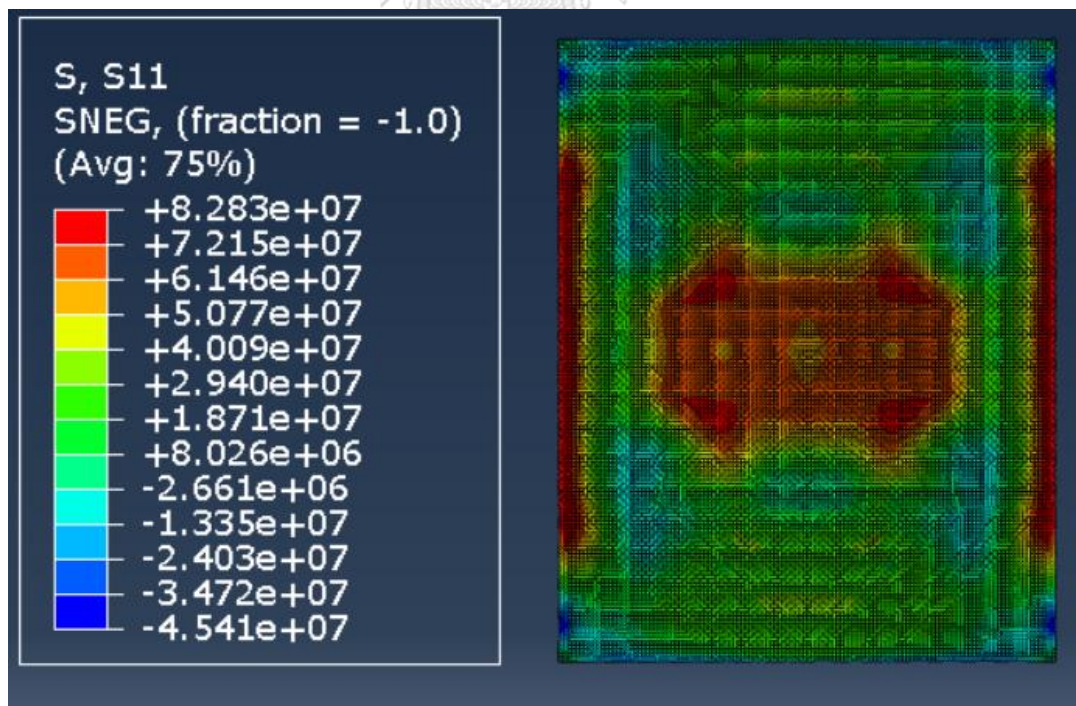
รูป ก - 6 การโก่งตัวของกระจกขนาด 1200×2400 mm หนา 12 mm รูเจาะ 38 mm

ก.2 ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS กระจกเทมเปอร์ภายใต้แรงระเบิด

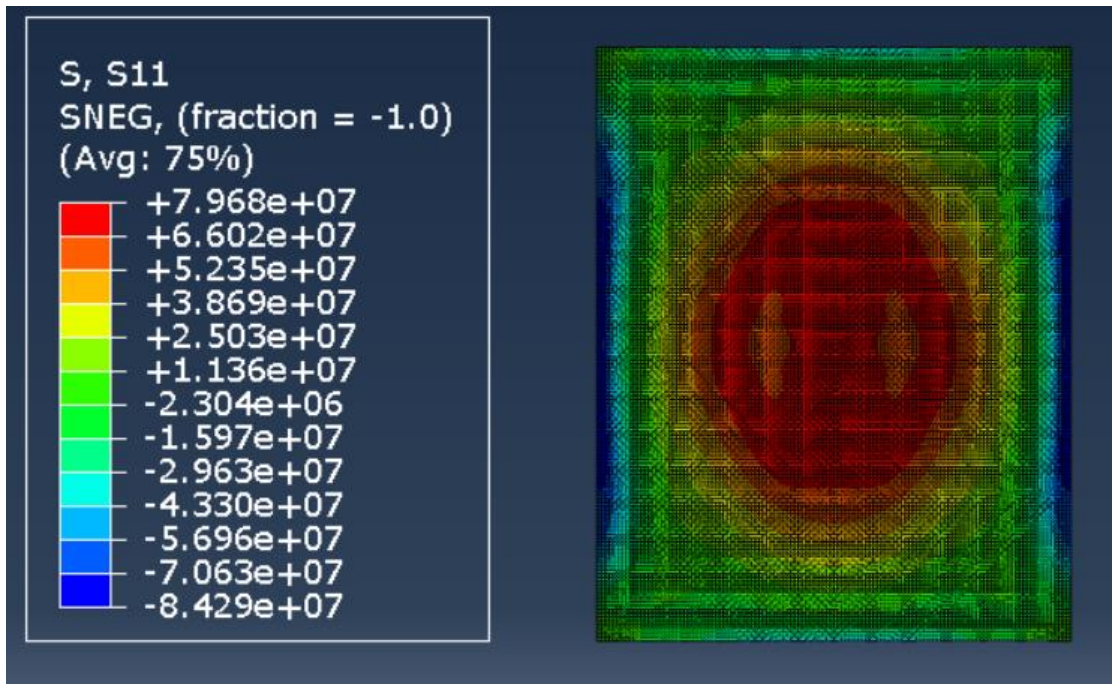
ก.2.1 ความเค้น (Stress)



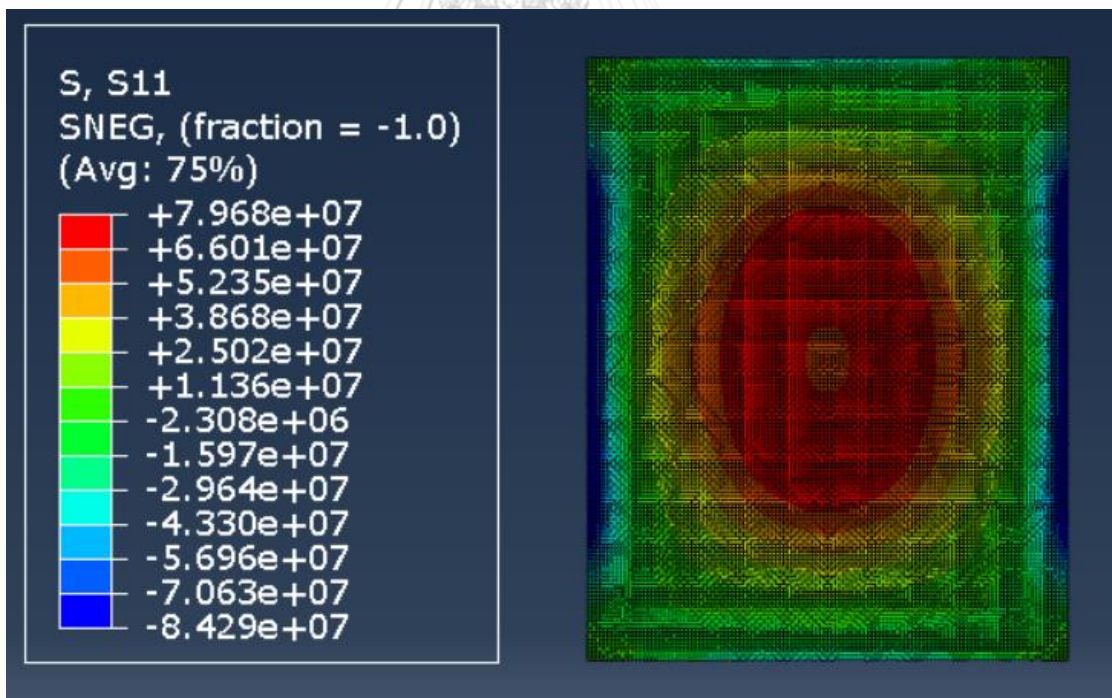
รูป ก - 7 ความเค้นของกระจกตัวอย่างที่ 3 1200x1500 mm หนา 6 mm



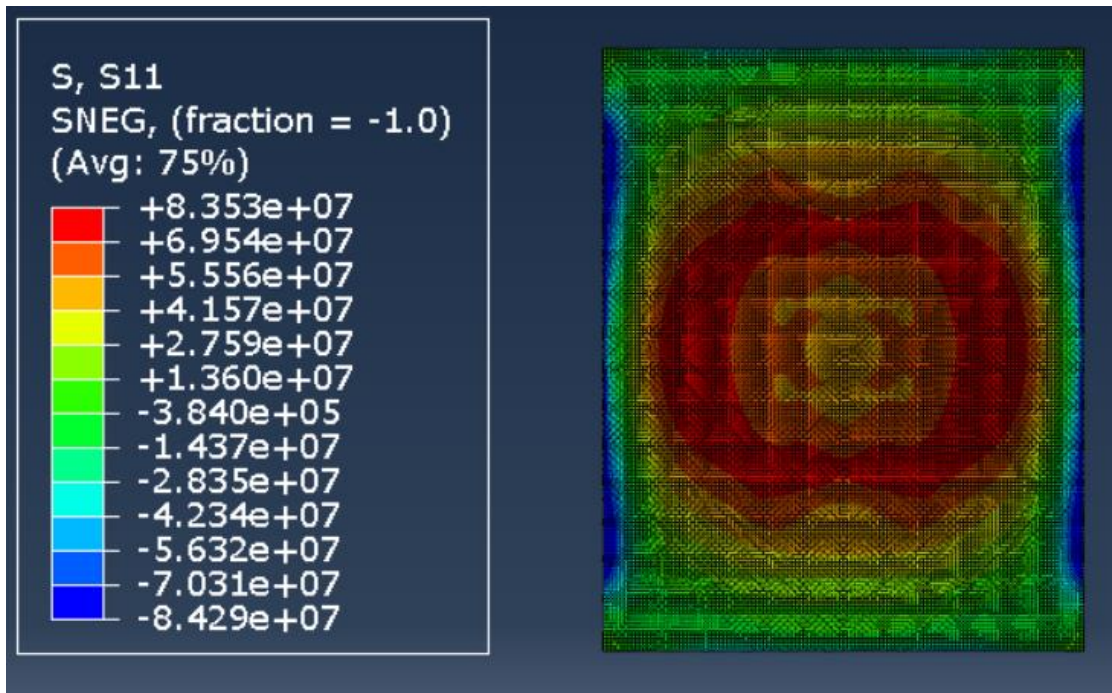
รูป ก - 8 ความเค้นของกระจกตัวอย่างที่ 9 1200x1500 mm หนา 6 mm



รูป ก - 9 ความเค้นของกระจกตัวอย่างที่ 10 1200x1500 mm หนา 10 mm

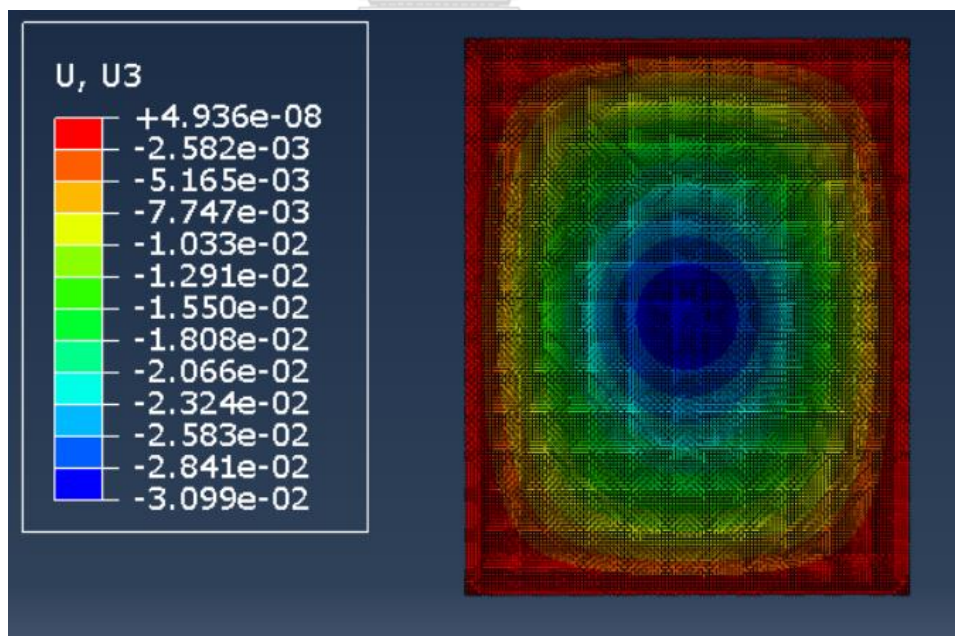


รูป ก - 10 ความเค้นของกระจกตัวอย่างที่ 11 1200x1500 mm หนา 10 mm



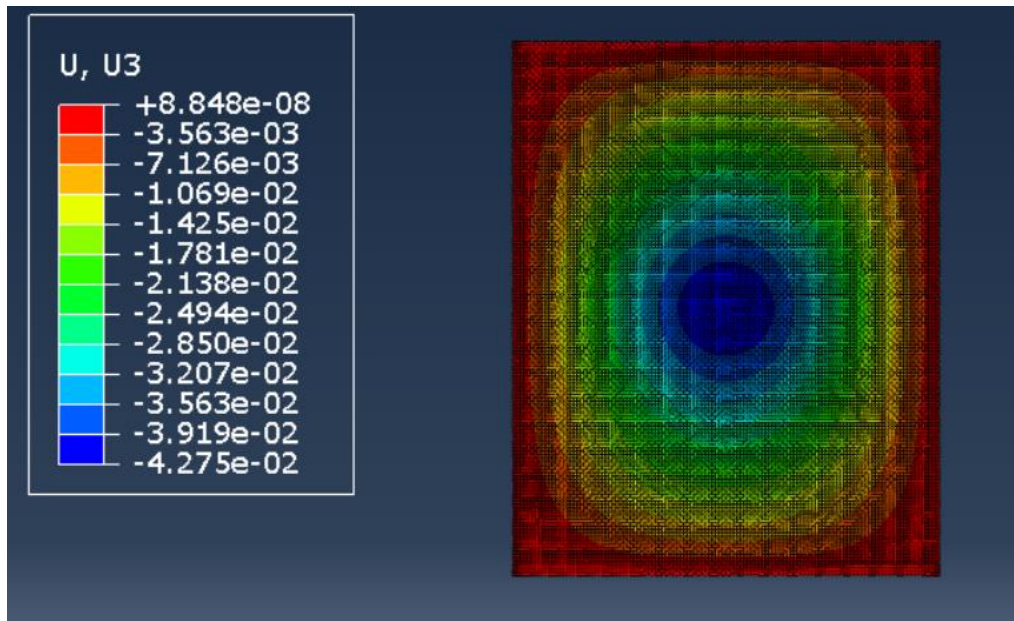
รูป ก - 11 ความเค้นของกระจกตัวอย่างที่ 12 1200×1500 mm หนา 10 mm

#### ก.2.2 การโก่งตัว (Deflection)

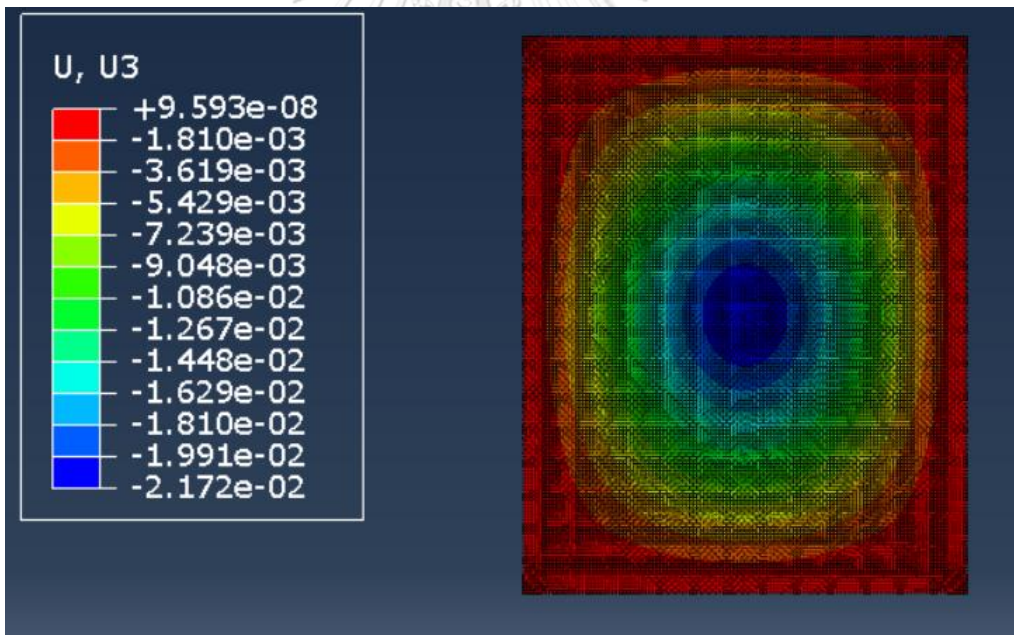


รูป ก - 12 การโก่งตัวของกระจกตัวอย่างที่ 3 1200×1500 mm หนา 6 mm

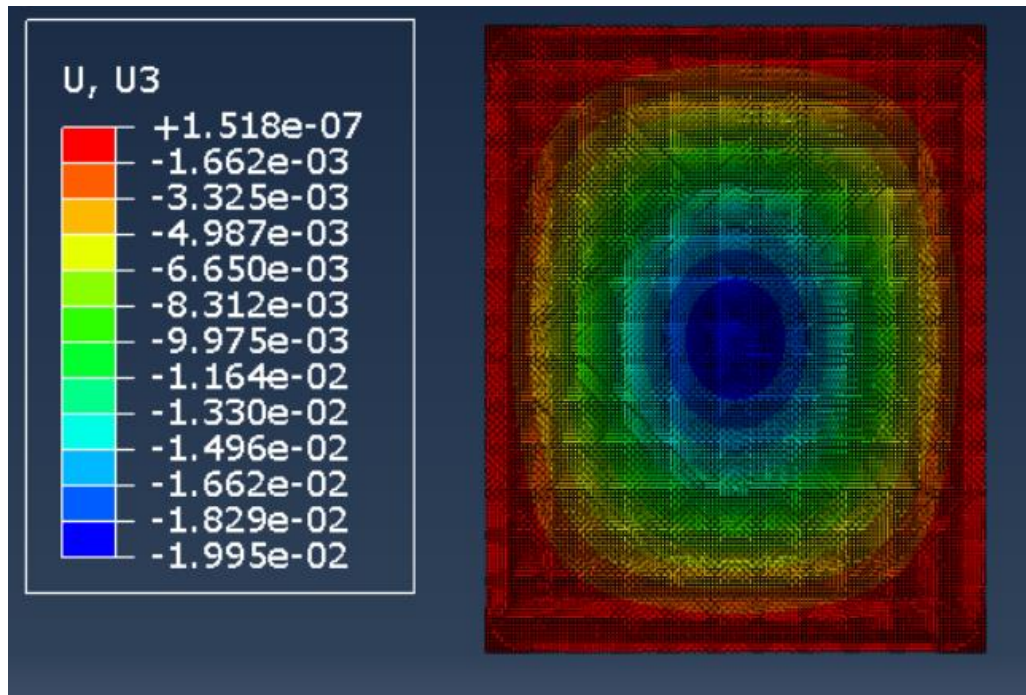




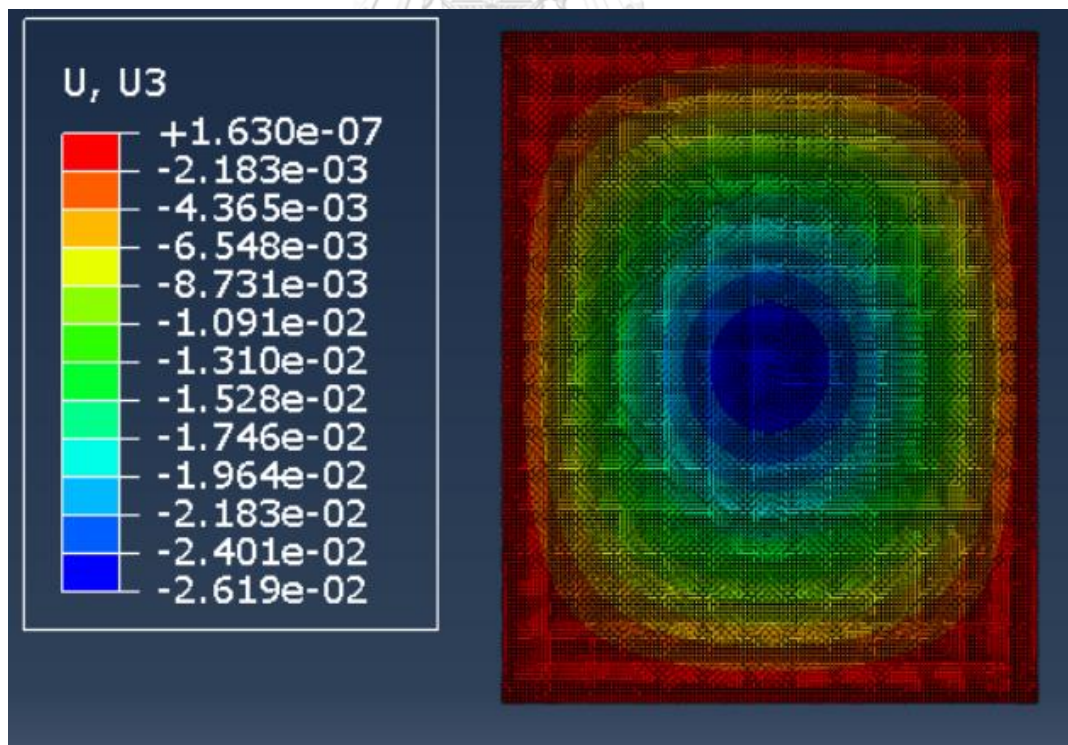
รูป ก - 13 การโก่งตัวของกระจกตัวอย่างที่ 9 1200x1500 mm หนา 6 mm



รูป ก - 14 การโก่งตัวของกระจกตัวอย่างที่ 10 1200x1500 mm หนา 10 mm



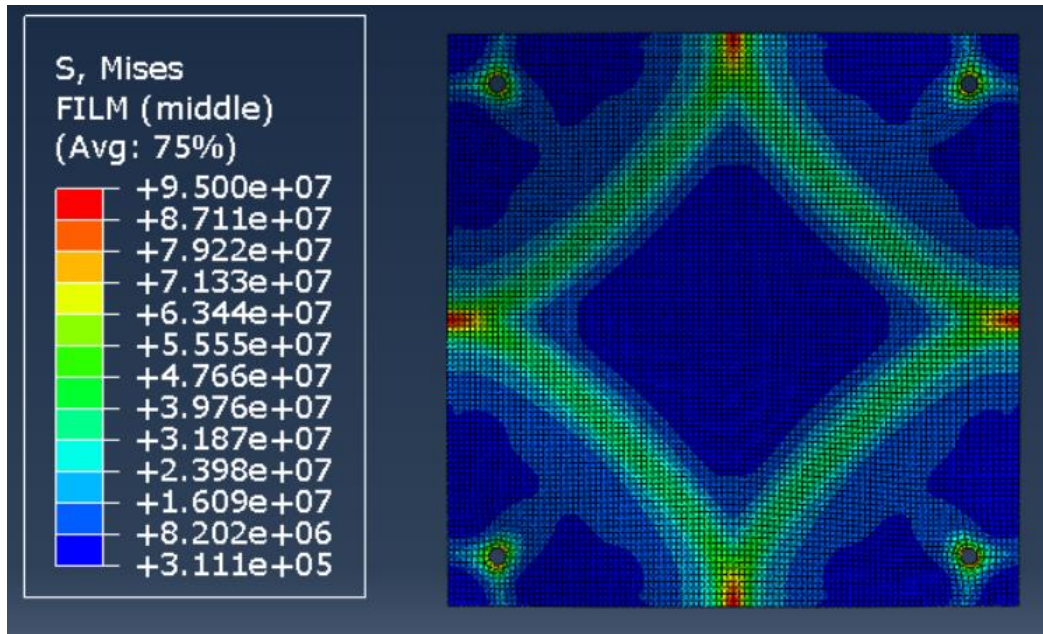
รูป ก - 15 การโค้งตัวของกระจกตัวอย่างที่ 11 1200×1500 mm หนา 10 mm



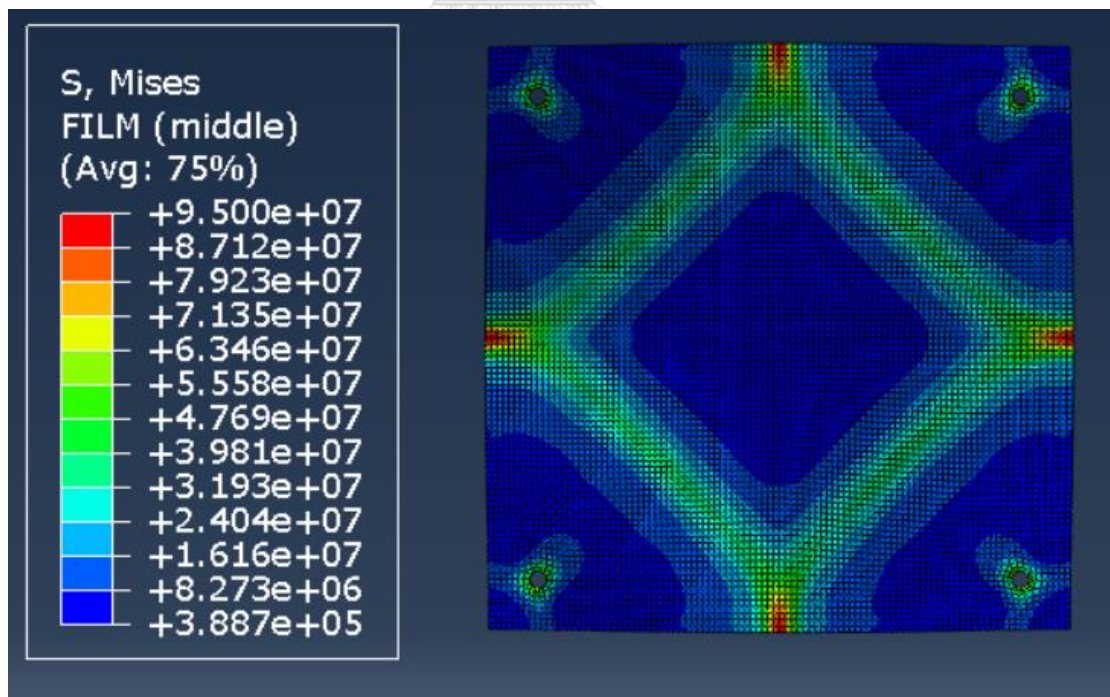
รูป ก - 16 การโค้งตัวของกระจกตัวอย่างที่ 12 1200×1500 mm หนา 10 mm

ก.3 ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด

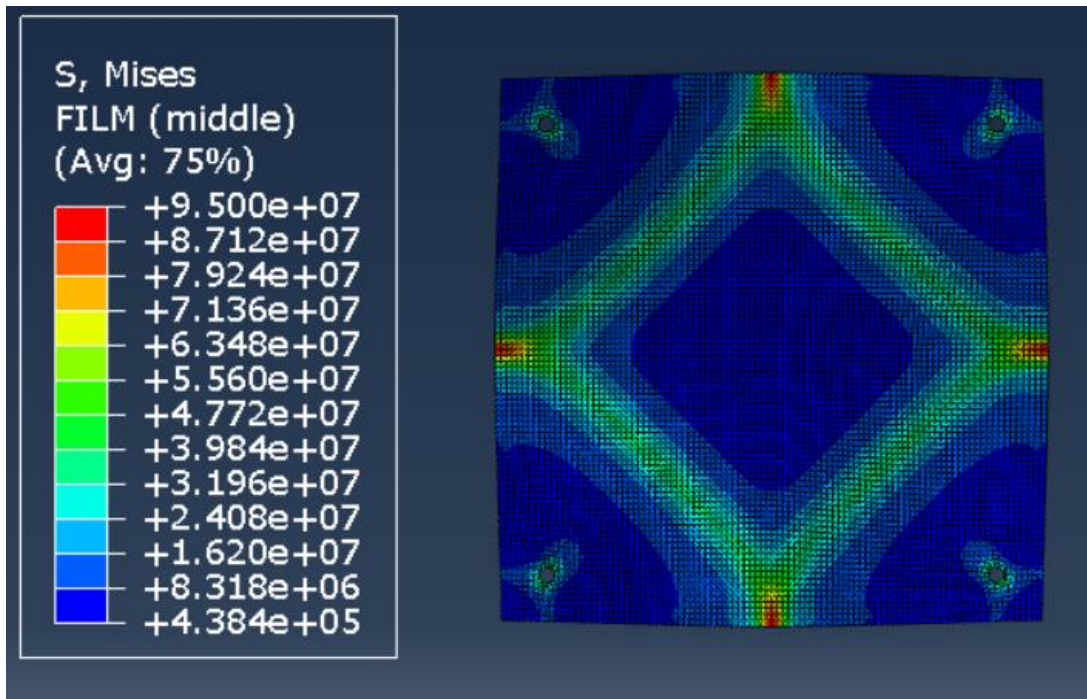
ก.3.1 ความเค้น (Stress)



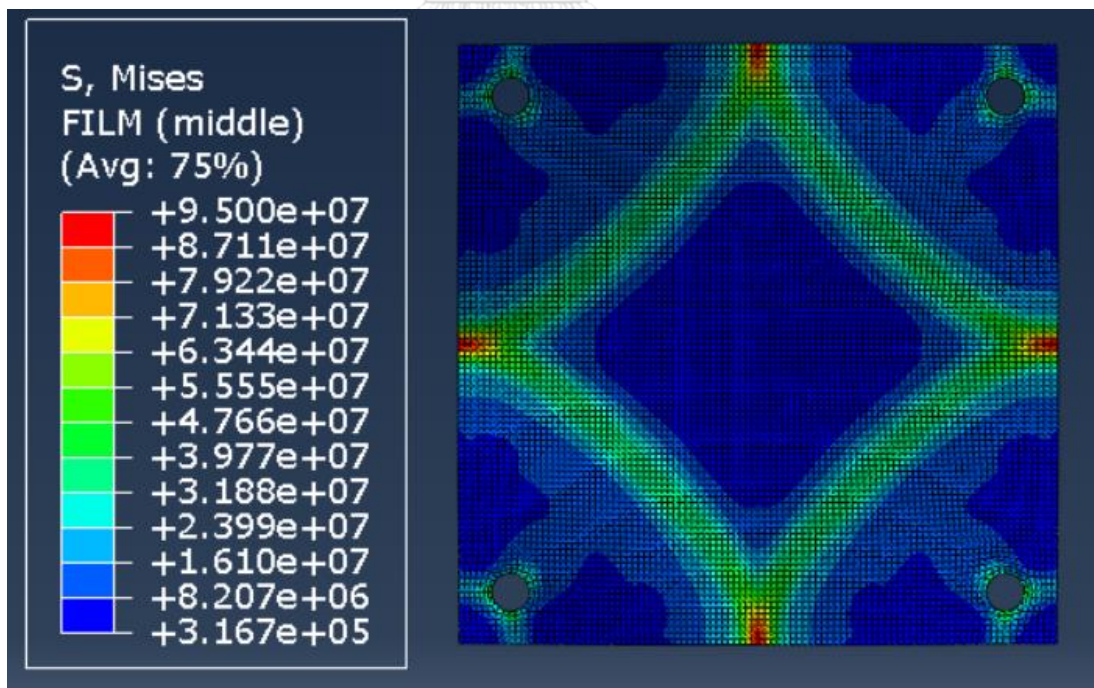
รูป ก - 17 ความเค้นของฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm รูเจาะ 18 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 1 kg ระยะระเบิด 1 m



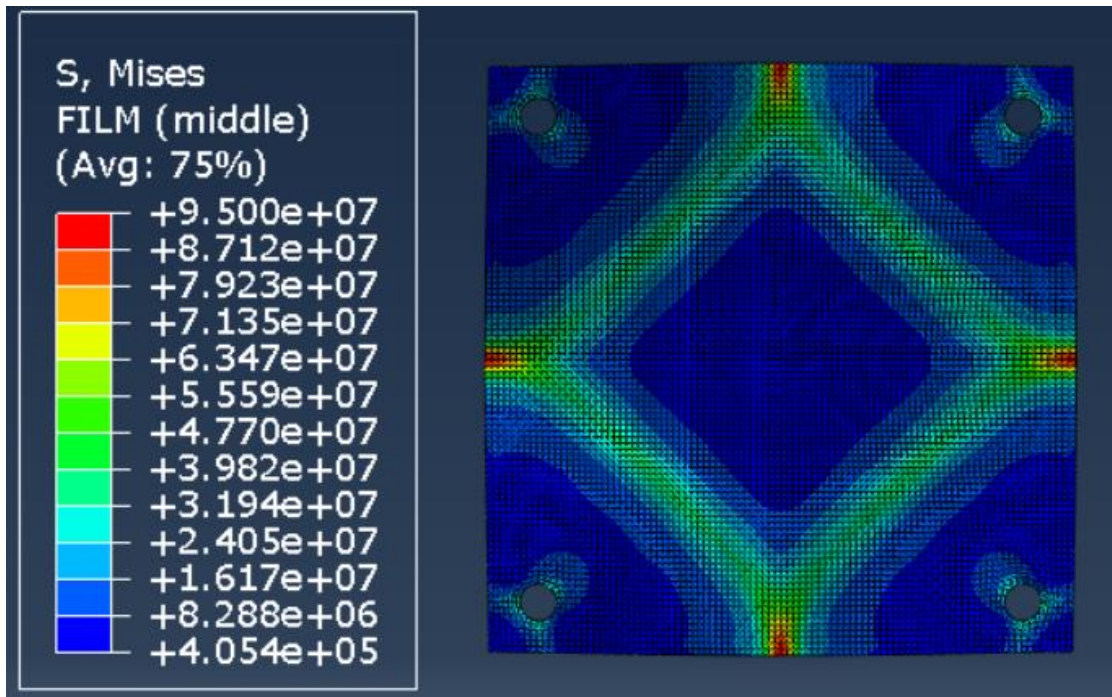
รูป ก - 18 ความเค้นของฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm รูเจาะ 18 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 2 kg ระยะระเบิด 2 m



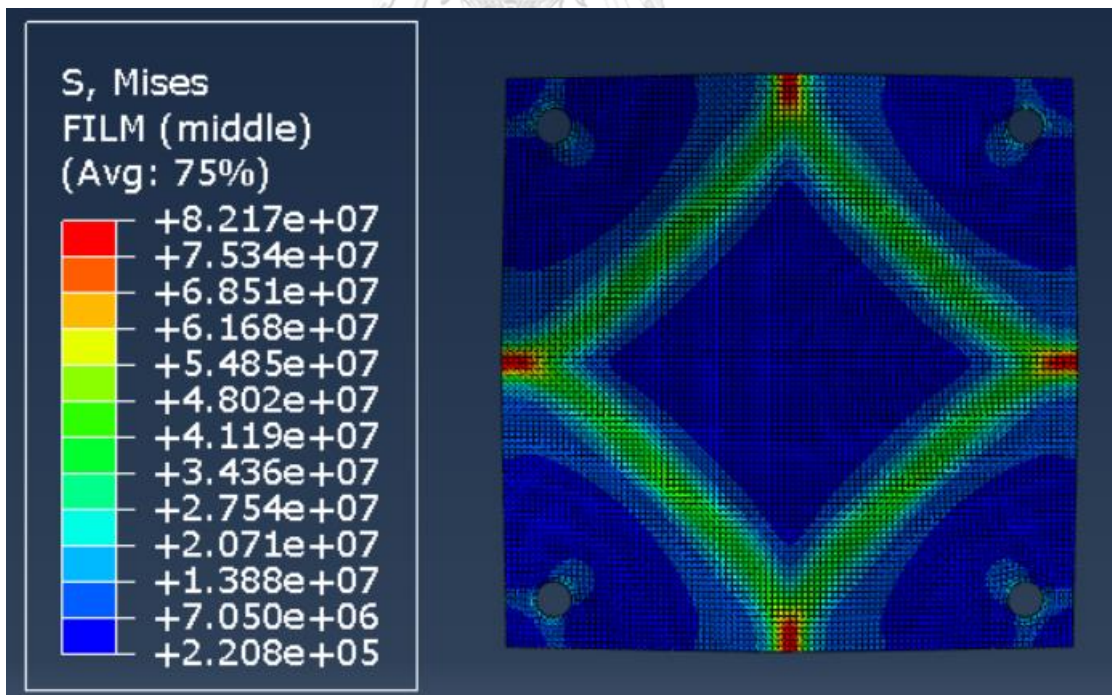
รูป ก - 19 ความเค้นของฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm รูเจาะ 18 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 6 kg ระยะระเบิด 4 m



รูป ก - 20 ความเค้นของฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm รูเจาะ 38 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 1 kg ระยะระเบิด 1 m

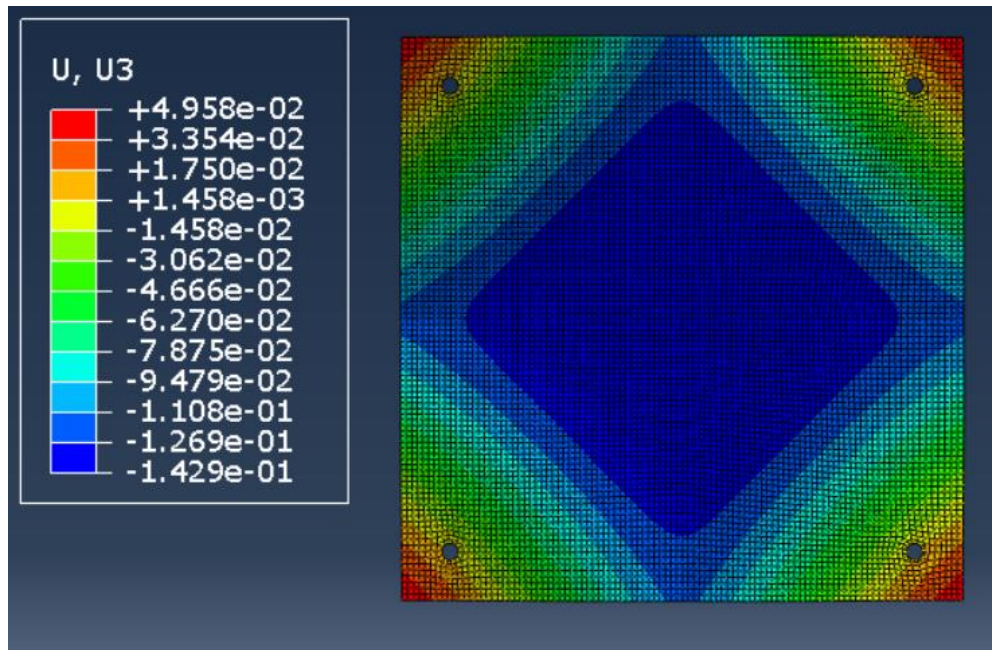


รูป ก - 21 ความเค้นของฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm รูเจาะ 38 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 2 kg ระยะระเบิด 2 m

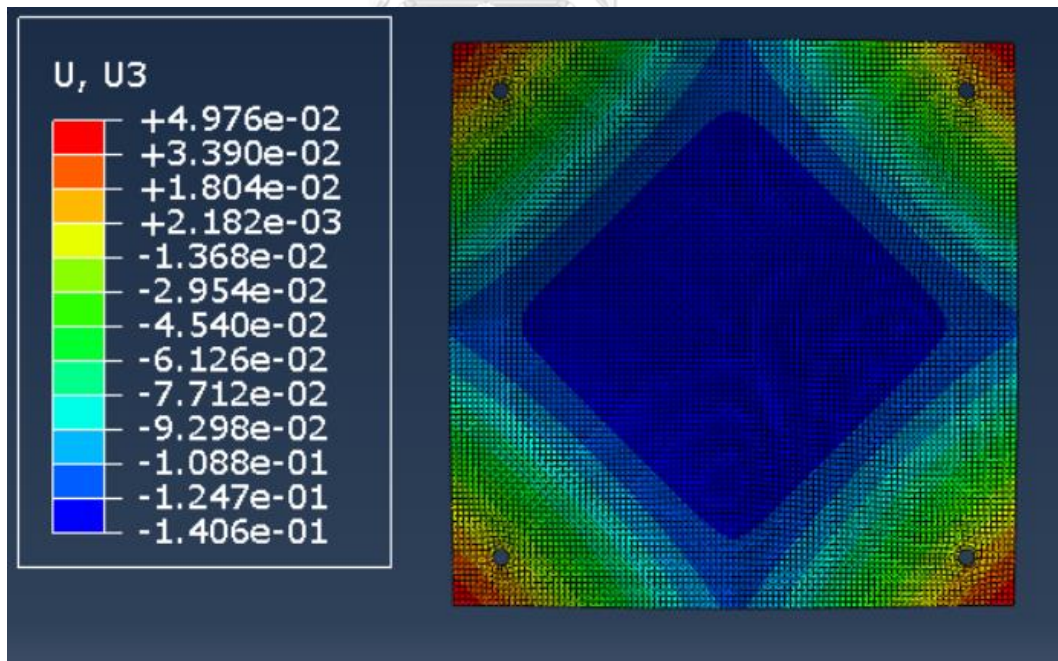


รูป ก - 22 ความเค้นของฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm รูเจาะ 38 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 6 kg ระยะระเบิด 4 m

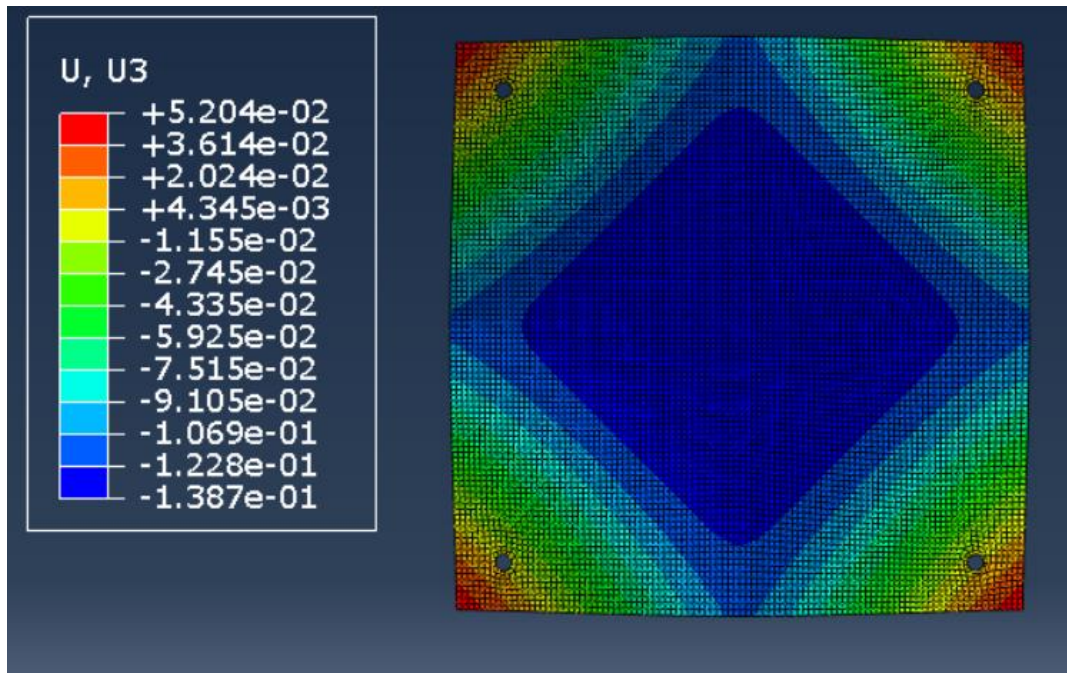
### ก.3.2 การโก่งตัว (Deflection)



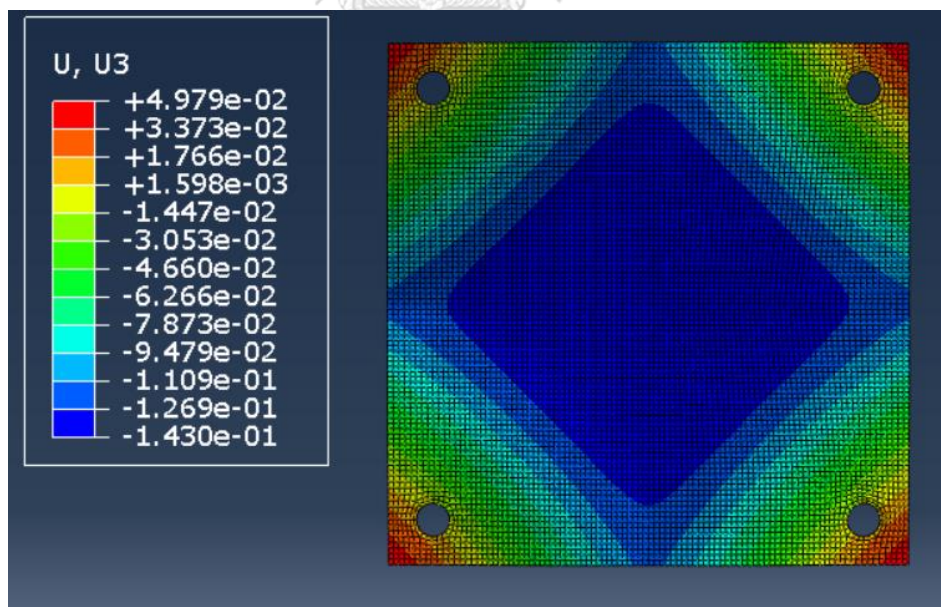
รูป ก - 23 การโก่งตัวของกระจกติดฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm หนา 12 mm รูเจาะ 18 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 1 kg ระยะระเบิด 1 m



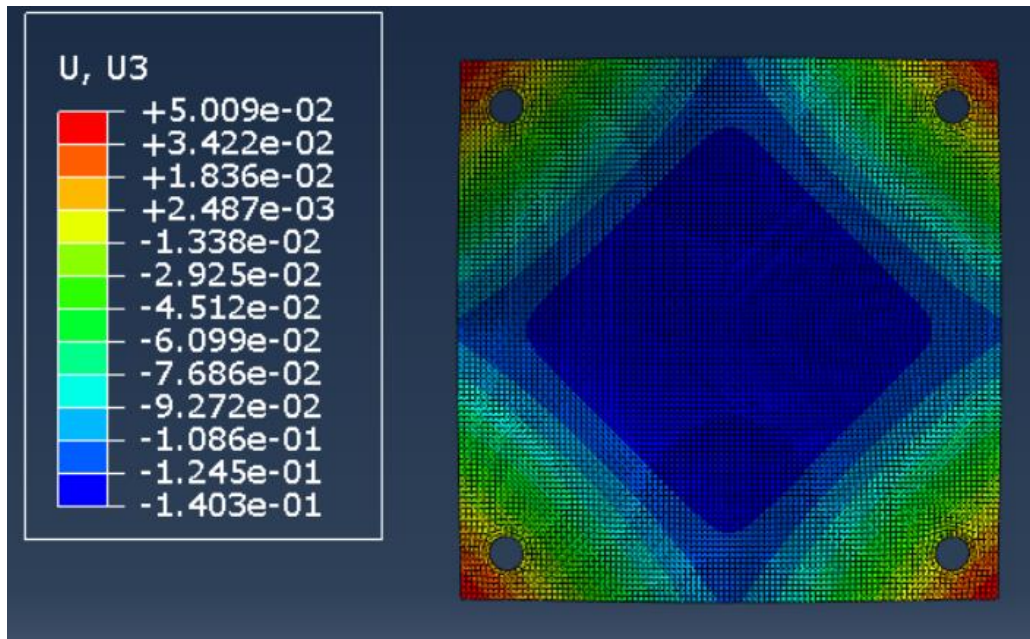
รูป ก - 24 การโก่งตัวของกระจกติดฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm หนา 12 mm รูเจาะ 18 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 2 kg ระยะระเบิด 2 m



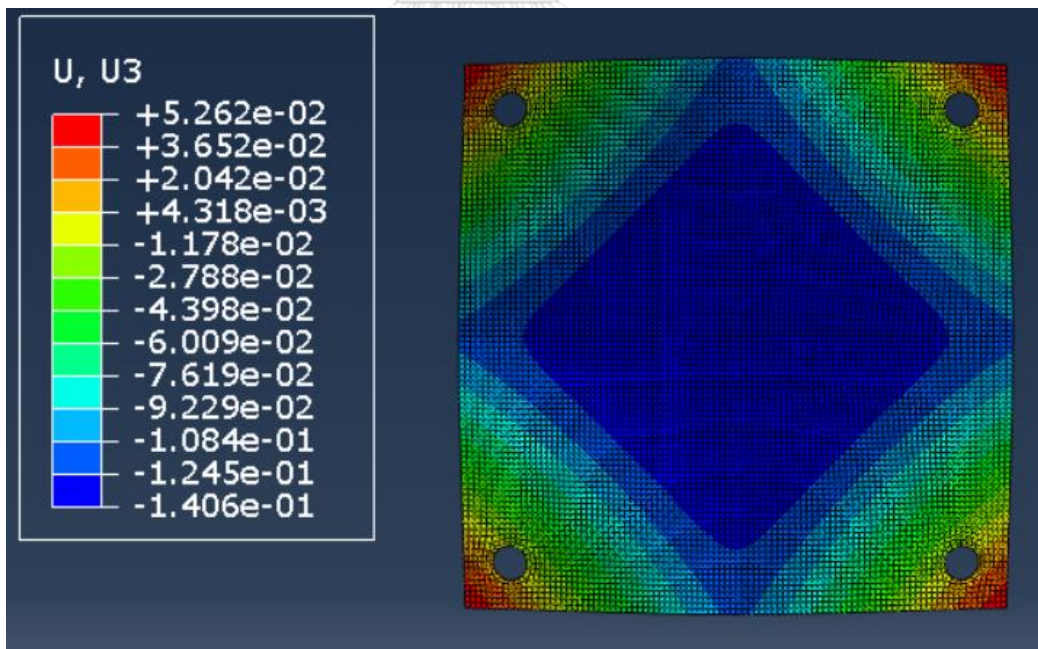
รูป ก - 25 การโก่งตัวของกระจกติดฟิล์มนิรภัยขนาด 1200x1200 mm หนา 12 mm รูเจาะ 18 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 6 kg ระยะระเบิด 4 m



รูป ก - 26 การโก่งตัวของกระจกติดฟิล์มนิรภัยขนาด 1200x1200 mm รูเจาะ 38 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 1 kg ระยะระเบิด 1 m



รูป ก - 27 การโค้งตัวของกระจกติดฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm หนา 38 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 2 kg ระยะระเบิด 2 m



รูป ก - 28 การโค้งตัวของกระจกติดฟิล์มนิรภัยขนาด 1200×1200 mm หนา 38 mm ภายใต้แรงระเบิด TNT 6 kg ระยะระเบิด 4 m



## ภาคผนวก ข.

ทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบฟิล์มนิรภัย PROFILON® ER1 ตามมาตรฐานการดึงฟิล์มบาง ASTM D882 ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการทดสอบ 5 ตัวอย่าง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ ข-1

**Test Report**

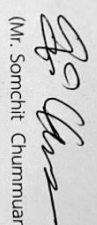
Report No: 652303-0669/2 Page 1/1

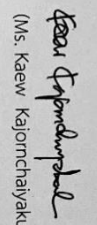
Sample type: Safety Film  
Description of specimen: Suitable for testing  
Sample owner: Sirawit Akarasut  
Address: 310/13 Samanikhom 1 Soi 12, Lumpini Town place Village, Chankasam Subdistrict, Chatuchuk District Bangkok 10900

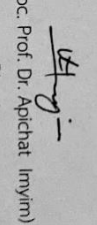
Objective: To test mechanical properties  
Test method: ASTM D882 E.mod  
Specimen preparation: ASTM D882  
Instrument: Universal testing machine; (Hounsfield H10KM)  
Test date: March 25, 2022

**Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University**  
 ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาคารสถาบัน 3 จุฬาลงกรณ์ซอย 62 พญาไท กรุงเทพมหานคร 10330 โทร: 0-2218-8032 โทรสาร 0-2254-0211

Sample No.	Mechanical properties						
	E modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Ultimate strength (N/mm <sup>2</sup> )	Break stress (N/mm <sup>2</sup> )	%Elongation	Gauge length (mm)	Thickness (mm)	Width (mm)
1	2226	81.40	65.00	20.60	50	0.49	24.96
2	2623	93.00	74.80	39.60	50	0.49	24.84
3	2573	97.40	78.20	40.80	50	0.49	25.50
4	2088	100.10	80.40	50.40	50	0.49	26.15
5	2248	103.90	83.10	53.60	50	0.49	25.76

  
 (Mr. Somchit Chummuangyen)  
 Analyst

  
 (Ms. Kaew Kajonchayakul)  
 Chief Scientist

  
 (Assoc. Prof. Dr. Apichat Imyim)  
 Director

Remarks: 1. The results are valid exclusively for those samples analyzed.  
 2. The report shall not be reproduced partly, except in full, without written approval of the organization.  
 JP/Al

รูปที่ ข - 1 คุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มนิรภัยที่นำไปทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D882

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สิริวิษณุ อัครสุด
วัน เดือน ปี เกิด	8 เมษายน 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสงขลานครินทร์
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	5 ศุภกานุกูล ต.พิมาน อ.เมืองสตูล จ.สตูล 91000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY