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

สิรวิชญ์ อัครสุต[1] และ วิทิต ปานสุข[2]

[1,2] ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: sirawit.ag@gmail.com*

บทคัดย่อ

เหตุการณ์ระเบิดที่เกิดขึ้นตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันล้วนก่อให้เกิดความสูญเสียทั้งทางทรัพย์สินและชีวิต อันตรายจะเกิดมากยิ่งขึ้นหากบริเวณที่เกิดการระเบิดมีกระจก มีเหตุการณ์ระเบิดเกิดขึ้นที่กรุงออสโล ประเทศนอร์เวย์ ทำให้กระจกบริเวณอาคารราชการได้รับความเสียหาย แต่ไม่มีเศษกระจกที่ก่อให้เกิดอันตรายได้เนื่องจากมีการติดตั้งฟิล์มนิรภัยในบริเวณดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำนายพฤติกรรมของกระจกเทมเปอร์และสามารถจำลองพฤติกรรมกระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัย งานวิจัยเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองกระจกเทมเปอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อพิจารณาผลของน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอและแรงระเบิดและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับการทดสอบในอดีต จากนั้นสร้างแบบจำลองกระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยตามกรณีศึกษา โดยเริ่มจากระยะการระเบิด 1 m, 2 m และ 4 m โดยแรงระเบิด TNT เริ่มที่ 1 kg และทำการเพิ่มแรงระเบิดขึ้นจนกว่าฟิล์มนิรภัยจะขาด เพื่อหาแรงระเบิดสูงสุดที่ฟิล์มสามารถทนได้ ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ที่ระยะระเบิด 2 m ฟิล์มจะขาดเมื่อระเบิดมีขนาด 2 kg และที่ระยะระเบิด 4 m ฟิล์มจะขาดเมื่อระเบิดมีขนาด 6 kg โดยมีค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางแผ่นกระจกอยู่ที่ประมาณ 140 mm

คำสำคัญ: ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, แรงระเบิด, กระจกนิรภัย, ฟิล์มนิรภัย

Abstract

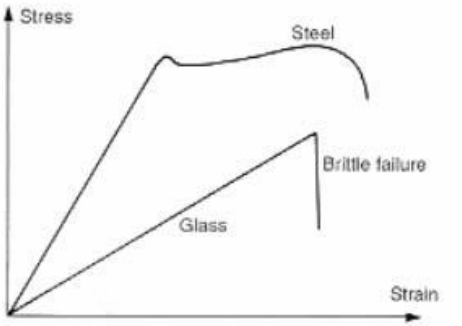
Explosions from the past to the present have resulted in the loss of property and lives. More dangerous if the blasting area has glass. Government buildings in Oslo, Norway suffered glass damage because of an explosion, however, no dangerous glass fragments were present because the safety film was installed 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

ขนาด 950 kg แรงระเบิดทำลายส่วนภายนอกของอาคารในวิถี 1 km ทำให้กระจกบริเวณอาคารราชการได้รับความเสียหาย แต่ไม่มีเศษกระจกที่ก่อให้เกิดอันตรายได้เนื่องจากมีการติดตั้งฟิล์มนิรภัย [3] ในบริเวณดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจการวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด [4,5] ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [6] เนื่องจากกระจกเทมเปอร์มีความแข็งแรงมากกว่ากระจกธรรมดา 3-5 เท่า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถทำนายพฤติกรรมของกระจกเทมเปอร์และจำลองพฤติกรรมของฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดเพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ทำการทดสอบต่อไปในอนาคต โดยงานวิจัยนี้สามารถทำให้ผู้ที่จะทำการทดสอบในอนาคตสามารถประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายได้และสามารถเป็นแนวทางในการออกแบบกระจกและฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดได้

2. คุณสมบัติของวัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 คุณสมบัติของกระจก

กระจกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) คือเส้นตรงในช่วงแรกมีลักษณะที่คล้ายกับคุณสมบัติของเหล็กซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเราสามารถอธิบายคุณสมบัตินี้ได้ตามกฎของฮุค (Hooke's law) ตามรูปที่ 1 และ ตารางที่ 1



รูปที่ 1 คุณสมบัติของเหล็กและกระจก [7]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกระจกเทมเปอร์

โมดูลัสความยืดหยุ่น	70,000 N/mm^2
อัตราส่วนปัวซอง	0.22
ความหนาแน่น	2500 kg/m^3

2.2 คุณสมบัติของฟิล์มนิรภัย

ฟิล์มนิรภัยที่ประกอบด้วยฟิล์มซ้อนกันหลายชั้นจนมีความหนา 0.5 มิลลิเมตร เมื่อติดตั้งฟิล์มนิรภัย PROFILON® ER1 [3] กับกระจกทำให้กระจกกลายเป็นกระจกนิรภัย ที่สามารถต้านทานแรงกระแทกได้ คุณลักษณะและคุณสมบัติของฟิล์มนิรภัย PROFILON® ER1 แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มนิรภัย

โมดูลัสความยืดหยุ่น	2.4 GPa
ความหนาแน่น	1300 kg/m^3
ความเค้นสูงสุดที่ยอมให้	95 MPa

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของฟิล์มนิรภัย [7]

สี/เคลือบสี	สีใส
ความหนา	~ 0.5 มิลลิเมตร
สารที่ใช้ยึดติด	อะคริลิก
ส่วนประกอบ	ฟิล์มซ้อนกันหลายชั้น ผ่านกระบวนการด้วยเครื่อง Sandglider
การเคลือบผิว	เคลือบแข็งด้วย DURITAL - พื้นผิว 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 ตามมาตารฐาน EN 13541 (NS) (แสดงในตารางที่ 4) ระดับ A1 ตามมาตรรฐาน 52 290 (การต้านทานแรงกระแทก) ระดับ P2A ตามมาตรฐาน EN 356

ตารางที่ 4 การจำแนกประเภทของมาตรฐาน EN13541 [8]

การต้านทานของมาตรฐาน 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

2.3 ระเบียบวิธีวิจัย

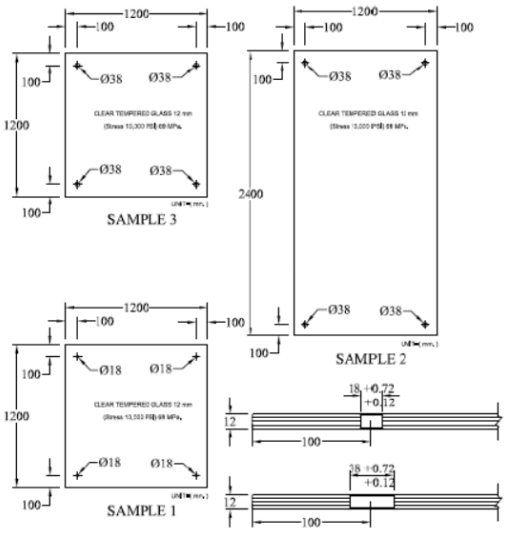
2.3.1 ขนาดของแบบจำลองกระจกเทมเปอร์

ขนาดและวัสดุใช้ตามงานวิจัยในอดีตแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ การจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ [9] และการจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด [10]

การจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ [4] จำลองกระจกเทมเปอร์ 2 ขนาด 3 รูปแบบ คือ

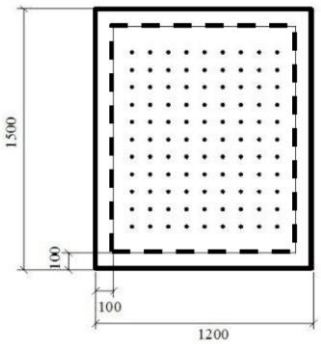
1. กระจกขนาด 1200×1200 mm ความหนา 12 mm มีขนาดรูเจาะ 18 mm 4 มุม โดยมีระยะห่างจากมุมขอบทั้ง 4 ด้านเป็นระยะ 100 mm
2. กระจกขนาด 1200×1200 mm ความหนา 12 mm มีขนาดรูเจาะ 38 mm 4 มุม โดยมีระยะห่างจากมุมขอบทั้ง 4 ด้านเป็นระยะ 100 mm
3. กระจกขนาด 1200×2400 mm ความหนา 12 mm มีขนาดรูเจาะ 38 mm 4 มุม โดยมีระยะห่างจากมุมขอบทั้ง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

โดยกระจกขนาด1200×1200 mm ใช้น้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ 16700 Pa และกระจกขนาด 1200×2400 mm ใช้น้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ 3200 Pa



รูปที่ 2 ขนาดและตำแหน่งของรูเจาะ

การจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด [5] ใช้กระจกขนาด 1500×1200 mm ตามรูปที่ 3 โดยขนาดระเบิด ระยะระเบิด และความหนาของกระจกใช้ตามตารางที่ 5



รูปที่ 3 ขนาดความกว้างยาวของกระจก [5]

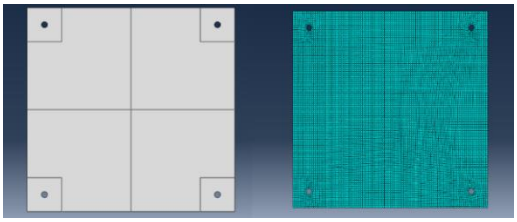
ตารางที่ 5 ขนาดของระเบิด และระยะระเบิดของการทดสอบ [5]

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

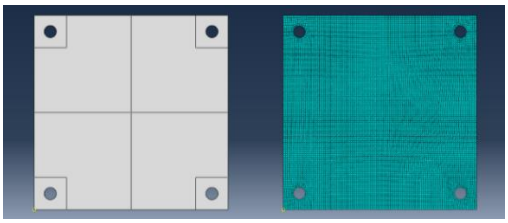
2.4 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS ในการจำลองกระจกเทมเปอร์ โดยเลือกใช้ Shell element แบ่งขนาดชิ้นส่วน ดังนี้

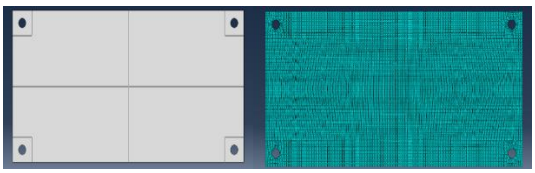
1. การจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ เลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด S4R แบ่งชิ้นส่วนเป็นขนาด 12×12 mm ดังแสดงในรูปที่ 4 ถึง รูปที่ 6



รูปที่ 4 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×1200mm รูเจาะขนาด 18 mm

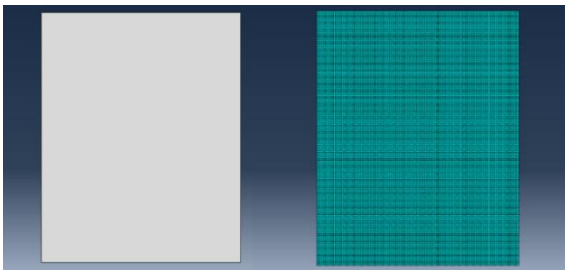


รูปที่ 5 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×1200mm รูเจาะขนาด 38 mm



รูปที่ 6 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×2400mm รูเจาะขนาด 38 mm

2. การจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิดเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด S4R แบ่งชิ้นส่วนเป็นขนาด 10×10 mm ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การแบ่งขนาดชิ้นส่วนของกระจกขนาด 1200×1500mm

2.5 เงื่อนไขขอบเขต

แบบจำลองกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของกระจกเทมเปอร์ ดังนี้

1. การจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ ที่รูเจาะทั้ง 4 รูของกระจกให้มีการเคลื่อนที่และการหมุนในแนวแกน x, y และ z เท่ากับ 0 (U1,U2,U3,UR1,UR2,UR3 = 0)

2. การจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด ที่ขอบทั้ง 4 ด้านของกระจกเป็นให้มีการเคลื่อนที่และการหมุนในแนวแกน x, y และ z เท่ากับ 0 (U1,U2,U3,UR1,UR2,UR3=0)

2.6 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

พิจารณาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต [4] สำหรับการจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ พิจารณาค่ารับแรงได้สูงสุดเมื่อผิวกระจกมีค่าความเค้นเท่ากับ 73 MPa ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ ASTM E1300 ยอมให้ [11] และ ค่าโก่งตัวของกระจกมีค่าตรงกับงานวิจัยในอดีต สำหรับการจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด [5] ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบค่าโก่งตัวสูงสุด

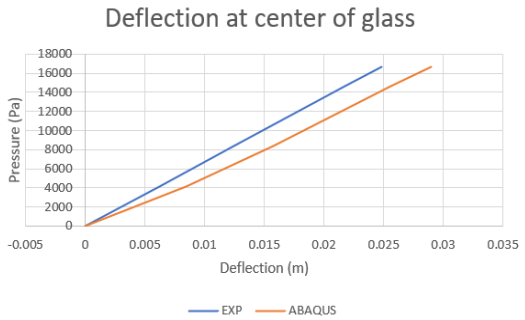
2.7 วิเคราะห์กระจกติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิดด้วยแบบจำลองที่ปรับแก้แล้ว

การจำลองกระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด โดยทำการระเบิด ที่ระยะ 1 m, 2 m และ 4 m ให้เป็นการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ (Free air blast) เริ่มจากระเบิดTNT 1 kg จากนั้นเพิ่มแรงระเบิดจนกว่าฟิล์มจะขาด เพื่อวิเคราะห์ความทนทานของฟิล์มนิรภัย ขนาดของแบบจำลองจะใช้เหมือนงานวิจัยในอดีต [4] เนื่องจากเป็นความหนาทั่วไปของกระจกเทมเปอร์ที่ใช้ในประเทศไทย

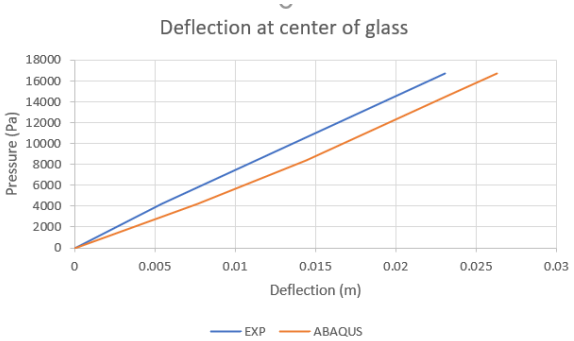
3. ผลการวิเคราะห์

3.1 เปรียบเทียบแบบจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ กับงานวิจัยในอดีต

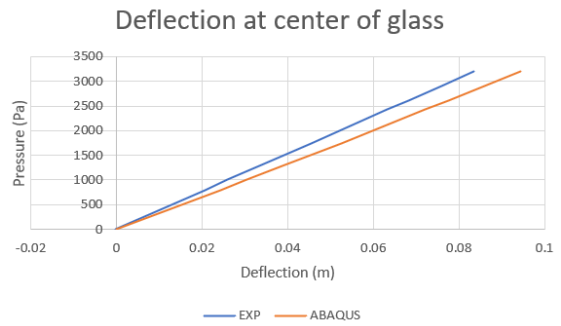
การวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ภายใต้น้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ กับงานวิจัยในอดีต [4] โดยกระจกขนาด 1200×1200 mm ใช้น้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ 16700 Pa และกระจกขนาด 1200×2400 mm ใช้น้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ 3200 Pa กระจกขนาด 1200×1200 mm ขนาดรูเจาะ 18 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกเท่ากับ 28.98 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกของงานวิจัยในอดีต เท่ากับ 24.86 mm ค่าความเครียด ที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดมีค่าเท่ากับ 1.056 m/m ค่าความเครียดจุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดของงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 0.988 m/m ตามรูปที่ 8 และ รูปที่ 11 กระจกขนาด 1200×1200 mm ขนาดรูเจาะ 38 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกเท่ากับ 29.08 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกของงานวิจัยในอดีต เท่ากับ 26.29 mm ค่าความเครียด ที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดมีค่าเท่ากับ 0.937 m/m ค่าความเครียดจุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดของงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 0.865 m/m ตามรูปที่ 9 และ รูปที่ 12 กระจกขนาด 1200×2400 mm ขนาดรูเจาะ 38 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกเท่ากับ 94.40 mm ค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกของงานวิจัยในอดีต เท่ากับ 83.53 mm ค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดมีค่าเท่ากับ 1.096 m/m ค่าความเครียดจุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดของงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 0.970 m/m ตามรูปที่ 10 และ รูปที่ 13 กระจกทั้ง 3 แบบ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจกและค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึดดังแสดงในตารางที่ 6 และ ตารางที่ 7



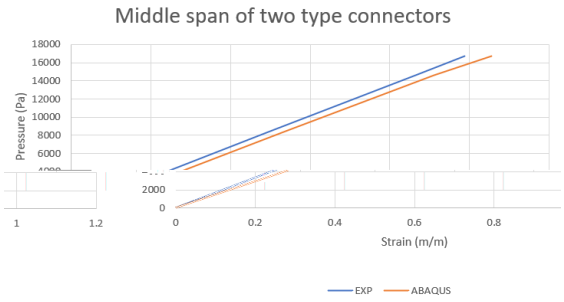
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอต่อค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจกขนาด 1.2×1.2 m รูเจาะ 18 mm



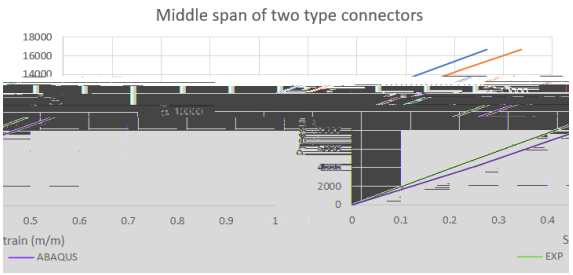
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอต่อค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของ กระจกขนาด 1.2×1.2 m รูเจาะ 38 mm



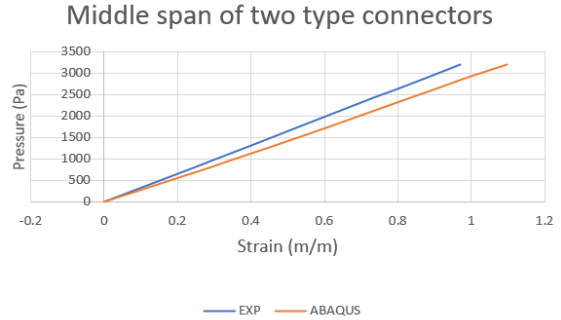
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ ต่อค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของ กระจกขนาด 1.2×2.4 m รูเจาะ 38 mm



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ ค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึด กระจกขนาด 1.2×1.2 m รูเจาะ 18 mm



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ ต่อค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึด กระจกขนาด 1.2×1.2 m รูเจาะ 38 mm



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ ต่อค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึด กระจกขนาด 1.2×2.4 m รูเจาะ 38 mm

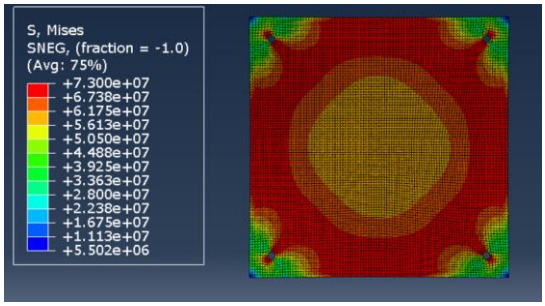
ตารางที่ 6 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าโก่งตัวของกระจก

ลักษณะกระจก	งานวิจัยในอดีต	ABAQUS	% ความต่าง
1200×1200 รูเจาะ18 mm	24.86 mm	28.98 mm	16.57 %
1200×1200 รูเจาะ 38 mm	23.06 mm	26.29 mm	14.10 %
1200×2400 รูเจาะ 38 mm	83.53 mm	94.40 mm	13.01 %

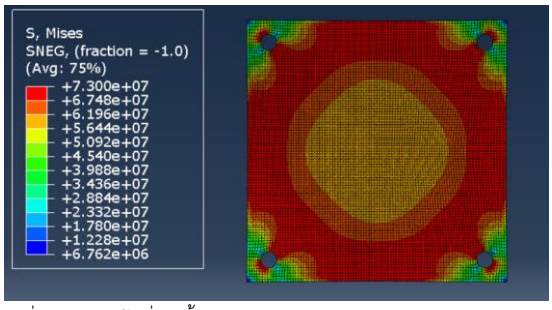
ตารางที่ 7 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความเครียด

ลักษณะกระจก	งานวิจัยในอดีต	ABAQUS	% ความต่าง
1200×1200 รูเจาะ18 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 %

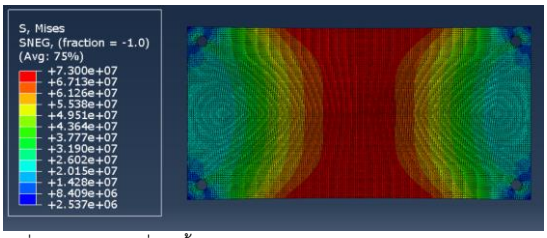
ค่าความเค้น (stress) ของแบบจำลองกระจกเทมเปอร์แสดงในรูปที่ 14 ถึงรูปที่ 16 โดยพบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดจะเกิดที่บริเวณจุดกึ่งกลางระหว่างรูเจาะ



รูปที่ 14 ความเค้นที่เกิดขึ้นของกระจกขนาด 1200×1200 mm หนา 12 mm รูเจาะ 18 mm



รูปที่ 15 ความเค้นที่เกิดขึ้นของกระจกขนาด 1200×1200 mm หนา 12 mm รูเจาะ 18 mm

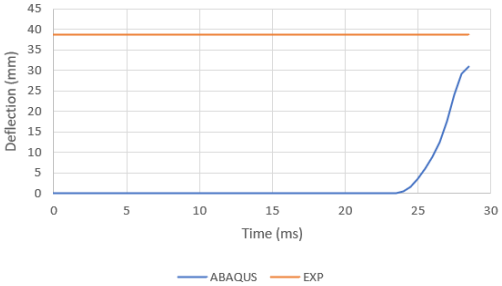


รูปที่ 16 ความเค้นที่เกิดขึ้นของกระจกขนาด 1200×1200 mm หนา 12 mm รูเจาะ 18 mm

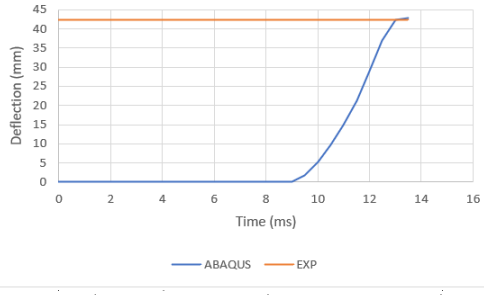
จากการเปรียบเทียบค่าโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางกระจกและค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึด พบว่ามีค่ามากกว่าการทดสอบในอดีต เนื่องจากการทดสอบในอดีตมีการใส่เหล็กที่รูของกระจกเพื่อเป็นตัวยึดกระจกซึ่งคาดว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเหล็กกับกระจกและค่าความเค้นที่เกิดขึ้นตรงกับงานวิจัยในอดีต ซึ่งงานวิจัยในอดีตระบุว่าค่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่ระหว่างกลางของ 2 ตัวยึดในทุกกรณี

3.2 เปรียบเทียบแบบจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิดกับงานวิจัยในอดีต

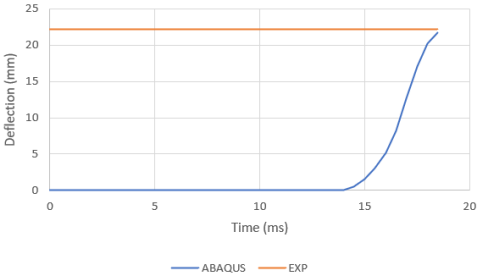
การวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ภายใต้แรงระเบิดกับงานวิจัยในอดีต [5] กระจกขนาด 1500×1200 mm โดยใช้ความหนาของกระจก ขนาดของวัตถุระเบิด และระยะระเบิดตาม ตารางที่ 5 สำหรับกระจกตัวอย่างที่ 3 ค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของกระจกมีค่าเท่ากับ 30.99 mm ค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของกระจกจากงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 38.76 mm กระจกตัวอย่างที่ 9 ค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของกระจกมีค่าเท่ากับ 42.75 mm ค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของกระจกจากงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 42.40 mm กระจกตัวอย่างที่ 10 ค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของกระจกมีค่าเท่ากับ 21.72 mm ค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของกระจกจากงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 22.20 mm กระจกตัวอย่างที่ 11 ค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของกระจกมีค่าเท่ากับ 19.90 mm ค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของกระจกจากงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 18.15 mm กระจกตัวอย่างที่ 12 ค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของกระจกมีค่าเท่ากับ 26.19 mm ค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของกระจกจากงานวิจัยในอดีตมีค่าเท่ากับ 21.87 mm ดังที่แสดงในรูป 17 ถึงรูปที่ 21 มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางกระจก ดังแสดงในตารางที่ 8



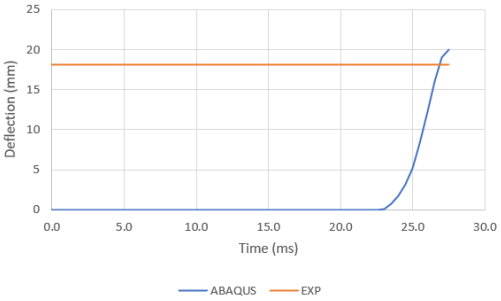
รูปที่ 17 ค่าโก่งตัวสูงสุดของกระจกตัวอย่างที่ 3



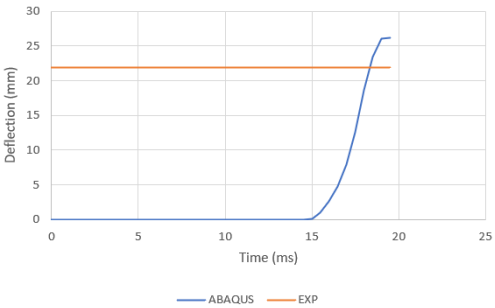
รูปที่ 18 ค่าโก่งตัวสูงสุดที่ของกระจกตัวอย่างที่ 9



รูปที่ 19 ค่าโก่งตัวสูงสุดที่ของกระจกตัวอย่างที่ 10



รูปที่ 20 ค่าโก่งตัวสูงสุดที่ของกระจกตัวอย่างที่ 11



รูปที่ 21 ค่าโก่งตัวสูงสุดที่ของกระจกตัวอย่างที่ 12

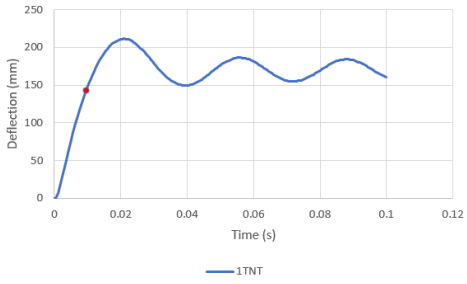
ตารางที่ 8 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าโก่งสูงสุดของกระจก (Maximum Deflection)

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 %

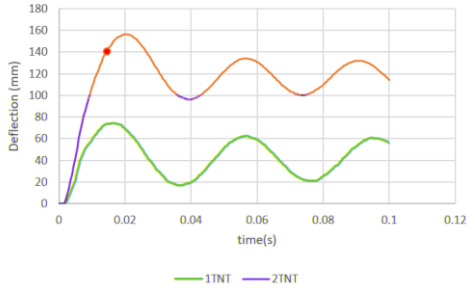
จากการเปรียบเทียบค่าโก่งตัวสูงสุดที่จุดกึ่งกลางกระจก พบว่า ตัวอย่างที่ 9, 10 และ 11 มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต ตัวอย่างที่ 3 และ 12 ยังมีค่าโก่งตัวสูงสุดไม่ใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต เนื่องจากการทดสอบระเบิดแต่ละครั้งจะได้ค่าโก่งตัวสูงสุดไม่เท่ากัน จะมีค่าโก่งตัวสูงสุดอยู่ในช่วง 30-40 mm สำหรับกระจกเทมเปอร์หนา 6 mm และมีค่าโก่งตัวสูงสุดอยู่ในช่วง 18-27 mm สำหรับกระจกเทมเปอร์หนา 10 mm [10] ซึ่งจะเห็นว่าค่าโก่งตัวสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองยังอยู่ในช่วงของงานวิจัยในอดีต

3.3 การวิเคราะห์กระจกติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด

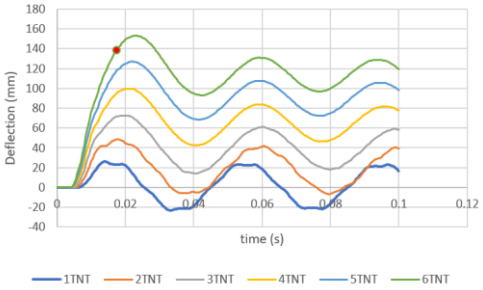
จากการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบในอดีตและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากหัวข้อ 3.1 และ 3.2 จะเห็นว่ามีค่าโก่งตัวของกระจกใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต ผลที่ได้จากการวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัย 1 m, 2 m และ 4 m เริ่มจากระเบิดTNT 0.5 kg สำหรับระยะห่าง 1 m และเริ่มจากระเบิดTNT 1 kg สำหรับระยะห่าง 2 และ 4 m จากนั้นเพิ่มแรงระเบิดจนกว่าฟิล์มจะขาด ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะได้ตามรูปที่ 22 ถึงรูปที่ 27 โดยจุดสีแดงบนกราฟ คือ จุดที่ฟิล์มขาด ค่าโก่งตัวที่ฟิล์มขาดจะได้ตามตารางที่ 9 และตารางที่ 10



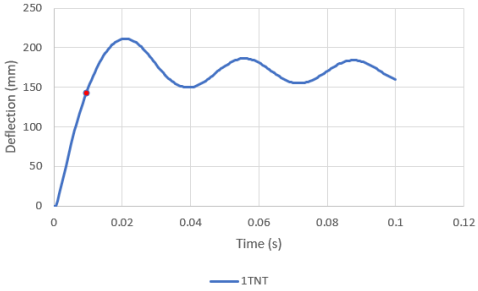
รูปที่ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลา ของกระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะขนาด 18 mm ระยะระเบิด 1 m



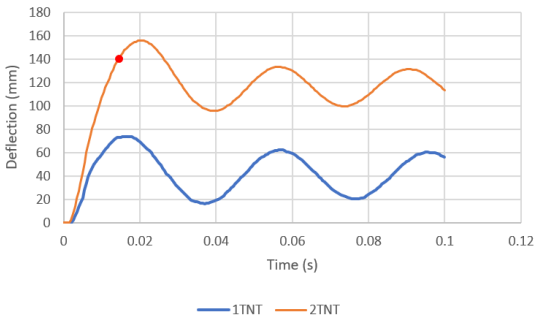
รูปที่ 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลา ของกระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะขนาด 18 mm ระยะระเบิด 2 m



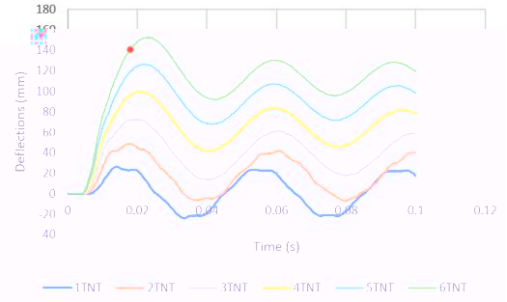
รูปที่ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลา ของกระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะขนาด 18 mm ระยะระเบิด 4 m



รูปที่ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลา ของกระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะขนาด 38 mm ระยะระเบิด 1 m



รูปที่ 26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลาของ กระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะขนาด 38 mm ระยะระเบิด 2 m



รูปที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโก่งตัวและเวลาของ กระจกขนาด1200×1200 mm รูเจาะขนาด 38 mm ระยะระเบิด 4 m

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์กระจกเทมเปอร์ติดฟิล์มนิรภัยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อวิเคราะห์กระจกติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเทียบกับงานวิจัยในอดีต สำหรับแบบจำลองกระจกเทมเปอร์กับน้ำหนักกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ พบว่าค่าความเค้น (stress) จะมีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางระหว่าง 2 ตัวยึด โดยค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจก (deflection) และค่าความเครียด (strain) มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต สำหรับแบบจำลองกระจกเทมเปอร์กับแรงระเบิด มีค่าโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของกระจก (deflection) ใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต

การวิเคราะห์กระจกติดฟิล์มนิรภัยภายใต้แรงระเบิด สามารถวิเคราะห์แรงระเบิดที่ทำให้ฟิล์มขาดที่ระยะระเบิด 1 m, 2 m และ 4 m โดยที่ระยะ 1 m ฟิล์มนิรภัยจะขาดที่ระเบิด TNT 1 kg ที่ระยะ 2 m ฟิล์มนิรภัยจะขาดที่ระเบิด TNT 2 kg และที่ระยะ 4 m ฟิล์มนิรภัยจะขาดที่ระเบิด TNT 6 kg

อย่างไรก็ตามผลการศึกษานี้ยังไม่ได้ครอบคลุมถึงกระจกขนาดอื่น ซึ่งอยู่ระหว่างผลการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] ยิ้มแย้ม, ณ. ประเภทของกระจก [*Online*]. 2020 25 November 2020]; Available from: http://www.thanachai-glass.com/file/glass.pdf.

[2] Scott/Stewart//(2011).//Retrieved May 12,2021,/from/ https://worldview.stratfor.com/article/norway-lessons-successful-lone-wolf-attacker

[3] Haverkamp, PROFILON® ER1 explosion resistant security film. 2018.

[4] กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย, การคำนวณแรงระเบิดและผลกระทบจากแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคาร. 2559.

[5] Karlos, V. and G. Solomos, *Calculation of blast loads for application to structural components.* Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.

[6] 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/.

[7] Hamid, Y.S. and G. Parke. *Glass footbridge*. in *Global Civil Engineering Conference*. 2017. Springer.

[8] 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.

[9] Yossapong, S., Behaior of tempered glass with drilled type connector. 2018, Chulalongkorn University.

[10] 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.

[11] Testing, A.S.f. and Materials, Standard practice for determining load resistance of glass in buildings. 2007: ASTM International.