

การวิเคราะห์แฟรกเมนเทนชันและไฟไนต์เอลเมนต์เพื่อศึกษาความต้านทานกระสุน
ของแผ่นลามิเนตกระจก-พีวีบี



นางสาว พัสตราภรณ์ วิเชียรรัตน์

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FRAGMENTATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR BALLISTIC
RESISTANCE STUDIES OF THE GLASS-PVB LAMINATES

Miss. Pattraporn Wichianrat



ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์แฟรกเมนเทชันและไฟไนต์เอเลเมนต์เพื่อศึกษา
ความต้านทานกระสุนของแผ่นลามิเนตกระจก-พีวีบี

โดย

นางสาวพัสดราภรณ์ วิเชียรรัตน์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. สุจาริณี คชวัฒน์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. ชัยวุฒิ กมลพิลาส

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.สุจาริณี คชวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ชัยวุฒิ กมลพิลาส)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ศิริพร ลาภเกียรติदार)

5272455323 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : TRANSPARENT ARMOR / SODA-LIME GLASS / PVB / FINITE ELEMENT / BALLISTIC PERFORMANCE

PATTRAPORN WICHIANRAT : FRAGMENTATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR BALLISTIC RESISTANCE STUDIES OF THE GLASS-PVB LAMINATES. ADVISOR : SUJARINEE KOCHAWATTANA, Ph.D., CO-ADVISOR: CHAIWUT GAMONPILAS, Ph.D., 86 pp.

The aim of this study is to improve the soda-lime glass : PVB transparent armors' structures so that the thinner and lighter armors having ballistic resistance at the level of 3A according to NIJ standard can be fabricated. In this study, glass sheets and polymer films were laminated using various configurations in order to investigate the effects of parameters on the ballistic performance. These parameters included (i) thickness of glass sheets (ii) number of laminated layers (iii) thickness of polymer films and (iv) addition of polycarbonate sheet in the structure. After lamination process, the specimens were ballistic tested by .44 magnum at the ballistic velocity of 426 m/s. By using fragmentation technique, the patterns of cracks appeared on the tested specimens were analyzed together with the fragment size distributions. The results indicated the appropriate thickness of the front sheet (impact side) and also the effects of film's thickness on the crack generating behaviors. The ballistic tests were studied in parallel with Axisymmetric 2D finite element analysis. It was found that results from the field tests were in good agreement with the finite element analysis. From this study, the transparent armors which are 9.76 mm thinner and 19.23% lighter than those of the standard specimen have been fabricated successfully. The weight efficiency was further improved when polycarbonate sheet was inserted in to the structures as well as 11.76 mm thinner and 26.54% lighter than the standard model.

Department : Materials Science.....

Field of Study : Ceramic Technology.....

Academic Year : 2010.....

Student's Signature *พัสตราภรณ์ อธิษฐ์ยรรยง*

Advisor's Signature *สุจาริณี โคชawatana*

Co-advisor's Signature *ชัยวุฒิ กามอนพิลาส*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากการได้รับความอนุเคราะห์ การสนับสนุนให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาอย่างดียิ่งของบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังมีรายนามดังต่อไปนี้

อาจารย์ ดร.สุจาริณี ศษวัฒน์ และ ดร.ชัยวุฒิ กมลพิลาส อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยด้วยดีตลอดมา อีกทั้งยังคอยอบรมสั่งสอนเป็นอย่างดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ หัวหน้าภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ และอาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการวิจัยและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในภาควิชาวัสดุศาสตร์

ดร. กุลจิรา สุจิโรจน์ ดร. วิชชุดา เดาด์ และ ดร. ดวงพร ศิริกิตติกุล นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการวิจัยและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

คุณวิรัช วุฒิมงคลชัย คุณกิกจรรย์ รุ่งเรืองศรี และคุณณิพัทธ์ เฉลิมธนะวงศ์ เจ้าหน้าที่บริษัท Thai-German specialty glass ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการวิจัยและอำนวยความสะดวกและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนสถานที่และเครื่องมือในงานวิจัย

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่สนับสนุนเงินวิจัยภายใต้ทุนวิจัยโครงการพัฒนาและผลิตกระจก คัลสเตอร์ซอฟแวร์ ไมโครชิป อิเล็กทรอนิกส์ สำนักบริหารคลังเตอร์และโปรแกรมวิจัย (CPMO) รหัสโครงการ P09-00089 รหัสกลุ่มโปรแกรม SPA B3-3

ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่สนับสนุนเงินวิจัยในงานวิจัย

บริษัท Thai-German specialty glass ที่สนับสนุนวัสดุและเครื่องมือในงานวิจัย

กองพลธิการตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทดสอบยิงในงานวิจัย

เพื่อนๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณพ่อ แม่ และน้องชาย ที่คอยอบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจที่ดีในการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ลักษณะทั่วไปของแผ่นกระจก.....	4
2.1.1 ส่วนประกอบของแผ่นกระจก.....	4
2.2 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานแผ่นกระจก.....	5
2.2.1 แผ่นกระจกชนิดโซดาไลม์ (soda-lime glass).....	5
2.2.2 แผ่นฟิล์มพีวีบี (Polyvinyl butyral, PVB).....	7
2.2.3 โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate).....	8
2.3 การผลิตแผ่นกระจก.....	9
2.4 การทดสอบความสามารถในการต้านทานกระสุน.....	11
2.4.1 การจำแนกระดับของแผ่นกระจก.....	12

2.4.2	บทนิยาม.....	13
2.5	ทฤษฎีเกี่ยวกับแฟรกเมนเทชัน.....	15
2.5.1	กลไกของแฟรกเมนเทชันพลศาสตร์ (Dynamic fragmentation).....	15
2.5.2	กระบวนการแตกหักและแฟรกเมนเทชันของวัสดุเปราะ (Fracture process and fragmentation of brittle materials).....	19
2.6	ทฤษฎีเกี่ยวกับไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element).....	22
2.6.1	การสร้างเมช (Mesh generation).....	24
2.6.2	ความสัมพันธ์ของสมบัติเนื่องจากโครงสร้าง (Constitutive relations)....	25
2.6.3	ความสัมพันธ์ของสมบัติเนื่องจากโครงสร้างของกระจกชนิดโซดาไลม์....	28
2.6.4	ความสัมพันธ์ของสมบัติเนื่องจากโครงสร้างของกระจก.....	31
2.6.5	ความสัมพันธ์ของสมบัติเนื่องจากโครงสร้างแผ่นโพลีคาร์บอเนต.....	33
2.6.6	สมการภาวะ (Equation of state, EOS) ของแผ่นฟิล์มพีวีบี.....	33
2.6.7	ความเร็วคลื่น (wave speed) ในวัสดุ.....	34
2.6.8	Courant number.....	34
2.7	เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	35
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2	การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานแผ่นกระจกกันกระจก.....	38
3.2.1	ศึกษาความหนาของแผ่นกระจกต่อความสามารถในการกันกระจก.....	39

3.2.2	ศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นกระจกที่เหมาะสมต่อความสามารถในการกัน กระสุน.....	40
3.2.3	ศึกษาความหนาของแผ่นฟิล์มต่อความสามารถในการกันกระสุน.....	40
3.2.4	ศึกษาความหนาของแผ่นกระจกที่เหมาะสมเพื่อลดน้ำหนักแผ่นเกราะกัน กระสุน.....	41
3.3	การทดสอบยิงแผ่นเกราะกันกระสุน.....	43
3.4	การวิเคราะห์แฟรกเมนเทชันภายหลังการทดสอบยิง.....	45
3.5	การพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	46
3.5.1	ศึกษาความเสียหายของแผ่นกระจกเปรียบเทียบกับการทดสอบจริง....	50
3.5.2	ศึกษาความเสียหายของแบบจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนที่จำนวนชั้น ของแผ่นกระจกแตกต่างกัน.....	50
3.5.3	ศึกษาความเสียหายของแบบจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนที่ความหนา ของแผ่นฟิล์มแตกต่างกัน.....	51
3.6	ศึกษาการลดน้ำหนักชิ้นงานแผ่นเกราะโดยการใช้วัสดุโพลีคาร์บอเนต.....	51
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	55
4.1	ผลของความหนาของแผ่นกระจกที่มีต่อความสามารถในการกันกระสุน.....	55
4.2	ผลของจำนวนชั้นของแผ่นกระจกที่มีต่อความสามารถในการกันกระสุน.....	56
4.2.1	ผลของการทดสอบยิง.....	56
4.2.2	การวิเคราะห์แฟรกเมนเทชันในการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นกระจก..	58

4.2.3	ความเสียหายจากการยิงของแผ่นกระจกโดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับทดสอบจริง.....	60
4.2.4	ผลของจำนวนชั้นกระจกที่มีต่อการต้านทานกระสุนโดยแบบจำลองไฟไนต์- เอลิเมนต์.....	65
4.3	ผลของความหนาของแผ่นฟิล์มที่มีต่อความสามารถในการกันกระสุน.....	67
4.3.1	ผลจากการทดสอบยิง.....	67
4.3.2	การวิเคราะห์แฟรกเมนเทชันเพื่อศึกษาอิทธิพลจากความหนาของแผ่นฟิล์ม	69
4.3.3	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาอิทธิพลจากความหนาของแผ่น ฟิล์ม.....	70
4.4	ความหนาของแผ่นกระจกที่เหมาะสมเพื่อลดน้ำหนักแผ่นเกราะกันกระสุน.....	72
4.5	การลดน้ำหนักชิ้นงานแผ่นเกราะโดยใช้วัสดุโพลีคาร์บอเนต.....	73
4.5.1	ผลการทดสอบยิง.....	73
4.5.2	ผลของแฟรกเมนเทชันต่อการศึกษารีดน้ำหนักชิ้นงานแผ่นเกราะโดย การใช้วัสดุโพลีคาร์บอเนต.....	74
4.5.3	ผลของการศึกษาความเสียหายของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อการ ศึกษาการลดน้ำหนักชิ้นงานแผ่นเกราะโดยการใช้วัสดุโพลีคาร์บอเนต.....	76
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	79
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	80

รายการอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของกระจกชนิดโซดาไลม์	6
ตารางที่ 2.2 สมบัติของกระจกโซดาไลม์	6
ตารางที่ 2.3 สมบัติของฟิล์มพีวีบี	7
ตารางที่ 2.4 สมบัติของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	8
ตารางที่ 2.5 มาตรฐานการทดสอบแผ่นกระจกใส	12
ตารางที่ 2.6 การจำแนกระดับของการทดสอบยิง.....	13
ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่สำหรับสมการภาวะ.....	34
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	37
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	38
ตารางที่ 3.3 การจัดเรียงชิ้นงานเพื่อศึกษาความหนาของแผ่นกระจกต่อความสามารถในการกัน กระสุน	39
ตารางที่ 3.4 การจัดเรียงชิ้นงานเพื่อศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นกระจกที่เหมาะสมต่อความสามารถ ในการกันกระสุน	40
ตารางที่ 3.5 การจัดเรียงชิ้นงานเพื่อศึกษาความหนาของแผ่นฟิล์มต่อความสามารถในการกัน กระสุน	41
ตารางที่ 3.6 การจัดเรียงชิ้นงานเพื่อลดน้ำหนักของแผ่นกระจกกันกระสุน.....	42
ตารางที่ 3.7 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการร่อน.....	45
ตารางที่ 3.8 ขนาดของตะแกรงที่ใช้ในการคัดแยกเศษกระจกของชิ้นงาน	45
ภาพที่ 3.8 แสดงการคัดแยกเศษกระจกของชิ้นงานแผ่นกระจกกันกระสุนหลังจากผ่านการทดสอบ ยิง	46
ตารางที่ 3.9 ค่าคงที่สมการสภาวะแบบ Polynomial ของกระจกชนิดโซดาไลม์.....	46
ตารางที่ 3.10 ค่าคงที่สมการ Johnson-Holmquist (JH-2) ของกระจกชนิดโซดาไลม์	47
ตารางที่ 3.11 ค่าสมบัติทั่วไปของกระจกชนิดโซดาไลม์.....	47
ตารางที่ 3.12 ค่าคงที่สมการสภาวะแบบ Linear ของกระสุน.....	47
ตารางที่ 3.13 ค่าคงที่สมการ Streinberg Guinan ของกระสุน	48
ตารางที่ 3.14 ค่าสมบัติทั่วไปของกระสุน	48
ตารางที่ 3.15 ค่าคงที่สมการสภาวะแบบ Linear ของแผ่นฟิล์มพีวีบี	48
ตารางที่ 3.16 ค่าความเสียหายของแผ่นฟิล์มพีวีบี	49

ตารางที่ 3.17 ค่าสมบัติทั่วไปของแผ่นฟิล์มพีวีบี	49
ตารางที่ 3.18 ค่าคงที่สมการสภาวะ Bilinear ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	49
ตารางที่ 3.19 ค่าความเสียหายของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	49
ตารางที่ 3.20 ค่าคงที่การแปรรูปแบบไอโซทรอปิกเชิงหลายเส้นของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	50
ตารางที่ 3.21 ค่าสมบัติทั่วไปของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	50
ตารางที่ 3.22 การจัดเรียงชั้นงานแผ่นเกราะเมื่อเพิ่มวัสดุโพลีคาร์บอเนต	51
ตารางที่ 4.1 ความหนาและน้ำหนักของชั้นงานลักษณะต่างๆ	57
ตารางที่ 4.2 แสดงผลความเสียหายของแผ่นกระจกจากการทดสอบจริงเปรียบเทียบกับผลจาก การจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	64
ตารางที่ 4.3 ความหนาและน้ำหนักของชั้นงานเมื่อเพิ่มวัสดุโพลีคาร์บอเนต	74

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 ชิ้นงานแผ่นเกราะมาตรฐาน.....	2
ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของแผ่นเกราะใส.....	5
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของโพลีคาร์บอเนต	8
ภาพที่ 2.3 การอบรีด	9
ภาพที่ 2.4 เตาสุญญากาศ.....	10
ภาพที่ 2.5 หม้อนึ่งอัดไอ	11
ภาพที่ 2.6 มุมตกกระทบของวิถีกระสุน.....	14
ภาพที่ 2.7 ระยะห่างของปากกระบอกปืนและแผ่นเกราะ	14
ภาพที่ 2.8 ขนาดของแฟรกเมนเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเปลี่ยนไป	17
ภาพที่ 2.9 ค่าความเหนียวเปรียบเทียบกับค่าขนาดแฟรกเมนที่เปลี่ยนไป.....	19
ภาพที่ 2.10 กระบวนการแตกของวัสดุเปราะ.....	21
ภาพที่ 2.11 แผนผังแสดงขั้นตอนของการเสียหาย	22
ภาพที่ 2.12 แผนผังแสดงขั้นตอนของไฟไนต์เอเลเมนต์	24
ภาพที่ 2.13 เอเลเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์	25
ภาพที่ 2.14 สรุปลักษณะการของวัสดุแต่ละชนิด.....	26
ภาพที่ 2.15 กราฟความเค้น-ความเครียด	27
ภาพที่ 2.16 ข้อมูลจาก Johnson-Holmquist สำหรับแผ่นกระจกโซดาไลม์.....	30
ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของแผ่นกระจกโซดาไลม์	31
ภาพที่ 2.18 ข้อมูลจาก Streinberg-Guinan ของกระสุน	32
ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียด เชิงหลายเส้น.....	33
ภาพที่ 3.1 การจัดเรียงแผ่นกระจกและแผ่นฟิล์ม	38
ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการอัดรีดด้วยความร้อน.....	42
ภาพที่ 3.3 แผนผังอุณหภูมิของหม้อนึ่งอัดไอ	43
ภาพที่ 3.4 ชิ้นงานที่ได้หลังจากผ่านหม้อนึ่งอัดไอ	43
ภาพที่ 3.5 แท่นทดสอบยิง	44
ภาพที่ 3.6 แท่นยึดชิ้นงาน.....	44
ภาพที่ 3.7 การจัดวางชิ้นงานในขั้นตอนการทดสอบยิง	44
ภาพที่ 3.8 แสดงการตัดแยกเศษกระจกของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนหลังจากผ่านการทดสอบยิง	46

ภาพที่ 3.9 แผนผังอุณหภูมิของเตาสู่ญญากาศ	52
ภาพที่ 3.10 แผนผังการทดลองชิ้นงานแผ่นกระจก.....	53
ภาพที่ 3.11 แผนผังการทดลองชิ้นงานแผ่นกระจกกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต.....	54
ภาพที่ 4.2 ความเสียหายด้านหลังของชิ้นงานแผ่นกระจกกันกระสุน (a) G8 (b) G10 (c) G12 และ (d) G15	56
ภาพที่ 4.3 ความเสียหายด้านหน้าของชิ้นงานแผ่นกระจกกันกระสุน (a) G15 (b) G15-N4 (c) G15-N3 และ (d) G15-N2.....	57
ภาพที่ 4.4 ความเสียหายด้านหลังของชิ้นงานแผ่นกระจกกันกระสุน (a) G15 (b) G15-N4 (c) G15-N3 และ (d) G15-N2.....	57
ภาพที่ 4.5 การกระจายขนาดเศษกระจกของชิ้นงาน G15, G15-N4 และ G15-N3	59
ภาพที่ 4.6 แผนภาพขนาดอนุภาคเฉลี่ยของชิ้นงานลักษณะต่างๆ	59
ภาพที่ 4.7 ความเสียหายของแผ่นกระจกที่ความหนาแตกต่างกันในสภาวะการทดสอบยิงด้วยกระสุน 9 มิลลิเมตร ที่ระดับ 2A ความเร็ว 332 เมตรต่อวินาที.....	61
ภาพที่ 4.8 ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนเมื่อเวลาผ่านไปในระหว่างการทดสอบยิงด้วยกระสุน 9 มิลลิเมตร ที่ระดับ 2A ความเร็ว 332 เมตรต่อวินาที	62
ภาพที่ 4.9 ความเสียหายของแผ่นกระจกที่ความหนาแตกต่างกันในสภาวะการทดสอบยิงด้วยกระสุน 9 มิลลิเมตร ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที.....	63
ภาพที่ 4.10 ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนเมื่อเวลาผ่านไปในระหว่างการทดสอบยิงด้วยกระสุน 9 มิลลิเมตร ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที	64
ภาพที่ 4.11 แบบจำลองความเสียหายของแผ่นกระจกกันกระสุนที่จำนวนชิ้นแตกต่างกันในสภาวะการทดสอบยิงด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที.....	66
ภาพที่ 4.12 ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนเมื่อเวลาผ่านไปในระหว่างการทดสอบยิงแผ่นกระจกที่จำนวนชิ้นแตกต่างกันด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที.....	67
ภาพที่ 4.13 ความเสียหายด้านหน้าของชิ้นงานแผ่นกระจกกันกระสุน (a) G15-N4 (b) G15-N4-F152 (c) G15-N4-F228	68
ภาพที่ 4.14 ความเสียหายด้านหลังของชิ้นงานแผ่นกระจกกันกระสุน (a) G15-N4 (b) G15-N4-F152 (c) G15-N4-F228	68
ภาพที่ 4.15 การกระจายขนาดเศษกระจกของชิ้นงาน G15-N4 เมื่อความหนาฟิล์มแตกต่างกัน.69	
ภาพที่ 4.16 แผนภาพขนาดอนุภาคเฉลี่ยของชิ้นงาน G15-N4 เมื่อความหนาฟิล์มแตกต่างกัน ..69	
ภาพที่ 4.17 ความเสียหายของแผ่นกระจก G15-N4 ที่ความหนาฟิล์มแตกต่างกันเมื่อเวลาผ่านไป ในระหว่างการทดสอบยิงด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที ...	71

ภาพที่ 4.18 ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงการทดสอบยิงแผ่นเกราะ G15-N4 ที่ความหนาฟิล์มแตกต่างกันด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที	72
ภาพที่ 4.19 ความเสียหายด้านหน้าของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G10-15-5-3 (b) G15-10-5-3	73
ภาพที่ 4.20 ความเสียหายด้านหลังของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G10-15-5-3 (b) G15-10-5-3	73
ภาพที่ 4.21 ความเสียหายด้านหน้าของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G15-N4-PC (b) G15-N3-PC	74
ภาพที่ 4.22 ความเสียหายด้านหลังของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G15-N4-PC (b) G15-N3-PC	74
ภาพที่ 4.23 การกระจายขนาดเศษกระสุนของชิ้นงาน G15-N4-PC และ G15-N3-PC เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน G15-N4 และ G15-N3.....	75
ภาพที่ 4.24 แผนภาพขนาดอนุภาคเฉลี่ยของชิ้นงาน G15-N4-PC และ G15-N3-PC เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน G15-N4 และ G15-N3.....	75
ภาพที่ 4.25 ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุน G15-N4-PC และ G15-N3-PC เมื่อเวลาผ่านไปในช่วงการทดสอบยิงด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที 77	
ภาพที่ 4.26 ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงการทดสอบยิงแผ่นเกราะกันกระสุน G15-N4-PC และ G15-N3-PC ด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที	78

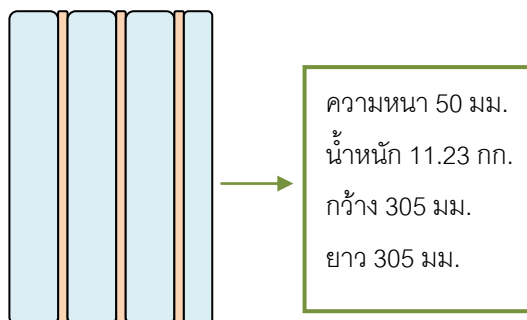
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสถานการณ์ความไม่สงบต่างๆ ที่เกิดขึ้นมากมายในปัจจุบัน ไม่เพียงแต่ในประเทศไทยแต่ยังเกิดขึ้นต่อเนื่องทั่วทุกหนทุกแห่ง และเนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านอวกาศยุคโทรปกรณ์ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว จึงทำให้การพัฒนาวัสดุอุปกรณ์เพื่อป้องกันอันตรายจากอาวุธเหล่านี้มีความสำคัญและจำเป็นมากยิ่งขึ้น จึงมีความสนใจที่จะหาวัสดุที่มีความสามารถในการกันกระสุนได้ และพบว่าวัสดุที่มีความสามารถในการกันกระสุนได้นั้นมีหลากหลายชนิด เช่น เซรามิก พอลิเมอร์ และโลหะ โดยทั่วไปเกราะกันกระสุนสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดใหญ่ๆ คือ เกราะที่บวมและเกราะใส ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาเกราะใส สำหรับเกราะใสนี้เป็นวัสดุที่สำคัญมีความต้องการใช้งานทั้งทางด้านทางทหาร เช่น ฉากป้องกันอาวุธ หน้าต่างสำหรับยานพาหนะ หมวกนิรภัย เป็นต้น อีกทั้งยังมีการใช้งานทางด้านกรรุด ยานพาหนะ และเชิงพาณิชย์ต่างๆ จึงทำให้ความต้องการใช้งานของเกราะใสมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

โดยทั่วไปเกราะใสควรมีสมบัติทนต่อแรงกระแทกของกระสุนที่มีความเร็วสูง และจะต้องดูดซับพลังงานจลน์จากการพุ่งชนไว้ได้ [1] เกราะใสมักจะถูกผลิตให้มีโครงสร้างเป็นแบบแซนด์วิชซึ่งประกอบด้วยชั้นกระจกและชั้นเทอร์โมพลาสติกใสนำมาอัดซ้อนกันหลายชั้น (Laminate) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงสามารถทนต่อแรงปะทะของกระสุนและดูดซับพลังงานจลน์ที่เกิดจากการชนไว้ได้ เกราะใสในปัจจุบันสามารถผลิตจากวัสดุหลายชนิด เช่น กระจก พลาสติก สปิเนล และเซฟไฟร์ เป็นต้น โดยกระจกชนิดโซดาไลม์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมถูกนำมาใช้งานเนื่องจากมีความแข็งแรง ราคาถูกและสามารถหาได้ง่าย และฟิล์มพีวีบีที่เป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติกได้รับความนิยมนำมาลามาเนตกับแผ่นกระจกเนื่องจากสามารถควบคุมการยึดติดได้ง่าย มีความใสเมื่อทำการยึดติดกับกระจก ต้านทานการยืดขยายได้ดีเมื่อรับแรงชนจากกระสุน และเสถียรต่อแสงยูวี โดยความสามารถในการกันกระสุนของเกราะใสซึ่งเป็นวัสดุคอมโพสิตระหว่างกระจกและฟิล์มพีวีบีนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนชั้น การจัดเรียง และความหนาของกระจกและฟิล์มพีวีบีเพื่อให้ชั้นงานเกราะใสมีน้ำหนักและราคาที่เหมาะสม [1-3] เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นงานมาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 ชิ้นงานแผ่นเกราะมาตรฐาน

ในงานวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้ความสามารถในการกันกระสุนของแผ่นเกราะใสดุ๊กตรวจสอบโดยใช้การทดสอบยิงตามมาตรฐาน NIJ0108.01 ที่ระดับ 3A ด้วยกระสุน .44 magnum ความเร็วกระสุนประมาณ 426 ± 15 เมตรต่อวินาที ชิ้นงานเกราะใสดุ๊กที่มีการจัดเรียงแตกต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการกันกระสุน จำนวนและขนาดของเศษกระเจกที่แตกออกจากแผ่นเกราะใสดุ๊ก โดยการวิเคราะห์ที่เศษกระเจกที่หลุดออกจากชิ้นงานหลังจากการทดสอบยิงไปคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาดต่างๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสัมพัทธ์กับขนาดของเศษกระเจก และความสัมพันธ์ระหว่างเศษกระเจกกับค่าพลังงานสะท้อนกลับ พบว่าขนาดเศษกระเจกเฉลี่ย (Average fragment size) มีผลแปรตามกันกับค่าพลังงานสะท้อนกลับและค่าความเหนียว (Toughness) ของชิ้นงาน โดยแผ่นกระเจกที่ขึ้นรูปโดยการลามิเนตจะมีค่าขนาดเศษกระเจกเฉลี่ย ค่าพลังงานการสะท้อน และค่าความเหนียวของชิ้นงานสูงกว่ากระเจกที่ไม่ได้ผ่านการลามิเนตทำให้กระเจกแบบลามิเนตมีความสามารถในการกันกระสุนได้ดี [4] และเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานและการทดสอบยิงแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีค่าสูงนั้น จึงทำให้มีความสนใจพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อสร้างแบบจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนจากโปรแกรม AnsysTM ซึ่งสามารถคาดการณ์ความเสียหายของวัสดุภายใต้การปะทะด้วยความเร็วสูงของกระสุนได้ [5] โดยสร้างแบบจำลองสองมิติแบบ Axisymmetric และควบคุมสภาวะการจำลองเสมือนจริงกับการทดสอบยิงแผ่นเกราะกันกระสุน

งานวิจัยนี้มุ่งทำการศึกษาผลของการจัดเรียงแผ่นกระเจกโซดาไลม์กับฟิล์มพีวีบีเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้สามารถกันกระสุนที่ระดับ 3A ตามมาตรฐาน NIJ และเพื่อให้ได้แผ่นเกราะใสดุ๊กในระบบกระเจกชนิดโซดาไลม์กับฟิล์มพีวีบีที่มีน้ำหนักเบา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาผลของการจัดเรียงแผ่นกระจกโซดาไลม์กับฟิล์มพีวีบีที่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานกระสุนสำหรับใช้ผลิตเป็นแผ่นเกราะใสด้วยวิธีแฟรกเมนเทชันและแบบจำลองไฟไนต์-เอเลเมนต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1. ศึกษาความหนาของแผ่นกระจกต่อความสามารถในการกันกระสุน
- 1.3.2. ศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นกระจกที่เหมาะสมต่อความสามารถในการกันกระสุน
- 1.3.3. ศึกษาความหนาของแผ่นฟิล์มต่อความสามารถในการกันกระสุน
- 1.3.4. ศึกษาความหนาของแผ่นกระจกที่เหมาะสมเพื่อลดน้ำหนักแผ่นเกราะกันกระสุน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1. ได้ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดเรียงแผ่นกระจก-พีวีบี
- 1.4.2. ได้ชิ้นงานแผ่นเกราะใสที่มีความสามารถในการกันกระสุนที่ระดับ 3A ตามมาตรฐาน NIJ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวโดยทั่วไปเกี่ยวกับเกราะกันกระสุนชนิดแผ่นเกราะใส วิธีการขึ้นรูป หลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับการศึกษาความสามารถในการกันกระสุนของแผ่นเกราะกันกระสุน

2.1 ลักษณะทั่วไปของแผ่นเกราะใส

เกราะใส คือ วัสดุที่มีความใสสามารถมองเห็นได้และมีความสามารถในการป้องกันการปะทะของซีปนาวูธ (Ballistic impacts) หรือแฟรกเมน (Fragment) เกราะใสถูกนำไปใช้งานหลากหลายชนิด เช่น ฉากป้องกันอาวุธ หน้าต่างสำหรับยานพาหนะ หมวกนิรภัย เป็นต้น เกราะใสทั่วไป ผลิตด้วยการอัดซ้อนกันของแผ่นวัสดุที่มีความแข็งสูง คั่นระหว่างชั้นด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ โดยมีการใช้ความร้อนและความดันเพื่อช่วยให้การอัดซ้อนยึดติดกันแน่น

ประสิทธิภาพการป้องกันและโครงสร้างของเกราะใสจะถูกออกแบบโดยใช้วัสดุ (Materials) ความหนาของวัสดุ (Materials thickness) จำนวนชั้นของวัสดุ (Number of layers) ความแข็งของวัสดุระหว่างชั้น (Interlayer hardness) และความหนาของวัสดุระหว่างชั้น (Interlayer thickness) ให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานสามารถต้านทานต่อกระสุนได้ดี ภายใต้ความสมดุลและความเหมาะสมในด้านความหนา น้ำหนัก การมองเห็น และราคาของชิ้นงาน [1, 6] ส่วนใหญ่แผ่นเกราะใสสามารถผลิตได้จากแผ่นพลาสติกและแผ่นกระจกทุกชนิด ส่วนวัสดุที่คั่นระหว่างชั้นนั้น มีทั้งที่อยู่ในรูปของของแข็ง (Solid form) เช่น แผ่นฟิล์มพีวีบี (Polyvinylbutyral, PVB) แผ่นฟิล์มอีวีเอ (Ethylvinylacetate, EVA) และแผ่นฟิล์มพียู (Polyurethane, PU) และที่อยู่ในรูปของของเหลว (Liquid form) เช่น เรซิน (Resin) [7]

2.1.1 ส่วนประกอบของแผ่นเกราะใส

แผ่นเกราะใสประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

1. วัสดุแข็งแผ่นหน้า (Hard face materials)

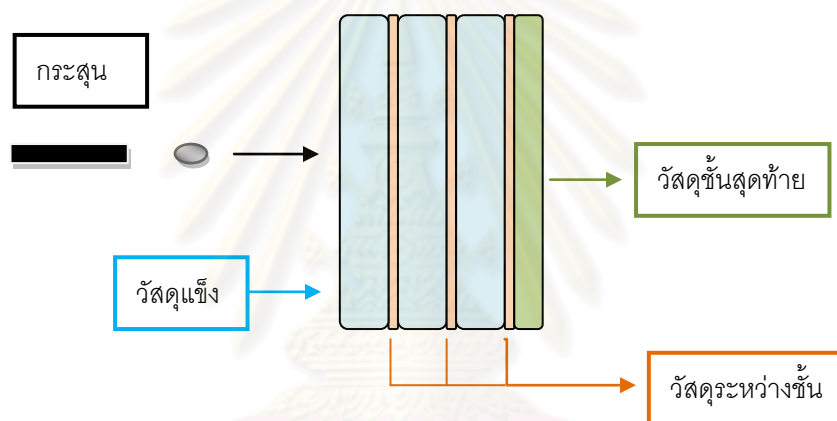
เป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง สามารถลดความเร็วและทำลายหัวกระสุนเมื่อเข้าพุ่งชนแผ่นเกราะ ส่งผลให้กระสุนแตกกระจายเป็นชิ้นย่อย หรือมีพลังงานลดลงเมื่อเข้าสู่ชิ้นงานเกราะในชั้นถัดไปโดยที่ชั้นถัดไปอาจเป็นวัสดุชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน เช่น เซรามิก กระจก แซฟไฟร์ เป็นต้น

2. วัสดุระหว่างชั้น (Interlayer materials)

วัสดุระหว่างชั้นมีหน้าที่ในการช่วยยึดติดระหว่างวัสดุแต่ละชั้น กระจายพลังงานจลน์ที่เกิดจากการพุ่งชน ยับยั้งการเคลื่อนที่ของรอยแตก (Crack propagation) และช่วยยึดติดเศษกระจกที่แตกแล้วไม่ให้กระเด็นเป็นอันตรายต่อรอบข้าง

3. วัสดุชั้นสุดท้าย (Final layer materials)

วัสดุชั้นสุดท้ายเป็นแผ่นพอลิเมอร์ ซึ่งอาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ในโครงสร้างของแผ่นกระจาใส ทำหน้าที่เพื่อป้องกันเศษที่หลุดออกจากชิ้นงานแผ่นกระจาใส และอาจช่วยหยุดกระสุนที่สามารถทะลุมาถึงชั้นนี้



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของแผ่นกระจาใส

2.2 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานแผ่นกระจาใส

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้วัสดุเพื่อผลิตเป็นชิ้นงานแผ่นกระจาใส ดังนี้

2.2.1 แผ่นกระจกชนิดโซดาไลม์ (soda-lime glass)

แผ่นกระจกชนิดโซดาไลม์เป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบหลัก คือ ททราย (Si_2O) เหมือนแผ่นกระจกชนิดอื่นๆ แต่มีโซดาหรือโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ในปริมาณมาก เพื่อช่วยลดอุณหภูมิการหลอมแก้ว ดังตารางที่ 2.1 การใช้งานของกระจกโซดาไลม์เป็นไปอย่างแพร่หลาย เช่น ขวดน้ำ แก้วน้ำ เป็นต้น ซึ่งเราสามารถพบเห็นได้ทั่วไป และใช้ทำกระจกแผ่น กระจกหน้าต่าง ซึ่งสามารถนำไปทำกระจกนิรภัยได้ ทั้งนี้กระจกชนิดโซดาไลม์มีคุณสมบัติเด่น คือ แข็งแรง ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย

และทนทานสามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานาน สมบัติทั่วไปของกระจกชนิดโซดาไลม์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของกระจกชนิดโซดาไลม์ [8-9]

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
Si ₂ O	72.6
SO ₃	0.2
Al ₂ O ₃	1.1
Na ₂ O	13.9
K ₂ O	0.6
MgO	3.9
CaO	8.4
Fe ₂ O ₃	0.11

ตารางที่ 2.2 สมบัติของกระจกโซดาไลม์ [9-10]

สมบัติทางกายภาพ	
ความหนาแน่น (g/cm ³)	2.5
มอดุลัสยืดหยุ่น (GPa)	72
อัตราส่วนปัวซอง (μ)	0.23
ความแข็งระดับจุลภาค (Mohr's scale)	5-6
ความต้านทานแรงดึง (MPa)	55
สมบัติทางความร้อน	
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8.3
จุดอ่อนตัว ($^{\circ}\text{C}$)	715
สมบัติทางแสง	
ดัชนีหักเห	1.52

2.2.2 แผ่นฟิล์มพีวีบี (Polyvinyl butyral, PVB)

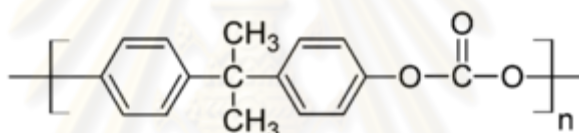
แผ่นฟิล์มพีวีบี คือ วัสดุอสัณฐานเทอร์โมพลาสติก (Amorphous thermoplastic) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของโพลีไวนิลอะซิเตต (Polyvinyl acetates, PVAC) และมีสมบัติเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น (Elastic materials) หรือมีสมบัติความยืดหยุ่นหนืด (Viscoelastic materials) พีวีบีเป็นเรซินแข็ง (Solid resin) สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ (Organic solvent) โดยสมบัติความแข็งตึง (Stiffness) สมบัติแบบยืดหยุ่น (Elastic properties) การยึดติด (Adhesion) และการดูดซับน้ำ (Water-absorbing capacity) ขึ้นอยู่กับสารเพิ่มความเหนียว (Softener) แผ่นฟิล์มพีวีบีมักถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาคารซึ่งจะมีสารเพิ่มความเหนียวในปริมาณสูงเพื่อให้แผ่นฟิล์มมีความเหนียว (Toughness) และการยืดตัว (Elongation) ที่เหมาะสม แผ่นฟิล์มพีวีบีถูกใช้ในการลามิเนตชั้นงานกระจกนิรภัย เนื่องจากมีสมบัติเหนียวและยืดหยุ่นดี ควบคุมการยึดติดได้ง่าย มีความใสเมื่อทำการยึดติดกับกระจก ด้านทานการยืดขยายได้ดีเมื่อรับแรงชนจากกระสุน ดูดซับพลังงานที่เกิดจากการชนและเสถียรต่อแสงยูวี [1, 11-12] สมบัติโดยทั่วไปของแผ่นฟิล์มพีวีบี แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของฟิล์มพีวีบี [13]

สมบัติทางกายภาพ	
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm^3)	1.07
มอดุลัสยืดหยุ่น (MPa)	11
ความต้านทานแรงดึง (MPa)	28.1
เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ 20°C	275
สมบัติทางความร้อน	
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($\times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$)	4.2
สมบัติทางแสง	
ดัชนีหักเห	1.48

2.2.3 โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate)

โพลีคาร์บอเนตเป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่มีกลุ่มคาร์บอเนต (Carbonate group) เป็นส่วนประกอบ มีโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.2 วัสดุหลักที่ใช้ผลิตโพลีคาร์บอเนต คือ Bisphenol A และ Prosgene (COCl_2) โพลีคาร์บอเนตที่ผลิตจาก Bisphenol A จะเป็นวัสดุที่มีความสามารถต้านทานต่อการกระแทกได้ดีมาก แต่มีความต้านทานต่อการขีดข่วนต่ำ จึงต้องทำการเคลือบผิวด้านหน้าของแผ่นโพลีคาร์บอเนต คุณสมบัติส่วนใหญ่คล้ายกับ Polymethyl methacrylate (PMMA) แต่มีความแข็งแรงมากกว่า และราคาแพงกว่า นอกจากนี้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความใส มีความสามารถในการมองเห็นทะลุผ่านได้ดี และแสงสามารถทะลุผ่านได้ดีกว่าแก้วบางชนิด อุณหภูมิสภาพแก้ว (Glass transition temperature) ของแผ่นโพลีคาร์บอเนตอยู่ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และมีจุดอ่อนตัวสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส สมบัติต่างๆ ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต [14] ได้แสดงดังตารางที่ 2.4



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของโพลีคาร์บอเนต [14]

ตารางที่ 2.4 สมบัติของแผ่นโพลีคาร์บอเนต [10, 15]

สมบัติทางกายภาพ	
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm^3)	1.2
มอดุลัสยืดหยุ่น (GPa)	2.35
ความต้านทานแรงดึง (MPa)	70
ความแข็ง (MPa)	95
อัตราส่วนบัวของ (μ)	0.38
สมบัติทางความร้อน	
การนำความร้อน ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	0.2
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$)	7
สมบัติทางแสง	
การส่องผ่านของแสง (%)	89
ดัชนีหักเห	1.58

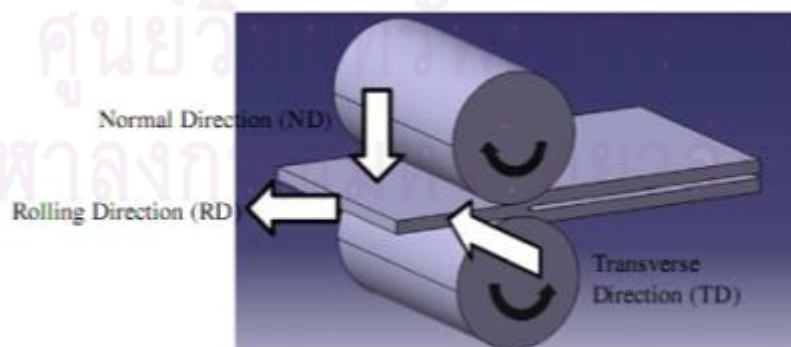
2.3 การผลิตแผ่นเกราะใส

การผลิตแผ่นเกราะใสทำโดยการอัดเรียงซ้อนแผ่นกระจกและแผ่นฟิล์มสลับกันเป็นชั้นๆ จนมีความแข็งแรงสามารถทนต่อแรงกระแทกของกระสุน กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการลามิเนต (Laminate) ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมเพื่อวัสดุให้เกิดการยึดติดกัน กระบวนการลามิเนตเป็นกระบวนการที่มีการใช้กันโดยแพร่หลาย โดยสามารถแบ่งขั้นตอนของกระบวนการลามิเนต ได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้ [7]

1. การเตรียมแผ่นฟิล์มและแผ่นกระจก
2. การประกอบแผ่นฟิล์มและแผ่นกระจก
3. การดูดเอาอากาศออกจากชิ้นงาน (De-airing) ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การอบรีด (Double-roll technique) หรือใช้เตาสุญญากาศ (Vacuum oven)

- การอบรีด (Double-roll technique)

การอบรีดเป็นกระบวนการที่ลูกกลิ้ง 2 อัน หมุนในทิศทางตรงข้ามกัน ทำการหมุนรีดชิ้นงานเพื่อให้เกิดการยึดติดกันของแผ่นกระจกและแผ่นฟิล์มโดยมีการให้ความร้อนที่เหมาะสมเพื่อให้ฟิล์มเกิดการอ่อนตัวและยึดเกาะกับแผ่นกระจก ดังแสดงในภาพที่ 2.3 การขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานลามิเนตด้วยกระบวนการนี้ ทำให้แผ่นฟิล์มติดบนผิวของแผ่นกระจกได้เป็นอย่างดี แรงที่กดของลูกกลิ้งลงบนผิวของชิ้นงานจะช่วยไล่ฟองอากาศที่เกิดในระหว่างชั้นแผ่นฟิล์มและแผ่นกระจกได้ดี



ภาพที่ 2.3 การอบรีด [16]

- เตาสุญญากาศ (Vacuum oven)

เตาสุญญากาศ คือ เตาที่ให้ความร้อนพร้อมไปกับการดูดเอาอากาศออกจนมีระดับความดันต่ำกว่าระดับบรรยากาศ ทำโดยใช้ถุงหุ้มชิ้นงานและดูดเอาอากาศออกพร้อมกับให้ความร้อนไปในเวลาเดียวกันเพื่อให้เกิดการยึดติดที่มีประสิทธิภาพ การขึ้นรูปโดยวิธีนี้จะทำให้ฟองอากาศที่อาจหลงเหลืออยู่ในชิ้นงานระหว่างแผ่นฟิล์มและแผ่นกระจกจะหลงเหลือน้อยกว่าวิธีการอบรีด แต่จะใช้ระยะเวลาและกระบวนการที่ยู้งยากกว่า โดยลักษณะของเตาสุญญากาศ ปรากฏดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 เตาสุญญากาศ [17]

4. กระบวนการผ่านหม้อนึ่งอัดไอ (Autoclave) ภายใต้ความร้อนและความดัน

- หม้อนึ่งอัดไอ (Autoclave)

หม้อนึ่งอัดไอเป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการของการต้มน้ำให้กลายเป็นไอที่สภาวะอุณหภูมิสูงถึง 121 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า เกิดเป็นความดันไอสูงในภาชนะปิดสนิท หม้อนึ่งอัดไถูกนำมาใช้งานหลากหลายยกตัวอย่าง เช่น การทดสอบการรานตัวของผลิตภัณฑ์เซรามิก [18] ในกระบวนการลามิเนตกระดาษใส่นั้น หม้อนึ่งอัดไอจะถูกใช้งานหลังจากการอบรีดหรือการใช้เตาสุญญากาศ เพื่อให้อุณหภูมิและความดันที่สูงขึ้น ทำให้แผ่นฟิล์มเกิดการยึดติดกันกับแผ่นกระจกอย่างสมบูรณ์ ลักษณะโดยรวมของหม้อนึ่งอัดไอ ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 หม้อนึ่งอัตโนมัติ [19]

2.4 การทดสอบความสามารถในการต้านทานกระสุน

การทดสอบความสามารถในการกันกระสุนของแผ่นเกราะนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นมาตรฐานสำหรับแผ่นเกราะทึบ และแผ่นเกราะใส ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเฉพาะการทดสอบแผ่นเกราะใส โดยมาตรฐานยุโรปจะกำหนดการจำแนกระดับของแผ่นเกราะ นิยามคุณลักษณะที่ต้องการ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบซึ่งครอบคลุมถึงแผ่นเกราะที่ใช้ในการป้องกันและลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุนปืน เช่น โล่กันกระสุน ป้อมยามหุ้มเกราะ ยานหุ้มเกราะ และห้องนิรภัย เป็นต้น แต่ไม่รวมถึงเสื้อเกราะ และหมวกเกราะ [20-21]

เนื่องจากมาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะใสมีมากมายหลายมาตรฐานและมีการเลือกใช้ที่แตกต่างกันในแต่ละประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 จึงจำเป็นต้องมีการอ้างอิงโดยระบุให้แน่ชัดถึงมาตรฐานที่นำมาใช้งาน

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะใส [22]

ประเทศ	มาตรฐาน
ออสเตรเลีย	Australian, AS243
อังกฤษ	British, BSI-5051
แคนาดา	Canadian, CSA 752
เยอรมนี	German, DIN52290
สหรัฐอเมริกา	USA, ASTM F1233
	USA, HPW-TP-0501
	USA, NIJ0108.01
	USA, UL 752

สำหรับมาตรฐานยุโรปกรณีกระสุนกลาโหม ว่าด้วยแผ่นเกราะกันกระสุนนั้นจะอ้างอิงมาตรฐาน NIJ เพื่อใช้สำหรับยุโรปกรณีสำหรับกองทัพไทย (แสดงเป็นตัวหนาในตารางที่ 2.5)

2.4.1 การจำแนกระดับของแผ่นเกราะ

เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน NIJ0108.01 ระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนปืนสามารถจำแนกได้เป็น 6 ระดับ ตามลำดับของระดับภัยคุกคามของกระสุน ดังตารางที่ 2.6 ดังนี้

1. แผ่นเกราะระดับ 1 เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 1 (Type : 22LR ; 38 special) ได้
2. แผ่นเกราะระดับ 2A เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 2A (Type : Lower velocity 357 magnum ; 9mm) และระดับ 1 ได้
3. แผ่นเกราะระดับ 2 เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 2 (Type : Higher velocity 357 magnum ; 9mm) และระดับ 1 และ 2A ได้
4. แผ่นเกราะระดับ 3A เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนปืนพกโดยทั่วไปได้ ซึ่งเป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 3A (Type : 44 Magnum ; High velocity 9mm) และระดับ 1 2A และ 2 ได้
5. แผ่นเกราะระดับ 3 เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนปืนเล็กยาวได้ ซึ่งเป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 3A (Type : Rifle) และระดับ 1 2A 2 และ 3A ได้

6. แผ่นเกราะระดับ 4 เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนปืนเล็กยาวชนิดเจาะเกราะได้ ซึ่งเป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 4 (Type : Armor-piercing rifle) และระดับ 1 2A 2 3A และ 3 ได้

ในกรณีที่ผู้ใช้ต้องการแผ่นเกราะพิเศษ (Special type) ที่มีความสามารถในการกันกระสุนที่นอกเหนือไปจากที่กล่าวไว้ข้างต้น ผู้ใช้จำเป็นต้องกำหนดขนาดและชนิดของกระสุนที่ใช้ในการทดสอบกับความเร็วขั้นต่ำของกระสุนที่แผ่นเกราะจะสามารถเผชิญได้

ตารางที่ 2.6 การจำแนกระดับของการทดสอบยิง [20]

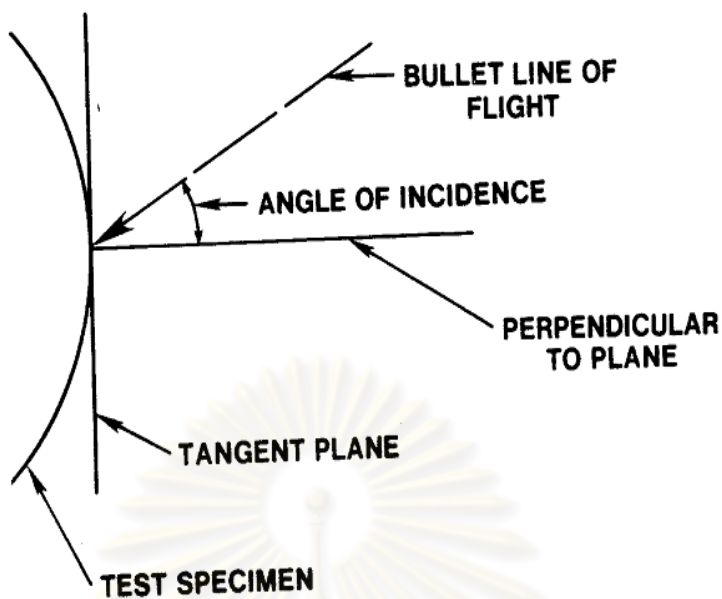
ระดับของแผ่นเกราะ	กระสุน	น้ำหนักกระสุน (กรัม)	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)
1	22 LRHV	2.6	320 ± 12
	38 special	10.2	259 ± 15
2A	357 magnum	10.2	381 ± 15
	9 mm	8	332 ± 12
2	357 magnum	10.2	425 ± 15
	9 mm	8	358 ± 12
3A	.44 magnum	15.55	426 ± 15
	9 mm	8	426 ± 15
3	7.62 mm	9.7	838 ± 15
4	30-06	10.8	868 ± 15

ในงานวิจัยในครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาแผ่นเกราะที่มีความสามารถในการป้องกันกระสุนที่ระดับ 3A กระสุน .44 magnum ความเร็ว 426 ± 15 เมตรต่อวินาที

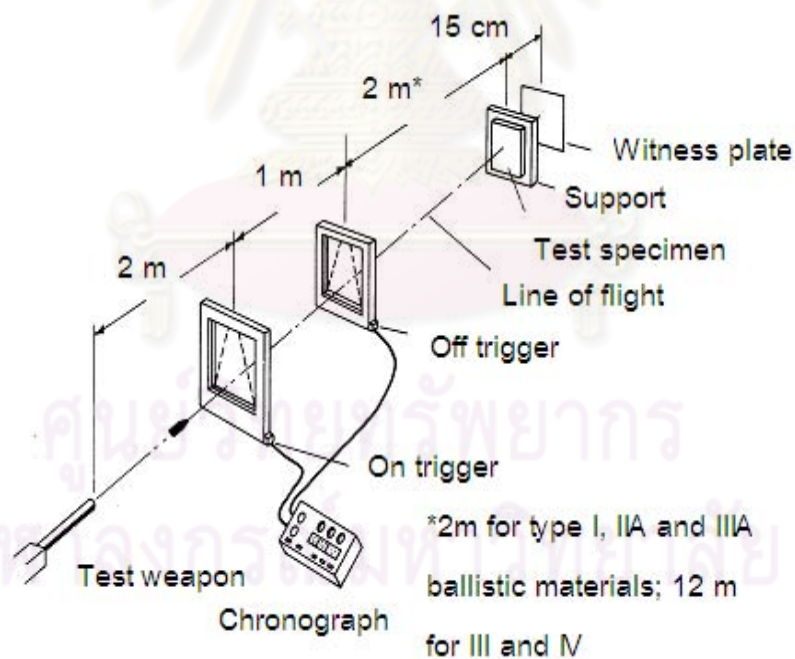
2.4.2 บทนิยาม

- มุมตกกระทบ (Angle of incidence)

มุมตกกระทบของวิถีกระสุนที่ตกกระทบบนแผ่นเกราะต้องไม่กว้างไปกว่า 5 องศา ดังภาพที่ 2.6 และระยะระหว่างของปากกระบอกปืนกับแผ่นเกราะในการทดสอบยิงจะต้องอยู่ห่างจากกัน 5 เมตร ดังรายละเอียดแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.6 มุมตกกระทบของวิถีกระสุน [20]



ภาพที่ 2.7 ระยะห่างของปากกระบอกปืนและแผ่นเกราะ [20]

2. แผ่นพยาน (Witness plate)

แผ่นพยาน หมายถึง แผ่นโลหะที่ใช้เป็นวัตถุพยานในการพิสูจน์ผลการยิงทะลุผ่านเกราะ แผ่นพยานนี้ควรทำด้วยโลหะอลูมิเนียมอัลลอยชนิด 2024-T3 หรือ 2024-T4 ที่มีความหนา 0.5

มิลลิเมตร ยึดตรึงไว้ด้านหลังของเกราะที่จะทดสอบโดยอยู่ห่างจากชิ้นงานเกราะ 15 เซนติเมตร และจัดวางในแนวตั้งฉากกับวิถีกระสุน ทั้งนี้แผ่นพยานต้องมีขนาดอย่างน้อย 12 x 12 ตารางนิ้ว (305 x 305 ตารางมิลลิเมตร)

3. การทะลุผ่าน

การทะลุผ่าน หมายถึง การที่กระสุนเจาะทะลุผ่านเกราะแล้วปรากฏว่ามีเศษชิ้นส่วนของกระสุนหรือเศษชิ้นส่วนของเกราะเจาะทะลุผ่านแผ่นพยานด้วย ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ด้วยการมองเห็นแสงที่ลอดผ่านรอยทะลุบนแผ่นพยานนั้น เมื่อนำหลอดไฟฟ้าขนาด 60 วัตต์ส่องผ่านแผ่นพยาน

4. ระยะห่างของรอยยิง

ระยะห่างของรอยยิง หมายถึง ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของจุดที่ยิงบนแผ่นเกราะไปถึงจุดศูนย์กลางของจุดที่ยิงจุดอื่นบนเกราะนั้น หรือไปถึงริมขอบของเกราะนั้น กำหนดระยะห่างของรอยยิงปกติ ควรมีระยะห่างจากกันเอง และห่างจากขอบเกราะไม่น้อยกว่า 2 นิ้ว

5. นัดที่ยิงผ่านเกณฑ์

นัดที่ยิงผ่านเกณฑ์ หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.6 ซึ่งจำเป็นต้องเกิดขึ้นจากการยิงด้วยความเร็วกระสุนตามที่กำหนดหรือสูงกว่าที่กำหนดแล้วไม่เกิดการทะลุผ่าน

6. นัดที่ยิงไม่ผ่านเกณฑ์

นัดที่ยิงไม่ผ่านเกณฑ์ หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.6 ซึ่งจำเป็นต้องเกิดขึ้นจากกรณีที่ยิงด้วยความเร็วกระสุนตามที่กำหนดหรือต่ำกว่าที่กำหนด และมีระยะห่างของรอยยิง (ทั้งห่างจากกัน และห่างจากขอบเกราะ) ได้ระยะตามกำหนดแล้วเกิดการทะลุผ่าน

2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับแฟรกเมนเทชัน

2.5.1 กลไกของแฟรกเมนเทชันพลศาสตร์ (Dynamic fragmentation)

การศึกษาเกี่ยวกับกลไกของแฟรกเมนเทชันพลศาสตร์ เพื่อกำหนดขนาดของแฟรกเมน (Fragment size) ที่เกิดจากกระบวนการแฟรกเมนเทชันนั้น มีทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ [23]

1. หลักการของจุดบกพร่องในตัว (Inherent flaw concepts)

จุดบกพร่องที่อยู่ในชิ้นงานเปรียบเสมือนกับเป็นจุดด้อยในชิ้นงาน เป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการแตกหักภายใน (Internal fracture) ชิ้นงานได้ สำหรับวัสดุพหุผลึกแบบเปราะ (Brittle polycrystalline materials) นั้นหากมีการเกิดรอยแตกระดับจุลภาค (Microcracks) ช่องว่าง (Voids) และความไม่สมบูรณ์อื่นๆ ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกหักภายในได้ ส่วนวัสดุประเภทแก้ว (Glass) การเกิดการแตกภายในอาจมีสาเหตุมาจาก สารมลทิน (Impurities) ดิสโลเคชัน (Dislocations) และการผันผวนของอุณหภูมิ (Thermal fluctuations) โดยค่าความเค้นแรงดึง (Tensile stress) ตรงตำแหน่งที่เริ่มเกิดการแตกหักจากจุดบกพร่องขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุ (Material properties) รูปร่างของจุดบกพร่อง (Geometry of flaw) และขนาดของจุดบกพร่อง (Size of flaw) โดยจำนวนของจุดบกพร่องที่เกิดในชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเค้นแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งสองตัวแปรเป็นไปตามดัชนียกกำลัง (Power law) ดังสมการที่ 2.1

$$N = k\sigma^m \quad (2.1)$$

โดยที่	N	คือ จำนวนจุดบกพร่อง
	σ	คือ ความเค้นแรงดึง
	k	คือ ค่าคงที่

และเมื่อมีแรงมากกระทำต่อวัสดุอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นความเค้นการแตกหักแบบแรงดึง (Tensile fracture stress, σ_c) ขนาดของแฟรกเมน (Fragment size) จะสามารถประมาณค่าได้ ดังสมการที่ 2.2

$$d \sim N(\sigma_c)^{-1/3} = k^{-1/3}\sigma_c^{-1/3} \quad (2.2)$$

โดยที่	d	คือ ขนาดแฟรกเมน
--------	-----	-----------------

ซึ่งมีสมการที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

$$\sigma_c = E\varepsilon' t_f \quad (2.3)$$

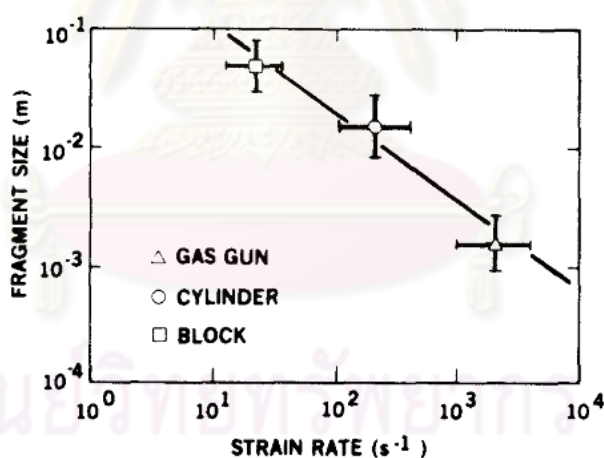
โดยที่	E	คือ มอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus)
	ε'	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain rate)

t_f คือ เวลาในการเกิดการแตกหัก (Time to fracture)

$$t_f \sim d/c_g \quad (2.4)$$

โดยที่ c_g คือ ความเร็วการแตกหัก (Fracture velocity)

การแตกแบบเปราะ (Brittle Fracture) จะขึ้นอยู่กับอัตราแรงกด (Loading rate) Grady และ Kipp [1985] ได้ทำการศึกษาเรื่องนี้ และพบว่าหากเป็นอัตราแรงกดที่เกิดขึ้นอย่างช้า การเพิ่มขึ้นของความเค้นแรงดึงจะมีค่าต่ำ จำนวนจุดบกพร่องที่ถูกกระตุ้นน้อย ระยะทางการขยายของการแตกหักสูง ทำให้เกิดแฟรกเมนต์ขนาดใหญ่ ซึ่งตรงข้ามกับการแตกของชิ้นงานแผ่นเกราะที่เกิดแรงปะทะอย่างรุนแรง อัตราแรงกดที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้การเพิ่มขึ้นของความเค้นแรงดึงจะมีค่าสูง จำนวนจุดบกพร่องที่ถูกกระตุ้นมาก ระยะทางการขยายของการแตกหักต่ำ ทำให้เกิดแฟรกเมนต์ขนาดเล็ก ดังภาพที่ 2.8 เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ขนาดของแฟรกเมนต์มีค่าลดลง [23]



ภาพที่ 2.8 ขนาดของแฟรกเมนต์เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเปลี่ยนไป [23]

2. หลักการสมดุลพลังงาน (Energy balance concepts)

พลังงานที่สำคัญที่เกิดขึ้นจากการที่กระสุนปะทะแผ่นเกราะและอย่างรุนแรง คือ พลังงานจลน์ ผลจากการปะทะดังกล่าวทำให้เกิดการแตกของชิ้นงาน เราสามารถใช้หลักการสมดุลพลังงาน (Energy balance) มาอธิบายเรื่องนี้ โดยพิจารณาว่าแรงจากกระสุนที่พุ่งปะทะแผ่นเกราะจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่ใช้ในการสร้างรอยแตกบนแผ่นเกราะและความสามารถในการต้านทานกระสุนของเกราะ สามารถพิจารณาได้จากปริมาณการเกิดพื้นที่ผิวใหม่ (New surface

area) นั่นคือ ค่าพลังงานที่ทำให้เกิดแฟรกเมนต์สามารถคำนวณได้จากขนาดแฟรกเมนต์ที่เกิดขึ้น โดยค่าพลังงานจลน์ที่ศูนย์กลางของมวล (Center of mass) สำหรับรูปทรงกลมเดี่ยว (Single sphere) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$T' = \frac{2\pi}{45} \frac{\rho \cdot^2}{\rho} a^5 \quad (2.5)$$

โดยที่ T' คือ ค่าพลังงานจลน์ศูนย์กลางของมวลสำหรับรูปทรงกลมเดี่ยว
 $\rho \cdot$ คือ อัตราความหนาแน่น (Density rate)
 a คือ รัศมีของมวลรูปทรงกลม (Spherical mass)

จากสมการที่ 2.5 จะได้ค่าพื้นที่ผิวของแฟรกเมนต์ (Fragment surface area) ดังสมการที่ 2.6

$$A = (3\rho \cdot^2 / 5\rho\gamma)^{1/3} \quad (2.6)$$

โดยที่ A คือ ค่าพื้นที่ผิวของแฟรกเมนต์
 ρ คือ ความหนาแน่น (Density)
 γ คือ พลังงานการเกิดพื้นที่ผิวของแฟรกเมนต์ (Energy of fragment surface area)

เพื่อให้แฟรกเมนต์เศษชิ้นพลศาสตร์มีความหลากหลายและสามารถใช้ได้กับการทดลองได้ หลากหลายตัวอย่าง จึงนิยมที่จะเสนอในรูปของค่าขนาดแฟรกเมนต์มากกว่าค่าพื้นที่ผิว โดยการตั้งสมมติฐานว่าแฟรกเมนต์มีรูปร่างเป็นทรงกลม ดังสมการที่ 2.7

$$d = 6/A \quad (2.7)$$

สำหรับการแตกแบบเปราะ เราสามารถพิจารณาความสามารถในการต้านทานต่อการแตกได้จากความเหนียว (Toughness) ซึ่งสัมพันธ์กันกับค่าขนาดแฟรกเมนต์ ดังสมการที่ 2.8-2.10

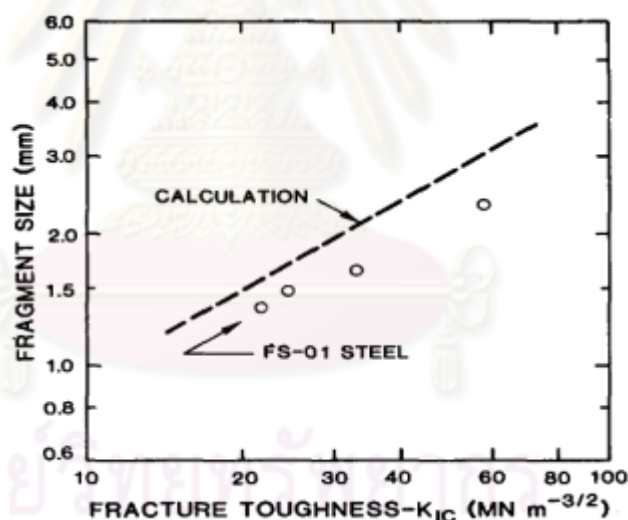
$$\gamma = K_{1c}^2 / 2\rho c_l^2 \quad (2.8)$$

$$\varepsilon' = \rho \cdot / 3\rho \quad (2.9)$$

$$d = \left(\frac{\sqrt{20}K_{1c}}{\rho c_l \varepsilon'} \right)^{2/3} \quad (2.10)$$

โดย	d	คือ ค่าขนาดอนุภาค
	K_{1c}	คือ ค่าความเหนียว
	ρ	คือ ค่าความหนาแน่น
	c_l	คือ ค่าความเร็วของคลื่น (wave speed)

จากสมการที่ 2.10 พบว่าความเหนียวจะมีค่าแปรผันตามกับขนาดแฟรกเมนต์ที่หลุดออกจากชิ้นงาน ผลการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 2.9 [23] งานวิจัยในรายงานนี้มุ่งเน้นศึกษาขนาดของแฟรกเมนต์ที่หลุดออกจากชิ้นงานแผ่นเกราะเพื่อพิจารณาแนวโน้มของความเหนียวของชิ้นงาน



ภาพที่ 2.9 ค่าความเหนียวเปรียบเทียบกับค่าขนาดแฟรกเมนต์ที่เปลี่ยนไป [23]

2.5.2 กระบวนการแตกหักและแฟรกเมนต์ของวัสดุเปราะ (Fracture process and fragmentation of brittle materials)

กระบวนการแตกหักและแฟรกเมนต์ของวัสดุเปราะ เช่น หิน เซรามิก โลหะแข็ง เป็นต้น มีแรงผลักดัน (Driving force) ของการเกิดการแตกหัก คือ พลังงานที่เกิดจากการชนของกระสุน ซึ่งเราสามารถลำดับแยกกระบวนการดังกล่าวได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ [24-25]

1. ขั้นแรก

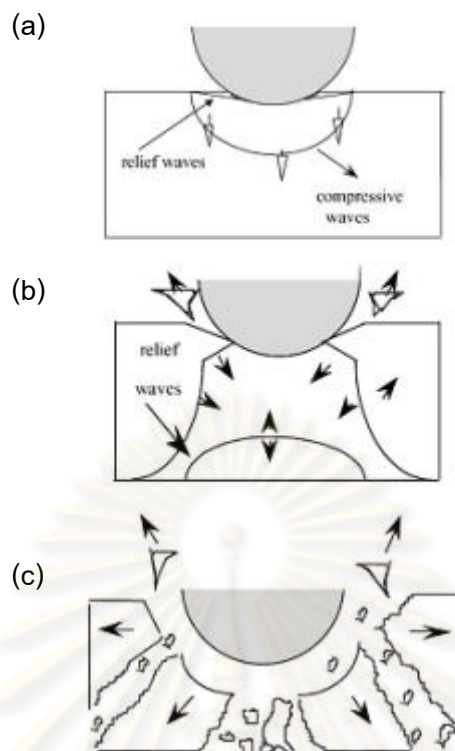
เมื่อเกิดการชนอย่างรุนแรงของแผ่นเกราะและกระสุนจะทำให้เกิดปริมาตรของการชน (Volume of contact) เกิดขึ้นด้านหลังตรงตำแหน่งของการชน และทำให้เกิดการขยายตัวของคลื่นความเค้นของการอัด (Compressive stress wave) ดังภาพที่ 2.10 (a) และในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนของการเกิดรอยแตก (Crack nucleation) จำนวนของรอยแตก (Number of crack) ที่จะขึ้นอยู่กับปริมาณความบกพร่องภายในชิ้นงานวัสดุ อัตราแรงกด และความทนทานต่อแรงผลักดัน หรือพลังงานที่เกิดจากการชนนั่นเอง

2. ขั้นที่สอง

จะเกิดคลื่นบรรเทา (Relief waves) ซึ่งเป็นคลื่นที่เกิดจากการสะท้อนจากพื้นผิวอิสระ (Free surface) ทำให้การเคลื่อนที่ของกระสุนไปยังแผ่นเกราะนั้นมีค่าความเร็วที่ลดลง ดังภาพที่ 2.10 (b) ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการเติบโตของรอยแตก (Crack growth) รอยแตกจะเติบโตจนกระทั่งค่าความรุนแรงของความเค้น (Stress intensity) ตรงตำแหน่งปลายของรอยแตกมีค่าต่ำกว่าที่ระดับวิกฤต (Critical level) และวิถีของรอยแตก (Crack path) ในวัสดุเปราะจะสามารถควบคุมโดยค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Maximum tensile stress) ซึ่งถ้าหากมีพลังงานเหลือเพียงพอตรงตำแหน่งปลายของรอยแตกก็จะทำให้เกิดการแตกกิ่ง (Branching) ซึ่งการเกิดการแตกกิ่งจะมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของขนาด และรูปร่างของแฟรกเมน

3. ขั้นสุดท้าย

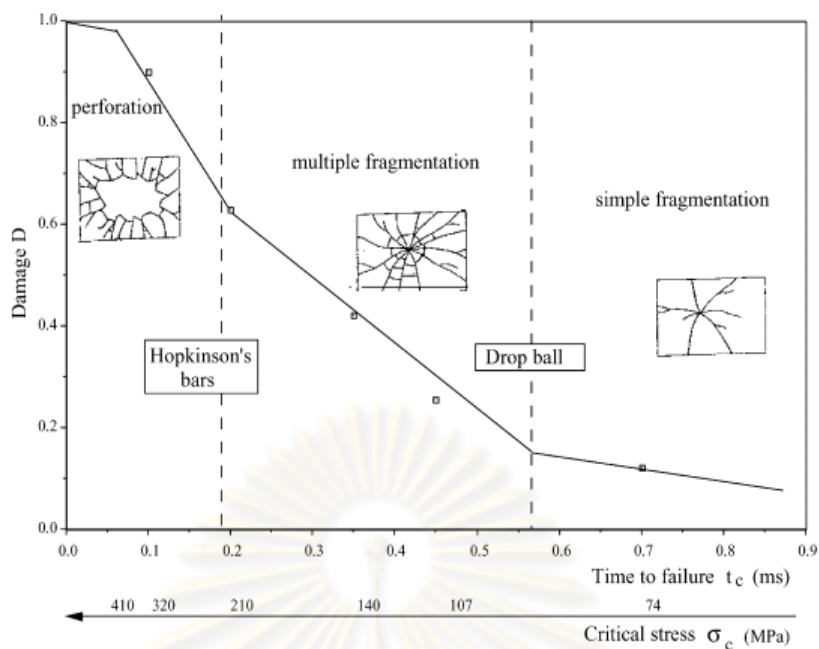
หลังจากเกิดการชนของกระสุนและแผ่นเกราะแล้วก็จะทำให้เกิดแฟรกเมนจากปฏิกิริยาของคลื่นบรรเทา ดังภาพที่ 2.10 (c) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการรวมตัวของรอยแตก (Crack coalescence) ผลที่ได้จะกำหนดจำนวน ขนาด และรูปร่างของแฟรกเมน เมื่อพิจารณารอยแตก 2 รอย หากรอยแตกที่เกิดขึ้นมาชนกันก็จะเกิดการรวมตัวกัน หรือหากรอยแตกที่เกิดขึ้นมีทิศทางชนกันอาจมีการเบี่ยงทิศทางและเกิดการรวมตัวในภายหลัง



ภาพที่ 2.10 กระบวนการแตกของวัสดุเปราะ [24]

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงความเสียหายของชิ้นงานแผ่นเกราะที่เตรียมจากวัสดุแก้วซึ่งเป็นวัสดุประเภทวัสดุเปราะ กระบวนการเกิดแฟรกเมนจะสอดคล้องกับการกระบวนการแตกดังภาพที่ 2.10 รอยแตกที่เกิดขึ้นบนแผ่นหน้าของชิ้นงานเกราะใส่ภายหลังการทดสอบยังมีพฤติกรรมดังแสดงในภาพที่ 2.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.11 แผนผังแสดงขั้นตอนของการเสียหาย [24]

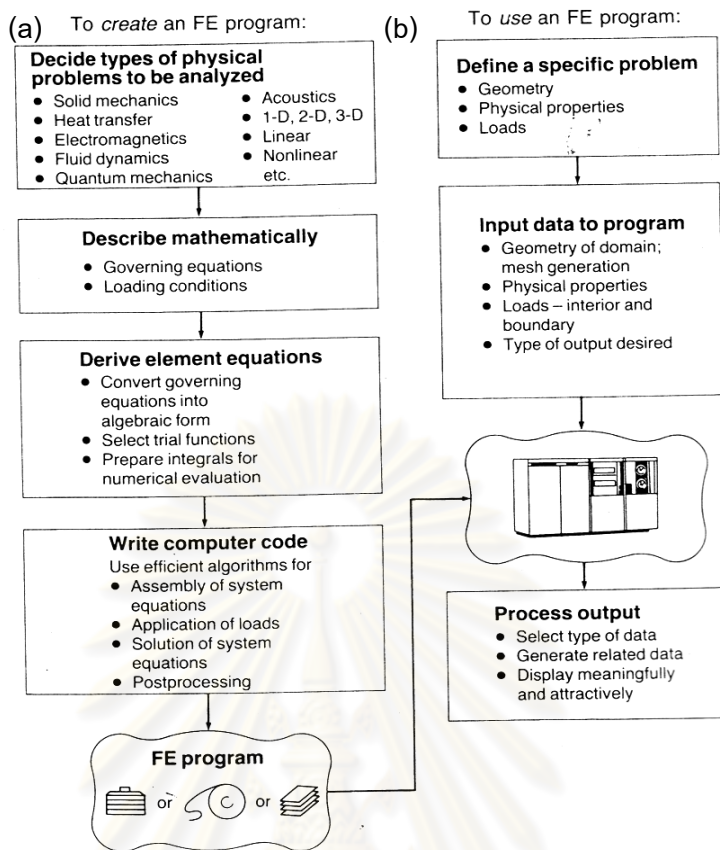
2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element)

ไฟไนต์เอลิเมนต์ คือเทคนิคทางคอมพิวเตอร์สำหรับประมาณวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข (Numerical solution) เพื่อสรุปสมการของแคลคูลัส (Equations of calculus) ซึ่งสามารถทำนายการตอบสนองของระบบทางฟิสิกส์ (Physical systems) ภายใต้อิทธิพลภายนอกได้ การใช้งานของไฟไนต์เอลิเมนต์มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งทางด้านสาขาวิศวกรรม วิทยาศาสตร์ และคณิตศาสตร์ [26] นอกจากนี้ประโยชน์ของไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถวิเคราะห์ความเสียหายและความเค้นที่เกิดขึ้นในยานยนต์ การบิน อาคาร และโครงสร้างสะพาน [27]

การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสร้างได้ทั้งการสร้างโปรแกรมขึ้นเอง ดังภาพที่ 2.12 (a) และการสร้างด้วยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งมีขั้นตอนของกระบวนการดังภาพที่ 2.12 (b) โดยมีขั้นตอนหลัก ดังนี้ [26]

1. กำหนดปัญหาโดยเฉพาะเจาะจง (Define a specific problem) โดยมีขั้นตอน ดังนี้
 - การสร้างรูปร่างเรขาคณิต (Geometry) คือ การสร้างแบบจำลองของชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการ
 - สมบัติทางฟิสิกส์ (Physical properties) คือ การใส่ข้อมูลสมบัติของวัสดุในแบบจำลองของชิ้นงานตัวอย่าง
 - แรง (Loads) คือ แรงที่กระทำต่อชิ้นงานในแบบจำลอง

- ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis step) คือ ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลอง เป็นขั้นตอนของการใส่รายละเอียดของการวิเคราะห์แบบจำลอง เช่น แรงกด ความเร็ว ระยะทาง เป็นต้น ที่กระทำกับรูปร่างของแบบจำลองที่สร้างขึ้น
2. การป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม (Input data to program) โดยมีขั้นตอน ดังนี้
- การสร้างเมช (Mesh generation) คือ การแบ่งช่องแบบจำลองของชิ้นงาน ตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับการคำนวณ
 - สมบัติทางฟิสิกส์ (Physical properties) คือ การใส่ข้อมูลสมบัติของวัสดุในแบบจำลองของชิ้นงานตัวอย่าง
 - การกำหนดขอบเขต (Boundary condition) คือ การใส่ขอบเขตของการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง
3. กระบวนการแสดงผล (Process output) คือ การแสดงและแปลความของผลจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์
- เลือกประเภทของข้อมูล (Select type of data)
 - สร้างข้อมูลที่สัมพันธ์กัน (Generate related data)
 - แสดงผลอย่างมีความหมายและอย่างน่าดึงดูดใจ (Display meaningfully and attractively)

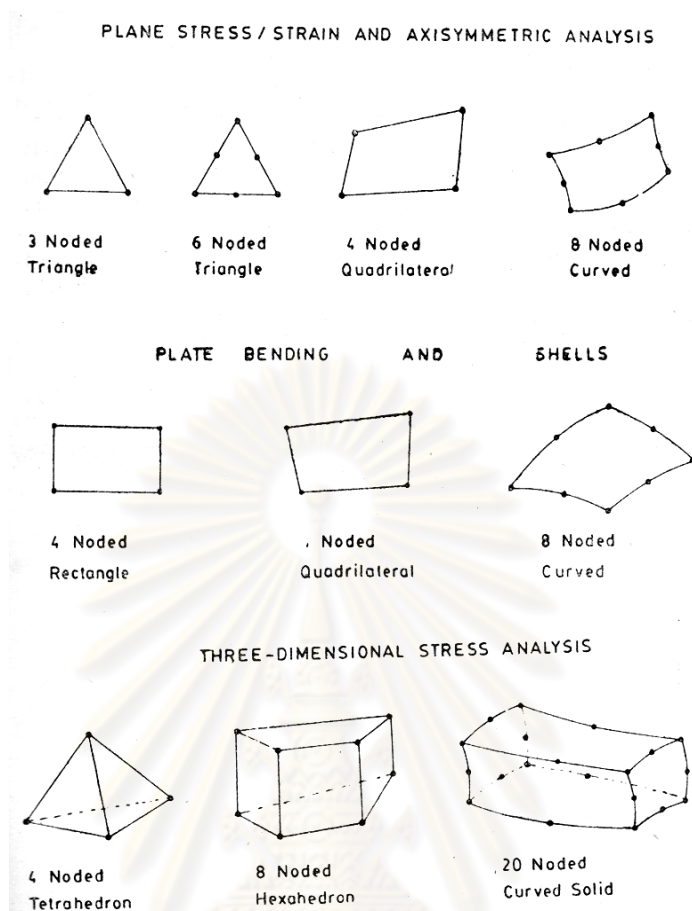


ภาพที่ 2.12 แผนผังแสดงขั้นตอนของไฟไนต์เอลิเมนต์ [26]

2.6.1 การสร้างเมช (Mesh generation)

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้การแก้ปัญหาอย่างเหมาะสมของสมการนั้น จะมีขั้นตอนที่สำคัญ คือ การแบ่งรูปร่างเรขาคณิตของแบบจำลองออกเป็นช่องเล็กๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งในรูปร่างเรขาคณิตจะประกอบไปด้วยเอลิเมนต์จำนวนมากมาเรียงต่อกัน ซึ่งการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะคำนวณในแต่ละเอลิเมนต์ที่ทำการแบ่งในรูปร่างเรขาคณิต และรวบรวมผลที่ได้จากแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันต่อไป โดยการเชื่อมต่อกันของแต่ละเอลิเมนต์ จะเชื่อมต่อกันตรงตำแหน่งที่เรียกว่า จุด (Node) [28]

การแบ่งรูปร่างเรขาคณิต โดยเอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นในไฟไนต์เอลิเมนต์มีหลากหลายรูปแบบ เช่น สี่เหลี่ยม (Rectangle) และสามเหลี่ยม (Triangle) ดังภาพที่ 2.13 โดยจะแบ่งเอลิเมนต์ของการวิเคราะห์แบบ Plane stress/ strain และ Axisymmetric และการวิเคราะห์ความเค้นในสามมิติ (Three-dimensional stress analysis) โดยในงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติด้วยการวิเคราะห์แบบ Axisymmetric และใช้การแบ่งรูปร่างเรขาคณิตโดยใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม



ภาพที่ 2.13 เอเลเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์ [29]

2.6.2 ความสัมพันธ์ของสมบัติเนื่องจากโครงสร้าง (Constitutive relations)

การวิเคราะห์ความเสียหายของแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์จำเป็นต้องวิเคราะห์สมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันของวัสดุแต่ละชนิด จึงจำเป็นต้องเลือกใช้สมบัติของโครงสร้างที่เหมาะสมกับวัสดุที่นำมาวิเคราะห์ในแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ ดังภาพที่ 2.14

Material model	Characteristics	Examples
Elastic, linear or nonlinear	Stress is a function of strain only; same stress path on unloading as on loading. ${}^t\sigma_{ij} = {}^tC_{ijrs} {}^t\epsilon_{rs}$ linear elastic: ${}^tC_{ijrs} \text{ is constant}$ nonlinear elastic: ${}^tC_{ijrs} \text{ varies as a function of strain}$	Almost all materials provided the stresses are small enough: steels, cast iron, glass, rock, wood, and so on, before yielding or fracture
Hyperelastic	Stress is calculated from a strain energy functional W , $\delta S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \delta \epsilon_{ij}}$	Rubberlike materials, e.g., Mooney-Rivlin and Ogden models
Hypoelastic	Stress increments are calculated from strain increments $d\sigma_{ij} = C_{ijrs} d\epsilon_{rs}$ The material moduli C_{ijrs} are defined as functions of stress, strain, fracture criteria, loading and unloading parameters, maximum strains reached, and so on.	Concrete models (see, for example, K. J. Bathe, J. Walczak, A. Welch, and N. Mistry [A])
Elastoplastic	Linear elastic behavior until yield, use of yield condition, flow rule, and hardening rule to calculate stress and plastic strain increments; plastic strain increments are instantaneous.	Metals, soils, rocks, when subjected to high stresses
Creep	Time effect of increasing strains under constant load, or decreasing stress under constant deformations; creep strain increments are noninstantaneous.	Metals at high temperatures
Viscoplasticity	Time-dependent inelastic strains; rate effects are included.	Polymers, metals

ภาพที่ 2.14 สรุปหลักการของวัสดุแต่ละชนิด [30]

โดยที่ σ คือ ความเค้น
 e คือ ความเครียด

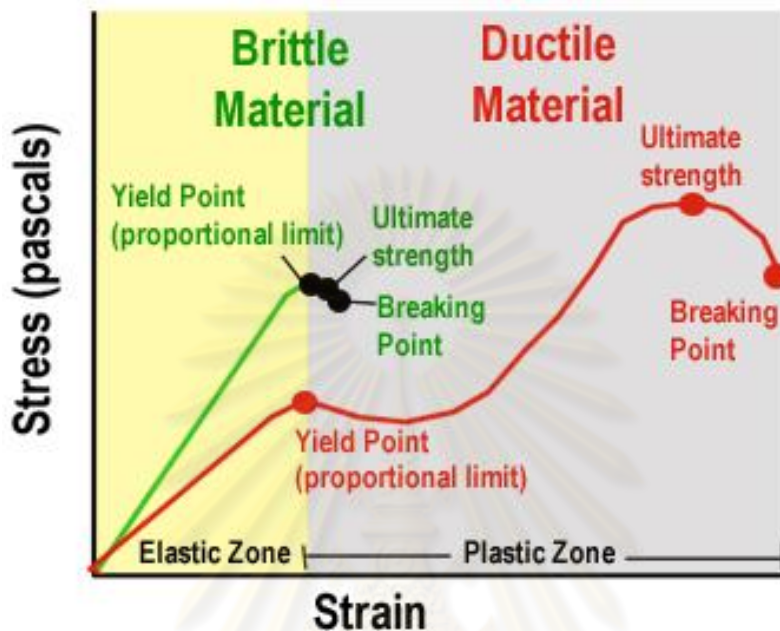
2.6.2.1 พฤติกรรมของวัสดุยืดหยุ่น (Elastic material behavior)

หลักการสำคัญและการใช้อย่างแพร่หลายของวัสดุยืดหยุ่น ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง ซึ่งอธิบายโดยช่วงกราฟ ความเค้น-ความเครียดในช่วงเส้นตรง (Linear) ดังกฎเชิงเส้นของฮุก โดยนัยทั่วไป (Generalized hook's law) ดังภาพที่ 2.15 ซึ่งได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงยืดหยุ่น ดังสมการที่ 2.11 [30]

$${}^tS_{ij} = {}^tC_{ijrs} {}^t\epsilon_{rs} \quad (2.11)$$

โดยที่ ${}^tS_{ij}$ คือ ค่าความเค้น Piola-Kirchhoff

${}^t\varepsilon_{rs}$ คือ ค่าความเครียด Green Lagrange
 ${}^tC_{ijrs}$ คือ เทนเซอร์ค่าคงที่สภาพยืดหยุ่น (Constant elasticity tensor)



ภาพที่ 2.15 กราฟความเค้น-ความเครียด [31]

เมื่อพิจารณาสถานะความเค้นในสามมิติสำหรับวัสดุแบบยืดหยุ่น ซึ่งสัมพันธ์กับค่ามอดุลัสของยัง (E) และอัตราส่วนปัวซอง (ν)

$${}^tC_{ijrs} = \lambda \delta_{ij} + \mu (\delta_{ir} \delta_{js} + \delta_{is} \delta_{jr}) \tag{2.12}$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} ; \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{2.13}$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0; & i \neq j \\ 1; & i = j \end{cases}$$

โดยที่ λ คือ ค่าคงที่ Lamé
 μ คือ ค่าคงที่ Lamé
 δ_{ij} คือ Kronecker delta

2.6.2.2 พฤติกรรมของวัสดุพลาสติก (Plastic material behavior)

วัสดุแบบพลาสติก เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติความเสียหายอยู่ในช่วงพลาสติก (Plastic zone) ดังภาพที่ 2.15 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

1. วัสดุที่มีคุณสมบัติแบบไม่ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain rate independent materials)

วัสดุประเภทนี้เป็นวัสดุที่ไม่ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain rate) สมบัติของวัสดุเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ อีลาสติก (Elastic) และ พลาสติก (Plastic) ดังสมการที่ 2.14

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{el} + \varepsilon_{ij}^{pl} \quad (2.14)$$

โดยที่ ε_{ij} คือ ความเครียดรวม
 ε_{ij}^{el} คือ ความเครียดยืดหยุ่น
 ε_{ij}^{pl} คือ ความเครียดพลาสติก

2. วัสดุที่มีคุณสมบัติแบบขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain rate dependent materials)

วัสดุประเภทนี้เป็นวัสดุที่มีสมบัติขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด เช่น โลหะ และพลาสติกชนิดโพลีคาร์บอเนต

2.6.3 ความสัมพันธ์ของสมบัติเนื่องจากโครงสร้างของกระจกชนิดโซดาไลม์

สำหรับการสร้างแบบจำลองของชิ้นงานแผ่นกระจกชนิดโซดาไลม์ของแผ่นกระจกกันกระสุนจะใช้สมการความสัมพันธ์เนื่องจากโครงสร้างของแบบจำลอง Johnson-Holmquist (JH-2) ซึ่งได้กำหนดสมการความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุเพราะเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งแสดงพฤติกรรมที่ความเครียดสูง อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดสูง และความดันสูง ซึ่งได้กำหนดสมการเพื่อหาค่าคงที่ของสมการแบบจำลอง JH-2 ดังนี้ [32]

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (2.15)$$

โดยที่	σ^*	คือ ความเค้นสมมูลแบบบรรทัดฐาน (Normalized equivalent stress) ซึ่งอยู่ในรูป $\sigma^* = \sigma / \sigma_{HEL}$
	σ_i^*	คือ ความแข็งแรงที่ไม่เสียหายแบบบรรทัดฐาน (Normalized intact strength)
	σ_f^*	คือ ความแข็งแรงการแตกหักแบบบรรทัดฐาน (Normalized fractured strength)
	D	คือ ความเสียหาย (Damage) มีค่า $0 \leq D \leq 1.0$
	σ_{HEL}	คือ ความเค้นสมมูลที่ Hugoniot Elastic limit (HEL)

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2.16)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2.17)$$

โดยที่	A, B, C, M และ N	คือ ค่าคงที่
	$SFMAX$	คือ ตัวแปรความแข็งแรงการแตกหักทางเลือก (Optional fracture strength parameter) ซึ่ง $\sigma_f^* \leq SFMAX$
	P^*	คือ ความดันแบบบรรทัดฐาน (Normalized pressure)
	T^*	คือ ความดันอุทกสถิตแรงดึงสูงสุด (Maximum tensile hydrostatic pressure)
	$\dot{\epsilon}^*$	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดแบบไร้มิติ (Dimensionless strain rate)

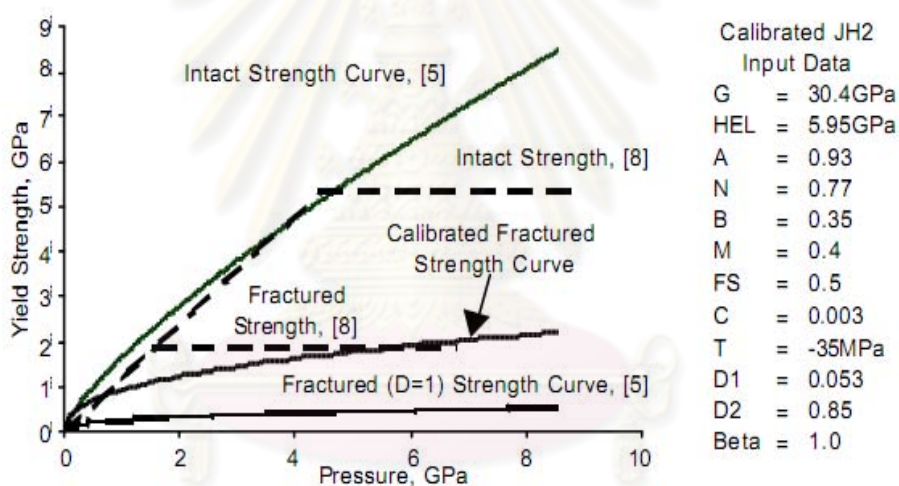
$$D = \frac{\sum \Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^f} \quad (2.18)$$

$$\epsilon_p^f = D1(P^* + T^*)^{D2} \quad (2.19)$$

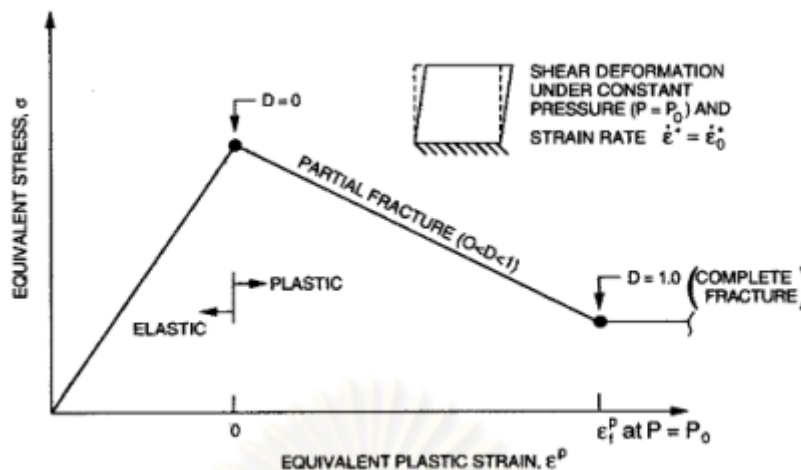
$$P = K1 \cdot \mu + K2 \cdot \mu^2 + K3 \cdot \mu^3 + \Delta P \quad (2.20)$$

โดยที่ $\Delta \epsilon_p$	คือ ความเครียดพลาสติกในระหว่างการอินทิเกรต
ϵ_p^f	คือ ความเครียดพลาสติกของการแตกหักภายใต้ความดันคงที่
$D1$ และ $D2$	คือ ค่าคงที่
$K1, K2$ และ $K3$	คือ ค่าคงที่ ซึ่ง K คือ มอดุลัสเชิงปริมาตรแบบยืดหยุ่น (Elastic bulk modulus)
μ	คือ ρ/ρ_0

จากสมการที่ 2.15–2.20 ทำให้สามารถได้ข้อมูลของค่าคงที่ต่างๆ ของ Johnson-Holmquist สำหรับแผ่นกระจกโซดาไลม์ ดังภาพที่ 2.16 และแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้น-ความเครียด ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.16 ข้อมูลจาก Johnson-Holmquist สำหรับแผ่นกระจกโซดาไลม์ [33]



ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของแผ่นกระจกโซดาไลม์ [34]

2.6.4 ความสัมพันธ์ของสมบัติเนื่องจากโครงสร้างของกระจก

ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้การทดสอบการยิงตามมาตรฐาน NIJ ที่ระดับ 3A กระจก .44 magnum ซึ่งเป็นวัสดุตะกั่ว (Lead) และใช้สมการความสัมพันธ์เนื่องจากโครงสร้างแบบออสติค-พลาสติก ของแบบจำลอง Streinberg-Guinan โดยได้อธิบายความสัมพันธ์ของความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดพลาสติกเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่า การเพิ่มความแข็งแรงด้วยการแปรรูป (Work hardening) และความสัมพันธ์ของมอดุลัสเฉือน (Shear modulus) โดยทั้งค่าความแข็งแรง ณ จุดครากและมอดุลัสเฉือนจะขึ้นกับอุณหภูมิและความดันที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดสูง ดังสมการที่ 2.21–2.24 [35] และจากการศึกษาของ Streinberg-Guinan สามารถสรุปค่าคงที่ของโลหะ 14 ชนิด ซึ่งรวมถึงวัสดุตะกั่วเพื่อใช้สร้างแบบจำลองสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.18

$$G = G_0 \left[1 + \left(\frac{G'_P}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right] \quad (2.21)$$

$$Y = Y_0 [1 + \beta(\epsilon + \epsilon_i)]^n \times \left[1 + \left(\frac{Y'_P}{Y_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{Y'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right] \quad (2.22)$$

$$Y_0 [1 + \beta(\epsilon + \epsilon_i)]^n \leq Y_{max} \quad (2.23)$$

$$E_c(\eta) = \int_1^{\eta} P(\eta) \frac{dn}{\eta^2} - 300C \exp \left[a \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \right] \eta^{\gamma_0 - a} \quad (2.24)$$

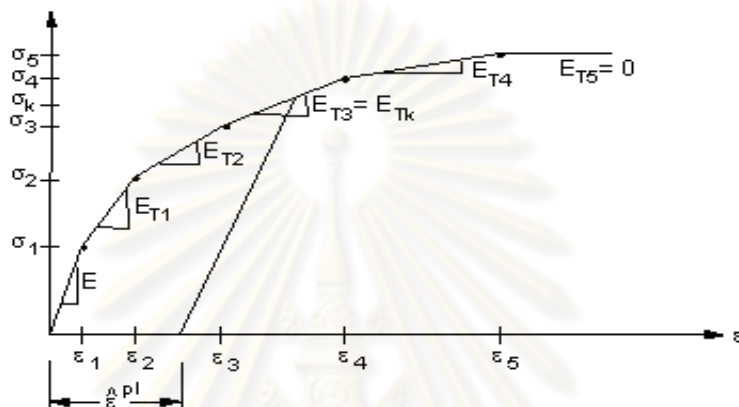
โดยที่ η	คือ การอัด (Compression)
β และ n	คือ ตัวแปรการเพิ่มความแข็งด้วยการแปรรูป (Work hardening parameters)
ϵ_i	คือ ความเครียดพลาสติกสมมูลเริ่มต้น (Initial equivalent plastic strain) ปกติมีค่าเท่ากับศูนย์
$E_c(\eta)$	คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)
$P(\eta)$	คือ ความดันที่ 300 เคลวิน
γ_0	คือ ค่าของ γ ที่จุดอ้างอิง
a	คือ สัมประสิทธิ์ของปริมาตรอันดับหนึ่ง (First-order volume)

Material	G_0 (GPa)	Y_0 (Gpa)	Y_{max} (Gpa)	β	n	$\frac{G'_r}{G_0}$ (TPa ⁻¹)	$\frac{-G'_r}{G_0}$ (kK ⁻¹)	T_{m0} (K)	γ_0	a	Comments
Al (6061-T6)	27.6 [24,28]	0.29 [28]	0.68 [24]	125 [28,33]	0.10	65. [22]	0.62 [24,28]	1,220	1.97 [28]	1.5	T_{m0} and a are for the 2024 alloy
Au	28.0	0.02 [34]	0.225 [23]	49 [35]	0.39	38.	0.31	1,970	2.99	2.4	
Be (S-200)	151. [22]	0.33 [36]	1.23 [23]	81 [24,37,38]	0.22	15.5	0.26	1,820	1.11	1.0	
Cu (OFHC half hard)	47.7	0.12 [39]	0.64 [40]	36 [41]	0.45	28.	0.38	1,790	2.02	1.5	
Mg (AZ31B-H24)	16.5 [24]	0.19 [24]	0.48 [24]	1100 [24]	0.12	103.	0.51	1,150	1.54 [24]	1.2	G'_r and G'_r are for pure Mg
Nb	37.7	0.70 [21]	1.4 [24]	(5) [Est.]	(0.2)	12. [42]	0.	3,530	1.66	1.3	
Ni (Annealed)	85.5	0.14 [40]	1.2 [40]	46 [40]	0.53	16.	0.33	2,330	1.96	1.5	
Pb	8.6	0.008 [43]	0.1 [34]	110 [44]	0.52	116.	1.16	760	2.74	2.2	
Pt (Annealed)	63.7 [45]	0.03 [45]	0.34 [46]	1300 [45]	0.19	25.	0.14	2,730	2.74	2.2	
Stainless steel (304)	77.0 [25]	0.34 [47]	2.5 [4,24,40]	43 [4,24,40]	0.35	26.	0.45 [24,48]	2,380	1.93 [24,25]	1.4	
Ta	69.0	0.77 [49]	1.10 [24]	(10) [50]	(0.1)	14.5 [42]	0.13	4,340	1.67	1.3	
Ti	43.4 [51]	0.71 [24,40]	1.45 [24,40]	780 [24,51]	0.065	11.5	0.62	2,260	1.23	1.0	
U	86.7	0.40 [11]	1.68 [23]	2000 [52]	0.16	35.	0.78	1,710	2.32	1.8	$\epsilon_i = 0.0375$
W	160.	2.2 [53,54]	4.0 [24]	(7.7) [9]	(0.13)	9.4 [55]	0.14	4,520	1.67	1.3	

ภาพที่ 2.18 ข้อมูลจาก Steinberg–Guinan ของกระดูก [33]

2.6.5 ความสัมพันธ์ของสมบัติเนื่องจากโครงสร้างแผ่นโพลีคาร์บอเนต

แผ่นโพลีคาร์บอเนตที่ใช้ในแบบจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนในครั้งนี้อยู่เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด และมีพฤติกรรมเพิ่มความแข็งแรงด้วยการแปรรูปแบบไอโซทรอปิกเชิงหลายเส้น (Multilinear isotropic hardening) ที่มีช่วงเส้นตรงหลายเส้นบนเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียด เชิงหลายเส้น [36]

2.6.6 สมการภาวะ (Equation of state, EOS) ของแผ่นฟิล์มพีวีบี

สมการภาวะของวัสดุ คือ สมการความสัมพันธ์การตอบสนองของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ สำหรับแผ่นฟิล์มพีวีบีมีพฤติกรรมสมบัติแบบสภาวะวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic material) ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติของแผ่นฟิล์มโพลียูรีเทน (Polyurethane) ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้สมการภาวะ (สมการที่ 2.25-2.26) และค่าคงที่ต่างๆของฟิล์มพีวีบีจากฟิล์มโพลียูรีเทน และค่าคงที่ต่างๆ ดังตารางที่ 2.7 [37-38]

$$U_s = C_0 + S U_p \quad (2.25)$$

$$p = \Gamma(v)[E - E_0(v)]/v \quad (2.26)$$

โดยที่	U_s	คือ ความเร็วกระแทกเส้นตรง (Linear shock velocity)
	U_p	คือ ความเร็วอนุภาค (Particle velocity)
	C_0 และ S	คือ ค่าคงที่

p	คือ ความดัน
v	คือ ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume)
E	คือ พลังงานภายในจำเพาะ (Specific internal energy)
$\Gamma(v)$	คือ ตัวแปร Gruneisen ที่ขึ้นกับปริมาตร

ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่สำหรับสมการภาวะ

ตัวแปร	ค่าคงที่
C_0 (mm/ μ s)	2.486
S	1.577
Γ_0	1.55

2.6.7 ความเร็วคลื่น (wave speed) ในวัสดุ

ในตัวกลางที่เป็นวัสดุแต่ละชนิดนั้นจะมีค่าความเร็วคลื่นที่ผ่านวัสดุนั้นๆ แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นกับสมบัติของวัสดุนั้นๆ โดยมีสมการความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.27 [39]

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \text{ หรือ } c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ เมื่อ } \nu = 0 \quad (2.27)$$

โดยที่ c คือ ความเร็วของคลื่นความเค้นในตัวกลาง (Stress wave speed)

E คือ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น

ν คือ ค่าอัตราส่วนปัวซอง

2.6.8 Courant number

Courant number คือ เศษส่วนของขนาดเอลเมนต์ที่เล็กที่สุดที่คลื่นความเค้นเคลื่อนที่ได้ใน 1 time step ดังสมการที่ 2.28 [39]

$$C_0 = \frac{C\Delta t}{\Delta x} \quad (2.28)$$

โดยที่ Δt คือ time step

Δx คือ ขนาดเอเลเมนต์ (element size)

2.7 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

Grant และคณะ [2] ได้ศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นแผ่นกระจกแบบต่างๆที่มีต่อความสามารถในการกันกระสุนเพื่อนำไปใช้เป็นกระจกรถยนต์ โดยทำการทดลองเตรียมแผ่นกระจกซ้อนกันสองชั้นคั่นกลางด้วยแผ่นฟิล์มพีวีบีหนา 0.76 มิลลิเมตร ใช้ความหนาของแผ่นด้านนอกและแผ่นด้านในที่แตกต่างกันจำนวน 12 แบบ นำไปหุ้มด้วยสุญญากาศและอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความดัน 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสในหม้อนิ่งอัดไอ (Autoclave) และชิ้นงานที่ได้นำไปทดสอบด้วยเครื่องยิงโดยใช้หินแกรนิตที่ความเร็ว 4-20 เมตรต่อวินาที พบว่าความเร็วที่เริ่มเกิดความเสียหายของชิ้นงาน (Critical velocity) ขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นกระจกด้านนอกสุดและกระจกชั้นที่สอง ซึ่งเมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นกระจกชั้นนอก ความเร็วที่เริ่มเกิดความเสียหายก็เพิ่มขึ้นด้วย

Bless และคณะ [40] ได้ศึกษาการแตกของแผ่นกระจกลามิเนตกับฟิล์มโพลียูรีเทน (Polyurethane) เรียงซ้อนกัน 4 และ 7 ชั้น ประกอบเข้าด้วยกันกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) และยึดติดกันด้วยตัวหนีบด้านข้าง หลังจากนั้นนำไปทดสอบยิงด้วยกระสุนความเร็ว 879-1110 เมตรต่อวินาที พบว่าแผ่นกระจกแต่ละชั้นจะมีลักษณะการแตกที่แตกต่างกัน โดยแผ่นหน้าเกิดรอยแตกแบบแฉก (Radial crack) แผ่นที่สองเกิดรอยแตกแบบเข็ม (Needle crack) แผ่นที่ 3-6 เกิดรอยแตกแบบซี่ล้อ (Spoke crack) และแผ่นสุดท้ายจะเกิดรอยแตกแบบแฉกเป็นเส้นตรงและต่อเนื่อง ซึ่งอาจเกิดจากความเสียหายแบบดัดโค้งอย่างรวดเร็ว (Rapid bending) จากการกดตรงกลางชิ้นงาน ซึ่งต่างกับการเรียงแบบ 4 ชั้น ที่มีความสมบูรณ์ของโครงสร้างน้อย

Orgaz และคณะ [4] ได้ศึกษาแผ่นกระจกบอโรซิลิเกต (Borosilicate monolithic) และกระจกบอโรซิลิเกตลามิเนตกับฟิล์มพีวีบีแบบต่างๆ ทำการทดสอบยิงโดยใช้แท่งกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และวัดค่าพลังงานสะท้อนกลับ (Reflected energy), พลังงานทะลุผ่าน (Transmitted energy) และพลังงานดูดซับ (Absorbed energy) จากวิธี Hopkinson pressure bar (SPHB) พบว่าแผ่นกระจกที่ทำการลามิเนตมีค่าพลังงานสะท้อนกลับที่สูงกว่าและมีค่าพลังงานการดูดซับที่น้อยกว่าแผ่นกระจกบอโรซิลิเกต โดย Orgaz ได้ทำการวิเคราะห์เศษกระจกที่หลุดออกจากชิ้นงานหลังจากการทดสอบยิงไปคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาด 50 100 315 630 1000 และ 2000 ไมครอน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสัมพัทธ์กับขนาดของเศษกระจก และความสัมพันธ์ระหว่างเศษกระจกกับค่าพลังงานสะท้อนกลับ จากผลการทดลองพบว่าขนาดเศษกระจกเฉลี่ย (Average fragment size) มีผลแปรตามกันกับค่าพลังงานสะท้อน

กลับและค่าความเหนียว (Toughness) ของชิ้นงาน โดยแผ่นกระจกที่ขึ้นรูปโดยการลามิเนตจะมีค่าขนาดเศษกระจกเฉลี่ย ค่าพลังงานการสะท้อน และค่าความเหนียวของชิ้นงานสูงกว่ากระจกบอโรซิลิเกตที่ไม่ได้ผ่านการลามิเนตทำให้กระจกแบบลามิเนตมีความสามารถในการกันกระสุนได้ดี

Sands และคณะ [5] ได้เปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบความสามารถในการกันกระสุนของแผ่นสปีเนลที่ยึดติดกันด้วยฟิล์มโพลียูรีเทนที่อุณหภูมิ 93-121 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมงในหม้อนึ่งอัดไอและประกบติดกับแผ่นโพลีคาร์บอเนตไว้เป็นชั้นหลังสุดของชิ้นงาน โดยสร้างแบบจำลองสองมิติแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) ของแผ่นเกราะจากโปรแกรม ANSYS/AUTODYN™ เพื่อศึกษาตำหนิ (Defect) ของชิ้นงานที่มีทั้งตำหนิที่เกิดบนผิวหน้าหรือในชิ้นงาน จำนวนและรูปร่างของตำหนิที่เกิดขึ้นต่อค่าความเร็วตกค้าง (Residual velocity) หลังจากกระสุนปะทะชิ้นงาน และระดับความสามารถในการกันกระสุนของแผ่นเกราะเปรียบเทียบกับกรทดสอบโดยทำแผ่นสปีเนลให้เกิดตำหนิจากการเซาะเป็นร่องและเจาะเป็นรูก่อนนำไปทดสอบยิงที่ความเร็ว 850 เมตรต่อวินาที ผลจากแบบจำลองแสดงว่าเมื่อชิ้นงานแผ่นสปีเนลที่มีความหนาน้อย จำนวนตำหนิมากส่งผลให้ค่าความเร็วตกค้างมีค่ามากทำให้ความสามารถในการกันกระสุนของชิ้นงานลดลง อีกทั้งยังพบว่าตำหนิที่เกิดบนผิวหน้าของชิ้นงานและตำหนิที่มีรูปร่างแบบวงรี (Elliptical) จะส่งผลอย่างมากต่อความสามารถในการกันกระสุนของชิ้นงาน ซึ่งจากการออกแบบจำลองผลที่ได้มีความสอดคล้องกันกับผลการทดสอบยิง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตชิ้นงานแผ่นกระจกใสกันกระสุนที่มีความสามารถในการป้องกันกระสุนระดับ 3A โดยทำการลามิเนตแผ่นกระจกชนิดโซดาไลม์และแผ่นฟิล์มพีวีบีเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการศึกษาความหนาของแผ่นกระจกและแผ่นฟิล์มที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แผ่นกระจกที่มีความสามารถในการป้องกันกระสุน โดยนำไปทดสอบยิงด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ตามมาตรฐาน NIJ เพื่อวิเคราะห์เศษกระจกที่หลุดออกจากชิ้นงาน ผลจากการทดสอบยิงจะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแบบจำลองความเสียหายไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys™

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

แผ่นกระจกกันกระสุนได้ถูกผลิตโดยผ่านกระบวนการลามิเนต โดยวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1-3.2

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุ	บริษัท
Soda-lime glass	Siam guardian, Thailand
Polyvinylbutyral (PVB) film	Dupont, Thailand
Polycarbonate	Sabic innovation plastic, Singapore

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	รายละเอียด
Double roll	Fa.Armatec GmbH industries, Germany
Autoclave	Fa.Armatec GmbH industries, Germany
Fixture support	Thai-German specialty glass

3.2 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานแผ่นกระจกกันกระสุน

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ทำการเตรียมชิ้นงานแผ่นกระจก โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. เตรียมแผ่นกระจกชนิดโซดาไลม์ ขนาด 305 x 305 ตารางมิลลิเมตร
2. ทำความสะอาดสิ่งสกปรกบนผิวหน้าของแผ่นกระจกด้วยน้ำปราศจากแร่ (Demineralized water) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
3. เตรียมแผ่นฟิล์มพีวีบีขนาด 305 x 305 ตารางมิลลิเมตร และทำการกำจัดฝุ่นผงบนผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม
4. นำแผ่นกระจกและแผ่นฟิล์มมาทำการจัดเรียงในรูปแบบต่างๆ กัน



ภาพที่ 3.1 การจัดเรียงแผ่นกระจกและแผ่นฟิล์ม

3.2.2 ศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นกระจกที่เหมาะสมต่อความสามารถในการกันกระสุน

เตรียมชิ้นงานกระจกโดยกำหนดให้กระจกแผ่นหน้ามีความหนา 15 มิลลิเมตร ทุกชิ้นงาน นำแผ่นกระจกมาจัดเรียงซ้อนกัน 2-4 ชั้น ระหว่างชั้นยึดติดกันด้วยฟิล์มพีวีบีความหนา 0.76 มิลลิเมตร รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การจัดเรียงชิ้นงานเพื่อศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นกระจกที่เหมาะสมต่อความสามารถในการกันกระสุน

ลำดับที่	ความหนาของแผ่นกระจกและแผ่นฟิล์ม (มม.)			
	G15	G15-N4	G15-N3	G15-N2
กระจก 1	15	15	15	15
ฟิล์ม 1	0.76	0.76	0.76	0.76
กระจก 2	15	15	15	15
ฟิล์ม 2	0.76	0.76	0.76	-
กระจก 3	15	5	3	-
ฟิล์ม 3	0.76	0.76	-	-
กระจก 4	3	3	-	-
ความหนารวม	50.28	40.28	34.52	30.76

3.2.3 ศึกษาความหนาของแผ่นฟิล์มต่อความสามารถในการกันกระสุน

เตรียมชิ้นงานกระจกโดยใช้กระจกหนา 15 มิลลิเมตร และปรับเปลี่ยนความหนาของฟิล์มจาก 0.76 ถึง 2.28 มิลลิเมตร รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การจัดเรียงชิ้นงานเพื่อศึกษาความหนาของแผ่นฟิล์มต่อความสามารถในการกัน
กระสุน

ลำดับที่	ความหนาของแผ่นกระจกและแผ่นฟิล์ม (มม.)		
	G15-N4	G15-N4-F152	G15-N4-F228
กระจก 1	15	15	15
ฟิล์ม 1	0.76	1.52	2.28
กระจก 2	15	15	15
ฟิล์ม 2	0.76	0.76	0.76
กระจก 3	5	5	5
ฟิล์ม 3	0.76	0.76	0.76
กระจก 4	3	3	3
ความหนารวม	40.28	41.04	41.80

3.2.4 ศึกษาความหนาของแผ่นกระจกที่เหมาะสมเพื่อลดน้ำหนักแผ่นเกราะกัน
กระสุน

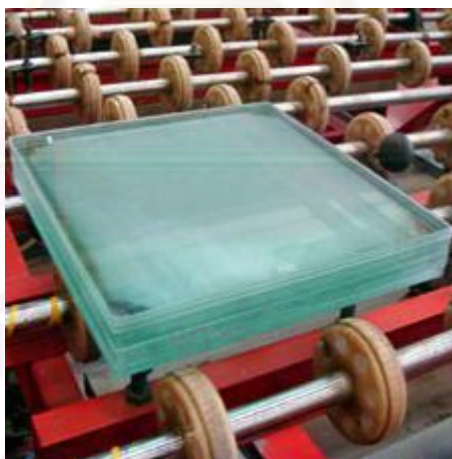
การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาชิ้นงานเกราะที่มีการจัดเรียงแบบ G15-N4 ให้มีความหนาและน้ำหนักที่เบากว่า โดยยังคงใช้ฟิล์มพีวีบีหนา 0.76 มิลลิเมตรเช่นเดิม ตารางที่ 3.6 แสดงการจัดเรียงชิ้นงานในการศึกษาขั้นตอนนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 การจัดเรียงชั้นงานเพื่อลดน้ำหนักของแผ่นกระดาษกันกระสุน

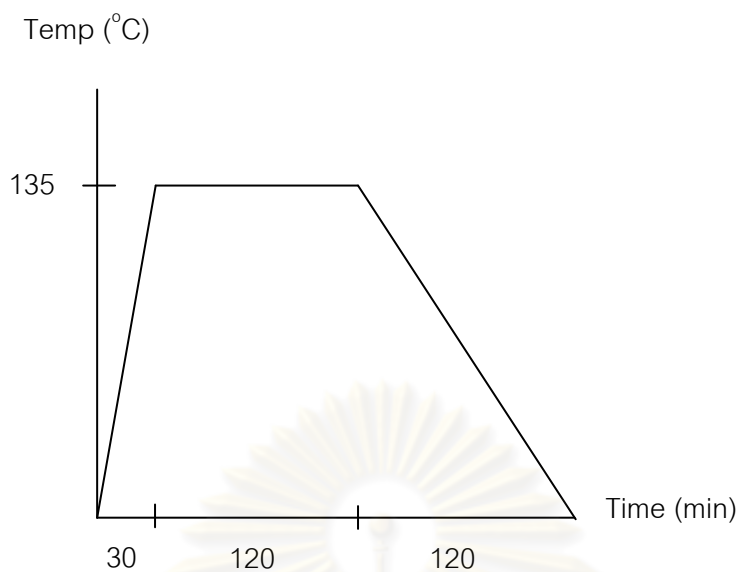
ลำดับที่	ความหนาของแผ่นกระดาษและแผ่นฟิล์ม (มม.)	
	G10-15-5-3	G15-10-5-3
กระดาษ 1	10	15
ฟิล์ม 1	0.76	0.76
กระดาษ 2	15	10
ฟิล์ม 2	0.76	0.76
กระดาษ 3	5	5
ฟิล์ม 3	0.76	0.76
กระดาษ 4	3	3
ความหนารวม	35.28	35.28

5. นำชิ้นงานผ่านการอัดรีดด้วยลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 65-80 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ลักษณะชิ้นงานหลังการอัดรีดด้วยลูกกลิ้ง แสดงในภาพที่ 3.2

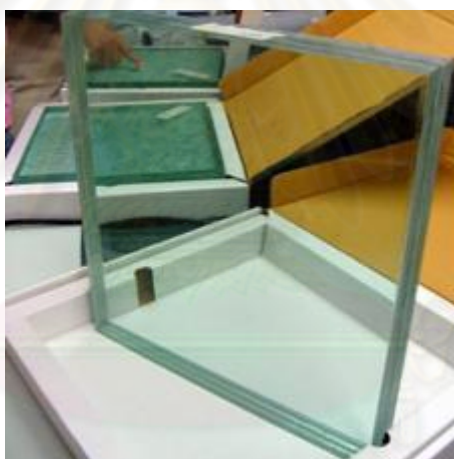


ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการอัดรีดด้วยความร้อน

6. นำชิ้นงานผ่านหม้อนึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ความดัน 13.5 บาร์ เป็นเวลา 4.5 ชั่วโมง ขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิแสดงไว้ในภาพที่ 3.3 ชิ้นงานที่ได้หลังจากผ่านหม้อนึ่งอัดไอ แสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.3 แผนผังอุณหภูมิของหม้อนึ่งอัดไอ



ภาพที่ 3.4 ชิ้นงานที่ได้หลังจากผ่านหม้อนึ่งอัดไอ

3.3 การทดสอบยิงแผ่นเกราะกันกระสุน

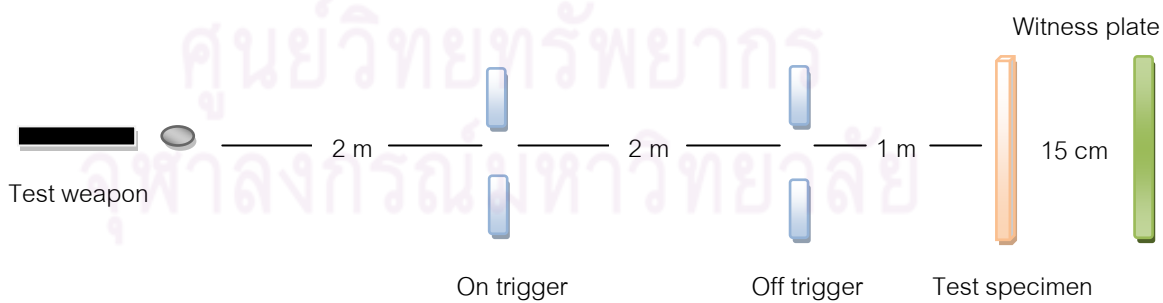
ความสามารถในการป้องกันกระสุนของชิ้นงานเกราะถูกตรวจสอบโดยการยิงเกราะที่ผลิตได้ด้วยแท่นยิงที่มีลำกล้องขนาด 6 นิ้ว (ภาพที่ 3.5) ตามมาตรฐาน NIJ0108.01 ที่ระดับ 3A กระสุน .44 magnum ความเร็ว 426 ± 15 เมตรต่อวินาที ชิ้นงานจะถูกบรรจุในถุงผ้าก่อนการทดสอบยิงเพื่อเก็บสะเก็ดที่หลุดออกจากชิ้นงาน จากนั้นจัดวางชิ้นงานบนแท่นยึด ดังแสดงในภาพที่ 3.6 การจัดวางชิ้นงานในขั้นตอนการทดสอบยิง แสดงดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.5 แท่นทดสอบยิง



ภาพที่ 3.6 แท่นยึดชิ้นงาน



ภาพที่ 3.7 การจัดวางชิ้นงานในขั้นตอนการทดสอบยิง

3.4 การวิเคราะห์แฟรกเมนเทชันภายหลังการทดสอบบึง

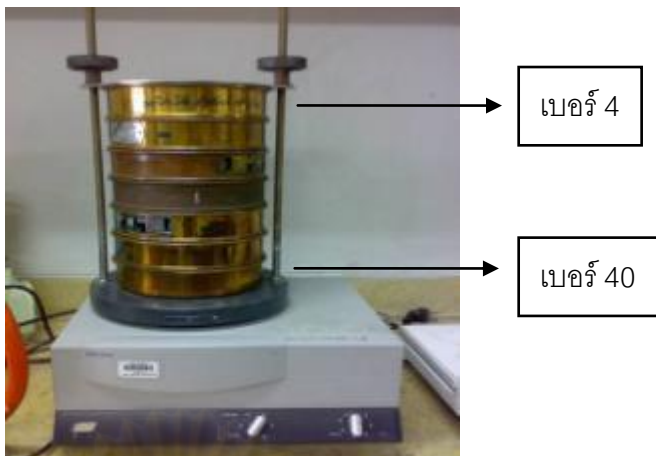
เศษกระจกของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนหลังจากผ่านการทดสอบบึงแล้วจะถูกนำมาทำการคัดแยกขนาดของเศษกระจกโดยผ่านตะแกรงร่อน ซึ่งมีอุปกรณ์และขนาดของตะแกรงดังตารางที่ 3.7-3.8 ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์ เป็นเวลา 5 นาที เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกของชิ้นงานเกราะใส่ที่มีการจัดเรียงแตกต่างกันหลังจากการทดสอบบึงกระสุน ขั้นตอนการคัดแยกขนาดของเศษกระจกโดยผ่านตะแกรงร่อน แสดงดังภาพที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการร่อน

อุปกรณ์	รายละเอียด
Test sieves	Retsch, Thailand
Sieving machine	AS200 Basic, serial number 2127030246, Retsch, Thailand

ตารางที่ 3.8 ขนาดของตะแกรงที่ใช้ในการคัดแยกเศษกระจกของชิ้นงาน

เบอร์ตะแกรง	ขนาดตะแกรง (มม.)
4	4.76
8	2.38
16	1.19
20	0.84
35	0.50
40	0.42



ภาพที่ 3.8 แสดงการตัดแยกเศษกระจกของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนหลังจากผ่านการทดสอบยิง

3.5 การพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การพัฒนาแบบจำลองความเสียหายของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนแบบสองมิติกระทำโดยจำลองชิ้นงานและกระสุนในการปะทะชิ้นงานด้วยแบบจำลอง Axisymmetric โดยใช้โปรแกรม Ansys™ ซึ่งค่าคงที่ต่างๆ ของวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความเสียหายในงานวิจัยครั้งนี้ มีดังต่อไปนี้

1. กระจกชนิดโซดาไลม์

ตารางที่ 3.9 ค่าคงที่สมการสภาวะแบบ Polynomial ของกระจกชนิดโซดาไลม์

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Parameter A1	4.57×10^7	kPa
Parameter A2	-1.38×10^8	kPa
Parameter A3	2.9×10^8	kPa
Parameter B0	0	-
Parameter B1	0	-
Parameter T1	4.54×10^7	kPa
Parameter T2	0	-

ตารางที่ 3.10 ค่าคงที่สมการ Johnson-Holmquist (JH-2) ของกระจกชนิดโซดาไลม์

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Hugoniot elastic limit HEL	5.95×10^6	kPa
Intact strength constant A	0.93	-
Intact strength constant N	0.77	-
Strain rate constant C	0.003	-
Fracture strength constant B	0.088	-
Fracture strength constant M	0.35	-
Maximum fracture strength ratio SFMAX	0.5	-
Damage constant D1	0.053	-
Damage constant D2	0.85	-
Bulking constant B	1	-
Hydrodynamic tensile limit T	-1.5×10^5	kPa

ตารางที่ 3.11 ค่าสมบัติทั่วไปของกระจกชนิดโซดาไลม์

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Density	2.53	g/cm^3
Shear modulus	3.04×10^7	kPa

2. กระจก

ตารางที่ 3.12 ค่าคงที่สมการสถานะแบบ Linear ของกระจก

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Gruneisen coefficient	2.74	-
Parameter C1	2006	m/s
Parameter S1	1.429	-
Parameter quadratic S2	0	s/m
Melting temperature Tmelt	760	K

ตารางที่ 3.13 ค่าคงที่สมการ Streinberg Guinan ของกระดูก

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Initial yield stress Y	8000	kPa
Maximum yield stress Ymax	1×10^5	kPa
Hardening constant B	110	-
Hardening constant n	0.52	-
Derivative dG/dP G'P	1	
Derivative dG/dT G'T	-9976	kPa/K
Derivative dY/dP Y'P	0.0009304	-

ตารางที่ 3.14 ค่าสมบัติทั่วไปของกระดูก

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Density	10.72	g/cm^3
Specific heat	124	$\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
Shear modulus	8.6×10^6	kPa

3. แผ่นฟิล์มพีวีบี

ตารางที่ 3.15 ค่าคงที่สมการสภาวะแบบ Linear ของแผ่นฟิล์มพีวีบี

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Gruneisen coefficient	1.55	-
Parameter C1	2486	m/s
Parameter S1	1.577	-
Parameter quadratic S2	0	s/m

ตารางที่ 3.16 ค่าความเสียหายของแผ่นฟิล์มพีวีบี

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Maximum tensile stress	2.81×10^7	Pa
Maximum shear stress	2×10^7	Pa

ตารางที่ 3.17 ค่าสมบัติทั่วไปของแผ่นฟิล์มพีวีบี

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Density	1.07	g/cm^3
Specific heat	1973	$\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
Shear modulus	0.052	MPa

4. แผ่นโพลีคาร์บอเนต

ตารางที่ 3.18 ค่าคงที่สมการสภาวะแบบ Bilinear ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Gruneisen coefficient	0.61	-
Parameter C1	1933	m/s
Parameter S1	2.65	-
Parameter C2	2350	m/s
Parameter S2	1.6	-
Relative volume V_B/V_0	0.742	-
Relative volume V_E/V_0	0.701	-

ตารางที่ 3.19 ค่าความเสียหายของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Maximum plastic strain	1×10^{20}	-

ตารางที่ 3.20 ค่าคงที่การแปรรูปแบบไอโซทรอปิกเชิงหลายเส้นของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

Plastic strain (m/m)	Stress (kPa)
0	80600
0.1	88000
0.5	1.42×10^5
0.6	1.68×10^5
0.7	1.87×10^5

ตารางที่ 3.21 ค่าสมบัติทั่วไปของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

ค่าสมบัติ	ค่าคงที่	หน่วย
Density	1.2	g/cm^3
Shear modulus	1×10^6	kPa

การพัฒนาแบบจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุน เป็นไปตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.5.1 ศึกษาความเสียหายของแผ่นกระจกเปรียบเทียบกับทดสอบจริง

นำแผ่นกระจกความหนา 10 15 และ 19 มิลลิเมตร มาทำการทดสอบยิงด้วยกระสุนขนาด 9 มม. (วัสดุ : ตะกั่ว, น้ำหนัก 8 กรัม) ที่ระดับ 2A (ความเร็ว 332 ± 15 เมตรต่อวินาที) และที่ระดับ 3A (ความเร็ว 426 ± 15 เมตรต่อวินาที) เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกันกระสุนของแผ่นกระจกที่ความหนาแตกต่างกัน และเปรียบเทียบผลจากการทดสอบจริงกับการพัฒนาแบบจำลองความเสียหายไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นกระจกที่ความหนาต่างๆ กัน

3.5.2 ศึกษาความเสียหายของแบบจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีจำนวนชั้นของแผ่นกระจกแตกต่างกัน

พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีจำนวนชั้นของแผ่นกระจกแตกต่างกัน คือ G15 G15-N4 G15-N3 และ G15-N2 โดยใช้กระสุน .44 magnum ที่ระดับ

3A ความเร็ว 426 ± 15 เมตรต่อวินาที (วัสดุ : ตะกั่ว น้ำหนัก 16 กรัม) จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองความเสียหายทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบจริง

3.5.3 ศึกษาความเสียหายของแบบจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนที่ความหนาของแผ่นฟิล์มแตกต่างกัน

พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีความหนาของแผ่นฟิล์มแตกต่างกัน คือ G15-N4 G15-N4-F152 และ G15-N4-F228 โดยใช้กระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 ± 15 เมตรต่อวินาที และทำการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองความเสียหายทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบจริง

3.6 ศึกษาการลดน้ำหนักชิ้นงานแผ่นเกราะโดยการใส่วัสดุโพลีคาร์บอเนต

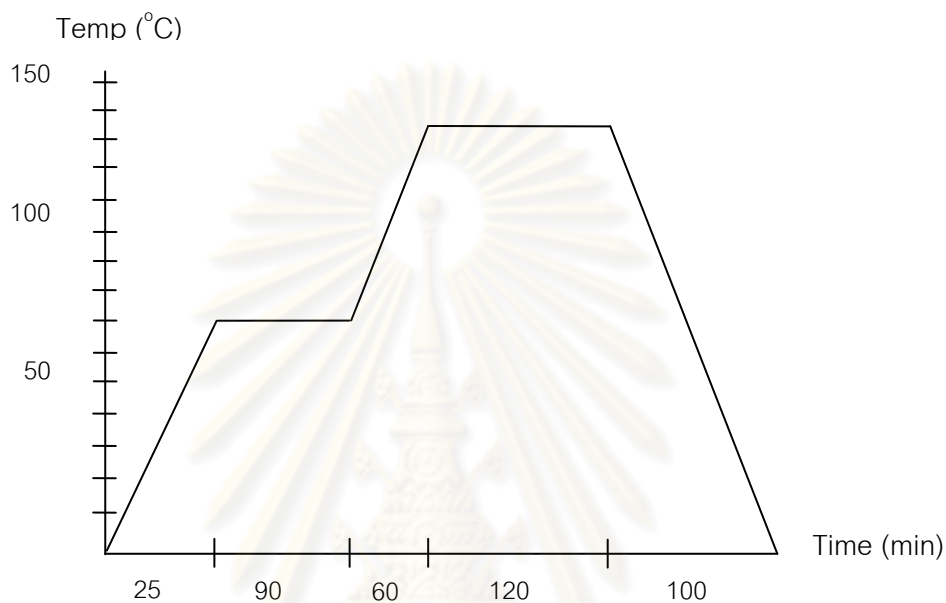
เตรียมชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนโดยเพิ่มแผ่นโพลีคาร์บอเนตหนา 3 มิลลิเมตร ด้านหลังชิ้นงานเกราะ เพื่อช่วยลดซับพลังงานจลน์จากการปะทะของกระสุน ระหว่างชั้นกระจกยึดติดกันด้วยฟิล์มพีวีบีหนา 0.76 มิลลิเมตร รายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.22

ตารางที่ 3.22 การจัดเรียงชิ้นงานแผ่นเกราะเมื่อเพิ่มวัสดุโพลีคาร์บอเนต

ลำดับที่	ความหนาของแผ่นกระจก แผ่นฟิล์ม และแผ่นโพลีคาร์บอเนต (มม.)	
	G15-N4-PC	G15-N3-PC
กระจก 1	15	15
ฟิล์ม 1	0.76	0.76
กระจก 2	15	15
ฟิล์ม 2	0.76	0.76
กระจก 3	5	3
ฟิล์ม 3	0.76	-
กระจก 4	3	-
ฟิล์ม 4*	0.76	0.76
โพลีคาร์บอเนต	3	3
ความหนารวม	44.04	38.28

*ฟิล์มชนิดพิเศษที่มีความสามารถในการยึดติดได้ดีทั้งกระจกและพอลิเมอร์

ชิ้นงานเกราะกันกระสุนที่มีแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหลัง ถูกผลิตโดยใช้เตาสู่ญญากาศ (Vacuum) ที่อุณหภูมิและเวลา ดังแสดงในภาพที่ 3.9 จากนั้นนำชิ้นงานผ่านหม้อน้ำอัดไอที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ความดัน 13.5 บาร์ นาน 4.5 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนการให้อุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 3.3 ชิ้นงานเกราะกันกระสุนที่ได้จะถูกนำมาผ่านขั้นตอนวิเคราะห์ความสามารถในการกันกระสุน ตามข้อ 3.4-3.5 ต่อไป

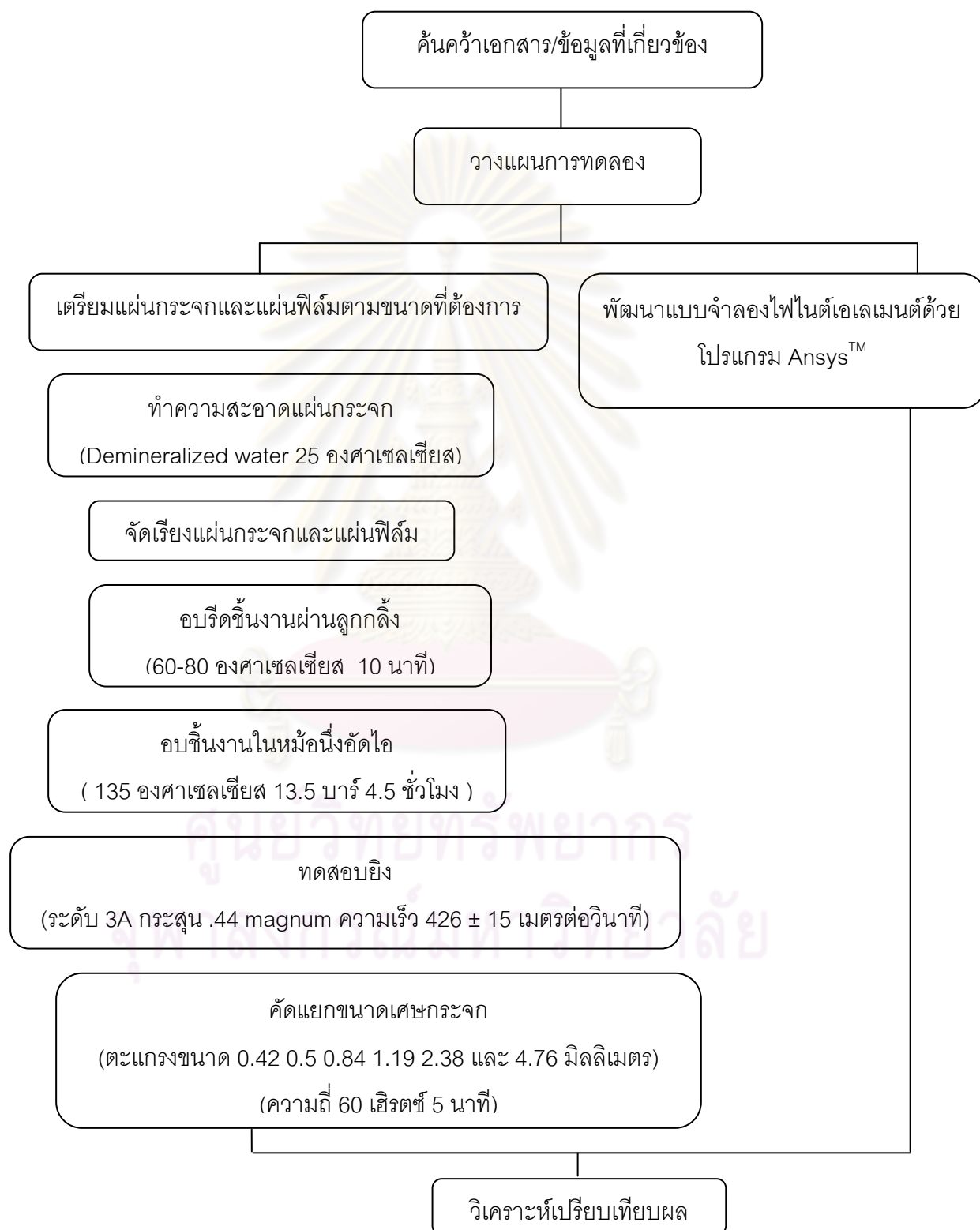


ภาพที่ 3.9 แผนผังอุณหภูมิของเตาสู่ญญากาศ

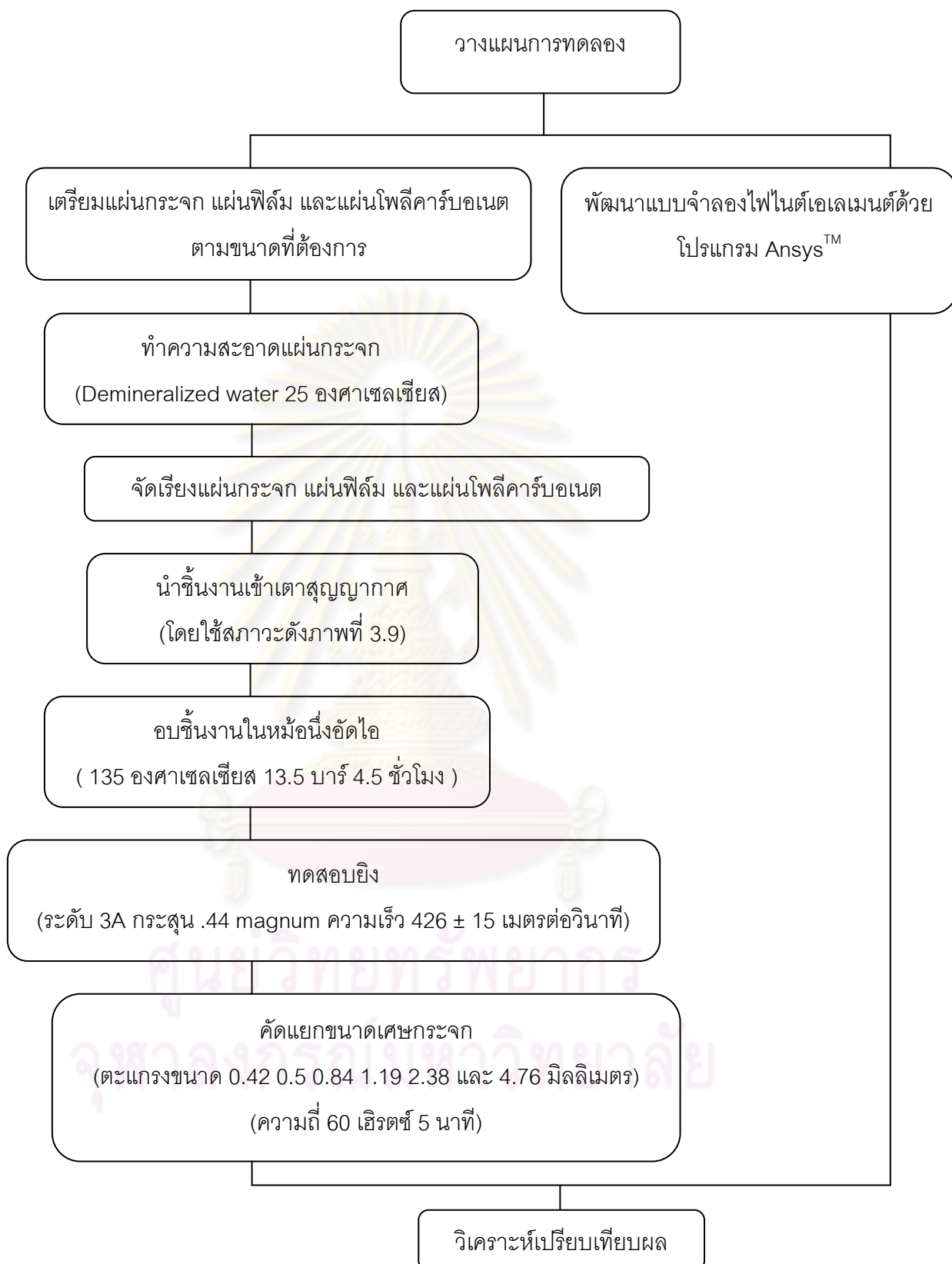
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6 แผนผังงานวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้มีขั้นตอนการเตรียมแผ่นเกราะกันกระสุนและขั้นตอนการวิเคราะห์ความสามารถในการกันกระสุนของแผ่นเกราะ ดังแสดงในภาพที่ 3.10 – 3.11



ภาพที่ 3.10 แผนผังการทดลองชิ้นงานแผ่นกระจก



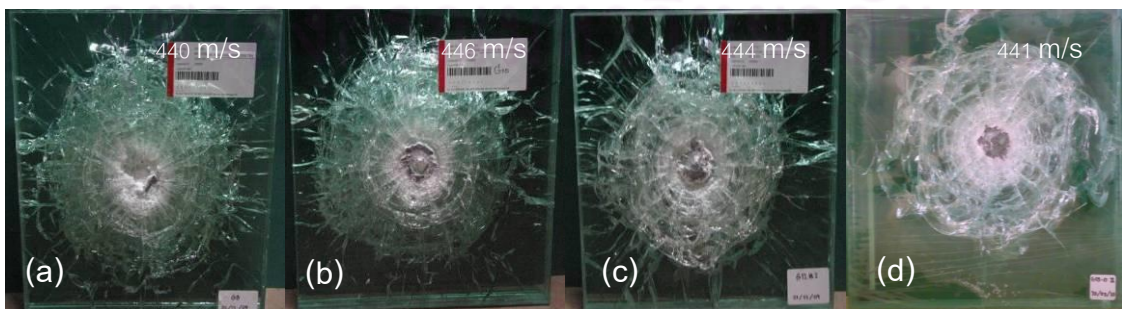
ภาพที่ 3.11 แผนผังการทดลองชิ้นงานแผ่นกระจกกับแผ่นโพลีคาร์บอนเนต

บทที่ 4

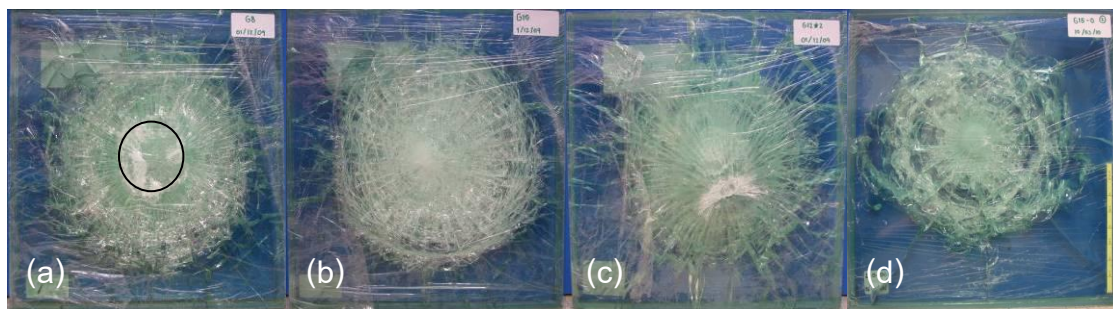
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลของความหนาของแผ่นกระจกที่มีต่อความสามารถในการกันกระสุน

การศึกษาในขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทราบความหนาของแผ่นกระจกที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ประกอบเป็นเกราะใส่ที่มีความสามารถในการป้องกันกระสุนที่ระดับ 3A โดยทำการเตรียมชิ้นงานเกราะกันกระสุนในลักษณะต่างๆ ให้มีความหนาใกล้เคียงกัน (ประมาณ 50 มิลลิเมตร) ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด และหม้อนึ่งอัดไอ จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการกันกระสุนที่ระดับ 3A กระสุน .44 magnum ความเร็ว 426 ± 15 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ จากการทดสอบพบว่าชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนทุกแบบ คือ G8 G10 G12 และ G15 (ดูตารางที่ 3.3 ประกอบ) สามารถยับยั้งการพุ่งชนด้วยความเร็วสูงของกระสุนไว้ได้ และชิ้นงานที่เตรียมจากกระจกความหนา 15 มิลลิเมตร มีความสามารถในการกันกระสุนได้ดีที่สุด เพราะชิ้นงานเกิดความเสียหายปรากฏเป็นรอยร้าวจากการปะทะของกระสุนหยุดอยู่ที่กระจกแผ่นที่สอง ในขณะที่ชิ้นงานที่เหลือจะเกิดความเสียหายจนถึงกระจกแผ่นสุดท้าย (ภาพที่ 4.1-4.2) โดยชิ้นงาน G8 เกิดความเสียหายมากที่สุดเมื่อตรวจสอบที่ด้านหลังของชิ้นงาน พบว่าบริเวณกึ่งกลางของกระจกแผ่นสุดท้ายเกิดการหลุดออกจากตัวชิ้นงานมีลักษณะเป็นหลุม (Crater) รัศมีประมาณ 4.8 เซนติเมตร ดังภาพที่ 4.2 (a) แต่ไม่พบความเสียหายดังกล่าวในชิ้นงานอื่นๆ ผลจากการทดลองทำให้ทราบว่าความหนาของแผ่นกระจกแผ่นหน้ามีความสำคัญเพราะจะทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุนที่พุ่งชนแผ่นเกราะด้วยความเร็วสูง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเลือกแผ่นกระจกแผ่นหน้าสุดให้มีความหนาเพียงพอที่จะรับแรงปะทะที่ระดับ 3A ได้ ผลที่ได้จากการทดสอบบ่งชี้ว่าชิ้นงาน G15 ซึ่งใช้กระจกหนา 15 มิลลิเมตร ประกอบเป็นแผ่นหน้า มีความเหมาะสมจะถูกนำมาพัฒนาเพื่อลดความหนา (ลดน้ำหนักชิ้นงาน) โดยยังคงความสามารถในการป้องกันกระสุนที่ระดับ 3A ไว้



ภาพที่ 4.1 ความเสียหายด้านหน้าของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G8 (b) G10 (c) G12 และ (d) G15



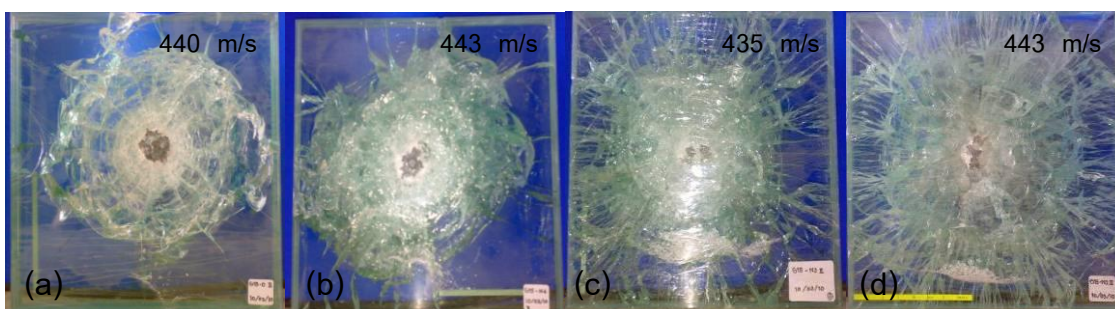
ภาพที่ 4.2 ความเสียหายด้านหลังของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G8 (b) G10 (c) G12 และ (d) G15

4.2 ผลของจำนวนชั้นของแผ่นกระจกที่มีต่อความสามารถในการกันกระสุน

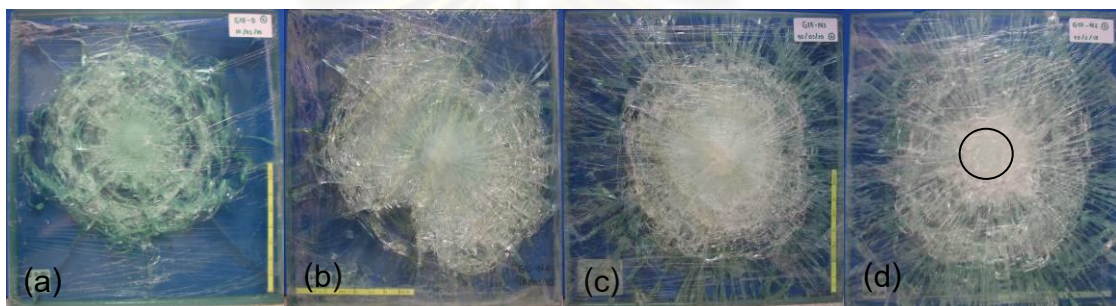
4.2.1 ผลของการทดสอบยิง

จากการศึกษาเบื้องต้นในหัวข้อ 4.1 ซึ่งทำให้ได้ข้อสรุปว่า กระจกแผ่นหน้าที่เหมาะสมสำหรับเกราะใส่กันกระสุนที่ระดับป้องกัน 3A ควรมีความหนาอย่างต่ำ 15 มิลลิเมตร จึงได้ทำการศึกษาในขั้นต่อไปถึงจำนวนชั้นของแผ่นกระจกที่เหมาะสม โดยเตรียมชิ้นงานที่มีการจัดเรียงแผ่นกระจกในลักษณะต่างๆ คือ G15 G15-N4 G15-N3 และ G15-N2 ความหนาฟิล์ม 0.76 มิลลิเมตร (ดูตารางที่ 3.4 ประกอบ) และทดสอบความสามารถในการกันกระสุนที่ระดับ 3A กระสุน .44 magnum ความเร็ว 426 ± 15 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ จากการทดสอบยิงพบว่าทุกชิ้นงานสามารถยับยั้งกระสุนที่พุ่งชนแผ่นเกราะด้วยความเร็วสูงได้ และเมื่อลดจำนวนชั้นของแผ่นกระจกความเสียหายบนแผ่นเกราะจะเกิดมากขึ้น โดยรอยแตกร้าวถูกตรวจพบเพียงเล็กน้อยบนกระจกแผ่นสุดท้ายของชิ้นงาน G15-N3 ส่วนชิ้นงาน G15-N2 พบความเสียหายของแผ่นกระจกแผ่นสุดท้ายแตกเป็นหลุมรัศมี 8.5 เซนติเมตร และเกิดความเสียหายแตกร้าวของชิ้นงานเป็นปริมาณมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าในชิ้นงาน G15-N2 เกิดความเสียหายในปริมาณมากที่บริเวณด้านหน้าของแผ่นเกราะ และพบการหลุดออกบริเวณกึ่งกลางของแผ่นกระจกแผ่นสุดท้าย

ในการใช้งานแผ่นเกราะน้ำหนักและความหนาเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงให้เกิดความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานสูงสุด นอกจากนั้นหากเกราะมีความหนาเกินความจำเป็นจะส่งผลกระทบต่อความใสและราคาของชิ้นงาน [3, 41] จากผลการทดสอบยิงพบว่าชิ้นงาน G15-N4 เป็นชิ้นงานที่เหมาะสมซึ่งมีความสามารถในการกันกระสุนได้ และมีความหนาลดลง 9.76 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักลดลง 19.23% เมื่อเทียบกับชิ้นงานมาตรฐาน [42] ดังแสดงในตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.3 ความเสียหายด้านหน้าของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G15 (b) G15-N4 (c) G15-N3 และ (d) G15-N2



ภาพที่ 4.4 ความเสียหายด้านหลังของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G15 (b) G15-N4 (c) G15-N3 และ (d) G15-N2

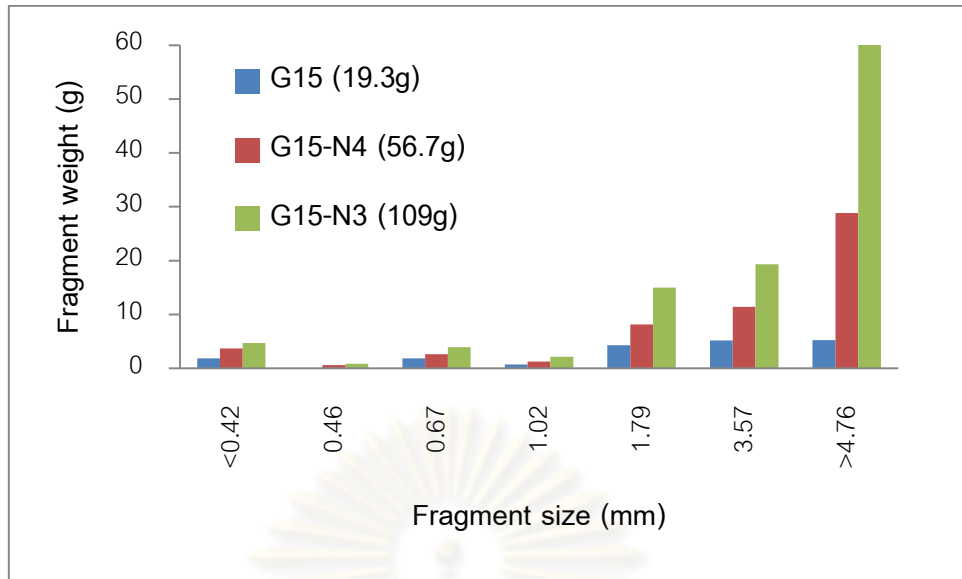
ตารางที่ 4.1 ความหนาและน้ำหนักของชิ้นงานลักษณะต่างๆ

ชิ้นงาน	การจัดเรียง ชิ้นงาน	ความหนารวม (mm)	ความหนาแน่น เชิงพื้นที่ (kg/ft ²)	% น้ำหนักที่ ลดลง
G15	15/15/15/3	50.28	11.39	+1.42
G15-N4	15/15/5/3	40.28	9.07	-19.23
G15-N3	15/15/3	34.52	7.83	-30.28
G15-N2	15/15	30.76	7.05	-37.22
standard	TGSG	50.04	11.23	-

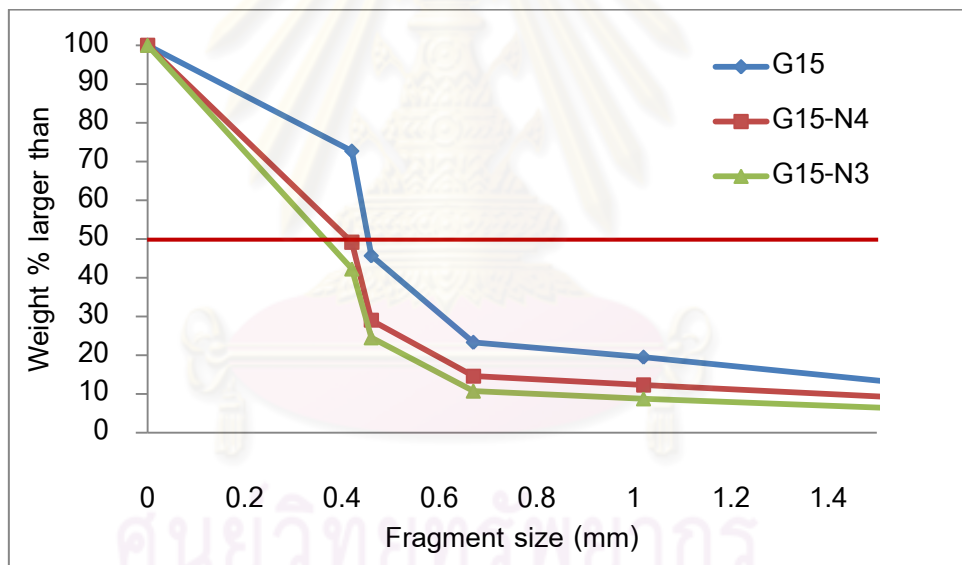
4.2.2 การวิเคราะห์แฟร็กเมนต์เศษชิ้นในการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นกระจก

หลังจากการทดสอบยิงแผ่นกระจกกันกระสุน เศษกระจกที่หลุดออกจากชิ้นงานด้านหน้า จะถูกนำมาคัดแยกขนาดอนุภาคโดยผ่านตะแกรงร่อนขนาด 0.42 0.50 0.84 1.19 2.38 และ 4.76 มิลลิเมตร จากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเศษกระจกที่หลุดออกจากชิ้นงาน พบว่าเมื่อลดความหนาของชิ้นงาน ปริมาณเศษกระจกที่หลุดออกจากชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ชิ้นงาน G15-N3 มีน้ำหนักเศษกระจกที่หลุดออกมากที่สุด คือ 109 กรัม สำหรับชิ้นงาน G15-N2 ไม่สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ได้เพราะเนื่องจากกระจกแผ่นสุดท้ายของชิ้นงานเกิดความเสียหาย มีเศษกระจกร่วงหลุดออกจากตัวชิ้นงานกระจกแผ่นสุดท้าย จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา Grady และ Kipp [1985] พบว่าค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเศษกระจกที่หลุดออกจากชิ้นงาน กระจกมีความสัมพันธ์แปรตามกันกับค่าความเหนียว (Toughness) ของชิ้นงาน ดังสมการที่ 2.10 [23] นอกจากนี้ Orgaz และคณะ [2009] ได้ศึกษาค่าอนุภาคเฉลี่ยของเศษกระจกชนิดบอโรซิลิเกตและพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับความเหนียวของชิ้นงานสอดคล้องกับรายงานของ Grady และ Kipp [4]

ภาพที่ 4.6 แสดงผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 50 เปอร์เซ็นต์ (เส้นอ้างอิงสีแดงในภาพ) พบว่าการลดความหนาของชิ้นงานทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลง ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานสมดุล (Energy balance) โดยสันนิษฐานว่าค่าพลังงานการพุ่งชน (Incident energy) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าพลังงานการดูดซับ (Absorbed energy) ค่าพลังงานการทะลุผ่าน (Transmitted energy) และ ค่าพลังงานการสะท้อนกลับ (Reflected energy) [4, 23] เมื่อพิจารณาชิ้นงานแผ่นกระจกทุกแบบที่มีความหนาของกระจกแผ่นหน้าเท่ากัน ทำให้สามารถประมาณได้ว่าค่าพลังงานการดูดซับบริเวณกระจกแผ่นหน้าในแต่ละชิ้นงานมีค่าเท่ากัน เพราะมีความหนาของกระจกแผ่นหน้าเท่ากัน พลังงานที่เหลือจะสามารถผ่านไปยังกระจกแผ่นหลังเป็นค่าพลังงานการทะลุผ่าน และจะมีพลังงานสะท้อนกลับมายังกระจกแผ่นหน้าของชิ้นงานแผ่นกระจกกันกระสุน จากการที่กระจกแผ่นหน้าของแต่ละชิ้นงานมีความหนาเท่ากันแต่การแตกออกของเศษกระจกแตกต่างกันบ่งบอกให้ทราบว่าปริมาณเศษกระจกที่หลุดต่างกันมีผลเนื่องมาจากค่าพลังงานการสะท้อนกลับต่างกัน ดังเช่นชิ้นงาน G15-N3 เป็นชิ้นงานที่มีความหนาน้อยทำให้พลังงานการทะลุผ่าน สามารถผ่านไปได้น้อย ทำให้มีค่าพลังงานการสะท้อนกลับสูง ส่งผลให้เกิดการแตกของชิ้นงานแผ่นหน้ามีค่าสูง



ภาพที่ 4.5 การกระจายขนาดเศษกระจกของชิ้นงาน G15, G15-N4 และ G15-N3



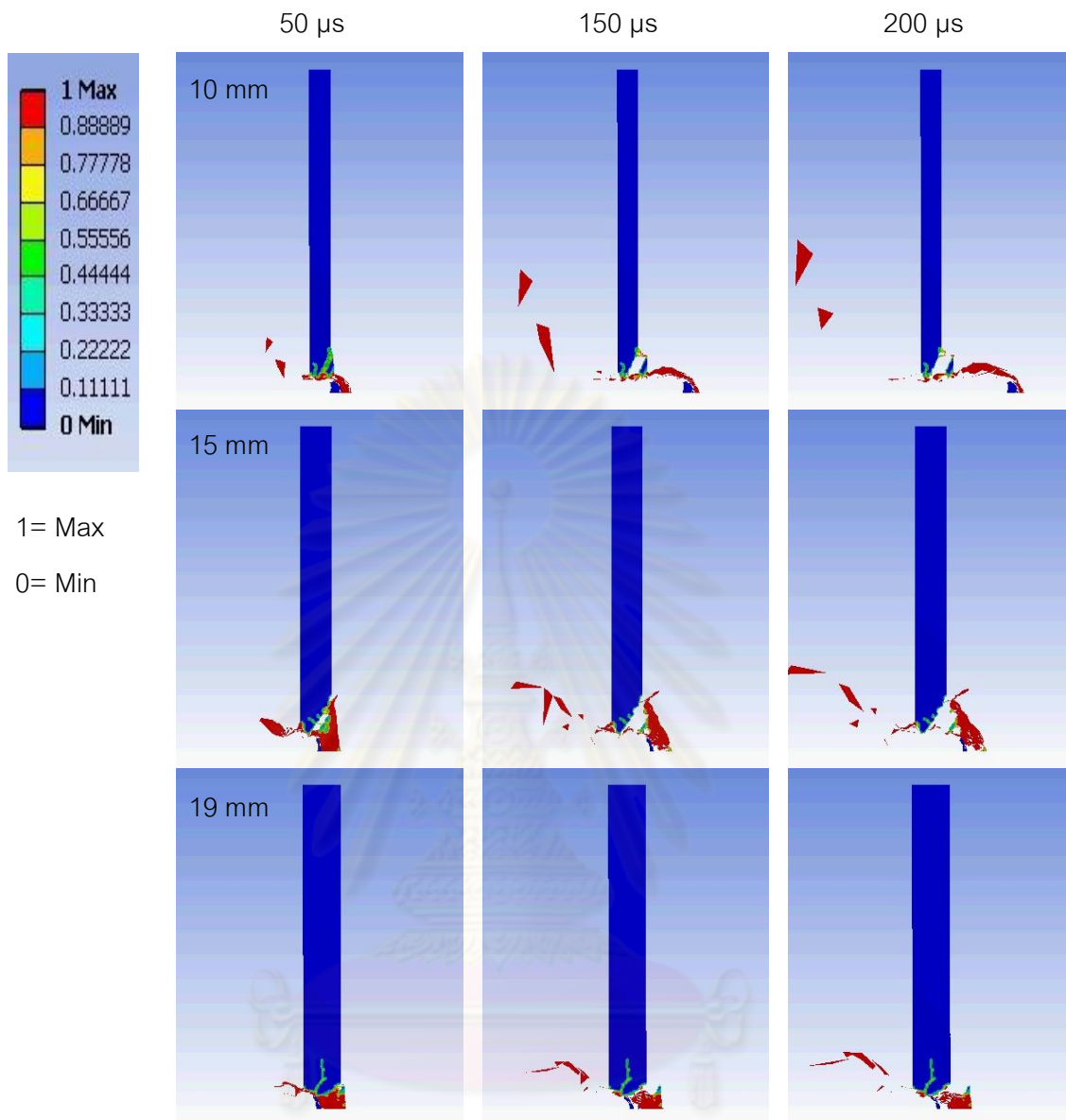
ภาพที่ 4.6 แผนภาพขนาดอนุภาคเฉลี่ยของชิ้นงานลักษณะต่างๆ

4.2.3 ความเสียหายจากการยิงของแผ่นกระจกโดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับทดสอบจริง

การจำลองความเสียหายของชิ้นงานแผ่นกระจกที่ความหนา 10 15 และ 19 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาความสามารถในการกันกระสุนของแผ่นกระจกและการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการเปรียบเทียบกับทดสอบจริงด้วยกระสุนชนิด 9 มม. ที่ระดับ 2A ความเร็ว 332 เมตรต่อวินาที และที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ จากภาพที่ 4.7 แสดงความเสียหายของชิ้นงานแผ่นกระจกความหนา 10 15 และ 19 มิลลิเมตร ที่สภาวะการทดสอบการยิงที่ระดับ 2A พบว่าแผ่นกระจกความหนา 10 และ 15 มิลลิเมตรไม่สามารถต้านทานกระสุนได้ กระสุนสามารถทะลุผ่านชิ้นงานไปได้ แต่แผ่นกระจกความหนา 19 มิลลิเมตร มีความสามารถในการกันกระสุนได้ กระสุนสามารถทะลุแผ่นกระจกได้เพียงบางส่วน เมื่อพิจารณาค่าพลังงานจลน์ของกระสุนที่ระดับ 2A ดังภาพที่ 4.8 ชิ้นงานแผ่นกระจกความหนา 15 และ 19 มิลลิเมตร มีความสามารถในการยับยั้งการปะทะชนของกระสุนที่ความเร็วสูงได้ เพราะค่าพลังงานมีค่าลดลงเข้าไปใกล้ศูนย์

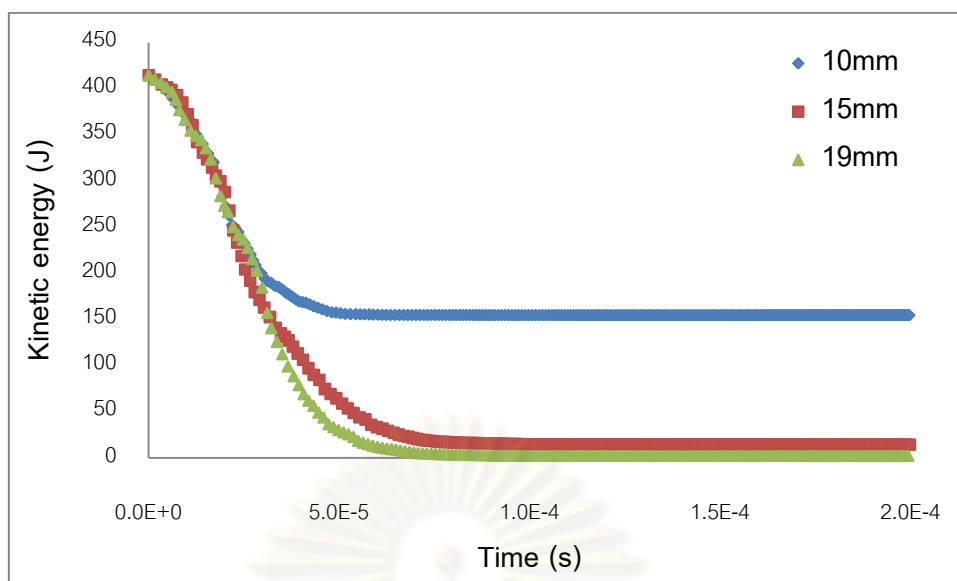


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.7 ความเสียหายของแผ่นกระจกที่ความหนาแตกต่างกันในสภาวะการทดสอบยิงด้วยกระสุน 9 มิลลิเมตร ที่ระดับ 2A ความเร็ว 332 เมตรต่อวินาที

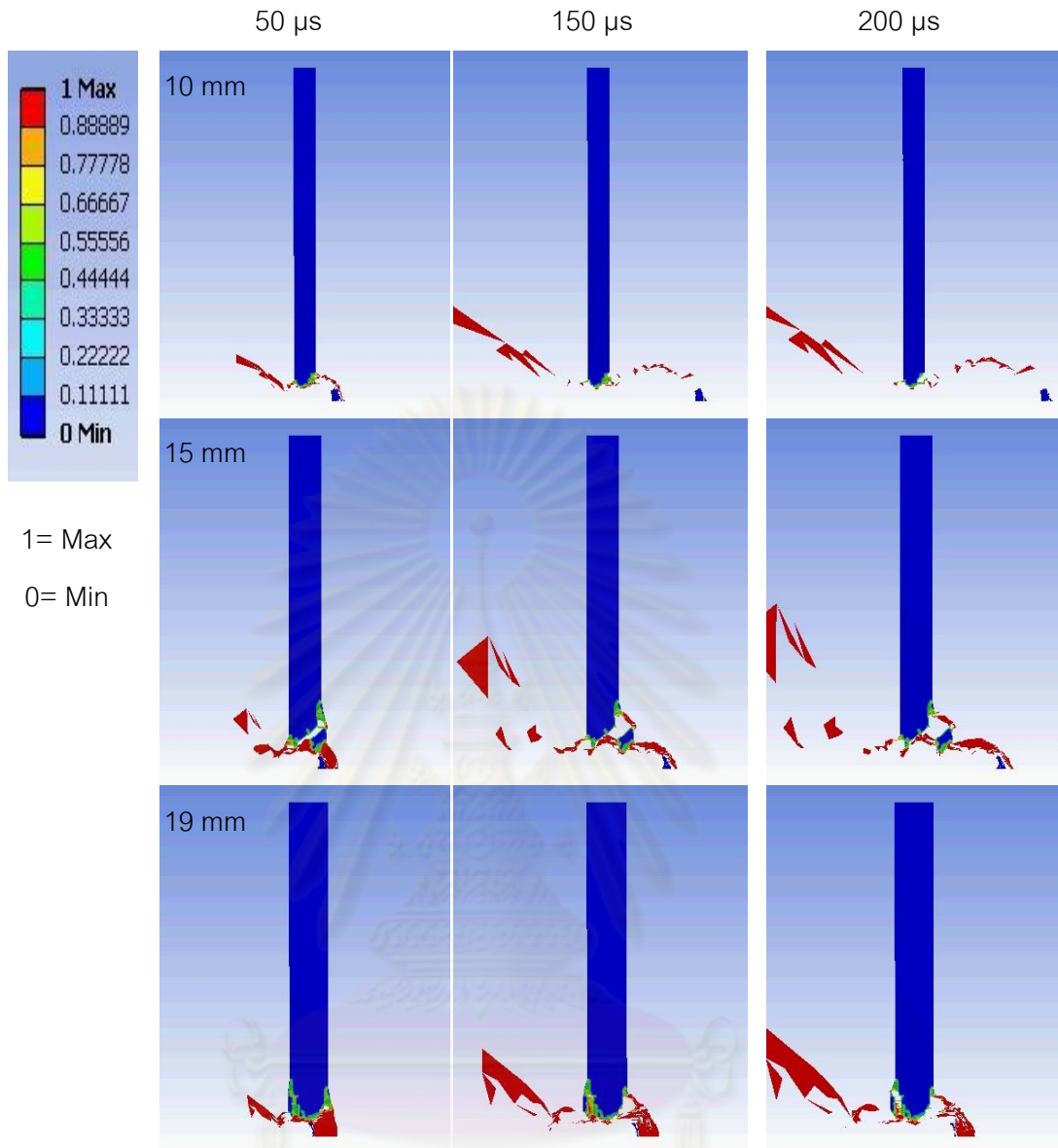
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.8 ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงการทดสอบยิงด้วยกระสุน 9 มิลลิเมตร ที่ระดับ 2A ความเร็ว 332 เมตรต่อวินาที

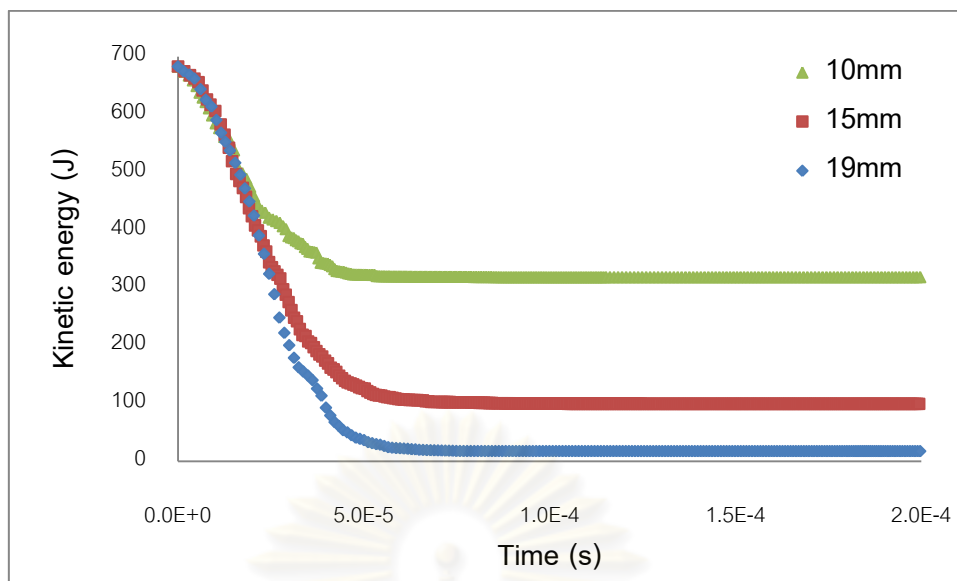
ความเสียหายของชิ้นงานแผ่นกระจกที่ความหนา 10 15 และ 19 มิลลิเมตร กระสุน 9 มม. ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในภาพที่ 4.9 พบว่าชิ้นงานแผ่นกระจกความหนา 19 มิลลิเมตร มีความสามารถในการยับยั้งกระสุนไว้ได้ เกิดการทะลุเพียงบางส่วน ซึ่งจากค่าพลังงานจลน์ของกระสุนมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์ ดังภาพที่ 4.10

ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.9 ความเสียหายของแผ่นกระจกที่ความหนาแตกต่างกันในสภาวะการทดสอบยิงด้วยกระสุน 9 มิลลิเมตร ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.10 ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงการทดสอบยิงด้วยกระสุน 9 มิลลิเมตร ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที

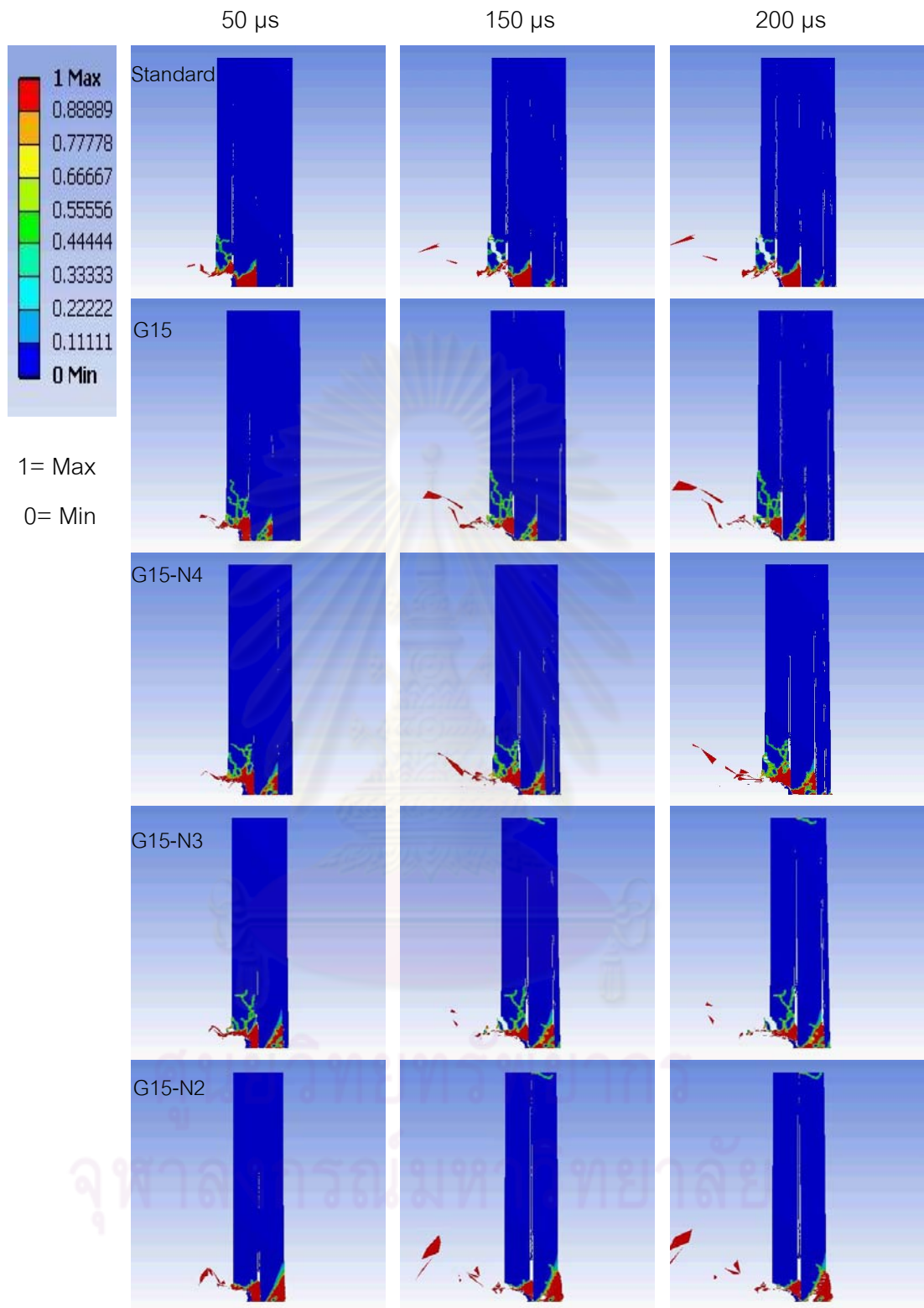
ตารางที่ 4.2 แสดงผลความเสียหายของแผ่นกระจกจากการทดสอบจริงเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ระดับ	ความหนากระจก (มิลลิเมตร)	การทดสอบจริง	การจำลองทางไฟไนต์ เอลิเมนต์
2A	10	ทะลุ	ทะลุ
	15	ทะลุบางส่วน	ทะลุ
	19	ทะลุบางส่วน	ทะลุบางส่วน
3A	10	ทะลุ	ทะลุ
	15	ทะลุ	ทะลุ
	19	ทะลุบางส่วน	ทะลุ

จากผลการจำลองความเสียหายของชิ้นงานแผ่นกระจกที่ความหนาแตกต่างกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบยิงจริง พบว่าผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน เป็นการยืนยันว่าการจำลองโดยใช้โปรแกรมมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะใช้คาดการณ์ความเสียหายของชิ้นงานแผ่นกระจกกันกระสุนได้

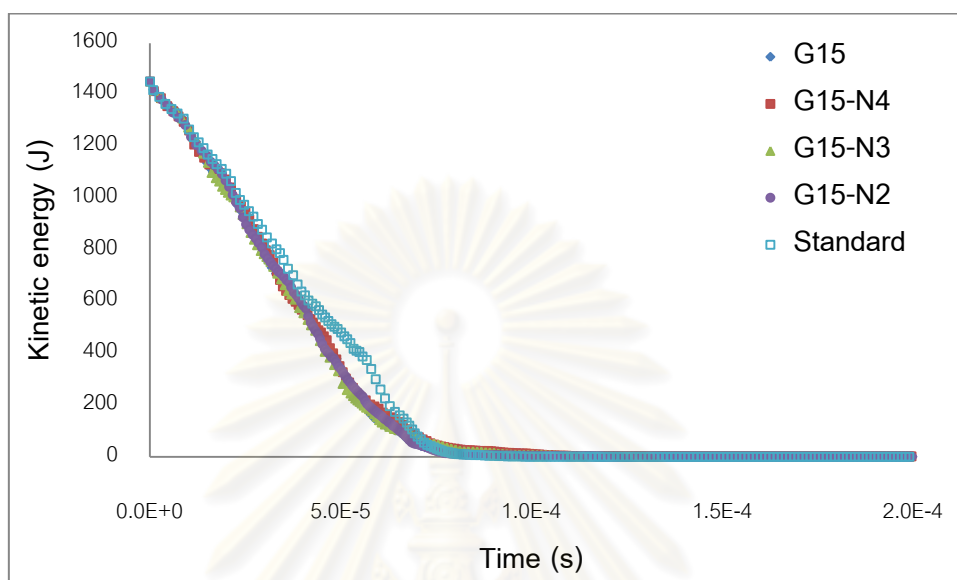
4.2.4 ผลของจำนวนชั้นกระจกที่มีต่อการต้านทานกระสุนโดยแบบจำลองไฟ-ไนต์เอเลเมนต์

ภาพที่ 4.11 แสดงแบบจำลองความเสียหายของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน (G15 G15-N4 G15-N3 และ G15-N2) พบว่าเกราะกันกระสุนทุกชิ้นงานมีความสามารถในการยับยั้งกระสุนขนาด .44 magnum ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที ระดับ 3A ตามมาตรฐาน NIJ ได้ โดยชิ้นงาน G15 และ G15-N4 มีความสามารถในการกันกระสุน .44 ที่ระดับ 3A ได้ดี ความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนถึงกระจกแผ่นที่ 2 ซึ่งใกล้เคียงกับชิ้นงานมาตรฐาน [42] แต่สำหรับชิ้นงาน G15-N3 และ G15-N2 เกิดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานมีความรุนแรงมากกว่า โดยชิ้นงานจะเกิดความเสียหายจนถึงแผ่นกระจกด้านหลังและมีความเสียหายตรงตำแหน่งขอบของชิ้นงาน จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง เพราะอาจเกิดอันตรายจากเศษกระจกด้านหลังที่หลุดออกจากชิ้นงานได้ ผลจากการศึกษาแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบยิงจริง พบว่ามีความสอดคล้องกัน และเป็นที่ยืนยันว่าชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง คือ G15-N4



ภาพที่ 4.11 แบบจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนที่จำนวนชั้นแตกต่างกันในสภาวะการทดสอบยิงด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที

เมื่อพิจารณาค่าพลังงานจลน์ของชิ้นงานแต่ละชนิดแล้ว พบว่าชิ้นงานทุกชนิดมีความสามารถในการยับยั้งการชนจากกระสุนได้ ค่าพลังงานจลน์ลดลงเท่ากับศูนย์หลังจากการทดสอบยิง ดังภาพที่ 4.12

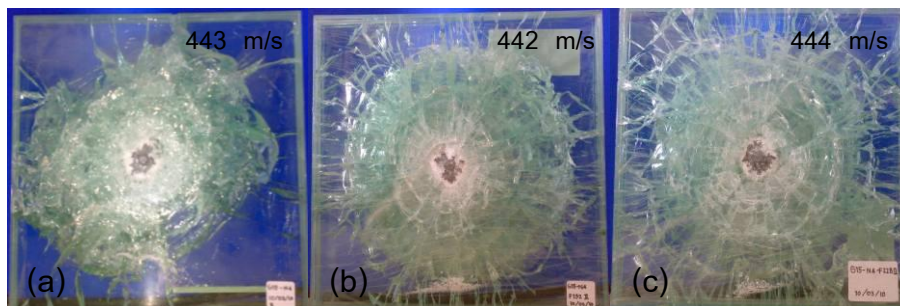


ภาพที่ 4.12 ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงการทดสอบยิงแผ่นเกราะที่จำนวนชั้นแตกต่างกันด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที

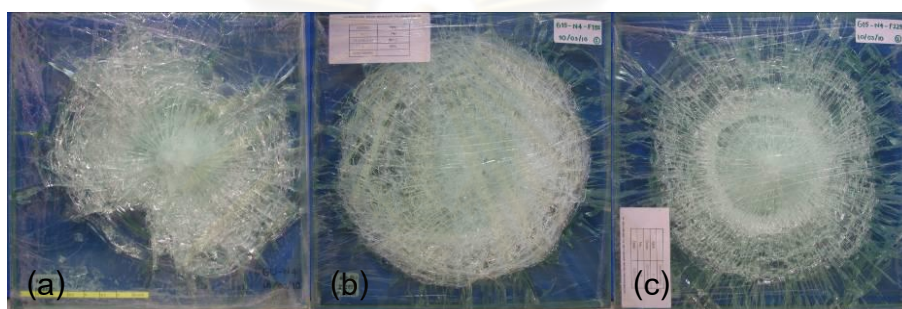
4.3 ผลของความหนาของแผ่นฟิล์มที่มีต่อความสามารถในการกันกระสุน

4.3.1 ผลจากการทดสอบยิง

งานวิจัยในส่วนนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาของฟิล์มที่มีต่อความสามารถในการกันกระสุนของชิ้นงานเกราะกันกระสุน โดยทำการเตรียมชิ้นงาน G15-N4 กำหนดความหนาของฟิล์มชั้นแรกแตกต่างกัน คือ 0.76 1.52 และ 2.28 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบยิงชิ้นงาน พบว่าจากเดิมที่ชิ้นงานเกิดรอยแตกร้าวถึงกระจุกแผ่นที่สองเมื่อเพิ่มความหนาฟิล์ม รอยแตกร้าวจะปรากฏในทุกชั้นของกระจุก และเมื่อพิจารณาที่รอยแตกร้าวพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มจะทำให้เกิดวงรัศมีของความเสียหายเป็นวงกว้างเพิ่มมากขึ้นที่กระจุกชั้นสุดท้าย ดังแสดงในภาพที่ 4.13 และ 4.14



ภาพที่ 4.13 ความเสียหายด้านหน้าของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G15-N4 (b) G15-N4-F152 (c) G15-N4-F228

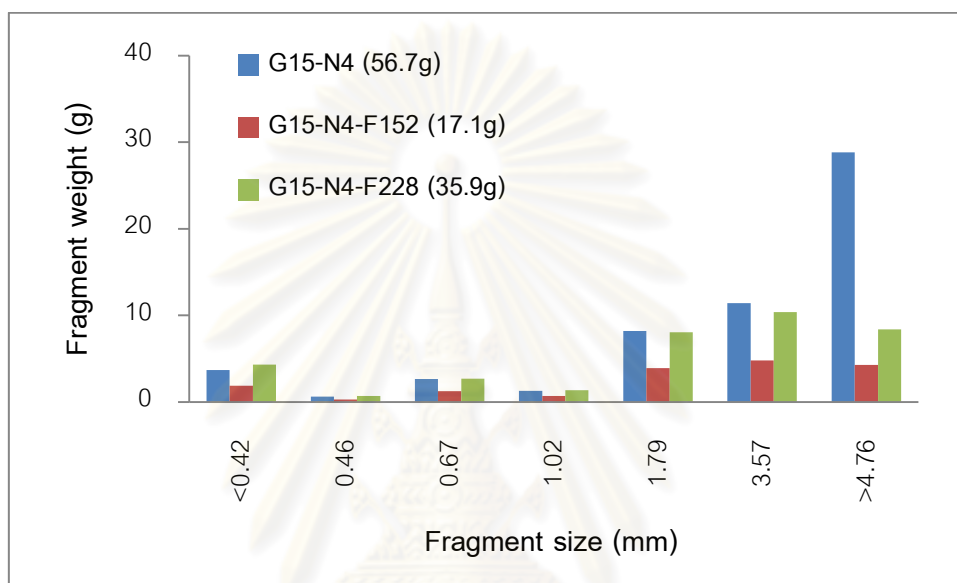


ภาพที่ 4.14 ความเสียหายด้านหลังของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G15-N4 (b) G15-N4-F152 (c) G15-N4-F228

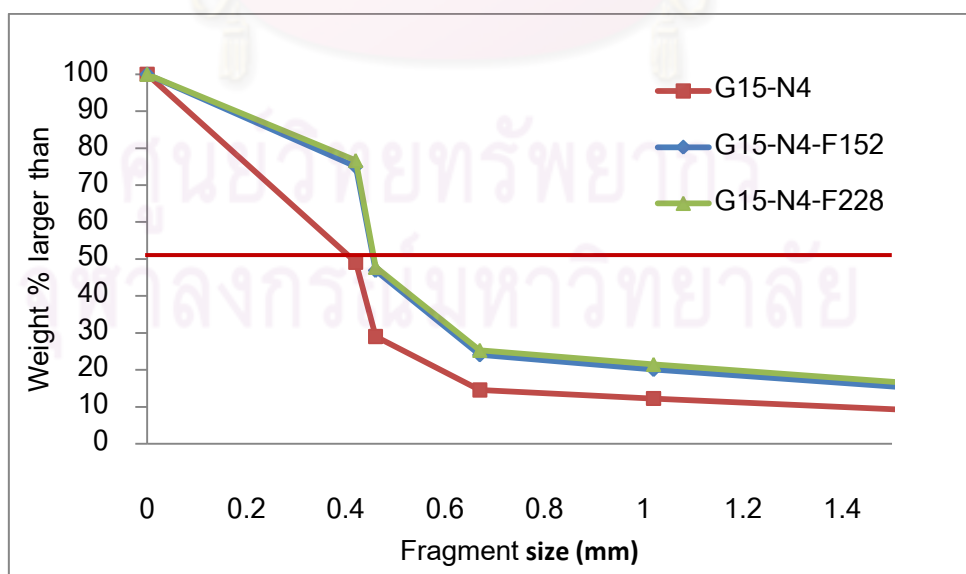
จากภาพจะเห็นว่าลักษณะการแตกของชิ้นงานเกิดรอยแตกสองชนิดที่สอดคล้องประสานกัน ได้แก่ 1) รอยแตกตามรัศมี (Radial cracks) เริ่มเกิดจากกึ่งกลางของชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากความเค้นในทิศทางตามเส้นรอบวง (Hoop stress) และ 2) เกิดรอยแตกร่วมศูนย์กลาง (Concentric cracks) วงนอกหลังจากการเกิดรอยแตกตามรัศมี [40, 43] งานวิจัยที่ผ่านมาได้อธิบายการแตกของชิ้นงานเกราะชนิดกระจกโซดาไลม์ว่าจะเกิดรอยแตกแบบตามแนวรัศมีทุกชั้นของแผ่นกระจกที่เกิดความเสียหายของชิ้นงานเกราะ [44] การที่รอยแตกเกิดเป็นบริเวณกว้างขึ้นในกระจกแผ่นสุดท้ายของชิ้นงานที่ทำการเพิ่มความหนาฟิล์มเป็นการบ่งชี้ว่า แรงได้ถูกส่งผ่านมายังฟิล์มที่หนาขึ้น และมีเวลาอยู่ในชั้นพอลิเมอร์นี้เป็นระยะเวลาสั้นขึ้น จนสามารถกระจายแรงออกไปตามแนวระนาบแผ่นฟิล์ม แรงดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปยังกระจกชั้นต่อไปด้วยความเร็วที่ลดลง และจะไปสร้างรอยแตกให้แก่กระจกชั้นต่อไปเป็นวงกว้างส่งผลให้รอยแตกในกระจกชั้นที่สองมีลักษณะแผ่กระจายเป็นวงกว้าง ในกรณีนี้แรงที่จะสะท้อนกลับมายังกระจกแผ่นหน้าจะมีกำลังลดลง (หรือไม่เพิ่มขึ้น) ทำให้ปริมาณเศษกระจกที่หลุดออกจากกระจกแผ่นหน้ามีปริมาณลดลง เมื่อความหนาฟิล์มเพิ่มมากขึ้น

4.3.2 การวิเคราะห์แฟรกเมนเทชันเพื่อศึกษาอิทธิพลจากความหนาของแผ่นฟิล์ม

ผลการตรวจสอบแฟรกเมนเทชันในกระจกชุดนี้ (ภาพที่ 4.15 และ 4.16) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณเศษกระจกที่หลุดออกจากกระจกแผ่นหน้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความหนาฟิล์ม ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของเศษกระจกมากขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาฟิล์ม



ภาพที่ 4.15 การกระจายขนาดเศษกระจกของชิ้นงาน G15-N4 เมื่อความหนาฟิล์มแตกต่างกัน



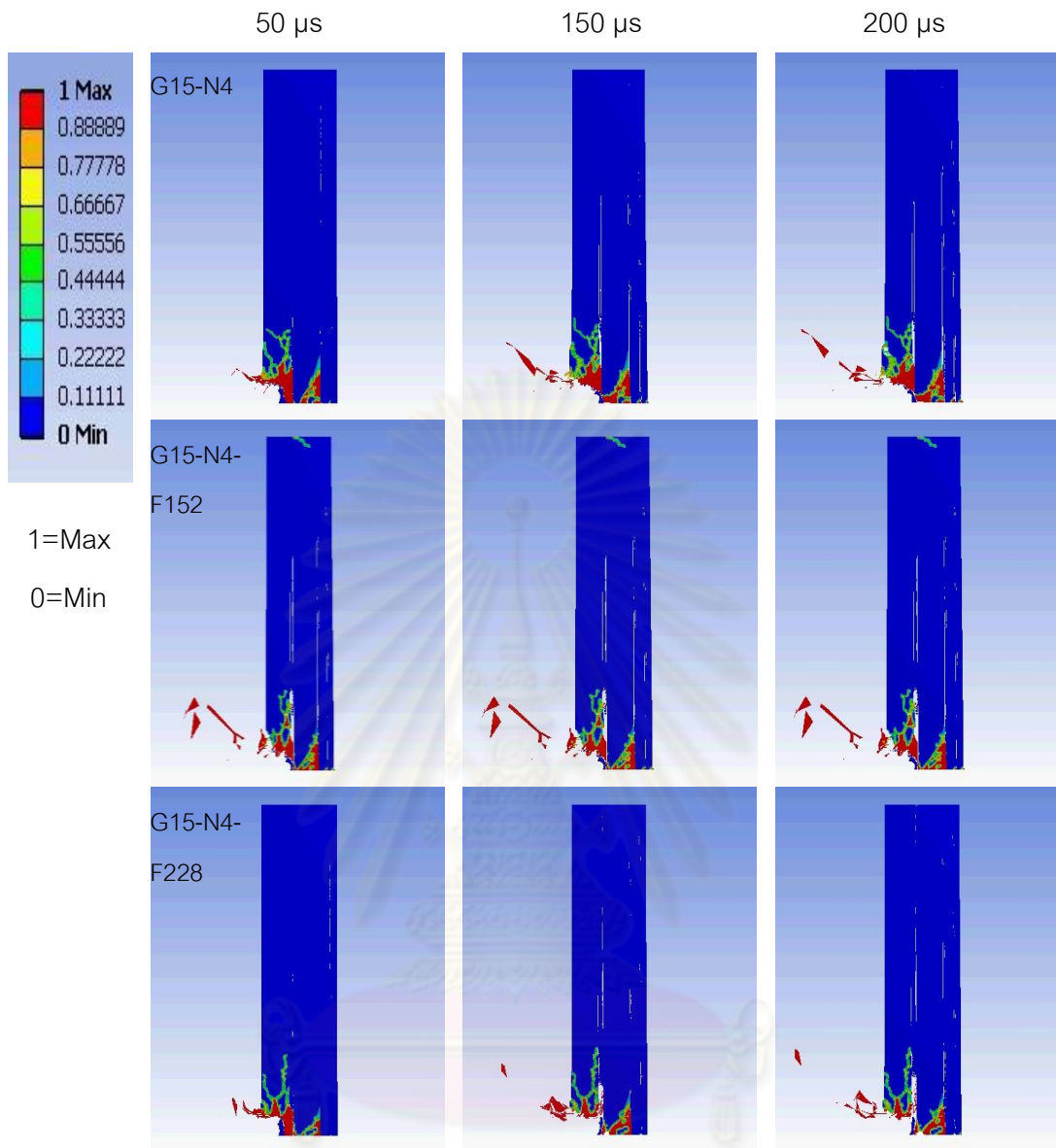
ภาพที่ 4.16 แผนภาพขนาดอนุภาคเฉลี่ยของชิ้นงาน G15-N4 เมื่อความหนาฟิล์มแตกต่างกัน

4.3.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาอิทธิพลจากความหนาของแผ่นฟิล์ม

จากการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นเกราะที่เหมาะสม คือ ชั้นงาน G15-N4 จึงทำการศึกษาความหนาฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับชั้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน โดยศึกษาความหนาฟิล์มแผ่นแรก ของชั้นงานที่แตกต่างกัน คือ 0.76 1.52 และ 2.28 มิลลิเมตร ผลความเสียหายของชั้นงานจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ความสามารถในการกันกระสุนของแผ่นเกราะเพิ่มขึ้น และอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นเกราะมากขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาฟิล์มเป็น 1.52 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 4.17 และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานจลน์ของชั้นงาน พบว่าการเพิ่มความหนาของแผ่นฟิล์มทำให้เวลาที่ใช้เพื่อให้ค่าพลังงานจลน์ลดลงเหลือศูนย์มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับชั้นงานที่ไม่ทำการเพิ่มความหนาฟิล์ม (ดังภาพที่ 4.18)

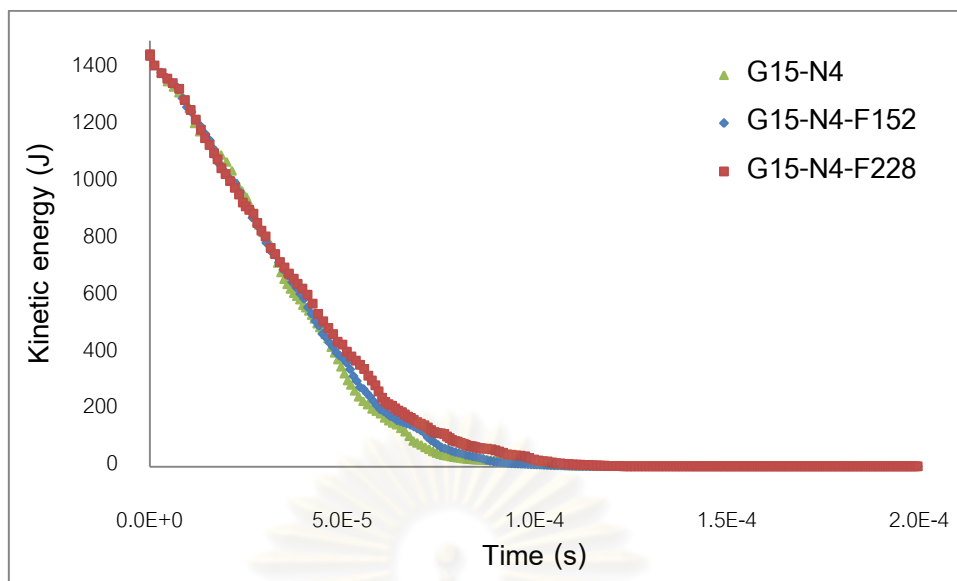


ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.17 ความเสียหายของแผ่นเกราะ G15-N4 ที่ความหนาฟิล์มแตกต่างกันเมื่อเวลาผ่านไป ในระหว่างการทดสอบยิงด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

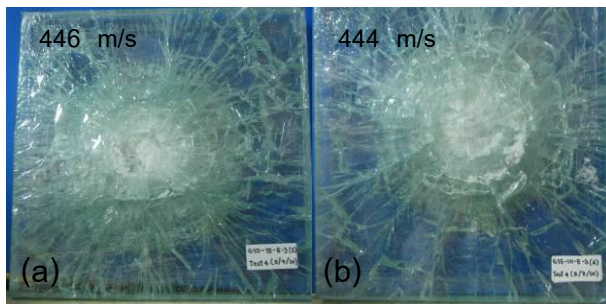


ภาพที่ 4.18 ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงการทดสอบยิงแผ่นเกราะ G15-N4 ที่ความหนาฟิล์มแตกต่างกันด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที

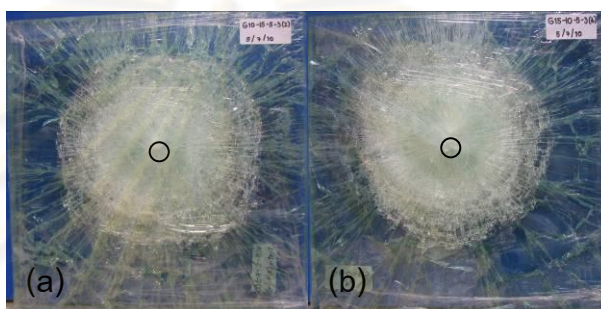
4.4 ความหนาของแผ่นกระจกที่เหมาะสมเพื่อลดน้ำหนักแผ่นเกราะกันกระสุน

งานวิจัยส่วนนี้มีจุดประสงค์ต้องการศึกษาความหนาของแผ่นกระจกที่เหมาะสมเพื่อทำการลดน้ำหนักแผ่นเกราะกันกระสุน โดยทำการลดความหนาแผ่นกระจกแผ่นที่ 1 หรือ 2 จากความหนา 15 มิลลิเมตร เหลือเพียง 10 มิลลิเมตร จากการทดสอบยิงพบว่าชิ้นงาน G15-10-5-3 และ G10-15-5-3 เกิดความเสียหายและรอยร้าวของแผ่นกระจกจนถึงแผ่นสุดท้ายเป็นจำนวนมาก บนชิ้นงาน เกิดการหลุดออกของแผ่นกระจกแผ่นหลังเป็นหลุมขนาดรัศมี 0.9 และ 1.2 เซนติเมตร สำหรับชิ้นงาน G15-10-5-3 และ G10-15-5-3 ตามลำดับ ดังแสดงภาพที่ 4.19 และ 4.20

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นกระจกด้านหน้าแผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2 ที่จะสามารถทำลายหัวกระสุนที่พุ่งชนแผ่นเกราะด้วยความเร็วสูงนั้นมีความหนาไม่น้อยกว่า 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.19 ความเสียหายด้านหน้าของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G10-15-5-3 (b) G15-10-5-3



ภาพที่ 4.20 ความเสียหายด้านหลังของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G10-15-5-3 (b) G15-10-5-3

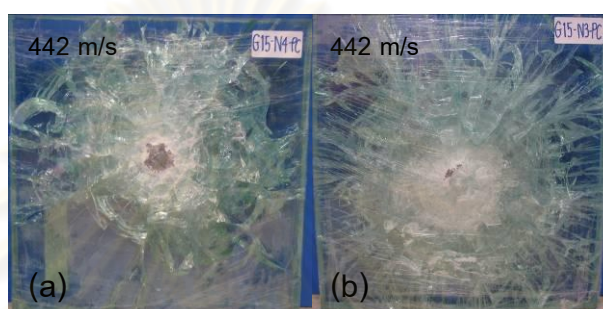
4.5 การลดน้ำหนักชิ้นงานแผ่นเกราะโดยใช้วัสดุโพลีคาร์บอเนต

4.5.1 ผลการทดสอบยิง

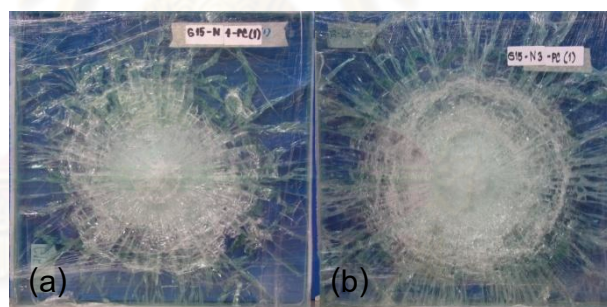
วัสดุโพลีคาร์บอเนตเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานการชนจากเศษกระสุนที่แตกออก และสามารถกระจายแรงของเศษกระสุนได้ [1] ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะเพิ่มประสิทธิภาพชิ้นงานแผ่นเกราะโดยเพิ่มแผ่นโพลีคาร์บอเนตความหนา 3 มิลลิเมตร ด้านหลังชิ้นงาน G15-N4 และ G15-N3 จากผลการทดสอบยิงพบว่าไม่พบความเสียหายของวัสดุโพลีคาร์บอเนตแผ่นหลัง ดังภาพที่ 4.22 จากการใช้วัสดุโพลีคาร์บอเนตทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงาน G15-N3-PC ซึ่งมีการจัดเรียงของกระจกด้านหน้าแผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบ G15-N3 ให้มีความสามารถในการต้านทานต่อกระสุนได้ดียิ่งขึ้น และสามารถลดน้ำหนักแผ่นเกราะ 26.54% และความหนาลดลง 11.76 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับชิ้นงานมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความหนาและน้ำหนักของชิ้นงานเมื่อเพิ่มวัสดุโพลีคาร์บอเนต

ชิ้นงาน	การจัดเรียงชิ้นงาน	ความหนารวม (mm)	ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (kg/ft ²)	% น้ำหนักที่ลดลง
G15-N4-PC	15/15/5/3/PC	44.04	9.49	-15.49
G15-N3-PC	15/15/3/PC	38.28	8.25	-26.54
standard	TGSG	50.04	11.23	-



ภาพที่ 4.21 ความเสียหายด้านหน้าของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G15-N4-PC (b) G15-N3-PC

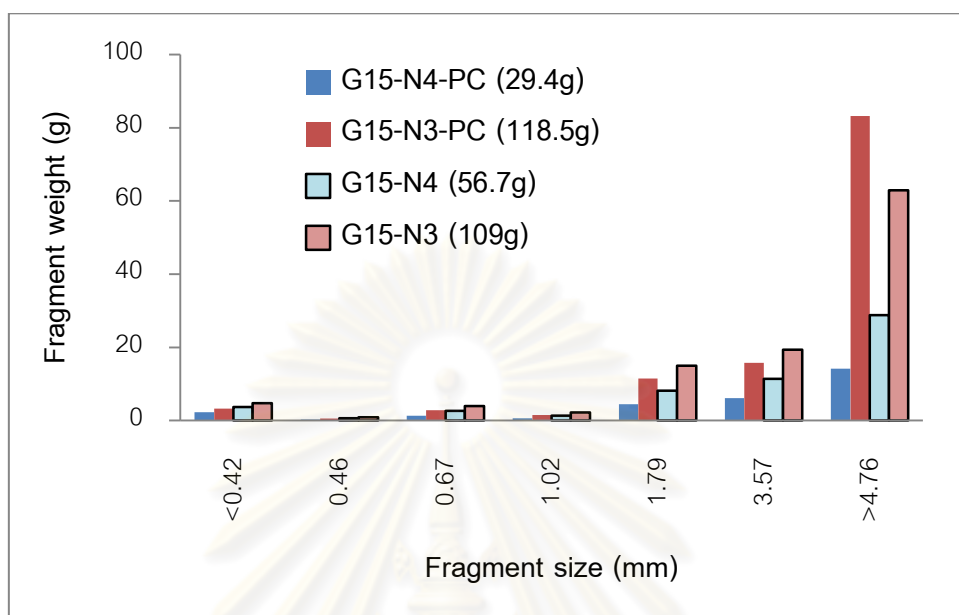


ภาพที่ 4.22 ความเสียหายด้านหลังของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน (a) G15-N4-PC (b) G15-N3-PC

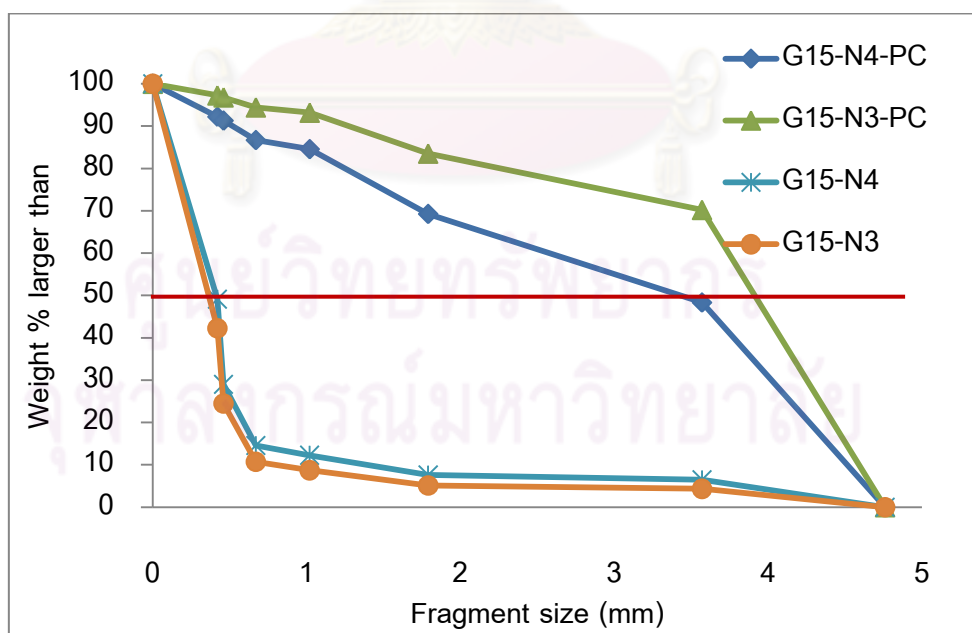
4.5.2 ผลของแฟรกเมนเทชันต่อการศึกษาการลดน้ำหนักชิ้นงานแผ่นเกราะโดยการใช้วัสดุโพลีคาร์บอเนต

จากผลการคัดแยกขนาดของเศษกระจกที่หลุดออกจากชิ้นงาน G15-N4-PC และ G15-N3-PC พบว่าชิ้นงาน G15-N3-PC มีเศษกระจกที่หลุดออกมากกว่าชิ้นงาน G15-N4-PC ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเศษกระจกที่หลุดออกมาของชิ้นงานทั้งสองแบบสอดคล้องกับผลการทดลองของชิ้นงาน G15-N4 และ G15-N3 ซึ่งไม่มีการเพิ่มวัสดุโพลีคาร์บอเนต ดังภาพที่ 4.23 และจากผลของค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยพบว่าชิ้นงาน G15-N4-PC และชิ้นงาน G15-N3-PC มีค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดพลังงานการสะท้อนกลับมายังกระจกแผ่นหน้าเป็นจำนวนมาก ดังภาพ

ที่ 4.24 ชิ้นงานมีค่าความเหนียวและความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนมีประสิทธิภาพและมีความสามารถในการกันกระสุนได้ดียิ่งขึ้น และปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน



ภาพที่ 4.23 การกระจายขนาดเศษกระจกของชิ้นงาน G15-N4-PC และ G15-N3-PC เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน G15-N4 และ G15-N3



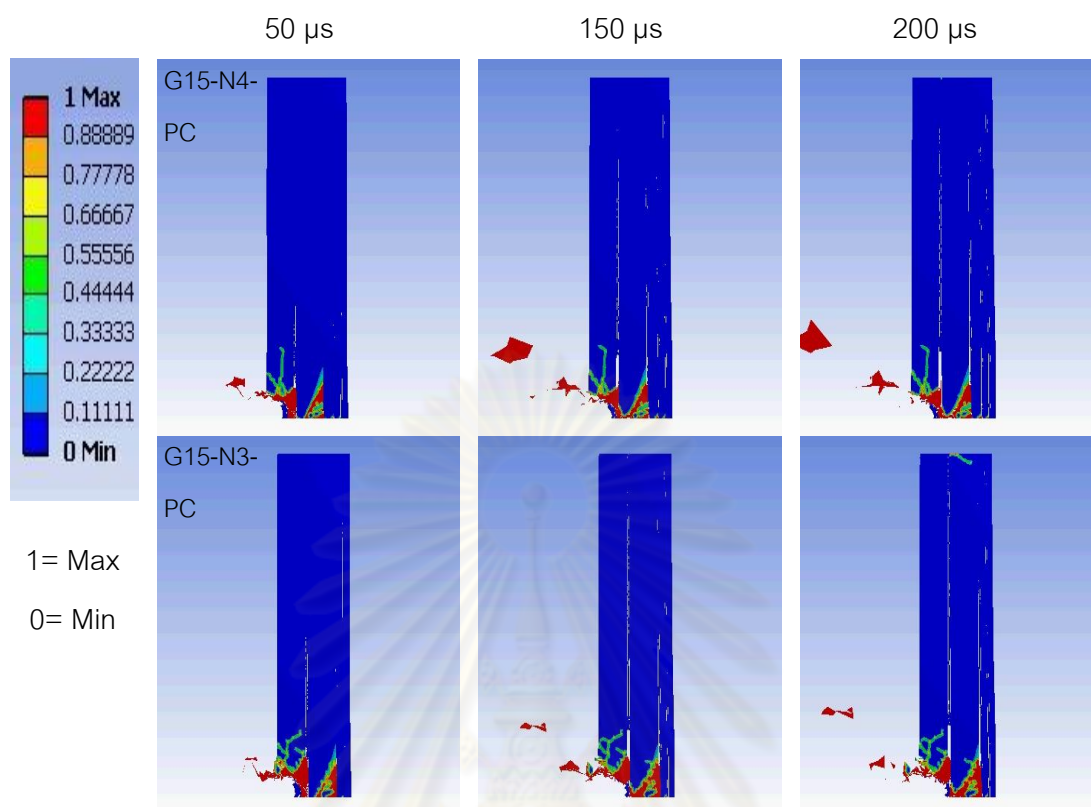
ภาพที่ 4.24 แผนภาพขนาดอนุภาคเฉลี่ยของชิ้นงาน G15-N4-PC และ G15-N3-PC เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน G15-N4 และ G15-N3

4.5.3 ผลของการศึกษาความเสียหายของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อการศึกษาการลดน้ำหนักชิ้นงานแผ่นเกราะโดยการใส่วัสดุโพลีคาร์บอเนต

จากภาพที่ 4.25 แสดงความเสียหายของชิ้นงานแผ่นเกราะ G15-N4-PC และ G15-N3-PC พบว่าความเสียหายของแผ่นเกราะจะเกิดขึ้นถึงกระจกแผ่นที่สอง และพบความเสียหายตรงตำแหน่งขอบของชิ้นงาน G15-N3-PC เล็กน้อย และจากค่าพลังงานจลน์ของทั้งสองชิ้นงานลดลงเหลือศูนย์เมื่อเวลาผ่านไปหลังการทดสอบยิง ดังภาพที่ 4.26 ชิ้นงานแผ่นเกราะทั้งสองจึงมีความสามารถในการกันกระสุนได้ดี ซึ่งการเพิ่มแผ่นโพลีคาร์บอเนตสามารถยับยั้งการเกิดสะเก็ดที่หลุดออกจากด้านหลังชิ้นงานด้านหลังหลังจากการทดสอบยิง

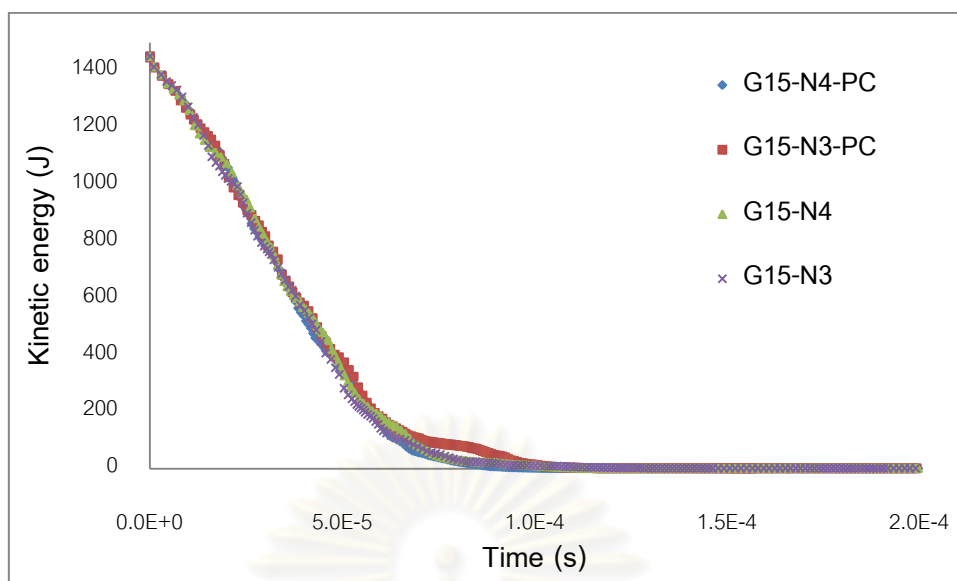


ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.25 ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุน G15-N4-PC และ G15-N3-PC เมื่อเวลาผ่านไปในช่วงการทดสอบยิงด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.26 ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงการทดสอบยิงแผ่นเกราะกันกระสุน G15-N4-PC และ G15-N3-PC ด้วยกระสุน .44 magnum ที่ระดับ 3A ความเร็ว 426 เมตรต่อวินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงชั้นกระจกโซดาไลม์และฟิล์มพีวีบีในโครงสร้างกระจกใสที่มีต่อความสามารถในการป้องกันกระสุนของกระจก โดยกำหนดการทดสอบยิงอยู่ที่ระดับ 3A ตามมาตรฐาน NIJ ได้ข้อสรุปดังนี้

5. กระจกโซดาไลม์แผ่นหน้า (ด้านปะทะกระสุน) ที่เหมาะสม สามารถทำให้ชิ้นงานทนทานต่อแรงกระสุนในระดับ 3A ควรจะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 15 มิลลิเมตร
6. ชิ้นงานกระจกที่ได้จากการจัดเรียงชั้นกระจกโซดาไลม์และฟิล์มพีวีบี ตามรูปแบบ G15-N4 มีน้ำหนักเบากว่าชิ้นงานมาตรฐาน 19.23% และบางกว่าชิ้นงานมาตรฐาน 9.76 มิลลิเมตร ชิ้นงานดังกล่าวยังคงสามารถต้านทานกระสุนที่ระดับ 3A ได้ดี
7. การเพิ่มความหนาของฟิล์ม ไม่ส่งผลให้รอยแตกบนชิ้นงานมีปริมาณลดลง แต่กลับทำให้พื้นที่ในการรอยแตกเกิดบนกระจกแผ่นหลังแผ่ขยายกว้างขึ้นกว่าเดิม ปฏิกิริยานี้ อาจเป็นผลมาจากการที่แรงมีเวลาอยู่ในชั้นฟิล์มนานขึ้น จึงเกิดการดูดซับและแผ่แนวแรงไปตามระนาบของแผ่นฟิล์มได้มากขึ้น
8. เมื่อทำการปรับความหนาของกระจกสองแผ่นหน้า ในกระจกใสที่มีการจัดเรียงตามรูปแบบ G15 โดยลดความหนากระจกแผ่นหน้าสุด หรือ ลดความหนากระจกแผ่นที่สอง พบว่าชิ้นงานที่ปรับความหนากระจกไม่สามารถต้านทานกระสุนได้ ความหนาขั้นต่ำที่เหมาะสมของกระจกสองแผ่นด้านหน้าจะต้องไม่น้อยกว่า 30 มิลลิเมตร
9. เมื่อประกอบแผ่นโพลีคาร์บอเนตความหนา 3 มิลลิเมตร ที่ด้านหลังของชิ้นงาน G15-N3 จะทำให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพในการกันกระสุนมากขึ้น มีน้ำหนักเบากว่าชิ้นงานมาตรฐาน 26.54% และบางกว่าชิ้นงานมาตรฐาน 11.76 มิลลิเมตร
10. ผลวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการยิงทดสอบจริงและจากการวิเคราะห์แฟร็กเมนต์ชัน ซึ่งแสดงว่าการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิ-

เมนต์ในงานวิจัยนี้ มีประสิทธิภาพดีเพียงพอที่จะนำมาศึกษาแนวโน้มความสามารถในการกันกระสุนของเกราะใสได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากความสำคัญของวัสดุแผ่นหน้าที่จะต้องมีความแข็งและความแข็งแรงเพราะมีหน้าที่ในการยับยั้งและทำลายความสามารถในการทะลุทะลวงของกระสุน ทำให้มีงานวิจัยมากมายได้ทำการศึกษาความสามารถในการป้องกันกระสุนของแผ่นเกราะโดยใช้วัสดุชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติเด่นมากกว่ากระจกชนิดโซดาไลม์ เช่น แซฟไฟร์ สปิเนล เป็นต้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมภายหลังจากงานวิจัยนี้ โดยเปลี่ยนวัสดุแผ่นหน้าเป็นวัสดุที่มีความแข็งและแข็งแรงสูงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น
2. จากงานวิจัยที่ผ่านมาผู้ศึกษาการผลิตแผ่นเกราะใสโดยใช้แผ่นฟิล์มได้หลากหลายชนิดเพื่อศึกษาพฤติกรรมของลักษณะการแตกของชิ้นงานแผ่นเกราะ และพบว่าการใช้งานเป็นเวลานานของแผ่นเกราะที่ถูกผลิตจากแผ่นฟิล์มพีวีจะเกิดความเสียหาย เกิดการหลุดลอกของแผ่นฟิล์มออกจากแผ่นกระจกได้ เนื่องจากแผ่นฟิล์มพีวีมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาความสามารถในการป้องกันกระสุนของแผ่นเกราะโดยใช้ฟิล์มชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติไม่ดูดซับความชื้นและมีพฤติกรรมลักษณะการแตกชิ้นงานที่แตกต่าง เช่น แผ่นฟิล์มพี-ยู และแผ่นฟิล์มอีวีเอ
3. การพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลสมบัติของวัสดุเพื่อสร้างแบบจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะใสจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ซึ่งอาจได้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุบางส่วนไม่สอดคล้องกับวัสดุที่นำมาผลิตชิ้นงานแผ่นเกราะในงานวิจัยนี้ ดังนั้นเพื่อความสมบูรณ์ของแบบจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะจึงควรนำวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาทำการทดสอบ Hopkinson pressure bar เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุแต่ละชนิดในสภาวะการเปลี่ยนแปลงความเครียดสูง

รายการอ้างอิง

- [1.] Freeguard, G. F., and Marshall, D. 1980. *Bullet-resistant glass A review of product and process technology*, in *Composite*, Department of chemical engineering, University of Nottingham: Nottingham, England.
- [2.] Grant, P. V., Cantwell, W. J., Mckenzie, H., and Corkhill, P. 1998. *The damage threshold of laminated glass structures*. *Int. J. Impact. Engng*, 21: p. 737-746.
- [3.] Straßburger, E. 2009. *Ballistic testing of transparent armour ceramics*. *J Eur Ceram Soc*, 29[2]: p. 267-273.
- [4.] Orgaz, F., and GomezDelRio, T. 2009. *Dynamic fracture and fragmentation patterns of borosilicate laminate glasses*. *Bol. Soc. Esp. Ceram*, 48[5]: p. 267-272.
- [5.] Sands, J. M., Fountzoulas, C. G., Gilde, G. A., and Patel, P. J. 2009. *Modelling transparent ceramics to improve military armour*. *J. Eur. Ceram. Soc*, 29: p. 261-266.
- [6.] Patel, P. J., Glide, G. A., Debmer, P. G., and Mccauley, J. W. 2000. *Transparent armor*. AMPTIAC Newsletter 4 [3] 1-13.
- [7.] Savineau, G. F. 1997. *Fundamentals of laminating process and quality requirements*, in *Glass processing day*, The fifth international conference on architectural and automotive glass. 13-15 September 1997. Tampere, Finland. p. 154-157.
- [8.] Barsoum, M. W. 1997. *Fundamental of ceramics*. The McGraw-Hill companies, Inc.
- [9.] Properties of soda-lime silica float glass. [online] Available from: www.pilkington.com/resources/ats129swproperties20090804.doc. [2011, April 29]
- [10.] Toqueboeuf, W., Mortaigne, B., and Cottenot, C. 1997. *Dynamic behaviour of polycarbonate/polyurethane multi-layer for transparent armor*. *J. Appl. Phys IV*, 7[C3]: p. 499-503.
- [11.] Weller, B., Wunsch, J., and Harth, K. 2005. *Experimental study on different interlayer materials for laminated glass*, in *Glass processing days*. Dresden, Germany. p. 120-123.

- [12.] Iwasaki, R., Sato, C., Lataillade, J. L., and Viot, P. 2007. *Experimental study on the interface fracture toughness of PVB (polyvinyl butyral)/glass at high strain rates*. TCRS, 12: p. 293-298.
- [13.] Dupont PV5200 series. 2009, Dupont. (Unpublished Manuscript)
- [14.] polycarbonate. [online] Available from:
www.polycarbonate/en.wikipedia.org/wiki/polycarbonate. [2011, February 20]
- [15.] Laxan 9030 sheet product data sheet, GE plastics. (Unpublished Manuscript)
- [16.] Kent, D., Wang, G., Yu, Z., Ma, X., and Dargusch, M. 2011. *Strength enhancement of biomedical titanium alloy through a modified accumulative roll bonding technique*. J. Mech. Biomed. Mater, 4: p. 405-416.
- [17.] Vacuum oven. [online] Available from: www.alibaba.com/product-free/100833445/vacuum_lacquer_curing_ovens/showimage.html. [2011, February 20]
- [18.] วรมน สุภัทรวณิชย์. 2534 "หม้อนึ่งอัตโนมัติ" เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการปฏิบัติงานเบื้องต้น. โดย รศ.ดร. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 173-176
- [19.] Autoclave. [online] Available from: www.domus-co.com/autoclaves/autoclave-steriflow/. [2011, February 21]
- [20.] Stewart, J. K.1985. *Ballistic resistant protective materials, NIJStandard 0108.01*. National Institute of Justice. (Unpublished Manuscript)
- [21.] มาตรฐานยุโรปกรณี กระบองกลาโหม. 2543, กมย.กท. (Mimeographed)
- [22.] Jacobsen, T. F. *Transparent armor options ground vehicles*, Sierracin/Sylmar Corp. (Unpublished Manuscript)
- [23.] Grady, D. E., and Kipp, M. E. 1985. *Mechanisms of dynamic fragmentation: factors governing fragment size*. Mech. Mater, 4[3-4]: p. 311-320.
- [24.] Bouzid, S., Nyoungue, A., Azari, Z., Bouaouadja, N., and Pluinage, G. 2001. *Fracture criterion for glass under impact loading*. Int. J. Impact. Engng, 25: p. 831-845.
- [25.] Grady, D. E., and Kipp, M. E. 1985. *Mechanisms of dynamic fragmentation: factors governing fragment size*. Mech. Mater, 4: p. 321-324.
- [26.] Burnett, D. S. 1987. *Finite element analysis from concepts to applications*. Addison-wesley publishing company.

- [27.] Chandrupatla, T. R., and Belegundu, A. D. 2002. *Introduction to finite element in engineering*. New Jersey. Prentice-Hall international, Inc.
- [28.] Dechaumphai, P. 2010. *Finite element method: fundamentals and applications*. Alpha science international, Ltd.
- [29.] Krishnamoorthy, C. S. 1987. *Finite element analysis theory and programming*. McGraw-Hall publishing company.
- [30.] Bathe, K. J. 1996. *Finite element procedures*. Prentice-Hall international, Inc.
- [31.] Stress-strain curve. [online] Available from: www.orthobullets.com/basic-science/9062/material-properties. [2011, February 23]
- [32.] Holmquist, T. J., Johnson, G. R., Grady, D. E., Lopatin, C. M., and Hertel, E. S. 1995. *High strain rate properties and constitutive modeling of glass*, in *15th International symposium on ballistics*. Jerusalem, Israel.
- [33.] Richards, M., Clegg, R., and Howlett, S. 1999. *Ballistic performance assessment of glass laminates through experimental and numerical investigation*, in *18th International symposium and exhibition on ballistics*. San Antonio, Texas, USA.
- [34.] Johnson, G. R., and Holmquist, T. J. 1994. *An improved computational constitutive model for brittle materials*. American Institute of Physics. p. 981-984.
- [35.] Steinberg, D. J., Cochran, S. G., and Guinan, M. W. 1979. *A constitutive model for metals applicable at high-strain rate*. *J. Appl. Phys.*, 51(3): p. 1498-1504.
- [36.] Multilinear stress-strain curve. [online] Available from: www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/thy_mat1.html. [2011, February 25]
- [37.] Maw, J. R., and Whitworth, N. J. 1997. *Shock compression and the equation of state of fully dense and porous polyurethane*. The American Institute of Physics. p. 111-114.
- [38.] Maw, J. R., Whitworth, N. J., and Holland, R. B. 1996. *Multiple shock compression of polyurethane and syntactic foams*. The American Institute of Physics. p. 133-136.
- [39.] Vanichayangkuranont, T., Maneeratana, K., and Chollacoop, N. 2005. *Simulation of stress wave propagation from dynamic loads*, in *The 19th conference of mechanical engineering network of Thailand*. Phuket, Thailand.
- [40.] Bless, S. J., Chen, T., and Russell, R. 2007. *Impact on glass laminates*, in *23rd International symposium on ballistics*. Tarragona, Spain

- [41.] Klement, R., Rolc, S., Mikulikova, R., and Krestan, J. 2008. *Transparent armour materials*. *J Eur Ceram Soc*, 28[5]: p. 1091-1095.
- [42.] *Standard product configuration*, Thai-German specialty glass.
- [43.] Nourry, E. and Nugue, J. C. *Impact on laminated glass: post-breakage behaviour assessment*. in www.glassfiles.com.
- [44.] Bless, S., and Chen, T. 2009. *Impact damage in layered glass*, in *Int. J. Fract.*



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว พัสดราภรณ์ วิเชียรรัตน์ เกิดวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์ สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2548 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษาปี 2553

การนำเสนอผลงานระดับชาติ

P. Wichianrat, K. Dateraksa, K. Sujirote and A. Chumphu, "Wear behavior of alumina nozzles by sand blasting", Journal of metals, materials and minerals, 20(3): p.15-18

การนำเสนอผลงานระดับนานาชาติ

K. Dateraksa, P. Wichianrat and K. Sujirote. "Corrosion and Thermal Shock Behavior of Ceramic Ferrule". 5th Thailand Materials Science and Technology Conference, September 16-19, 2008 (Poster)

P. Wichianrat, S. Kochawattana and C. Gamonpilas, "Fragmentation and finite element analysis on ballistic performance of transparent armor", The 6th mathematics and physical science graduate congress 2010, Kuala Lumpur, Malaysia, December 13-15, 2010 (Poster)

P. Wichianrat, S. Kochawattana and C. Gamonpilas, "Fragmentation and finite element analysis for ballistic resistance studies of the glass-PVB laminates", Pure and applied chemistry international conference 2011, Bangkok, Thailand, January 5, 2011. (Oral)

C. Gamonpilas, P. Wichianrat and S. Kochawattana, "A computational study of level 3A ballistic impact on laminated transparent armours", The 15th international annual symposium on computational science and engineering, Bangkok, Thailand, March 31, 2011. (Oral)