



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย และพัฒนา เกราะป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาด และ กระสุนปืนเล็ก
ยาวที่เป็นอาวุธสงคราม

The Research and Development of Ballistic Body Armour

โดย

พลเอก อภิชาติ ทิมสุวรรณ และคณะ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยและพัฒนาเกราะป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาด และ กระสุนปืนเล็กยาวที่เป็นอาวุธสงคราม The Research and Development of Ballistic Body Armour

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1. พลเอก อภิชาติ ทิมสุวรรณ | สำนักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม |
| 2. พันตรี ทรงพล เขี่ยมบุญฤทธิ์ | บริษัท ฟรีชิพาร์ท จำกัด |
| 3. ดร. ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ |
| 4. รศ. สมนึก วัฒนศรีกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ |
| 5. ดร. เนติมา สว่างวรรณ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ |
| 6. นาย มงคล พุ่มแก้ว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ |

ชุดโครงการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

สารบัญ

หน้า

ส่วนรายงานเนื้อหา

1. กลไกในการเจาะทะลุของกระสุน	1
2. คุณลักษณะที่สำคัญของเกราะกันกระสุน	7
2.1 เกราะปืนพก	7
2.2 เกราะปืนเล็กยาว	7
3. ประเภทของเสื้อเกราะกันกระสุน	8
3.1 วัสดุโลหะ	8
3.2 วัสดุเซรามิก	9
3.2.1 ผลกระทบจากการรอยแตกเริ่มต้น	10
3.2.2 ผลกระทบของความหนาของวัสดุยึดติด	12
3.3 วัสดุเส้นใย	18
3.4 เกราะวัสดุผสม (Composite)	18
4. เกราะโลหะ	20
4.1 ผลกระทบของรูปทรงหัวกระสุนต่อความเสียหายของแผ่นเกราะ	21
4.2 ผลกระทบจากความแข็งของแผ่นเกราะ	25
4.3 ผลกระทบจากชั้นของแผ่นเกราะ	26
4.4 ผลกระทบจากความหนาของแผ่นเกราะ	26
4.5 ผลกระทบทางความร้อน	27
5. การปรับปรุงคุณภาพโลหะ	28
5.1 กรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า	28
5.2 โครงสร้างเหล็กที่ได้จากกรรมวิธีทางความร้อน	29
5.3 ลักษณะการอบ-ชุบ เหล็กกล้า	31
5.4 การอบอ่อน หรือ อบคลาย (Annealing)	31
5.5 กรรมวิธีการทำ Full Annealing	32
5.6 กรรมวิธีการทำ Incomplete Annealing (Stress-relief)	33
5.7 กรรมวิธีการทำ Incomplete Annealing (Spheroidising)	33
5.8 การปรับปรุงความเหนียว (Normalizing)	34
5.9 การชุบผิวแข็งโดยการอบคาร์บอน (Carburization Hardening)	44

6. โครงสร้างวัสดุเซรามิค	47
6.1 โครงสร้างผลึกของเซรามิค	47
6.2 คุณสมบัติของเซรามิค	49
6.2.1 คุณสมบัติเชิงกลของเซรามิค	49
6.2.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเซรามิค	54
6.2.3 อะลูมินาเซรามิค	60
7. ขั้นตอนการเตรียมเซรามิคสำหรับประกอบเป็นเกราะ	67
7.1 ขั้นตอนการทำเซรามิค	67
7.2 กระบวนการขึ้นรูปเซรามิค	68
8. การออกแบบเสื้อเกราะและแผ่นเกราะ	70
8.1 ส่วนประกอบของเกราะและเสื้อเกราะ	70
8.2 ชุดเสื้อเกราะ	71
8.3 ภาพร่างแบบชุดเสื้อเกราะสำหรับการทำการผลิต	72
8.4 การกำหนดสัญลักษณ์แผ่นเกราะ	72
9. ขั้นตอนการประกอบแผ่นเกราะ	75
10. คุณลักษณะเฉพาะทางวิชาการ	75
11. วิธีการผลิตเสื้อเกราะและแผ่นเกราะกันกระสุน	76
12. การควบคุมคุณภาพผ้าและวัสดุประกอบสำหรับการตัดเย็บตัวเสื้อ	76
13. การผลิตแผ่นเกราะ (ARMOR PANEL)	76
14. การผลิตตัวเสื้อ (FRONT AND BACK CARRIER PROCESS)	79
15. ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน	80
ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน ครั้งที่ 1	80
ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	82
ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile test)	85
ผลการทดสอบ Micro Hardness Test	87
การยิงทดสอบเกราะปืนพกด้วยกระสุน .44	88
การยิงทดสอบเกราะปืนพกด้วยกระสุน .357	90
การยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงครามแบบที่ 1	92
การยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงครามแบบที่ 2	94
การยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงครามแบบที่ 3	96
ผลการตรวจสอบเกรน (Microstructures)	100

ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน รอบที่ 2	102
แบบฟอร์มบันทึกผลการยิงทดสอบเกราะกันกระสุน	103
รูปแบบการประกอบเกราะ	126
ตารางแสดงความหมายสัญลักษณ์	129
ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน รอบที่3	132
แบบฟอร์มบันทึกผลการยิงทดสอบเกราะกันกระสุน	142
16. การทดสอบความแข็ง	148
16.1 ผลการทดสอบความแข็ง Tensile test	148
กราฟผลการทดสอบแรงดึง Tensile test	150
17. การตรวจสอบความลึกความกว้างของรูกระสุนปืน	152
17.1 วิธีการทดสอบการวัดความลึกและความกว้างของรูกระสุนปืน	152
ด้วยเครื่อง 3D OPTICAL SCANNING	
17.2 ผลการทดสอบ การวัดความลึกและความกว้างของรูกระสุนปืน	158
18. ผลการทดสอบด้วยปืนเล็กยาว กระสุนปืน M16 และ AK47 AP	165
สรุปผลการทดลอง	166
เอกสารอ้างอิง	167
 ภาคผนวก	
ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน และรับรองมาตรฐาน	170
แบบฟอร์มบันทึกผลการยิงทดสอบเกราะกันกระสุน	175
ภาคผนวก คุณลักษณะของเสื้อเกราะกันกระสุน	179
มาตรฐานเสื้อเกราะ	184
ภาคผนวก ก. บทความสำหรับการเผยแพร่	185
ภาคผนวก ข. ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์หลังเสร็จโครงการ	191
ภาคผนวก ค. กิจกรรมที่วางแผน เทียบกับกิจกรรมที่ผ่านมา	193
ภาคผนวก ง ผลที่ได้รับตลอดโครงการ	194
บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร	196

ส่วนรายงานเนื้อหา

1. กลไกในการเจาะทะลุของกระสุน

กลไกการเจาะทะลุของกระสุนมีหลายรูปแบบ ขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ ดังนี้

- คุณสมบัติวัสดุ
- ความเร็ว
- รูปร่างของหัวกระสุน
- รูปแบบการรองรับของเป้าหมาย
- อัตราส่วนตามขนาด ของกระสุนกับแผ่นเกราะ

1. คุณสมบัติ : วัสดุที่แตกต่างกันจะมีรูปแบบการแตกหักที่ต่างกัน เช่นเซรามิค กับโลหะ โดยเซรามิคซึ่งเป็นวัสดุเปราะ (Brittle material) จะมีรูปแบบการแตก ขยายตัวออกเป็นวงกว้าง ในลักษณะรอยร้าว เนื่องจากวัสดุเซรามิคในขณะรับแรงกระแทกของกระสุนจะเป็นแรงในลักษณะ แรงกระทำด้านข้างหรือตามแนวภาคตัดของแผ่นเกราะ ซึ่งส่งผลให้เกิดโมเมนต์ดัด ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างแรงดึง แรงต้านในเนื้อวัสดุ

เนื่องจากเซรามิคเป็นวัสดุที่รับแรงอัดได้ดี (Compressive force) แต่รับแรงดึง (Tension force) ได้น้อย ซึ่งคุณลักษณะแบบนี้ส่งผลให้เกิดการเสียหายในส่วนที่รับแรงดึง ก่อให้เกิดรอยแตกร้าว (Crack) กระจายออกเป็นวงกว้าง

ในส่วนของโลหะโดยทั่วไปมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้ดี และมีความยืดหยุ่น (Elongation) .ในกรณีนี้ รอยแตกหักจึงมีลักษณะที่แตกต่างโดยสิ้นเชิงกับวัสดุเซรามิค โดยวัสดุจะมีการยืดตัวตามแรงกระสุน ก่อนเกิดการฉีกขาด

2. ความเร็ว : ความเร็วจัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจากสามารถบ่งบอกพลังงาน จลน์ของกระสุนได้

ความเร็ว สามารถแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ ความเร็วเชิงเส้น และความเร็วเชิงมุม ทั้งนี้ความเร็วเชิงเส้นมีผลต่อรูปแบบการเสียหายอย่างชัดเจน เนื่องจากมีทิศทางเดียวกับแนวการเจาะทะลุของกระสุน โดยเมื่อพลังงานจลน์เชิงเส้นของกระสุนมีมากกว่างานที่เกิดจากการเจาะทะลุของกระสุนในวัสดุใด แสดงว่ากระสุนยอมสามารถเจาะรูผ่านวัสดุนั้นได้ โดยที่

$$E_k = E_{k1} + E_{k2}$$

E_k : พลังงานจลน์

E_{k1} : พลังงานจลน์เชิงเส้น

E_{k2} : พลังงานจลน์เชิงมุม

พลังงานจลน์เชิงเส้นของกระสุน ย่อมาจากการระเบิดตัวของดินปืนของลูกกระสุนนั้นๆ พลังงานที่ได้จากการระเบิดตัวของดินปืนได้เปลี่ยนเป็นพลังงานในส่วนต่างๆ หลายประการ เช่น พลังงานความร้อน พลังงานเสียง พลังงานการสั่นสะเทือนของลำกล้อง พลังงานจลน์ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาว่าพลังงานจลน์เชิงเส้น เป็นพลังงานที่ต้องการจากกระบวนการยิง ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าพลังงานในส่วนอื่นๆ เป็นพลังงานสูญเสียไปของกระบวนการ (Lost) ดังนี้

$$E = E_{k1} + Lost$$

E : พลังงานดินปืน

$$E_{k1} = \frac{1}{2}mv^2$$

E_{k1} : พลังงานจลน์เชิงเส้น

m : มวล

v : ความเร็ว

พิจารณาระดับพลังงานจลน์เชิงเส้นของกระสุนที่ทำการทดสอบตามมาตรฐานของกระทรวงกลาโหมได้ดังตารางต่อไปนี้

มาตรฐาน	ขนาด	น้ำหนัก	ความเร็ว	พลังงานจลน์เชิงเส้น
		กรัม	เมตร/วินาที	จูล์
ระดับ 3A	9 mm.	8	436	760.384
ระดับ 3A	.44	15.55	436	1477.9964
ระดับ 3	7.62 mm	10.8	838	3792.1176

ตารางที่ 1 แสดงระดับพลังงานจลน์เชิงเส้นของกระสุน [1]

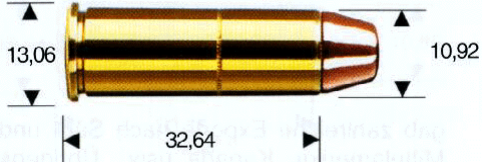
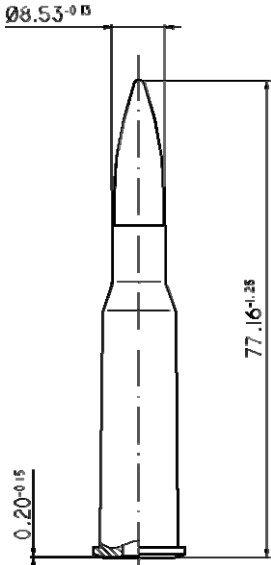
จากการพิจารณาในเรื่องของพลังงานสามารถกล่าวได้ว่า กระสุนจะสามารถทะลุผ่านวัสดุเกราะได้เมื่อกระสุนมีพลังงานจลน์เชิงเส้นมากกว่างานที่เกิดจากการเจาะทะลุของแผ่นเกราะ

$$E_{k1} > W$$

W : งานที่เกิดจากการเจาะทะลุแผ่นเกราะ

จากสมการข้างต้นยังไม่สามารถทำนายได้ว่าจะเกิดการเจาะทะลุแผ่นเกราะหรือไม่ เนื่องจากงานที่เกิดจากการเจาะทะลุแผ่นเกราะนั้นขึ้นกับกระบวนการ และรูปแบบการเสียหายของเกราะนั้นๆ ทำให้ไม่สามารถคำนวณได้โดยง่าย ซึ่งจำเป็นต้องมีการทดลองถึงจะประเมินงานที่เกิดจากการเจาะทะลุแผ่นเกราะ ตามองค์ประกอบนั้นๆ ได้ (Environments)

3. รูปร่างของหัวกระสุน : รูปร่างที่แตกต่างกันส่งผลให้รูปแบบการเสียหายต่างกัสดังตารางด้านล่างแสดงลักษณะหัวกระสุน

ขนาด	รูปร่าง และขนาด (มม.)	น้ำหนักหัวกระสุน
9 mm.		8
.44		15.55
7.62 mm		10.8

ตารางที่ 2 แสดงรูปร่างของกระสุน

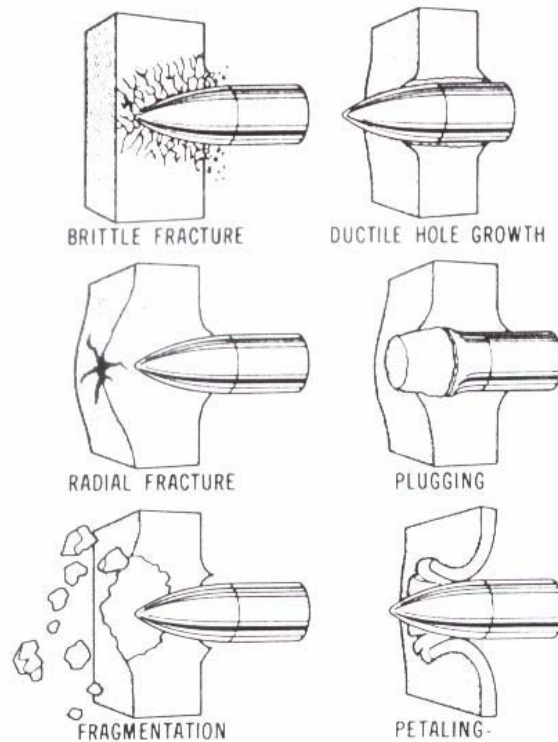
จากตารางแสดงให้เห็นว่ารูปร่างหัวกระสุนแต่ละชนิดแตกต่างกัน จากรูปร่างที่แตกต่างกันนี้ทำให้ภาระของแผ่นเกราะที่เกิดจากการกระทำของหัวกระสุนชนิดต่างแตกต่างกันออกไปและมีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุแผ่นเกราะด้วย โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4. รูปแบบการรองรับของเป้าหมาย : มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเป้าหมาย และแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะรับแรงกระแทกของกระสุน เช่นเมื่อมีวัสดุรองรับหลัง กับไม่มีวัสดุรองรับก็มีผลต่อการยุบตัวที่ต่างกัน เพราะมีแรงต้านทานการเคลื่อนที่ ที่ต่างกัน

ในการทดสอบแผ่นเกราะมาตรฐานของกระทรวงกลาโหมระบุไว้ชัดเจนว่าจะต้องรองรับหลังแผ่นเกราะด้วยดินน้ำมัน ที่มีความหนืดตามที่กำหนด ทั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดแรงปฏิกิริยาใกล้เคียงกันกับเกราะขณะที่สวมใส่กับร่างกายมนุษย์นั่นเอง

รูปแบบการเจาะทะลุของของแผ่นวัสดุเมื่อรับแรงกระแทก

จากการสรุป ของ Backman & Goldsmith (1978) และ Backman (1976) ซึ่งอ้างอิงในเอกสาร [4] สามารถแบ่งรูปแบบการเสียหาย ของชิ้นงาน แผ่นบาง จนถึงชิ้นงานที่มีความหนาปานกลาง ได้ดังรูปที่ 1



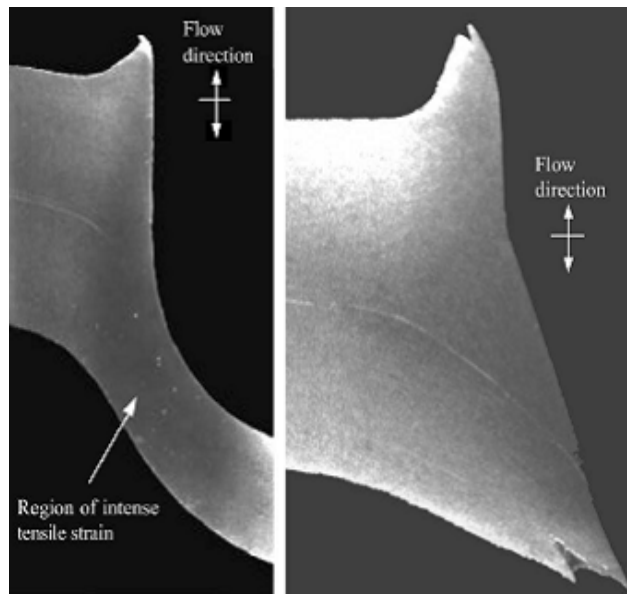
รูปที่ 1 รูปแบบการเสียหายแบบต่างๆ [4]

- Brittle Fracture
- Radial Fracture
- Fragmentation
- Ductile Hole Growth
- Plugging
- Petaling

อย่างไรก็ตาม ในการเสียหายจริงๆ นั้น อาจเกิดการเสียหายในหลายรูปแบบ ร่วมกัน เช่น เกิด Ductile Hole Growth แล้ว เกิดความเสียหายแบบ Plugging ร่วมด้วย

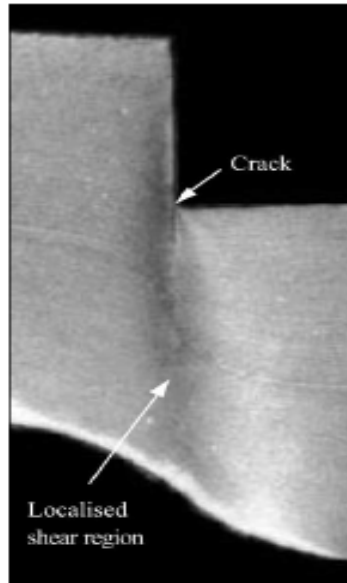
1. Brittle Fracture: เป็นรูปแบบที่เกิดกับวัสดุที่ทนความเค้นอัดได้น้อย
2. Radial Fracture: มักเกิดกับวัสดุจำพวกเซรามิค เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนความเค้นอัด ได้ดี แต่ทนต่อความเค้นดึงได้น้อย และบริเวณด้านหลังของการชนจะเกิดความเค้นแรงดึงมากในเวลาอันสั้น ทำให้วัสดุเริ่มแตกจากด้านหลังก่อนแล้วแผ่นวัสดุมีไปในวงกว้าง

3. Fragmentation: มักเกิดขึ้นคู่กับ Radial Fracture ในวัสดุจำพวกเซรามิก
4. Ductile Hole Growth: เป็นรูปแบบที่เกิดกับวัสดุโลหะเหนียว ที่ถูกกระแทกด้วย วัตถุหัวครี้งวงกลม และวัตถุหัวแหลมดังรูปที่ 2 เนื้อวัสดุจะถูกรีดเป็นชั้นๆ และขยายวงออกไป



รูปที่ 2 แสดงการเสียหายในรูปแบบ Ductile Hole Growth [5]

5. Plugging: เป็นรูปแบบที่มีการศึกษา และทดลอง เป็นจำนวนมาก เกิดขึ้นจากการกระแทกกับ วัตถุหัวครี้งวงกลม และวัตถุหัวตัดตรง โดยที่ความเร็วในการกระแทกหรือ การชนนั้นมีความเร็วใกล้เคียงกับ Ballistic Limit หรือความเร็วที่ต้องการน้อยสุด สำหรับการเจาะทะลุ โดยการชนกับแผ่นที่มีความหนานั้น จะเกิดเศษรูปทรงกระบอกที่มีรัศมีใกล้เคียงกับวัตถุที่พุ่งมาชน การเสียหายแบบ Plugging เป็นการเสียหายที่เกิดจากแรงตัดเฉือน หรือที่เรียกกันว่า Adiabatic shearing ซึ่งมีคุณลักษณะเฉพาะในการเกิดแนวการตัดเฉือนแคบๆ ดังรูปที่ 3 พลังงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะเปลี่ยนเป็นความร้อนทั้งหมด และเปลี่ยนรูปร่างด้วยความเร็วสูง (High strain rate) จากรายงานของ Moss (1980) ซึ่งอ้างอิงในเอกสาร [4] ให้ผล Strain rate ที่เกิดกับ Adiabatic shear band สูงถึง 10000000 s^{-1} และอุณหภูมิภายใน adiabatic shear band สูงถึง $100000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลจากรูปแบบการเสียหายในระนาบ Maximum shear stress การเกิดความเสียหายแบบ Plugging ค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลง มุมตกกระทบ และรูปทรงของหัววัตถุ กล่าวคือเมื่อเปลี่ยนรูปร่าง และมุมตกกระทบเล็กน้อย ก็อาจไม่เกิดความเสียหายแบบ Plugging อย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 3 แสดงการเสียหายในรูปแบบ Plugging [5]

6. Petaling: เป็นรูปแบบการเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุโลหะแผ่นบาง เมื่อถูกเจาะทะลุด้วยกระสุนหัวแหลม รอยรูเจาะทะลุจะมีการฉีกขาดดังรูปที่ 1

จากรูปแบบที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น การเสียหายรูปแบบ Plugging เป็นการเสียหายที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด ดังนั้นเมื่อเกิดการเสียหายในรูปแบบนี้ ความเร็วของหัวกระสุน หรือวัตถุจะลดลงน้อยกว่า เมื่อเทียบกับการเจาะทะลุของวัสดุในรูปแบบอื่น เนื่องจาก Adiabatic shear band ดังนั้นจึงควรลดปัจจัยที่ทำให้เกิด การเสียหายรูปแบบ Plugging โดยการลดมุมตกกระทบ และปัจจัยอื่นๆ เช่นความแข็งผิวที่เหมาะสม (Optimized surface hardness) ของวัสดุเกราะ

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าวัสดุเกราะที่เป็นโลหะแข็งเปราะมีความสามารถในการต้านทานการจะทะลุได้ไม่มากนัก เมื่อเทียบกับเกราะที่มีความแข็งสูงแต่ยังมีคุณสมบัติเหนียวในเนื้อวัสดุ

2. คุณลักษณะที่สำคัญของเกราะกันกระสุน

จากการศึกษารูปแบบการเสียหายของวัสดุและการทดลองต่างๆ ที่เกี่ยวกับเกราะกันกระสุน จะพบว่า พารามิเตอร์สำคัญขึ้นอยู่กับ รูปแบบหัวกระสุน, ความเร็ว, และคุณสมบัติวัสดุที่นำมาทำเกราะ มีผลต่อรูปแบบความเสียหายของเกราะ การออกแบบโดยปรับปรุงพารามิเตอร์เหล่านี้ เพื่อให้เกิดรูปแบบการเสียหายที่ใช้พลังงานมากที่สุด ย่อมมีผลดีกว่าการเพิ่มความหนาของวัสดุเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นคุณลักษณะที่สำคัญของเกราะจะต้องจัดการกับรูปแบบการเสียหายที่เหมาะสมต่อสภาพการใช้งาน ซึ่งในโครงการนี้ แบ่งการใช้งานเกราะ 2 ประเภท คือเกราะปืนพก และเกราะปืนเล็กยาวที่เป็นอาวุธสงคราม

2.1 เกราะปืนพก

เกราะปืนพกจะต้องผ่านการทดสอบ กับกระสุน .44 Magnum น้ำหนักหัวกระสุน 15.55 กรัม ที่ความเร็ว 436 m/s และ 9 mm. FMJ น้ำหนักหัวกระสุน 8 กรัม เร็ว 436 m/s ตามลำดับ [1] โดยทั่วไปกระสุนจะมีความเร็วต่ำ และลักษณะหัวกระสุนเป็นกระสุนหัวมน จนถึงใกล้เคียงกับรูปครึ่งวงกลม จากการศึกษากลไกการเสียหายของวัสดุ และการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าควรใช้วัสดุเหนียว และบางพอที่จะให้เกิดการดัดโค้ง เพื่อเป็นการเพิ่มภาระให้กับหัวกระสุน

คุณลักษณะที่สำคัญของเกราะกันกระสุนปืนพก

1. ความแข็งแรงสูงพอที่รับแรงกระแทก แต่ไม่ทำให้วัสดุเสียหายแบบ Plugging
2. การยืดตัวสูง จะทำให้เปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของหัวกระสุนไปเป็นพลังงานที่ทำให้ยืดตัว
3. ความแข็งแรงสูง
4. น้ำหนักเบา

2.2 เกราะปืนเล็กยาว

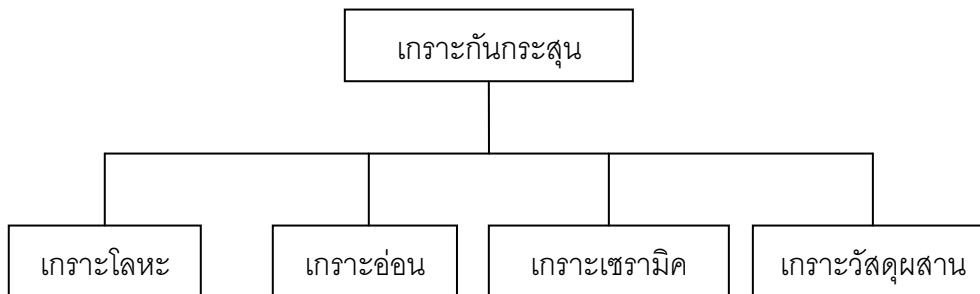
เกราะปืนเล็กยาว จะต้องผ่านการทดสอบ กับกระสุน 7.62 mm. 308 Winchester FMJ น้ำหนักหัวกระสุน 10.8 กรัม ความเร็ว 838 m/s กระสุนที่ใช้มีความเร็วสูง หัวกระสุนรูปทรงแหลม มีอำนาจการเจาะทะลุสูง ดังนั้นจึงควรลดอำนาจการทะลุทะลวงของกระสุนโดยการทำลายหัวกระสุนด้วยวัสดุชั้นแรก โดยการใช้วัสดุที่แข็งมากๆ เพื่อทำลายหัวกระสุน และให้วัสดุชั้นต่อไป รับพลังงานจลน์ และความเร็วที่เหลืออยู่

คุณลักษณะที่สำคัญของเกราะกันกระสุนปืนเล็กยาว

1. แผ่นเกราะชั้นแรกควรมีคุณลักษณะความแข็ง และความแข็งที่ผิวสูงมาก เพื่อทำลายหัวกระสุน
2. แผ่นเกราะชั้นต่อไปต้องมีความเหนียวและแข็งแรงพอที่รับพลังงานที่เหลือ
3. น้ำหนักรวมของชุดเกราะต้องมีน้ำหนักเบา
4. สามารถกันสะเก็ดที่เกิดจากการทำลายหัวกระสุนได้

3. ประเภทของเสื้อเกราะกันกระสุน

เสื้อเกราะกันกระสุนสามารถแบ่งประเภทได้ตามวัสดุหลักที่ใช้ในการลดอำนาจการทะลุทะลวงของกระสุน ซึ่งทำให้มีกระบวนการในการหยุดยั้งกระสุนต่างๆ กัน โดยขึ้นกับคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุกันกระสุนแต่ละชนิด ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้



3.1 วัสดุโลหะ

เกราะที่ใช้วัสดุประเภทโลหะ จะใช้คุณสมบัติเด่นของโลหะในด้านความแข็งแรงของโลหะ ซึ่งโลหะมีการได้ถูกใช้เพื่อทำเป็นเกราะตั้งแต่สมัยโบราณแล้ว และในปัจจุบันโลหะก็ยังสามารถนำมาใช้ทำเกราะกันกระสุนได้ โดยจุดเด่นของเกราะโลหะก็คือเป็นเกราะแข็ง ทำให้สามารถลดการกระแทกกระสุนต่อร่างมนุษย์เมื่อถูกยิงได้มากกว่าเกราะอ่อน

ความสามารถในการกันกระสุนของเกราะ มีประสิทธิภาพดีในการกันกระสุนปืนพก เนื่องจากกระสุนปืนพกมีความเร็วต่ำ หัวกระสุนมน ไม่มีคมตัด ทำให้สามารถใช้แผ่นโลหะในการทำเกราะ โดยใช้แผ่นโลหะซึ่งมีคุณสมบัติในการยืดตัวสูง ดูดซับพลังงานของกระสุนปืนจากการยืดตัวของแผ่นเกราะ

3.2 วัสดุเซรามิก

เกราะที่ใช้วัสดุประเภทเซรามิกเป็นวัสดุหลัก จะใช้คุณสมบัติเด่นของเซรามิกในด้านความแข็ง ซึ่งทำให้สามารถป้องกันหรือลดอำนาจการเจาะทะลุของกระสุนที่มีความคม มีความเร็ว และความสามารถในการเจาะทะลุสูง

หลักการที่ทำให้สามารถกันกระสุนที่มีความคมได้เนื่องจาก เซรามิกมีความแข็งสูงมาก เมื่อเทียบกับโลหะที่นำมาทำเป็นลูกกระสุน ทำให้ลูกกระสุนโลหะนั้นถูกทำลายทำให้ลดอำนาจในการเจาะทะลุไป

การดูดซับพลังงานของหัวกระสุนของเกราะที่ใช้เซรามิกเป็นวัสดุหลักคือ พลังงานของกระสุนจะถูกใช้ในสองส่วน คือพลังงานที่ใช้ในการทำลายหัวกระสุนเองเพราะแข็งน้อยกว่าเซรามิก และพลังงานที่ใช้ในการทำให้แผ่นเซรามิกแตกหัก

องค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ของเกราะที่ใช้วัสดุหลักเป็นเซรามิกก็คือ แผ่นรองหลัง เนื่องจากเซรามิก เป็นวัสดุเปราะ ที่จะแตกหักเมื่อถูกแรงกระแทก จึงจำเป็นต้องมีแผ่นรองหลังรับภาระในส่วนที่เหลือ และไม่ไห้กระสุน และเซรามิกที่แตกออกทะลุ เข้ามาทำอันตรายได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความสมารถให้กับแผ่นเซรามิกด้วย

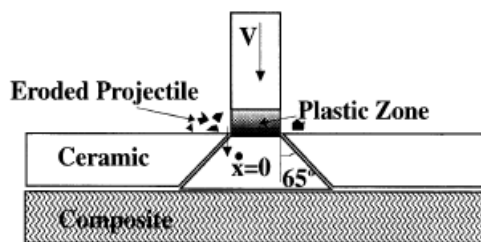


Fig. 1. Configuration at the end of the first phase.

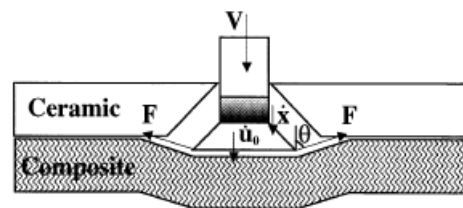


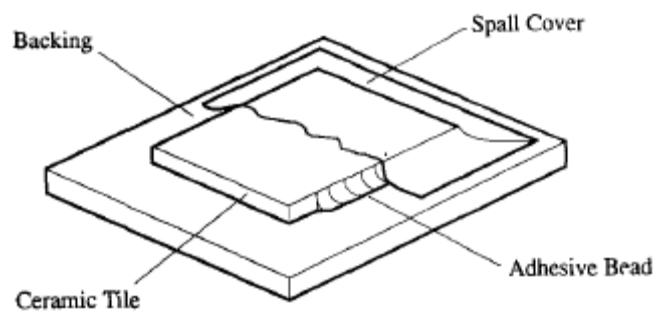
Fig. 2. Phenomenological description of the second phase.

รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนความเสียหายของแผ่นเซรามิกและแผ่นรองหลัง โดยแผ่นเซรามิกเสียหายแบบกรวย(Conical Fracture) โดยพื้นที่กระจายแรงจะเพิ่มขึ้นตลอดภาคตัด ความหนาของเซรามิกและแผ่นรองหลังสามารถรับพลังงานที่ยังเหลืออยู่ของกระสุนต่อไป [7]

ในการป้องกันกระสุนที่มีความเร็วสูง วัสดุที่สำคัญคือ เซรามิก ซึ่งนับว่าเป็นวัสดุที่เหมาะสมมากในการเกราะกันกระสุน เพราะสามารถใช้ความหนามาก ๆ ได้เนื่องจากน้ำหนักเบา อีกทั้งมีความแข็งแรงสูงมาก และความแข็งที่ผิวของเซรามิกก็สูงมาก เหมาะสำหรับการทำลายหัวกระสุน และเกิดการแตกหักในรูปแบบผสมระหว่าง Radial Fracture กับ Fragmentation ซึ่งเกิดจากการที่มีความแข็งสูง และเป็นวัสดุเปราะ

3.2.1 ผลกระทบจากรอยแตกเริ่มต้น

การทดลองของ I. HORSFALL และ D. BUCKLEY [8] ได้ทำการทดลองหา Ballistic limit velocity เพื่อหาผลกระทบของรอยแตกเริ่มต้น ทดลองกับแผ่น Alumina หนา 6 mm รองด้วย แผ่น E-glass composite หนา 9 mm แผ่นวัสดุทั้งสองประสานด้วย Sikaflex 221 เป็นวัสดุยึดติด ดังรูปที่ 5 และ รายละเอียดวัสดุดังตารางที่ 3 ทำการทดสอบโดยการยิงด้วยกระสุน NATO standard 7.62 x 51 mm



รูปที่ 5 รูปแบบการประกอบชิ้นงานทดลองของ I. HORSFALL และ D. BUCKLEY [8]

	<i>Alumina F A</i>	<i>E-glass composite</i>	<i>Sikaflex 221</i>
Size (mm)	100 x 100	150 x 150	
Thickness (mm)	6	9(17 ply plain weave)	1 (approx.)
Composition	95% Al_2O_3	27% chlorinated polyester resin	polyurethane
Density (kg m^{-3})	3680	2100	
Tensile strength (MPa)	350(MoR)	15.8	1.8
Elongation to failure (%)			450

ตารางที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทดลองของ I. HORSFALL และ D. BUCKLEY [8]

Standard tiles		Cracked tiles		
Velocity	Residual energy	Velocity	Residual energy	Distance from pre-crack
(m s ⁻¹)	(g m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)	(g m s ⁻¹)	(mm)
703	0	703	0	0
724	0	705	0	5
747	0	720	1400	3
753	1180	722	0	0
754	1550	723	0	5
764	1450	733	2700	5
767	0	734	0	5
769	0	735	0	3
771	550	743	2500	0
780	0	746	0	0
802	2600	747	0	4
		753	3400	3
		756	0	5
		762	0	5
		772	3500	5
		773	4950	0

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเปรียบเทียบ ballistic limit velocity ระหว่างชิ้นเซรามิคมาตรฐาน กับชิ้นที่มีรอยแตก[8]

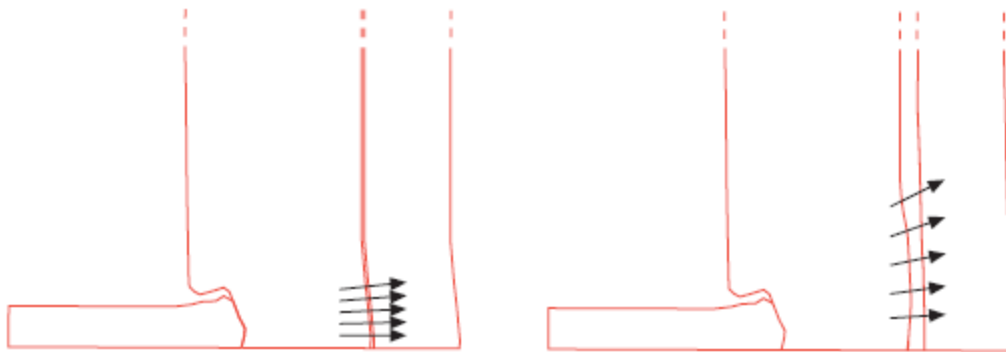
Standard panels			Pre-cracked panels-all panels		Pre-cracked panels less than 5 ram from crack	
Designation	Range	V _{so}	Range	V _{so}	Range	V _{so}
Over 6 shots	27	765	42	743	33	741
Over 8 shots	33	763	42	745	51	742
Over 10 shots	76	763	52	747		

ตารางที่ 5 ผลการทดลองเปรียบเทียบ ballistic limit velocity ระหว่างชิ้นเซรามิคมาตรฐาน กับชิ้นที่มีรอยแตก [8]

รายงานของ I. HORSFALL และ D. BUCKLEY [8] ได้สรุปผลการทดลองว่าเมื่อมีรอยแตกเริ่มต้น ความสามารถในการกันกระสุนจะลดลง จากผลการทดลอง ความเร็วน้อยสุดที่เกราะสามารถกับกระสุนได้นั้นได้ลดลงจาก 764 m s^{-1} เป็น 740 m s^{-1} หรือลดลง 3%

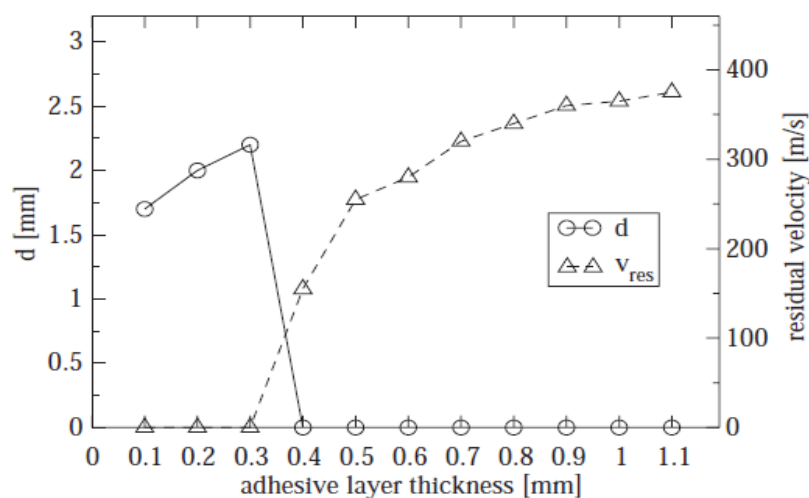
3.2.2 ผลกระทบของความหนาของวัสดุยึดติด

การทดลองของ J.Lopez-Puente, และคณะ [9] ได้ทำการทดลองหาผลกระทบจากความหนาของชั้นวัสดุยึดติด โดยทดลองกับ แผ่นเซรามิค Morgan Matroc 98% purity alumina หนา 8.3 mm รองด้วยแผ่น aluminium 2017-T6 หนา 12 mm และยึดติดด้วย Hysol EA-9361 โดยเปลี่ยนความหนาของวัสดุยึดติด



รูปที่ 6 ผลกระทบการส่งผ่านแรง ที่มีผลมาจากความหนาของวัสดุ, บาง(ซ้าย), หนา(ขวา) [9]

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นเมื่อชั้นวัสดุยึดติดมีความหนามากขึ้น มีผลให้แนวการส่งผ่านแรงกว้างขึ้น ทำให้วัสดุรับภาระน้อยลงได้ แต่การเพิ่มความหนาให้ชั้นวัสดุยึดติดประสาณนั้นก็มีข้อจำกัดดังรูปที่ 7

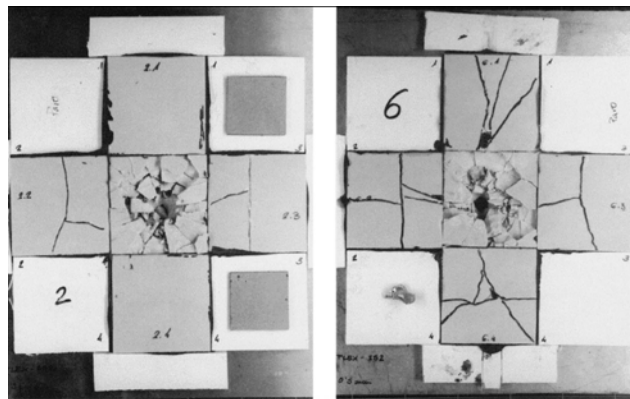


รูปที่ 7 แสดงความหนาที่ยังคงเหลือของเกราะ และความเร็วคงเหลือของกระสุน
เปรียบเทียบกับความหนาของวัสดุยึดติด [9]

จากกราฟพบว่าชั้นของวัสดุยึดติด มีความหนาที่ดีที่สุดจากผลการทดลองคือ 0.3 มม. เป็นจุดที่เกราะยังเหลือความหนามากที่สุด 2.25 mm กระสุนไม่ทะลุ หรือไม่มีความเร็วคงเหลือ กราฟในรูปที่ 7 เกิดจากการทดลองเปลี่ยนความหนาของชั้นวัสดุยึดติดครั้งละ 0.1 mm กราฟในรูปที่ 7 จึงไม่ต่อเนื่องในช่วงความหนาของวัสดุยึดติดที่ 0.3-0.4 mm แสดงว่ากระสุนจะสามารถทะลุแผ่นเกราะได้ในช่วง 0.3-0.4 mm

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ทำให้มีความสามารถในการต้านทานกระสุนได้ ยกตัวอย่างเช่น ในการทดลองนี้ชั้นความหนาที่เหมาะสมคือ 0.2-0.3 mm จะได้เกราะที่มีประสิทธิภาพดี

การเพิ่มความหนาให้ชั้นวัสดุยึดติดทำให้บริเวณการส่งผ่านแรงจากแผ่นเกราะเซรามิคกว้างมากขึ้น ดังรูปที่ 6 ทำให้แผ่นรองหลังรับได้มากขึ้น แต่ที่ความหนามากกว่า 0.3 มม. วัสดุยึดติดไม่ได้ส่งผลในการขยายพื้นที่รับแรง เนื่องจากความหนาที่มากเกินไปทำให้แผ่นเซรามิคต้องถูกตัดตามแรงกระแทกมากเกินไปที่เซรามิคจะสามารถถูกตัดได้ จึงทำให้แผ่นเซรามิคแตกหักก่อนที่จะถ่ายภาระให้แผ่นรองรับ



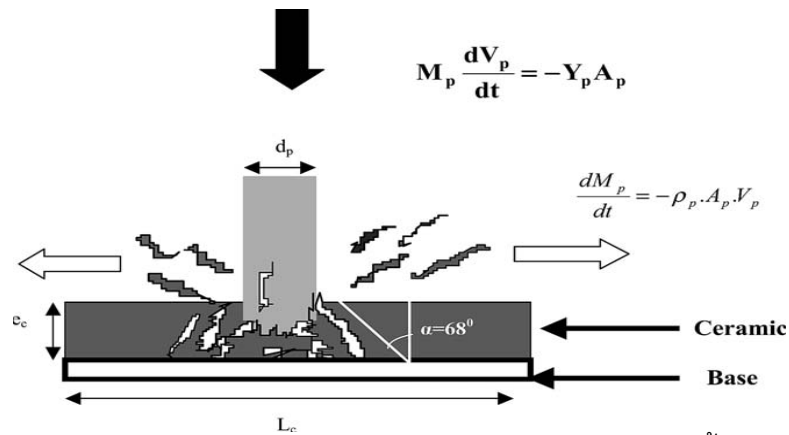
รูปที่ 8 แสดงผลการแตกกระจายของแผ่นเซรามิคแผ่นข้างเคียง

ภาพด้านซ้ายชั้นวัสดุยึดติดหนา และภาพด้านขวาชั้นวัสดุยึดติดบาง [10]

D.P. Goncalves, และคณะ [15] ได้ทำการออกแบบวัสดุเกราะโดยใช้ เซรามิค 2 ชนิดด้วยกันคือ ใช้เซรามิคที่มีส่วนผสมทางเคมี 2 ชนิด และมีคุณสมบัติ ทางกลเหมือนกันแต่ทั้ง 2 ชนิดแต่จะมีลักษณะของ Grain size ไม่เท่ากัน เป็นเกราะชั้นแรกและชั้นที่ 2 เป็นโลหะ และได้ทำการทดสอบสามารถคำนวณค่าของการสูญเสียมวลของกระสุนปืน ความเร็วกระสุนปืน และการยุบตัวของเกราะแผ่นหลังที่เป็นโลหะ

จากการทดสอบผลจากการกระทบแผ่นเกราะของกระสุนปืนได้ผลการทดสอบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1



รูปที่ 9 แสดงผลการกระทบจากการทดลองยิงเกราะเซรามิก และโลหะขั้นตอนที่ 1 [15]

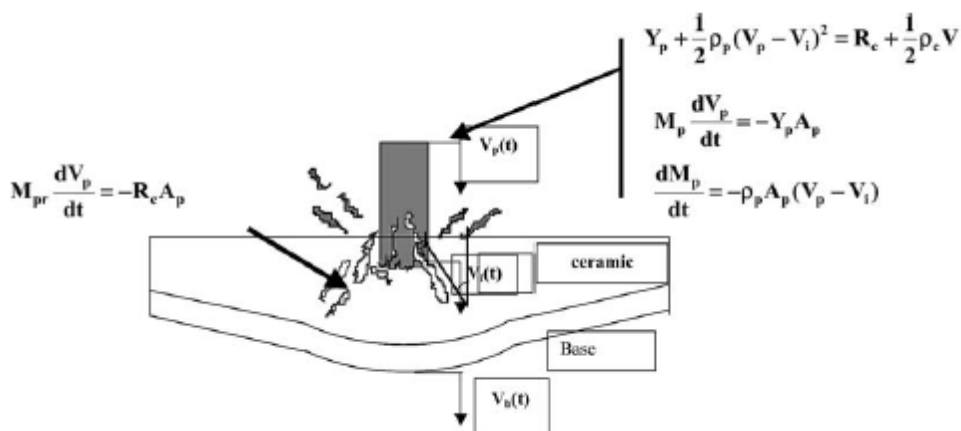
กระสุนกระทบแผ่นเซรามิกจะเกิดภาวะการกระแทกและสั่นสะเทือนเป็นลูกคลื่น(Compressive shock wave) กระจายแรงออกไปทำให้เกิดการประลัยโดยวัสดุแตกกระจายเป็นรูปกรวย มุมกระทบ 68° สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$M_p \frac{dV_p}{dt} = -Y_p A_p \quad (1)$$

$$\frac{dM_p}{dt} = -\rho_p A_p V_p \quad (2)$$

โดย M_p คือมวลของแผ่นเซรามิก, Y_p คือ ค่าความยืดตัวของวัสดุ (Dynamic yield of the projectile material) , ρ_p คือความถ่วงจำเพาะกระสุน, A_p คือหน้าตัดหัวกระสุน และ V_p คือความเร็วกระสุนปืน

ขั้นตอนที่ 2

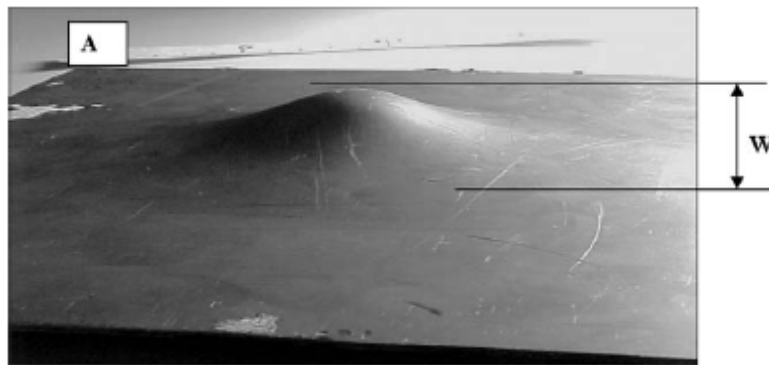


รูปที่ 10 แสดงผลการกระทบจากการทดลองยิงเกราะเซรามิก และโลหะขั้นตอนที่ 2 [15]

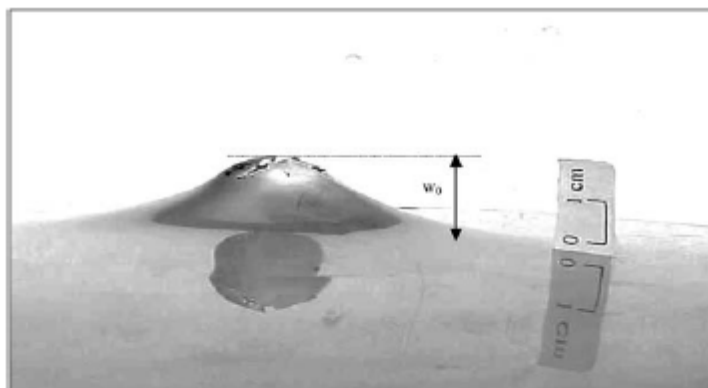
กระสุนผ่านชั้นเซรามิกมากระแทกแผ่นโลหะความด้วยแรงอัดหัวกระสุนทำให้เซรามิกแตกกระจาย ในขณะเดียวกันแผ่นรองหลังเริ่มเปลี่ยนรูปแบบ Elastic ความเร็วจะแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือความเร็วกระสุนปืนส่วนหลังของกระสุนปืน (V_p) ส่วนที่สองคือ ความเร็วกระสุนส่วนหน้าที่หัวกระสุนกระทบผ่านชั้นเซรามิก (V_i) ดังนั้นความแตกต่างระหว่าง V_p และ V_i คืออัตราการแทรกตัวผ่านชั้นเซรามิก ซึ่งสามารถเขียนได้สมการดังนี้

$$\frac{dM_p}{dt} = -\rho_p A_p (V_p - V_i) \quad (3)$$

ขั้นตอนที่ 3



ที่ 11.1 แสดงผลการกระทบจากการทดลองยิงเกราะเซรามิก และโลหะ [15]



รูปที่ 11.2 แสดงผลการกระทบจากการทดลองยิงเกราะเซรามิก และโลหะขั้นตอนที่ 3 [15]

คณะนักวิจัย ได้วิเคราะห์การเสียรูปของแผ่นรองหลัง Aluminium จากการปะทะของกระสุนขนาด 5.56 mm. ดังนี้ เมื่อกระสุนปืนผ่านชั้นเซรามิกมากระแทกแผ่นโลหะทำให้เกิดรอยนูนหรือเกิดการยัดขึ้นในแผ่นโลหะ สำหรับพลังงานการยุบตัว และพลังงานการดูดซับการกระแทก สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$E_p = \frac{\pi h A}{2(n+1)^3 \left(\frac{k}{D}\right)^2 \{4D \sqrt{\exp(n) - 1}\}} \quad (4)$$

E_p คือพลังงานจลน์, h คือความหนาของแผ่นวัสดุ, k คือ Deflection profile constant, n คือ Stress Constant, D คือ รัศมีลูกกระสุนปืน A คือค่าคงที่ของ Power law model ซึ่งสามารถนำไปใช้คำนวณหาพลังงาน และเลือกความหนาของแผ่นโลหะมาประกอบรองแผ่นเซรามิกได้

สรุปงานวิจัยของ Goncalves, [15]

การเพิ่มความแข็งของเซรามิกสามารถเพิ่มความต้านทานของกระสุนปืนได้ และการเพิ่มขนาดของ Grain Size จะเพิ่มประสิทธิภาพของเกราะด้วย โดยที่ไม่ได้เพิ่มความหนาของแผ่นเซรามิก ทั้งนี้ Grain Size จะมีสภาวะที่ดีที่สุดอยู่ที่ความบริสุทธิ์ของอลูมินา 85% ที่สำคัญแผ่นรองหลังเซรามิกมีส่วนช่วยอย่างมากการในการออกแบบ และพัฒนาแผ่นเกราะเชิงประกอบโดยใช้วัสดุ เซรามิก/ โลหะ/ เส้นใย ได้ดีต่อไปได้

E. Straßburger [16] ได้ทำการทดสอบและออกแบบวัสดุเกราะ เพื่อต้องการเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเซรามิก 3 ชนิดและ จะได้เลือกนำเอาวัสดุนั้นมาเป็นเกราะแผ่นหน้า อีกทั้งยังต้องการทราบค่าความหนาของเซรามิกที่จะใช้ ควรมีความหนาเท่าไรที่เหมาะสม รวมถึงน้ำหนักที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน โดยได้นำวัสดุเซรามิก 3 ชนิดด้วยกันคือ

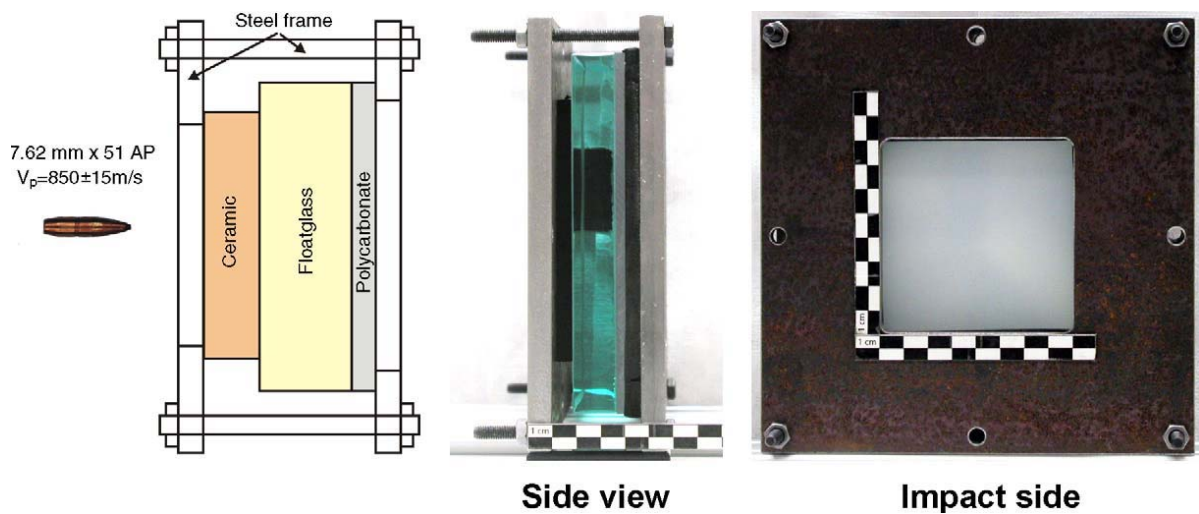
1. อลูมิเนียมออกไซด์ไนไตรด์ Aluminium oxynitride (AlON)
2. แมกนีเซียม อลูมิเนต สปิเนล Magnesium aluminate spinel ($MgAl_2O_4$)
3. อลูมินา Polycrystalline (Al_2O_3)

และนำวัสดุเซรามิกทั้ง 3 ชนิดมาทำการทดสอบหาค่าความแข็ง

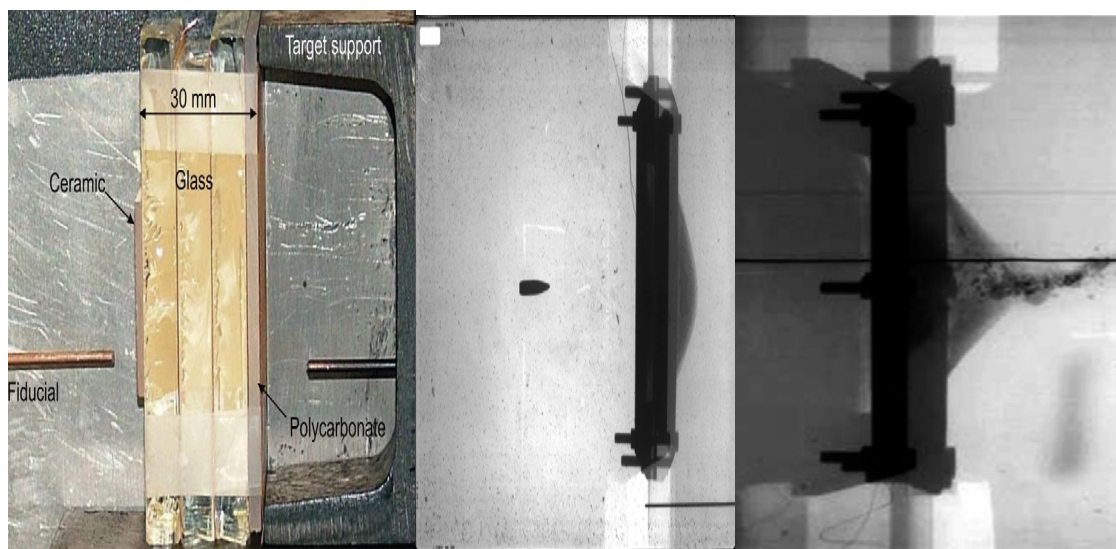
Properties of transparent ceramics		
Materials	Young's Modulus (GPa)	Hardness HV10 (GPa)
AlON	323	1850 (MPa)
$MgAl_2O_4$	275	15.0 (GPa)
Al_2O_3	400	21.5 (GPa)

ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติเชิงกลได้แก่ โมดูลัสความยืดหยุ่นและค่าความแข็งของเซรามิก

จากการทดลองของ Straßburger ในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นได้ว่า อลูมินา (Al_2O_3) มีความแข็งมากที่สุดที่ 21.5 (GPa) จึงได้เลือกนำเอาวัสดุ อลูมินา (Al_2O_3) มาเป็นเกราะแผ่นหน้าโดยที่จะเลือกความหนาที่ต่างกัน ซึ่งความหนาอยู่ระหว่าง 1.3 มม. ถึง 8.3 มม. เป็นเกราะแผ่นแรก ในชั้นที่สองจะเป็น soda-lime float glass ความหนาจะมี ตั้งแต่ หนึ่งชั้น จนถึงสามชั้น ส่วนชั้นสุดท้ายคือชั้นที่สามจะประกบด้วย Polycarbonate ที่มีความหนา 4 มม. ซึ่งนำวัสดุทั้ง 3 ชั้นนี้มาประกบกันโดยในแต่ละชั้นไม่ใช้วัสดุประสาน ดังรูปที่ 12 แล้วทดสอบโดยการยิงด้วยกระสุน 7.62 mm. x 51 AP ที่ความเร็วเฉลี่ย 850 ± 15 m/s.



รูปที่ 12 แสดงการทดสอบและการเรียงชั้นของวัสดุเกราะเซรามิค [16]



รูปที่ 13 แสดงการทดสอบของวัสดุเกราะเซรามิค [16]

จากผลการทดสอบกระสุนสามารถเจาะทะลุผ่านไปได้ และผลการทดลองสามารถทำให้ได้การคำนวณความหนาแน่นรวมของวัสดุ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{glass/polycarbonate}$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho_{FTOT} &= 1.5 \text{ mm} \times 3.99 \text{ g/cm}^3 + 30 \text{ mm} \times 2.5 \text{ g/cm}^3 + \\ &\quad 4 \text{ mm} \times 1.18 \text{ g/cm}^3 \\ &= 85.7 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

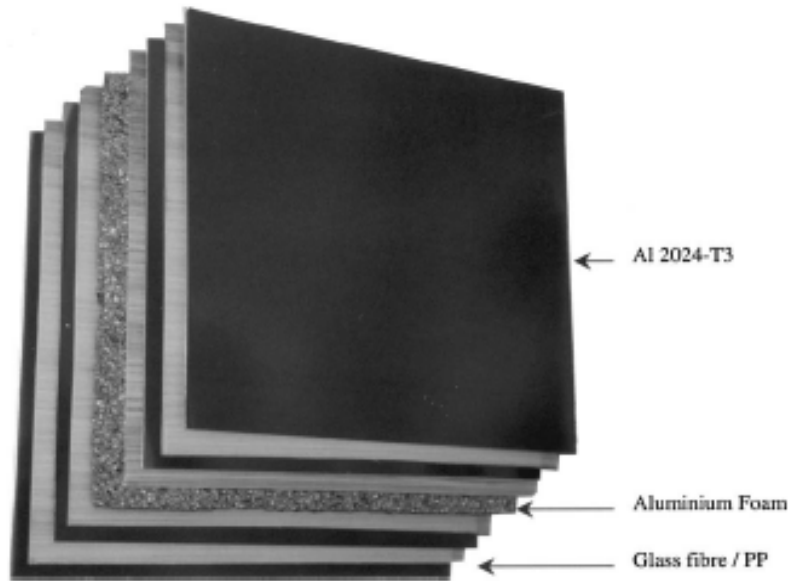
จากงานวิจัยของ E. Straßburger สรุปได้ว่า วัสดุเซรามิก Al_2O_3 จากการทดลองใช้ความหนาเซรามิกตั้งแต่ 1.3 มม. ถึง 8.3 มม. เป็นเกราะแผ่นแรก เซรามิกที่ใช้ควรมีความหนาอยู่ที่ 4 มม. ถ้ามีการเพิ่มความหนาขึ้นไป ก็จะไม่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกเลย การเพิ่มความหนาเข้าไปจะยิ่งทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้น และยังสรุปได้อีกว่าถ้าน้ำหนักของวัสดุทั้งหมดจะสามารถลดลงได้อีก 15% ถ้าวัสดุเซรามิก Al_2O_3 มีความหนาที่อยู่ที่ 1.5 มม. ดังนั้นวัสดุที่ควรนำมาใช้ควรจะเป็นวัสดุเซรามิก Al_2O_3 มีความหนาอยู่ที่ 4 มม.

3.3 วัสดุเส้นใย

เกราะที่ใช้วัสดุประเภทเส้นใย จะใช้คุณสมบัติเด่นของเส้นใย ในด้านความเหนียว โดยเกราะที่ได้จะเป็นเกราะอ่อน น้ำหนักเบาอ่อนนุ่ม สะดวกต่อการสวมใส่ แต่ไม่สามารถป้องกันกันอันตรายจากวัสดุมีคมได้ เมื่อถูกยิงก็ไม่สามารถลดแรงที่กระทำต่อร่างกายได้มาก เพียงแต่สามารถกันกระสุนไม่ให้ทะลุเข้าร่างกายได้เท่านั้น

3.4 เกราะวัสดุผสม (Composite)

เกราะที่ใช้วัสดุผสม จะในวัสดุผสมที่เกิดจากการวิจัยเพื่อ ทำวัสดุใหม่ๆ ในการทำเป็นเกราะกันกระสุน เช่น การใช้เส้นใย ผสานกับพลาสติก (Fiber-reinforced plastic-FRP) ซึ่งจำเป็นต้องมีการวิจัยและทดลองโดยเฉพาะ อีกทั้งการผลิตก็ต้องควบคุมคุณภาพให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนด

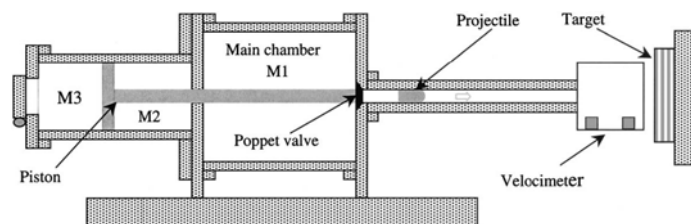


รูปที่ 14 รูปตัวอย่างชั้นเกราะวัสดุผสม [11]

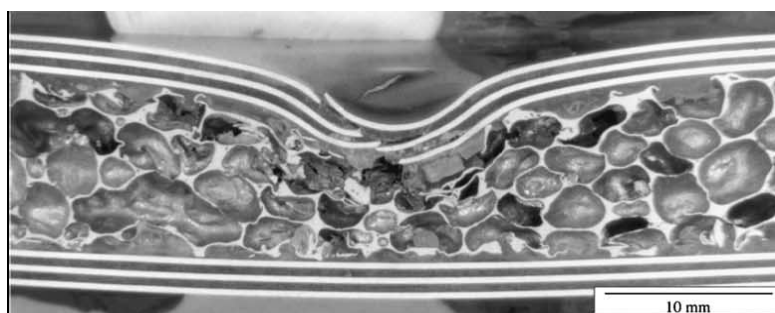
การทดลองของ G. Reyes Villanueva และ คณะ [11] แสดงให้เห็นลักษณะของเกราะวัสดุผสม (Composite) ดังรูปที่ 14 และแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 16 โดยทำการทดลองกับวัสดุ 3 ชนิดคือ

1. Woven glass fibre polypropylene (Twintex PP60 from Vetrotex Ltd.)
2. Aluminium 2024-T3 alloy
3. Aluminium foam (Alporas from the Shinko Wire Company)

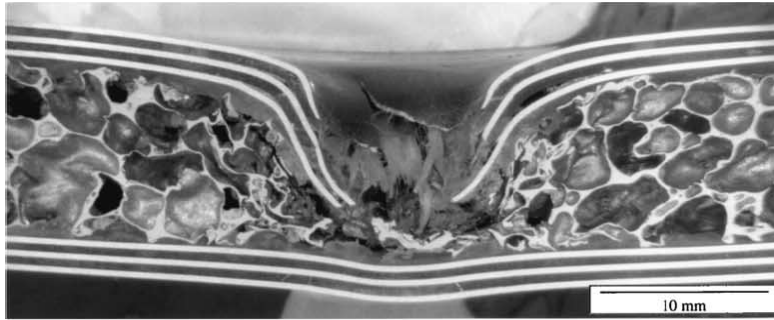
วัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้ถูกจัดเรียงตามรูปที่ 14 และยิงทดสอบด้วยเครื่อง Nitrogen gas gun ดังรูปที่ 15



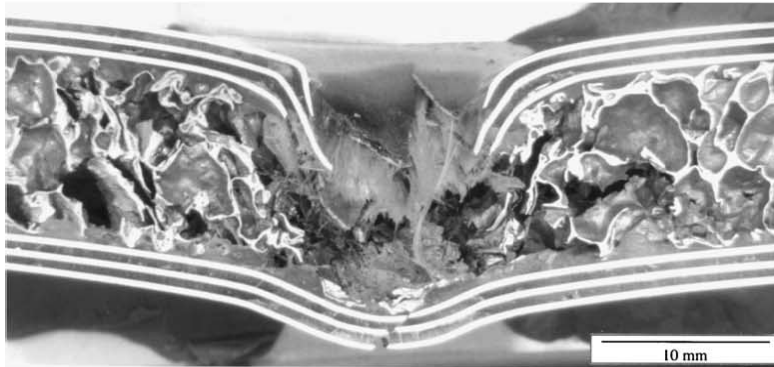
รูปที่ 15 เครื่องยิงทดสอบของ G. Reyes Villanueva และคณะ [11]



รูปที่ 16.1 Impact energy = 48 Joules

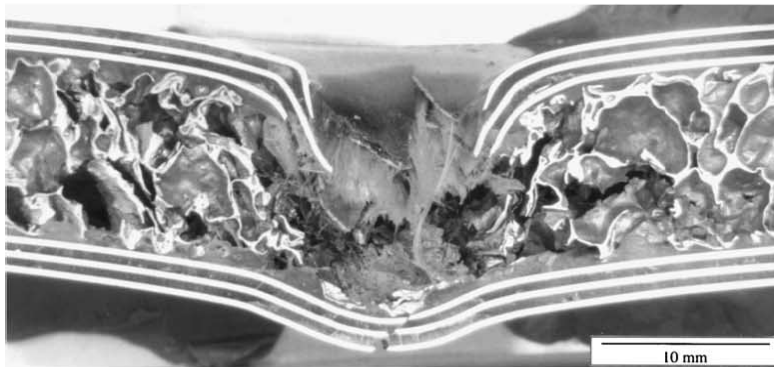


รูปที่ 16.2 Impact energy = 63 Joules



รูปที่ 16.3 Impact energy = 97 Joules

รูปที่ 16.1 แสดงการทดลองยิงเกราะวัสดุผสมที่ระดับพลังงานต่างๆ [11]



รูปที่ 16.4 Impact energy = 129 Joules

รูปที่ 16.2 แสดงการทดลองยิงเกราะวัสดุผสมที่ระดับพลังงานต่างๆ [11]

4. เกราะโลหะ

โลหะที่สามารถใช้ทำเกราะกันกระสุนได้มีอยู่หลายชนิด ซึ่งคุณสมบัติที่เด่นที่เลือกใช้เพื่อทำเกราะกันกระสุนคือ

1. ความแข็งแรงสูง
2. ยึดตัวดี
3. น้ำหนักเบา
4. มีความแข็งทั้งแผ่นเพียงพอในการรับแรงกระแทก

เกราะโลหะมีใช้กันมานานตั้งแต่สมัยโบราณ ซึ่งปัจจุบันก็ยังสามารถใช้โลหะในการทำเกราะกันกระสุนได้เช่นเดียวกัน ความต้านทานการยิงทะลุของวัสดุที่เป็นโลหะขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. ขนาดหัวกระสุน
2. รูปร่างหัวกระสุน
3. ความหนาแน่นหัวกระสุน
4. ความแข็งหัวกระสุน
5. ความเร็วตกกระทบ
6. มุมตกกระทบ
7. ความแข็งเกราะ
8. ความแข็งแรงของเกราะ
9. ความยืดตัวของวัสดุเกราะ
10. ความหนาแผ่นเกราะ
11. ลักษณะเกรน รูปแบบ Microstructure ของวัสดุ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ และจะได้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดกับวัสดุนำไปสู่วิธีการออกแบบเกราะกันกระสุนโลหะ โดยการควบคุมรูปแบบความเสียหายที่จะเกิดกับแผ่นเกราะต่อไป

4.1 ผลกระทบของรูปร่างหัวกระสุนต่อความเสียหายของแผ่นเกราะ

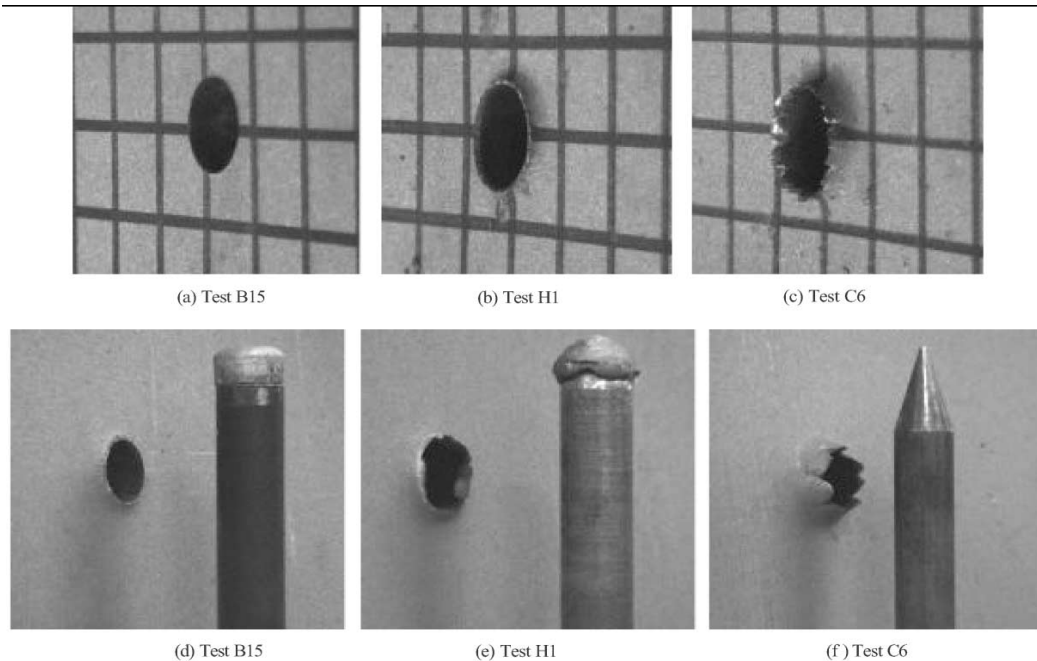
ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเกราะโลหะเป็นผลกระทบมาจากรูปร่างของหัวกระสุน โดยสามารถแบ่งรูปร่างของหัวกระสุนได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือกระสุนหัวมน (Hemispherical nose) และ กระสุนหัวแหลม (Conical nose)

กระสุนหัวมน ส่วนมากเป็นกระสุนปืนพกทั่วไป กระสุนหัวแหลม จะเป็นกระสุนปืนยาว และยังด้วยความเร็วสูง การทดลองของ T. Borvik [5] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะรูปร่างหัวกระสุน กับการเสียหายที่เกิดขึ้นบนแผ่นโลหะ โดยใช้แท่ง เหล็กเครื่องมือ ความแข็ง 53 HRC ยิ่งด้วยปืนอัดแก๊ส กระแทกกับแผ่นเหล็ก Weldox 460 E

กว้าง 500 ม.ม. หนา 12 ม.ม. ทดลองยิงเพื่อหา ballistic limit velocity(BVL) พบว่า หัวทรงมน กับ หัวทรงแหลมได้ BVL 300 m/s ในขณะที่ หัวทรงทุई BVL 185 m/s แสดงว่าทรงหัวทุईนั้นจะทะลุเข้าแผ่นเกราะได้ง่ายกว่า

ผลการทดลองที่ออกมาในลักษณะนี้สอดคล้องกับการอธิบายของ Backman & Goldsmith (1978) และ Backman (1976) [4] ที่อธิบายเกี่ยวกับรูปแบบการเสียหาย ดังนั้นสรุปได้ว่าหัวกระสุนมีผลต่อรูปแบบการเสียหาย และรูปแบบความเสียหายนั้นมีผลต่อพลังงาน

ที่ใช้ในการเจาะทะลุ

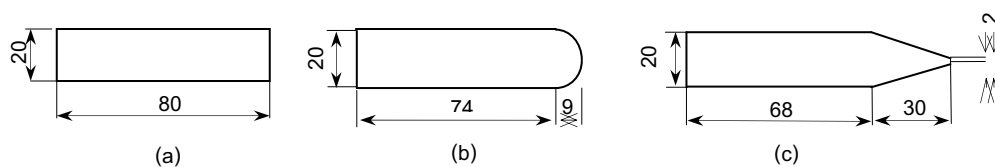


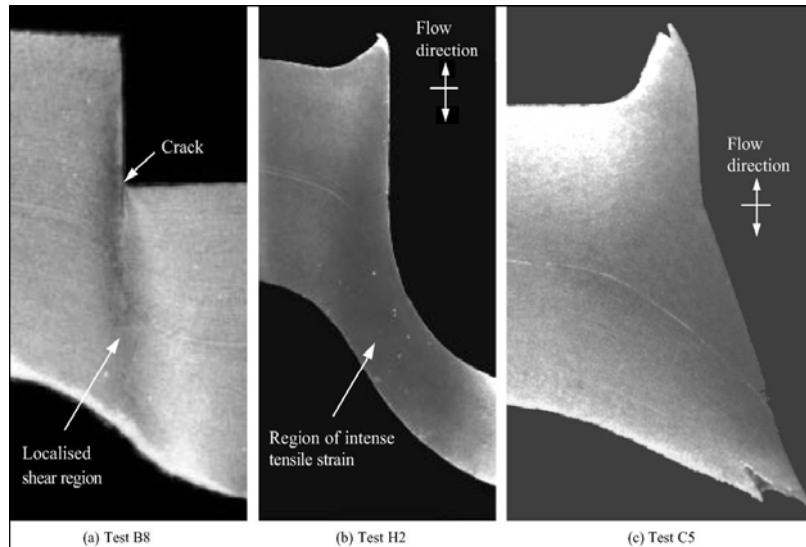
รูปที่ 17 รูปแสดงลักษณะของรอยเจาะ และ plugs ที่เกิดจากการเจาะ [5]

จากรูปที่ 17 แสดงลักษณะของรูเจาะด้านหน้า ด้านล่างแสดงลักษณะด้านหลังกับ plugs ที่เกิดจากการเจาะ สังเกตได้ว่ารอยเจาะ และปลั๊กที่เกิดจากการเจาะของหัวทรงทู่ นั้น มีลักษณะเรียบเหมือนถูกตัด แสดงให้เห็นว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นเกิดจากการตัดเฉือน

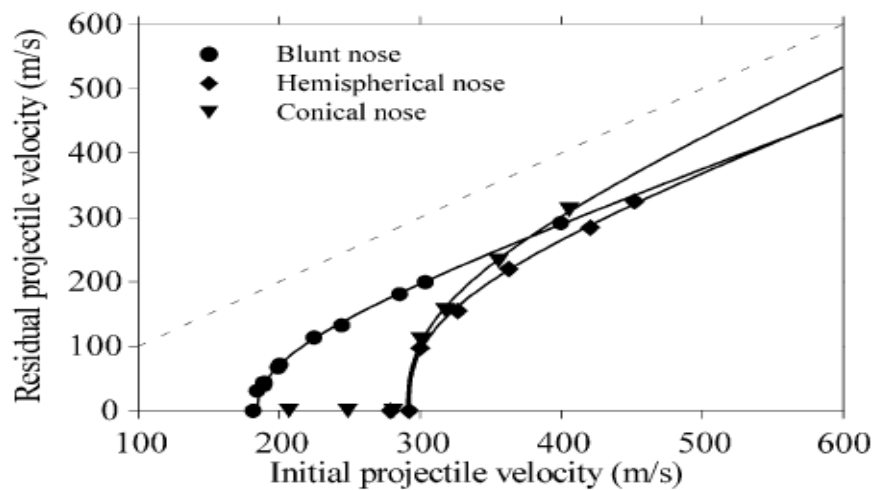
ปลั๊กของการเจาะด้วยหัวทรงมนขอบจะไม่เรียบ เพราะเป็นการเสียหายที่เกิดจากแรงดึง ในขณะที่การเจาะด้วยกระสุนหัวทรงแหลมนั้นไม่มีปลั๊ก แต่เนื้อวัสดุจะถูกผลักออกมาเป็นครีบทัน การที่ได้ผลต่างกันเป็นเพราะมีรูปแบบการเสียหายที่ต่างกันด้วย

ความเสียหายที่เกิดจากกระสุนหัวทรงแหลม และกระสุนหัวทรงมน ต่างเป็นการเกิดความเสียหายที่เกิดจากแรงดึงในเนื้อวัสดุ สังเกตได้จากรูปที่ 18 บริเวณที่เกิดการฉีกขาดของรอยการเจาะด้วยกระสุนหัวทรงมนนั้นจะเกิดที่บริเวณลูกศร ส่วนบริเวณที่เกิดการฉีกขาดของรอยการเจาะด้วยกระสุนหัวทรงแหลม นั้นจะเกิดบริเวณปลายแหลมดังรูป





รูปที่ 18 รูปตัดแสดงร่อง และลักษณะความเสียหายจากหัวรูปร่างต่างๆ [5]



รูปที่ 19 กราฟเปรียบเทียบความเร็วคงเหลือของวัตถุ ที่มีความเร็วเริ่มต้น และรูปร่างต่างๆ [5]

การวิเคราะห์กราฟความเร็วคงเหลือของวัตถุถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Recht and Ipson (1963) [14] เป็นโมเดลในการเขียนกราฟหา Ballistic limit velocity

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{1/p}, a = \frac{m_p}{m_{pl} + m_p}, p = 2$$

v_r ความเร็วคงเหลือ

v_i ความเร็วเริ่มต้น

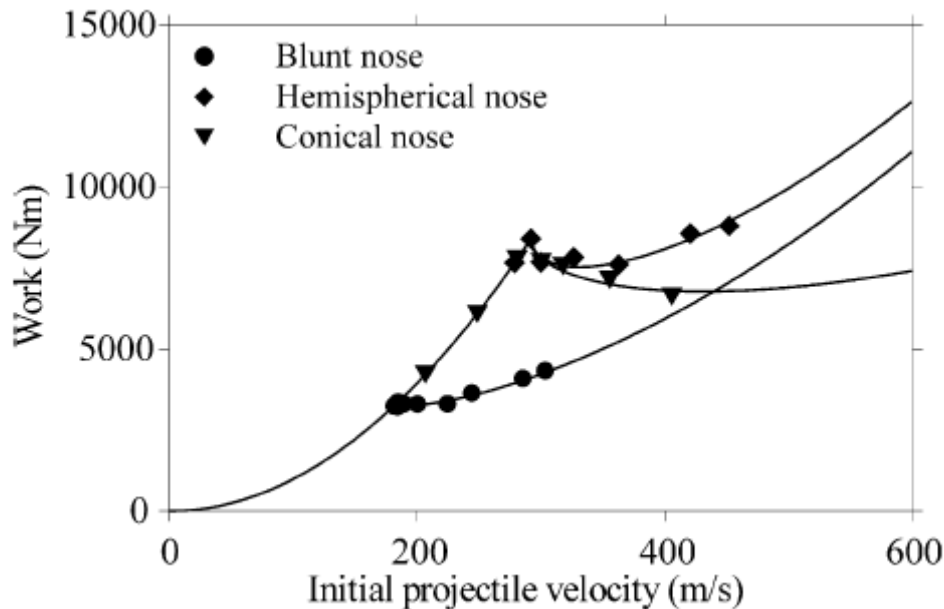
v_{bl} ballistic limit velocity

m_p น้ำหนักกระสุน

m_{pl} น้ำหนักเกราะ

p ค่าคงที่

ในรูปที่ 19 ความเร็วเริ่มต้นน้อยสุด ที่ทำให้มีค่าความเร็วคงเหลือ จะถูกเรียกว่า Ballistic limit velocity ซึ่งสามารถประมาณ ความเร็วน้อยสุดที่ทำให้กระสุนชนิดหนึ่ง สามารถเจาะทะลุเกราะชนิดหนึ่งได้ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของกระสุน หรือ เกราะย่อมมีผลทำให้ค่า Ballistic limit velocity เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนพลังงานจลน์เริ่มต้นไปเป็นงานที่ใช้ทำความเสียหาย [5]

กราฟพลังงาน วิเคราะห์จากสมการอนุรักษ์พลังงาน $\Delta E = 0$

$$\Delta E = \Delta K - \Delta W$$

$$\Delta K = \frac{1}{2} m_p v_i^2 - \frac{1}{2} m_p v_r^2 - \frac{1}{2} m_{pl} v_{rpl}^2$$

$$\Delta K = \Delta W = W_1 + W_2 + W_3$$

$$\Delta W = \frac{1}{2} m_p v_i^2 - \frac{1}{2} m_p v_r^2 - \frac{1}{2} m_{pl} v_{rpl}^2$$

- โดยที่
- ΔK เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์
 - ΔW เป็นงานที่เกิดจากการตกกระทบทั้งหมด
 - W_g เป็นงานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นเกราะ
 - W_l เป็นงานที่เกิดจากการไหลตัวแบบพลาสติกและความเสียหาย
 - W_p เป็นงานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของกระสุนเอง
 - $\frac{1}{2} m_p v_i^2$ เป็นพลังงานจลน์เริ่มต้นของกระสุน
 - $\frac{1}{2} m_p v_r^2$ เป็นพลังงานจลน์หลังตกกระทบของกระสุน

$$\frac{1}{2} m_{pl} v_{rpl}^2 \text{ เป็นพลังงานจลน์หลังตกกระทบของเกราะ}$$

จากรูปที่ 17 ลักษณะของรอยเจาะหัวทรงแหลมจะเสียพลังงานน้อยกว่าหัวทรงมน และเมื่อมีความเร็วต้นที่สามารถเจาะทะลุเกราะได้ ก็ยังคงมีความเร็วปลายเหลืออยู่มากกว่าหัวทรงมน กรณีหัวทรงมน และหัวทรงแหลมต่างมีความเร็วต้นเท่ากันและไม่สามารถเจาะเกราะให้ทะลุได้เหมือนกันแล้วก็จะมีการเสียพลังงานที่ใกล้เคียงกัน [5]

จากรูปที่ 17 แสดงให้เห็นว่าการที่มีรูปทรงที่หัวแตกต่างกัน ทำให้ Ballistic limit velocity (BLV) ต่างกัน และเป็นสาเหตุทำให้รูปแบบการเสียหายที่ต่างกันอีกด้วย

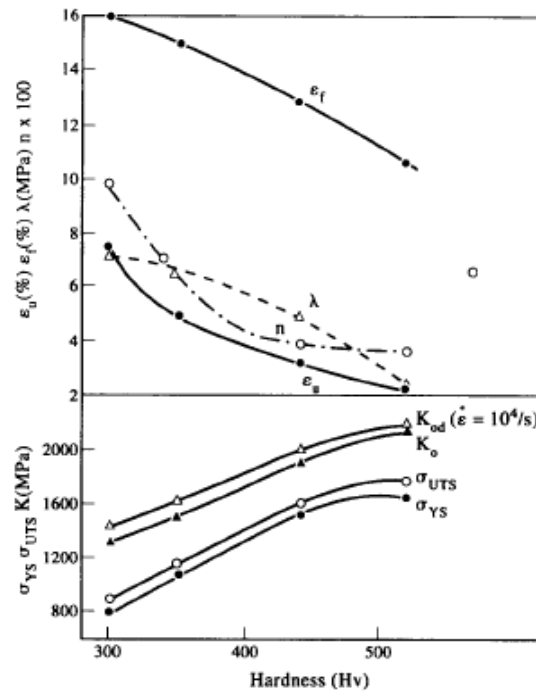
จากกราฟ รูปที่ 18 แสดงให้เห็นว่ารูปทรงหัวตัดมีค่า BLV น้อยกว่ามากเนื่องเกิดการเสียหายแบบ Plugging แต่รูปทรงหัวมน และหัวแหลมเกิดการเสียหายแบบ Ductile Hole Growth และการเสียหายแบบ Petaling ตามลำดับ ซึ่งต่างก็จำเป็นต้องดิ่งยัดวัสดุเช่นกัน จึงมีค่า Ballistic limit velocity ไม่ต่างกัน อีกทั้งจากกราฟพลังงาน ยังแสดงว่ามีการดูดซับพลังงานในระดับใกล้เคียงกันด้วย แต่ความเสียหายแบบ Plugging ไม่มีการดิ่งยัดวัสดุมากจึงทำให้เกิดการดูดซับพลังงานน้อยกว่ามาก

ผลการทดลองของ T. Borvik [5] สรุปได้ว่า BLV ของแผ่นเกราะนั้น ขึ้นกับรูปทรงของหัวกระสุน ด้วย โดยที่ หัวทรงมน และทรงแหลม มี BLV ประมาณ 300 m/s ส่วนหัวทรงทุ้มมี BLV ประมาณ 185 m/s ดังที่แสดงในรูปที่ 17 และจากรูปที่ 18 สังเกตได้ว่าเมื่อความเร็วเริ่มสูงมากถึง 400 m/s รูปทรงแหลมจะมีความเร็วคงเหลือมากที่สุด ดังนั้นกระสุน ปืนเล็กยาว ที่มีความเร็วสูง จึงมีหัวทรงแหลมเพื่อให้มีความเร็วสูง สำหรับเจาะทะลุในชั้นต่อไปได้ ในทางกลับกันกระสุนปืนสั้นที่มีความเร็วต่ำกว่า BLV ของหัวทรงมน กับทรงแหลม จะทำหัวกระสุนที่ค่อนข้างทุ้มเพื่อ ให้ BLV ของระบบลดลง หัวกระสุนจึงสามารถเจาะทะลุได้ดีขึ้น โดยสามารถทำให้เกราะโลหะ มีการขาดแบบ Plugging ได้ง่ายขึ้น

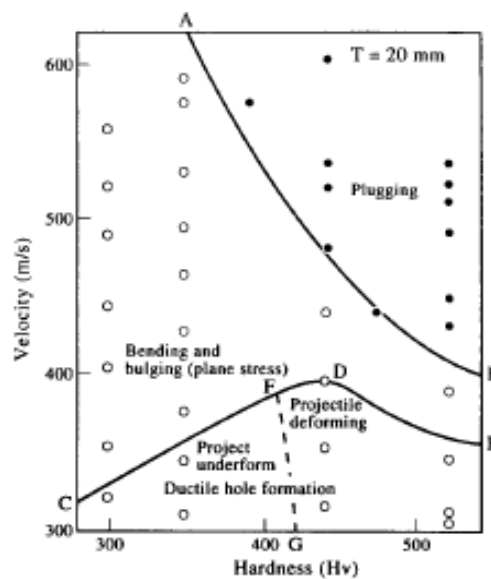
4.2 ผลกระทบจากความแข็งของแผ่นเกราะ

ความแข็งของแผ่นเกราะจะทำให้ สามารถต้านกระสุนดินนั้นขึ้นอยู่กับ ระดับของ ความแข็ง ความหนา ขนาดกระสุน

เมื่อเพิ่มความแข็งของแผ่นเกราะเหล็กกล้าขึ้นไปเรื่อยๆ ความสามารถในการต้านกระสุนจะลดลง เนื่องจากเป็นปัจจัยให้เกิดความเสียหายแบบ Plugging ซึ่งเกิดจากแนวความเค้นเฉือน และเป็นรูปแบบความเสียหายที่ใช้พลังงานน้อยกว่า ความเสียหายแบบ Ductile Hole Growth เป็นผลมาจากความสามารถในการยืดตัวของแผ่นเกราะลดลงเมื่อเพิ่มความแข็ง ดังที่แสดงในกราฟจากการทดลองของ DIKSHIT [12]



รูปที่ 21 แสดงความแข็งแรง และการยืดตัว เทียบกับความแข็ง ที่เพิ่มขึ้นในเหล็กกล้า [12]



รูปที่ 22 แผนภูมิ ความเร็ว-ความแข็ง แสดงบริเวณที่มีกลไกการเจาะทะลุในรูปแบบต่างๆ [12]

ในรูปที่ 22 เส้นที่แบ่งขอบเขตกลไกการเจาะทะลุในรูปแบบต่างๆ จุดวงกลมแสดงจุดที่มีการทดลอง โดยที่จุดที่บ่งชี้หมายถึงจุดที่เกิด Plugging ส่วนจุดที่ไม่บ่งชี้หมายถึงจุดที่เกิด Bulging หรือจุดที่แผ่นทดสอบโป่งนูนขึ้นก่อนแล้วขาดที่บริเวณรอยกระสุน

จากรูปที่ 22 เส้น AB และ CDE สามารถแบ่งโซนประเภทของความเสียหายได้ออกเป็น 3 โซน ตามกราฟ เมื่อเพิ่มความแข็ง จะทำให้เกิดความเสียหาย แบบ plugging ได้ง่ายขึ้นโดยความเร็วในการเจาะทะลุจะลดลง ซึ่งความเสียหายแบบ plugging ใช้พลังงานน้อยที่สุดในการทำให้เกราะทะลุ

ดังนั้นการเพิ่มความแข็งให้กับแผ่นเกราะโลหะจึงไม่ควรเพิ่มความแข็งจนทำให้เกิดความเสียหาย แบบ plugging

สรุปผลกระทบของความแข็งของแผ่นเกราะ ขึ้นกับรูปแบบ ของการเกิดความเค้น ความเครียด ในกรณีความเครียดระดับ (ตัวอย่างเกราะเหล็กหนา 80 มม.) การเพิ่มความแข็งจะเพิ่มความสามารถในการต้านทานกระสุนเนื่องจากการเพิ่มการสูญเสียพลังงานในพลาสติกโซนเพิ่มมากขึ้น และเพิ่มความเสียหายให้แก่หัวกระสุน

ในกรณีความเค้นระดับ การเพิ่มความแข็งสามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานกระสุนได้ในตอนแรก แต่เมื่อความแข็งมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการต้านทานกระสุนลดลง เนื่องการเริ่มเกิดความเสียหายแบบ plugging ดังนั้นในกรณีความเค้นระดับ ควรใช้ความแข็งในระดับกลาง

ในการทำเสื้อเกราะกันกระสุนนั้นจะต้องคำนึงถึงน้ำหนัก ดังนั้นการใช้ความหนาของโลหะให้เกิดกรณีความเครียดระดับ นั้นจะทำให้เสื้อเกราะมีน้ำหนักมากเกินไป อีกทั้งความเร็วของหัวกระสุนปืนเล็กยาวที่เป็นอาวุธสงครามมีความเร็วสูงมาก มีรูปทรงแหลมคม มีความแข็งของหัวกระสุนมาก ดังนั้นจะต้องหารูปแบบ และวัสดุที่เหมาะสมต่อไป

4.3 ผลกระทบจากชั้นของแผ่นเกราะ

จากการวิเคราะห์ ในบทความ Effect of air gaps on ballistic resistance of targets for conical impactors [11] สรุปไว้ได้ว่า จากการวิเคราะห์สำหรับหัวทรงแหลม ballistic limit velocity จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะห่างระหว่างแผ่นเกราะมากขึ้น หรือเมื่อมีจำนวนแผ่นมากขึ้น ในขณะที่ผลรวมความหนาของแผ่นเท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นกับวัสดุ และรูปแบบความเสียหายที่เกิดกับแผ่นเกราะในแต่ละชั้นด้วย

4.4 ผลกระทบจากความหนาของแผ่นเกราะ

การเพิ่มช่องว่างระหว่างแผ่นยังสามารถเพิ่ม Ballistic limit velocity ขึ้นได้นั้นการเพิ่มความหนาของแผ่นเกราะย่อมเพิ่ม ballistic limit velocity [5] ขึ้นได้เช่นกัน การเพิ่มความหนาของแผ่นเกราะมีผลทำให้ความหนาของชั้นที่ถูกดึงยึดออก ในการเสียรูป มีความหนามากขึ้นดังนั้นค่าความเค้นก็จะลดลง

4.5 ผลกระทบทางความร้อน

เมื่อวัสดุมีผลทางด้านความร้อนจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานหัวกระสุนได้มากขึ้นโดยจะสูญเสียออกไปเป็นพลังงานความร้อน ดังเช่นผลการทดลองของ S. Yadav [12] ดังรูปที่ 23 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อวัสดุมีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี จะทำให้ความลึกของการเจาะทะลุน้อยลง แต่ขนาดรูจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากผลของความร้อน การทดลองยังด้วย cylindrical tungsten heavy alloy (WHA) ที่ความเร็ว 1100 m/s เข้ากระทบกับแผ่นอลูมิเนียม 6061-T6 เปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยไฟต์ในต้อลิเมนต์ที่พิจารณาคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ เมื่อมีการคำนึงถึงการนำความร้อนของวัสดุแผ่นเกราะจะทำให้ผลของการคำนวณเข้าใกล้ผลที่เกิดจากการคำนวณ

Table 1
Mechanical constants

Material	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	ν	σ_y (GPa)	ϵ_0^p	n	ϵ_0^d	m
6061-T6 Al	2700	69	0.33	0.276	0.001	13.5	1000	11.5
WHA	17700	345	0.29	1.35	0.0033	10.0	1000	8.0

Table 2
Equation of state constants

Material	K_1 (GPa)	K_2 (GPa)	K_3 (GPa)
6061-T6 Al	55.5	297.0	197.0
WHA	320.0	564.0	1053.0

Table 3
Thermal constants

Material	c (J/kg K)	k (W/mK)	T_0 (K)	T_m (K)	α	β
6061-T6 Al	896	167	298	853	0.5	1.0
WHA	138	120	298	1723	0.78	1.0

Table 4
Summary of the computational runs. Coefficient of friction $\mu = 0.2$ for the computational runs unless otherwise stated

Run	Depth of penetration (mm)	Residual penetrator length (mm)	Maximum crater diameter (mm)
1. No thermal softening in WHA & Al	104	40.0	10.6
2. Thermal softening in Al alone ($\alpha = 1, \beta = 0$)	118	41.7	10.4
3. Thermal softening in WHA alone ($\alpha = 1, \beta = 0$)	79	33.8	13.4
4. Thermal softening in WHA alone ($\alpha = 1, \beta = 1$)	59	25.8	14.4
5. Thermal softening in both WHA & Al ($\alpha = 1, \beta = 0$)	81	34.1	13.4
6. Thermal softening in both WHA & Al ($\alpha = 1, \beta = 1$)	70	26.0	13.8
7. Thermal softening in both WHA & Al (α and β as per Table 3)	79	26.0	14.8
8. Thermal softening in both WHA & Al ($\mu = 0.01, \alpha$ and β as per Table 3)	83	26.0	14.8
9. Experiment	85	26.0	16.0

รูปที่ 23 ผลการทดลองและคุณสมบัติต่างๆ จากการทดลองของ S. Yadav [13]

5. การปรับปรุงคุณภาพโลหะ

โลหะถูกใช้ ทำเป็นเกราะ ตั้งแต่สมัยโบราณ โดยเริ่มจากการกันอันตรายจาก ดาบ ธนู และอาวุธต่างๆ จนกระทั่งป้องกันอันตรายจากกระสุนปืนในปัจจุบัน โลหะที่ใช้ในการทำเกราะ คือเหล็กกล้า เนื่องจากมีความแข็งแรง และรับแรงกระแทกได้ดี

โลหะที่จะใช้ทำเกราะกันกระสุนจำเป็นต้องมีคุณสมบัติที่ดีในการรับแรงกระแทก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการผ่านกระบวนการ การปรับปรุงคุณภาพโลหะ ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพโลหะก็มีด้วยกันหลายกระบวนการ โดยขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ด้วย วิธีที่เป็นที่นิยมและได้ผลมาก คือกรรมวิธีทางความร้อน โดยสามารถปรับปรุงคุณภาพของเหล็กให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการได้

5.1 กรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า

กรรมวิธีทางความร้อน หรือเรียกสั้นๆ ว่า “การอบ-ชุบ”

นิยาม Heat Treatment (การอบชุบ) หมายถึง “การรวมเอา การทำให้ร้อน การทำให้เย็น เวลา และการประยุกต์ใส่เข้าไปในโลหะหรือโลหะผสมในสภาพที่ยังเป็นของแข็ง แล้วทำให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ”

วัตถุประสงค์

- เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ให้ได้ตามที่ต้องการ
 - มีความอ่อนตัวสูง ขึ้นรูปได้ง่าย
 - มีความแข็งแรงสูง เพื่อทนการเสียดสี
 - มีความเหนียว ใช้งานที่มีแรงกระแทกและบิดตัวสูงได้ทนทาน

หลักการ เปรี้ยวให้ร้อนและปล่อยให้เย็นตัวที่อัตราต่างๆ กัน เหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างเนื่องจากมีสมบัติ Allotropy คือเปลี่ยนแปลงระบบผลึกเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

5.2 โครงสร้างเหล็กที่ได้จากกรรมวิธีทางความร้อน

เบไนต์ (Bainite)

เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการที่ Austenite เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยชุบให้อุณหภูมิลดลงไปจนถึงช่วงอุณหภูมิ 200-400 °C แล้วแช่ที่อุณหภูมินั้นเป็นเวลานานพอสมควร เบไนต์เป็นเหล็กคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กมาก (Submicroscopic carbides) ที่กระจายไปทั่ว Ferrite ที่ถูกบีบเค้น (Strained α)

Martensite

เกิดจากการที่ Austenite เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยชุบให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่าที่เกิด Bainite Martensite เป็นโครงสร้างที่แข็งและเปราะ คาร์บอนทั้งหมดถูกกักอยู่ในรูป Supersaturated solid solution (สารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด) ทำให้โครงสร้าง BCC ถูกบิดไปเป็น Body centered tetragonal (BCT) ปริมาณการบิดตัวนั้นแปรผันตามปริมาณคาร์บอนที่ละลายปนอยู่

Time-Temperature-Transformation (TTT) Diagrams

TTT diagram เป็นแผนภาพที่แสดงเวลาที่จำเป็นสำหรับการให้ Retained austenite เปลี่ยนไปที่อุณหภูมิคงที่กลายเป็นโครงสร้างที่ stable ซึ่งอาจเรียกแผนภาพนี้ว่า Isothermal transformation diagram

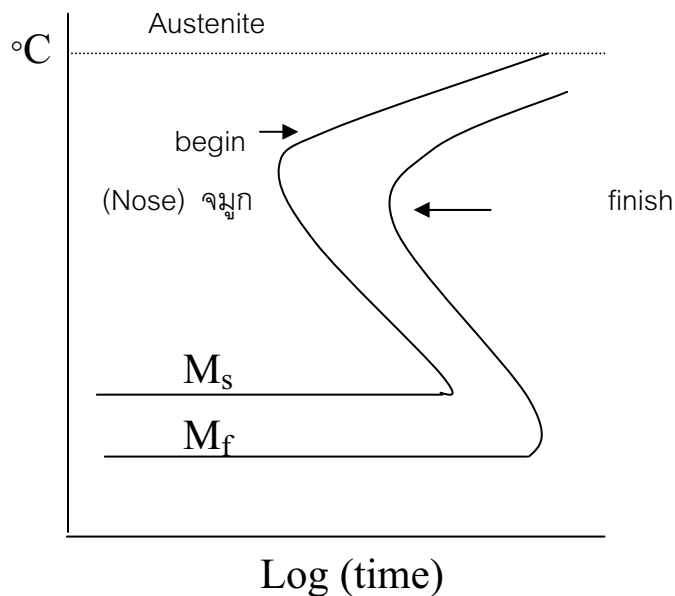
แผนภาพนี้เป็นรูปร่างคล้ายอักษร "S" โดยแกนตั้งเป็นอุณหภูมิและแกนนอนเป็นเวลา (Log scale) โดยมีเส้นต่างๆ คือ

เส้น Transformation begin

เส้น Transformation finish

เส้น Marten site start (M_s)

เส้น Martenite finish (M_f)



รูปที่ 24 แผนภาพ Isothermal transformation diagram

$$\text{Cooling rate} = (T_1 - T_2) / t$$

T_1 = อุณหภูมิที่อบอ่อน (ก่อนชุบ)

T_2 = อุณหภูมิหนึ่งที่ต่ำลงมา

T = เวลาที่ใช้ขณะชุบให้อุณหภูมิลดลงจาก T_1 มา T_2

CCR คือ Critical cooling rate ซึ่งเป็นอัตราการเย็นตัวที่พอดี โดยเส้น cooling curve จะลากผ่านจุด TTT-diagram ซึ่งหมายถึงว่ายังไม่มี การเปลี่ยนภาคของ retained austenite จนเมื่ออุณหภูมิลงต่ำกว่า M_s , M_f แล้วจึงเปลี่ยนภาคไปเป็น Martensite

นั่นคือ หากต้องการชุบแข็งให้ได้ Martensite ต้องเลือกสารชุบ (Quenching media) ที่ให้ cooling rate เร็วกว่า Critical cooling rate

5.3 ลักษณะการอบ-ชุบ เหล็กกล้า

การอบชุบที่สำคัญ และใช้กันมากมี 4 แบบ คือ

1. Annealing (การอบอ่อน หรือ การอบคลายเครียด)
2. Normalizing (การอบปกติ)
3. Tempering (การอบคืนตัว)
4. Hardening (การชุบแข็ง)

5.4 การอบอ่อน หรือ อบคลาย (Annealing)

การอบอ่อน หรือ อบคลาย หมายถึง การอบเพื่อให้เหล็กอ่อนลง (Softening) หรือเพื่อให้เหล็กเหนียวขึ้น (Toughening)

วัตถุประสงค์ของการอบเพื่อให้คืนตัว

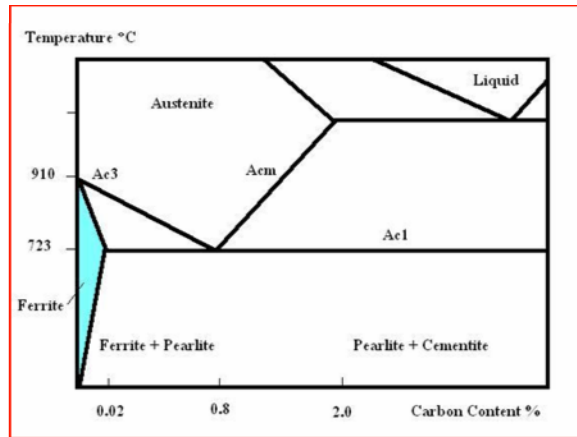
เนื่องจากเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) หรือการหล่อมา มักจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น และไม่สม่ำเสมอ ทำให้การกลึงหรือไสได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดความแข็งของเหล็กเพื่อกลึงไสได้

สะดวก มีสอง 2 วิธี คือ

1. Full Annealing (การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์)
2. Incomplete Annealing หรือ Process Annealing (การอบอ่อนไม่สมบูรณ์)
 - 2.1 Stress- relief Anneals
 - 2.2 Spheroidising Anneals

5.5 กรรมวิธีการทำ Full Annealing

1. เหล็ก Hypo-eutectoid เผาให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 ประมาณ $30-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนเหล็ก Hyper-eutectoid เผาให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac_1 ประมาณ $30-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ไม่เลย Acm)



รูปที่ 25 แผนภาพการเปลี่ยนโครงสร้างของเหล็ก

2. แช่เหล็กทิ้งไว้ในเตา ให้เป็น Austenite ทั้งหมด ปล่อยให้เย็นในเตาที่ปิดฝาสนิท (ถ้าเป็นเตาไฟฟ้า ก็เพียงแค่ถอดปลั๊กออก)

สิ่งที่จะเกิดขึ้น เมื่อเหล็กถูกปล่อยให้เย็นช้าๆ การเปลี่ยนโครงสร้างภายใน ก็จะกลับสู่สภาพใกล้เคียงสมดุลโครงสร้างที่เป็นอยู่เดิม นั่นคือ มาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ จะกลับมาเป็นเฟอร์ไรท์และซีเมนไทต์ ทำให้ความแข็งลดลงกลายเป็นเหล็กอ่อนนุ่ม

ความมุ่งหมาย เพื่อทำให้เหล็กอ่อนลงเพื่อสะดวกในการกลึงไส

5.8 การปรับปรุงความเหนียว (Normalizing)

Normalizing หมายถึง การอบเพื่อให้เหล็กมีเหนียวดีขึ้น โดยการลดขนาดของเม็ดเกรนของเหล็ก (Grain Size) เพื่อให้คุณสมบัติของเหล็กสม่ำเสมอ และขณะเดียวกัน ก็ลดความเครียดด้วย

วัตถุประสงค์ของ การอบเพื่อให้คืนตัว

โดยทั่วไปเหล็กที่ผ่านการหล่อ (Casting) หรือการรีดขึ้นรูปมา มักจะมีความแข็งหรือความเหนียวไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแท่ง จึงจำเป็นต้องนำมาทำ Normalizing

กรรมวิธีการทำ Normalizing

1. เหล็ก Hypo-eutectoid เผาให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 กับ A_{cm} ประมาณ $30-50\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. แช่เหล็กทิ้งไว้ในเตา ($30-60$ นาที/ความหนาเฉลี่ย 25 มม.) ให้อุณหภูมิเท่ากันหมดทุกจุดตลอดภายในใจกลางด้วย

3. เอาออกจากเตา ปล่อยให้เย็นในอากาศธรรมดา

สิ่งที่เกิดขึ้น เหล็กจะมีความเหนียวดีและคุณสมบัติสม่ำเสมอ

เม็ดเกรนของเหล็กจะมีขนาดเล็กกว่าแบบ Annealing เนื่องจากเย็นในอากาศ ดังนั้นอัตราการเย็นตัวจะเร็วกว่า

Tempering (การอบคืนตัว)

Tempering หมายถึง การอบเพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งาน ลดความเครียด เพิ่มความเหนียว ลดความเปราะลง

วัตถุประสงค์ของ การอบเพื่อให้คืนตัว

เนื่องจากเหล็กที่ผ่านการชุบ ย่อมเกิดความเครียดขึ้นภายใน ถึงมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ขาดความเหนียว (Ductility) ทำให้เปราะ หลังจากชุบแข็งแล้วจึงต้องนำมาอบ Tempering ก่อนนำไปใช้งานจริง

กรรมวิธีการทำ Tempering

1. นำเหล็กที่ผ่านการชุบแล้วมาเผาในเตา อุณหภูมิประมาณ $200-400\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. แช่เหล็กทิ้งไว้ในเตา $1-3$ ชั่วโมง
3. เอาออกจากเตา ปล่อยให้เย็นในอากาศธรรมดา

สิ่งที่เกิดขึ้น เหล็กที่ผ่านการชุบ จะมีความเหนียวดีขึ้น แต่ความแข็งจะลดลงเล็กน้อย

ข้อควรระวัง ขณะเผาที่อุณหภูมิต่ำ มาร์เทนไซต์จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

จะพยายามเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่สมดุลที่อุณหภูมิบรรยากาศ ดังนั้น

ไม่ควรเผาอุณหภูมิเกิน $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อไม่ให้มาร์เทนไซต์คืนตัวหมด

ผลของระดับอุณหภูมิ

500-650 °C ทำลายความเครียด/เหนียวสูง

350-450 °C เหนียวสูง/สปริง/ใกล้เคียง Bainite

150-250 °C ลดความเครียด/hardness ลดลงเล็กน้อย

การเปราะเนื่องจากการอบคืนตัว (Tempered Brittleness)

- การอบคืนตัวจะทำให้สมบัติด้านความเหนียวดีขึ้น แต่ในช่วงอุณหภูมิ 300-500 °C จะทำให้สมบัติทนแรงกระแทก (Impact strength) ลดลง
- เหล็กกล้าคาร์บอนจะเกิดการเปราะเล็กน้อย
- เหล็กกล้าผสม (โดยเฉพาะ Mn, Cr และ Mo) จะปรากฏชัดเจน
- สาเหตุจาก เกิดการตกผลึกของคาร์ไบด์ที่มาจาก Martensite หรือจากการที่ martensite แตกตัว ควรหลีกเลี่ยงอุณหภูมิดังกล่าว หรือใช้เวลาน้อยที่สุดในช่วงนี้

Hardening (การชุบแข็ง)

Hardening หมายถึง การชุบเพื่อให้เหล็กมีความแข็งขึ้น

การชุบแข็งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. Full hardening
2. Case (surface) hardening

Full hardening (การชุบแข็งทั้งชิ้นงาน)

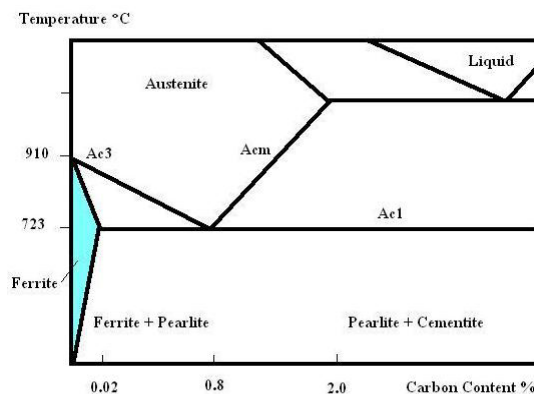
การชุบแข็งทั้งชิ้นงานของเหล็กกล้าเป็นกระบวนการที่อาศัยการเผาอบเหล็กให้เปลี่ยน

โครงสร้างเป็น Austenite แล้วจึงทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการจุ่มสารชุบได้โครงสร้างใหม่เป็น Martensite

การชุบแข็งทั้งชิ้นงานแยกเป็น

- ก. การชุบแข็งด้วยน้ำ (Water quench)
- ข. การชุบแข็งด้วยน้ำมัน (Oil quench)
- ค. การชุบแข็งด้วยอากาศ (Air quench)
- ง. การชุบแข็งแบบมาเทมเปอริง (Martempering)
- จ. การชุบแข็งแบบออสเทมเปอริง (Austempering)

หลักการ



รูปที่ 26 ภาพโครงสร้างสถานะของเหล็ก [17]

หลักการในการชุบแข็งเหล็กกล้า คือ การทำให้เหล็กกล้าเปลี่ยนโครงสร้างจาก BCC (Ferrite) กลายเป็น FCC (Austenite) โดยให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิเหนือเส้น Ac3 สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8 % หรือที่เรียกว่าเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ แต่สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.8 % หรือเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ให้ความร้อนแค่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac1

อุณหภูมิที่ใช้ในการชุบแข็งควรอยู่เหนือเส้นดังกล่าวประมาณ 50 ° C จากนั้นจึงทำให้เหล็กกล้าเย็นตัวลง ซึ่งความเร็วในการเย็นตัวจะต้องมากพอที่จะทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งเพิ่มขึ้น เพราะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเกรนมาร์เทนไซต์

เหตุที่อุณหภูมิชุบแข็งของเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์อยู่แค่เหนือเส้น Ac1 ประมาณ 50 ° C นั้นเนื่องจากเหล็กกล้าชนิดนี้มีจำนวนคาร์บอนสูง ถ้าใช้อุณหภูมิชุบแข็งเหนือเส้น Ac3 หลังจากการทำให้เย็นตัวลง จะทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งไม่สูงเท่าที่ควร เพราะจะเกิดเกรนที่เรียกว่ารีเทนอสเตไนต์ (Retained Austenite) หลงเหลืออยู่มาก นอกจากนั้นการใช้อุณหภูมิในการชุบแข็ง จะมีผลให้ได้เกรนมาร์เทนไซต์ที่หยาบ ซึ่งจะเป็นผลให้ได้ความแข็งไม่มากเท่าที่ควร ถ้าชุบแข็งเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์จากอุณหภูมิเหนือเส้น Ac1 ก็จะทำให้ได้เกรนมาร์เทนไซต์ ซึ่งเกิดจากเกรนอสเตไนต์ ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.9 % จะทำให้เกิดรีเทนอสเตไนต์น้อยกว่า เพราะเกรนอสเตไนต์กลายเป็นมาร์เทนไซต์ได้ง่ายกว่า คาร์บอนที่เหลือจะกลายเป็นซีเมนไซด์ ซึ่งมีความแข็งใกล้เคียงกันเกรนมาร์เทนไซต์ แต่มีความเปราะมากกว่า

การใช้อุณหภูมิชุบแข็งต่ำเกินไป รวมทั้งการใช้เวลาคงอุณหภูมิที่อุณหภูมิชุบแข็งสั้นเกินไป จะทำให้เหล็กคาร์ไบด์ที่เหลืออยู่นี้ เป็นแกนผลึกสำหรับกรนเพอร์โลต์ แทนที่จะกลายเป็นเกรนมาร์เทนไซต์

ถ้าชุบแข็งเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์จากอุณหภูมิระหว่างเส้น A_{c3} และ A_{c1} จะทำให้เกรนบางส่วนยังคงสภาพเป็นเฟอร์ไรต์อยู่ และทำให้เหล็กที่ชุบมีความแข็งไม่สม่ำเสมอบางจุดในเนื้อเหล็กจะอ่อน และบางจุดจะแข็งมาก

ถ้าใช้อุณหภูมิในการชุบแข็งมากเกินไป หรือใช้เวลาคงอุณหภูมินานเกินไป จะเป็นผลให้ได้เกรนมาร์เทนไซต์หยาบ และมีผลให้ชิ้นงานมีความเปราะมากขึ้น

ความแข็งของเหล็กที่ผ่านการชุบ ขึ้นอยู่กับสองสิ่ง คือ

1. ปริมาณ Carbon ในเหล็ก กล่าวคือ ถ้ามีมาก โอกาสที่จะเปลี่ยนเป็น มาร์เทนไซต์ก็ยิ่งง่าย และทำให้เกิดปริมาณของ มาร์เทนไซต์ง่าย
2. อัตราความเร็วในการชุบ กล่าวคือ ยิ่งเย็นเร็วๆ โอกาสที่ออสเทนไนท์ จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ก็มีมาก ในทางตรงข้ามถ้าเย็นช้าๆ ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรท์ กับซีเมนไตต์หมด

กรรมวิธีการทำ Hardening

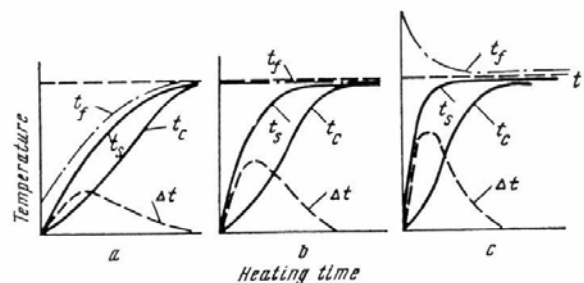
1. เเผาเหล็กให้ร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ $800-900^{\circ}\text{C}$ (ขึ้นกับชนิดของเหล็ก)
ถ้า $C < 0.8\%$ ให้ใช้อุณหภูมิเลยเส้น A_3 ประมาณ $50-75^{\circ}\text{C}$
ถ้า $C > 0.8\%$ ให้ใช้อุณหภูมิเลยเส้น A_1 ประมาณ $50-75^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น
2. เมื่อเหล็กกลายเป็น ออสเทนไนท์ แช่อุณหภูมิไว้ประมาณ 1 ชม./ความหนา 25 มม.
3. เอาออกจากเตาทำให้เย็นโดยเร็ว ด้วยการจุ่มในน้ำ (Water Quench)
หรือน้ำมัน (Oil Quench)

สิ่งที่เกิดขึ้น ออสเทนไนท์เปลี่ยนกลับเป็นเฟอร์ไรท์และเฟอไรต์ไม่ทัน

แต่ให้โครงสร้างที่มีความแข็งสูง เรียก มาร์เทนไซต์

อัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะสม

- อัตราการเผาช้า
 - เผาเหล็กให้ร้อนไปพร้อมๆ กับเตา อุณหภูมิของเหล็กจะต่ำกว่าเตาเพียงเล็กน้อย (ดูภาพ)
 - เหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีส่วนหนา บางต่างกัน
- อัตราการเผาสูง
 - บรรจุเหล็กเข้าเตาที่มีอุณหภูมิที่ต้องการ โดยพบว่าเหล็กจะมีอุณหภูมิที่ต่างกันมากในตอนเริ่มต้นจากนั้นจะเท่ากัน โดยใช้เวลาน้อยกว่าอัตราการเผาช้า
 - เหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน และมีปริมาณคาร์บอนปานกลาง
 - สามารถลดความต่างของอุณหภูมิโดยบรรจุเหล็กไว้ในหีบปิดคลุมมิดชิดก่อนบรรจุเข้าเตา
- อัตราการเผาที่สูงมาก
 - ไม่ค่อยนิยม เพราะอุณหภูมิระหว่างผิวกับใจกลางต่างกันมาก ซึ่งอาจทำให้เหล็กบิดเบี้ยวหรือแตกร้าวได้ ซึ่งสามารถลดความต่างของอุณหภูมิโดยบรรจุเหล็กไว้ในหีบปิดคลุมมิดชิดก่อนบรรจุเข้าเตาเช่นกัน



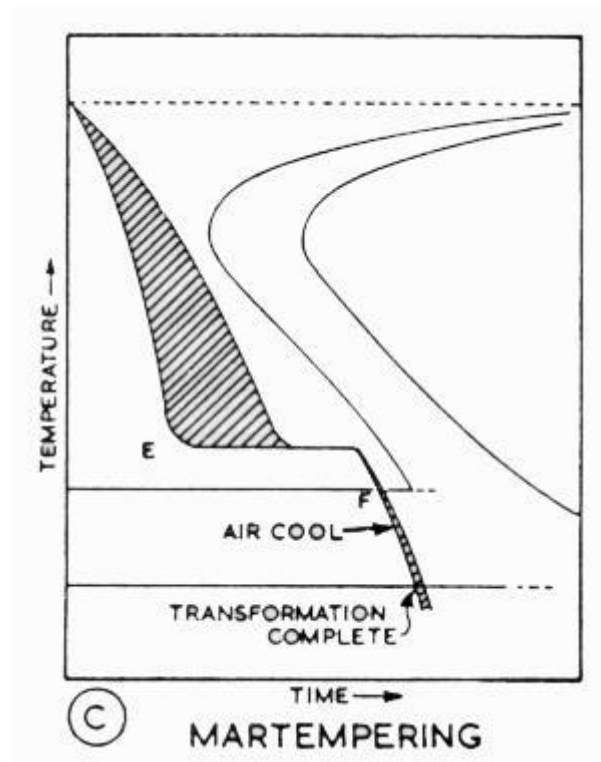
Three possible procedures for heating parts in a furnace
(after A. A. Shmykov):
 t' —specified heating temperature, t_s —surface temperature of heated parts, t_c —temperature in the core of heated part, Δt —temperature difference between surface and core, t_f —furnace temperature

รูปที่ 27 แผนภาพอุณหภูมิกับเวลาการให้ความร้อน [17]

ของเหลวสำหรับการชุบแข็ง

- ต้องมีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤติ
- มีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลงในช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงจาก Austenite ไปเป็น Martensite (ประมาณ 200-400 °C) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเครียดภายในจนเกิดการบิดงอ หรือแตกร้าวเสียหายได้
- ของเหลวสำหรับการชุบแข็งที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ น้ำ, น้ำเกลือ, น้ำด่าง, เกลือละลาย และอากาศ
- การถ่ายเทความร้อนที่ของเหลวกลายเป็นไอเมื่อสัมผัสกับแท่งเหล็กร้อน แบ่งเป็น 3 ลักษณะ
 - **ขั้นแรก** ของเหลวที่สัมผัสกับแท่งเหล็กร้อนจะกลายเป็นไอหุ้มแท่งเหล็กไว้ในลักษณะฟิล์มบางๆ การถ่ายเทความร้อนช่วงนี้จะช้า แต่จะเป็นอยู่ในระยะสั้นๆ
 - **ขั้นที่สอง** ฟิล์มบางๆ ที่หุ้มอยู่แตกออก ของเหลวสัมผัสกับแท่งเหล็ก จะเดือดและกลายเป็นไอ มีลักษณะเหมือนการกววน ขั้นตอนนี้อัตราการเย็นจะสูงมาก
 - **ขั้นที่สาม** อัตราการเย็นตัวช้าลง เพราะแท่งเหล็กเย็นน้อยลง ของเหลวมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดเดือด ความร้อนจึงถ่ายเทออกไปโดยการพาด้วยของแข็งอย่างเดียว อัตราการเย็นตัวจะลดลงจนถึงจุดที่ของเหลวกับแท่งเหล็กมีอุณหภูมิเท่ากัน

Mar-Tempering Hardening



รูปที่ 28 แผนภาพกรรมวิธี Mar-tempering Hardening [19]

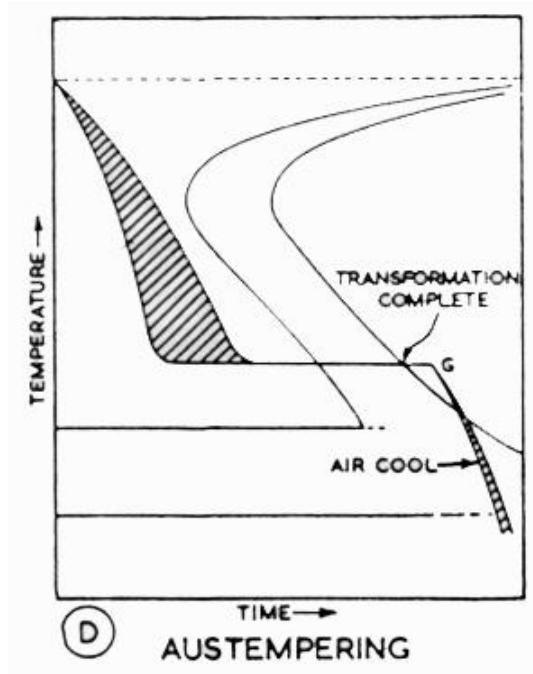
- นิยมใช้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน มีความหนา บางแตกต่างกันมาก (ถ้าชุบแบบปกติชิ้นงานอาจบิดงอ เกิดความเครียดจากการเย็นตัวเร็ว อาจแตกร้าวในที่สุด)
- ควรมีการอบคืนตัวเพื่อลดความเครียด

กรรมวิธีการทำ Mar-tempering

- 1 เฝاهدهล็กให้ร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 800-900 °C (ขึ้นกับชนิดของเหล็ก)
ถ้า $C < 0.8\%$ ให้ใช้อุณหภูมิเลเยเส้น A3 ประมาณ 50-75 °C
ถ้า $C > 0.8\%$ ให้ใช้อุณหภูมิเลเยเส้น A1 ประมาณ 50-75 °C เท่านั้น
- 2 เมื่อเหล็กกลายเป็น ออสเทนไนต์ แช่อุณหภูมิไว้ประมาณ 1 ชม./ความหนา 25 มม.
- 3 ชุบลงในอ่างเกลือหลอมละลาย (~400 °C) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เกลือโซเดียมไนเตรด กับโปแตสเซียมไนเตรด (40-50%) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 145 °C
ที่อุณหภูมิเหนือเส้น Ms โดยเวลาต้องไม่ถึงช่วงที่เกิด Bainite (ดูจาก TTT diagram)
- 4 เอาออกจากเตาทำให้เย็นโดยเร็ว ด้วยการจุ่มในน้ำ หรือน้ำมัน

5 ได้ที่มีโครงสร้าง Martensite ความแข็งสูง

Aus-Tempering Hardening



รูปที่ 29 แผนภาพกรรมวิธี Aus-Tempering Hardening [19]

กรรมวิธีการทำ Aus-tempering

1. เผาเหล็กให้ร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 800-900 °C (ขึ้นกับชนิดของเหล็ก)
ถ้า $C < 0.8\%$ ให้ใช้อุณหภูมิเลเยเส้น A3 ประมาณ 50-75 °C
ถ้า $C > 0.8\%$ ให้ใช้อุณหภูมิเลเยเส้น A1 ประมาณ 50-75 °C เท่านั้น
2. เมื่อเหล็กกลายเป็น ออสเทนไนต์ แช่อุณหภูมิไว้ประมาณ 1 ชม./ความหนา 25 มม.
3. ชุบลงในอ่างเกลือหลอมละลาย (~500-600 °C) ถ้าต้องการ Upper bainite (ขนนก)
ชุบลงในอ่างเกลือหลอมละลาย (~400-500 °C) ถ้าต้องการ Lower bainite (Acicular)
ทิ้งไว้ระยะยาวจนแน่ใจว่า austenite เปลี่ยนเป็น Bainite ทั้งหมดแล้ว (ดูจาก TTT diagram)
4. เอาออกจากเตาทำให้เย็นโดยเร็ว ด้วยการจุ่มในน้ำ หรือในน้ำมัน
5. ได้โครงสร้าง Bainite ตามอุณหภูมิที่ชุบในอ่างเกลือ

Hardenability

Hardenability (ความสามารถในการชุบแข็ง) ไม่สามารถวัดเป็นปริมาณได้ จะได้จากการเปรียบเทียบลักษณะความแข็งที่ได้จากการทดลอง เหล็กชนิดใดมีความแข็งถึงผิวใจกลาง สม่่าเสมอถือว่ามี Hardenability สูง

ข้อสังเกตเกี่ยวกับความสามารถในการชุบแข็ง

1. Austenite ที่เกรนโตจะมี Hardenability สูง (มีระยะฟักตัวนาน)
2. Fe_3C หรือ Carbide หรือสารมลทิน ที่ไม่ละลายได้หมดใน Austenite จะทำให้ความแข็งลดลง (กราฟขยับซ้าย)
3. เหล็ก 0.8%C เป็นเหล็กที่มี Hardenability สูงที่สุด (กราฟ ขยับขวาสุด)
4. ระดับความแข็งที่ผิวกับบริเวณภายในไม่ต่างกันมาก ถือว่ามี Hardenability สูง (ความชันต่ำ)
5. เหล็กส่วนผสมเท่ากัน ใช้อัตราเย็นตัวที่เท่ากัน ให้ ความแข็งเท่ากัน (ขนาดเหล็กไม่มีผลต่อความแข็ง)

Case hardening

เป็นการชุบแข็งเฉพาะผิวโดยที่ข้างในยังคงเหนียวอยู่ซึ่งใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ ไม่แข็งมาก ง่ายต่อการขึ้นรูป จากนั้นจึงนำมาชุบให้เฉพาะที่ผิวแข็ง เพื่อให้ทนต่อการสึกหรอ (wear) ได้แก่ เพลาและเฟือง เป็นต้น ทั้งนี้แบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

- ก. การชุบด้วยเปลวไฟ (Flame Hardening)
- ข. การชุบแข็งเหนียวนำ (Induction Hardening)
- ค. การชุบแข็งโดยการอบคาร์บอน (Carburization Hardening)
- ง. การชุบแข็งโดยการอบไนโตรเจน (Nitride Hardening)
- จ. การชุบแข็งโดยการอบคาร์บอนไนโตรเจน (Carbo-Nitriding)

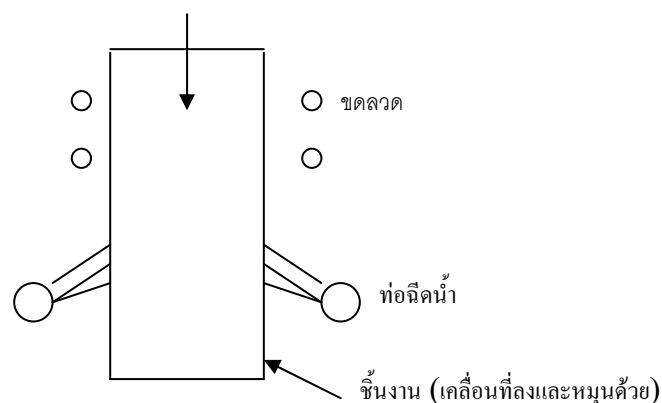
Flame Hardening

การให้ความร้อนชิ้นงานด้วยเปลวไฟ ทำได้โดยการใช้เปลวไฟจากก๊าซเชื้อเพลิง เช่น อาซิทีลิน หรือ โพรเพน การชุบจะมีด้วยกันหลายวิธี เช่น ชิ้นงานอยู่กับที่และเปลวไฟพร้อมน้ำพ่นเคลื่อนที่ หรือ อาจจะกลับกันคือ ชิ้นงานเคลื่อนที่ เช่น หมุนรอบตัวเอง และเปลวไฟอยู่กับที่ ข้อดีของการชุบวิธีนี้คือ แกนกลางจะไม่มีเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ การบิดรูปของชิ้นงานมีน้อย การชุบเป็นไปอย่างรวดเร็ว เชื้อเพลิงที่ใช้ไม่สิ้นเปลือง แต่ข้อเสียคือไม่สามารถชุบเพื่อให้ได้ความแข็งลึกน้อยกว่า 1 มม.ได้

วิธีนี้เหมาะกับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนปานกลางหรือมีคาร์บอนสูง (0.35-0.60%C)

Induction Hardening

หลักการของการชุบแข็งวิธีนี้คล้ายคลึงกับการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ เพียงแต่พลังงานความร้อนที่ใช้ได้จากขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งผลิตสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเกิดกระแสวน(Eddy Current) บริเวณผิวชิ้นงานชุบแข็ง ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนอย่างรวดเร็ว แต่ความร้อนนี้จะอยู่บริเวณผิวชิ้นงานเท่านั้น หลังจากได้รับความร้อนแล้วชิ้นงานก็就会被ทำให้เย็นด้วยการพ่นน้ำ การชุบแข็งด้วยวิธี Induction นี้จะได้ผิวงานที่แข็งแกร่งและเนื้อในเหนียวแน่น ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้การชุบแข็งแบบนี้ ได้แก่ พวงงานเพลลา สลักต่างๆ Roller รถตีนตะขาบ camshaft หรือ เฟืองที่ใช้กับเครื่องจักรกลการเกษตรที่ทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ ซึ่งเดิมจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็น Ferrite และ Pearlite และเมื่อผ่านกระบวนการ Induction hardening แล้วจะได้ Martensite บริเวณผิวในขณะที่ในบริเวณลึกเข้าไปจะมี Ferrite และ Pearlite ปนอยู่กับ Martensite ส่วนบริเวณภายในยังคงเป็น Ferrite และ Pearlite ดั้งเดิม



รูปที่ 30 ภาพหลักการของการชุบแข็งแบบ Induction Hardening

5.9 การชุบผิวแข็งโดยการอบคาร์บอน (Carburization Hardening)

การชุบวิธีนี้จะใช้เมื่อต้องการชุบผิวแข็งชิ้นงาน ซึ่งจะทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งปกติจะไม่สามารถทำการชุบแข็งได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการเพิ่มปริมาณคาร์บอนบริเวณผิวชิ้นงานเพื่อให้มีคาร์บอน (เหล็กคาร์ไบด์) มากพอ

คาร์บอนนี้อาจได้มาจากสารของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยจะต้องทำให้อะตอมคาร์บอนแพร่ (diffuse) เข้าไปในผิวเหล็กกล้า ซึ่งชิ้นงานจำเป็นต้องทำให้ร้อน จนมีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac3 เพราะที่อุณหภูมินี้ ความสามารถ และความเร็วในการแพร่ของคาร์บอนเข้าไปในเหล็กกล้า เป็นไปได้อย่างมาก บริเวณผิวซึ่งต้องการชุบแข็ง จะต้องให้คาร์บอนแพร่เข้าไปประมาณ 0.8 % และไม่ควรให้มีคาร์บอนมากกว่านี้ เพราะถ้ามีคาร์บอนมากเกินไปหลังจากการชุบจะมี Cementite หลงเหลืออยู่มากเกินไป ซึ่งมีผลเสีย คือมีความเปราะมาก โอกาสที่ผิวแตกร้าวจะมีมาก หรืออาจมี Retained austenite ตกค้างมาก การควบคุมคาร์บอนทำได้โดยหลายวิธี เช่น โดยการเลือกชนิดของสารเติมคาร์บอนซึ่งมีหลายชนิด นอกจากนั้นยังสามารถเลือกเวลาและอุณหภูมิเติมคาร์บอน เพื่อความเหมาะสมตามความต้องการ การใช้อุณหภูมิเติมคาร์บอนสูง จะทำให้คาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปได้ลึก และรวดเร็วสำหรับเวลาที่เลือกใช้ ขึ้นอยู่กับสารเติมคาร์บอน และ ความแข็งลึกที่ต้องการ

สารเติมคาร์บอน 2 ชนิด

1. Pack carburizing (ใช้สารเติมคาร์บอนที่เป็นของแข็ง)

เป็นการหมกชิ้นงานในผงคาร์บอน โดยการหุ้มห่อชิ้นงานด้วยผงคาร์บอนที่เตรียมไว้สำหรับการทำคาร์บูไรซิงโดยเฉพาะ เมื่อนำเหล็กที่ห่อหุ้มในกล่องเรียบร้อยแล้วนำไปเผาอบที่อุณหภูมิสูงผงเหล่านี้จะปล่อยธาตุคาร์บอนที่ซึมเข้าผิวเหล็กได้ ทำให้บริเวณผิวบางๆมีคาร์บอนมากกว่าแกนใน (900-1000°C)

สารเติมคาร์บอนที่เป็นของแข็งประกอบด้วย ถ่านไม้ ถ่านหิน เช่น ถ่านไม้ 60% ถ่านหินสีน้ำตาล 40% ผสมกับสารเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต จำนวนหนึ่ง ถ้าบริเวณใดไม่ต้องการชุบผิวแข็ง ก็สามารถทำได้โดยการพอกด้วยดินเหนียว หรือชุบผิวด้วยทองแดง

2. ใช้สารเติมคาร์บอนที่เป็นของเหลวและก๊าซ

สำหรับสารเติมคาร์บอนที่เป็นของเหลว Potassium cyanide (KCN) หรือ Sodium cyanide (NaCN) ผสมกับคลอไรด์ สารนั้นเมื่อได้รับความร้อนสูง กลือโซเดียมไซยาไนด์จะแตกตัว และคาร์บอนจะแพร่เข้าไปในผิวเหล็ก โดยจะรวมกับเหล็กในเหล็กคาร์ไบด์ การเติมคาร์บอนวิธีนี้แม้ว่าจะมีราคาแพง

แต่เวลาที่ใช้เดิมจะสั้นมาก ชิ้นงานที่มีผิวเรียบดีการแพร่ของคาร์บอนจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและการบิดเบี้ยวของชิ้นงานจะมีน้อย แต่ข้อเสียคือ การปกปิดบริเวณที่ไม่ต้องการชุบแข็งจะทำได้ยากกว่า

สารเติมคาร์บอนที่อยู่ในรูปก๊าซที่ใช้ ได้แก่ ก๊าซเชื้อเพลิง เช่น โพรเพน แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ผสมกับแก๊สพาหะ (Carrier Gas) คือ เอ็นโดเทอร์มิกส์แก๊ส (Endothermic Gas) ข้อดีของวิธีนี้ คือ การควบคุมจำนวนคาร์บอน ทำได้ง่าย ใช้พลังงานน้อย และเวลาสั้น ชิ้นงานที่ได้ผิวจะสะอาด แต่ข้อเสีย คือ เครื่องจักรราคาแพง

ตัวอย่างเหล็กอาบคาร์บอน

ตัวอย่างเฟืองที่ใช้ในระบบส่งกำลังในเครื่องจักรกล เครื่องยนต์ และยานพาหนะต่างๆ มักจะทำได้ด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งมีโครงสร้างเดิมที่เป็น Ferrite เกือบ 90 % นอกจากนั้นเป็น Pearlite เมื่อเติมคาร์บอนที่ 920 °C แล้ว คาร์บอนซึมเข้าไปในเนื้องานทำให้ที่ผิวงานจะมีคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็น 0.8-0.9 % โครงสร้างจะเป็น Pearlite ถัดลึกเข้าไปในเนื้องานก็จะประกอบด้วย Pearlite และ Ferrite ดังนั้นเมื่อนำไปชุบแข็งแล้วผิวงานจะกลายเป็น Martensite ซึ่งแข็งแกร่งการสึกหรอได้ดี ในขณะที่ใจกลางชิ้นงานยังคงเป็น Pearlite และ Ferrite เหมือนเดิม ซึ่งยังคงอ่อนและมีความเหนียวดีเช่นเดิม

Nitriding

ใช้ก๊าซแอมโมเนียในการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนเพื่อซึมเข้าผิวเหล็กที่อุณหภูมิสูง สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนผิวจะแข็งและเปราะมีโครงสร้างเป็นรูปเข็มของคอมเพล็กซ์ไนไตรด์ ในกรณีที่ใช้เหล็กกล้าผสมที่มีธาตุผสมของอะลูมิเนียม โครเมียม นิกเกิล และโมลิบดีนัม รวมกันเกิน 3 เปอร์เซนต์หลังเผาอบด้วยวิธีไนไตรดิงแล้วนำไปกลึงไสละเอียด เมื่อนำมาชุบแข็งและเทมเปอร์ที่ประมาณ 500 °C ในบรรยากาศของแอมโมเนียประมาณ 50 ชั่วโมง ผิวเหล็กกล้าจะแข็งเป็นพิเศษ คือ มีความแข็งเกิน 70 Rc

โดยที่วิธีนี้ กระทำที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ จึงไม่เกิดการแตกร้าว บิด งอ ของชิ้นงานซึ่งเป็นข้อดีของกรรมวิธีนี้

Cyaniding

ชุบด้วย NaCN หรือ KCN ใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (0.20-0.25 % °C)

Carbonitriding

ใช้แก๊สแอมโมเนีย (20-30 %) และ Hydrocarbon

840-860 °C สำหรับเครื่องจักรที่มีชิ้นส่วนซับซ้อน

540-560 °C สำหรับดอกสว่าน, รีมเมอร์หัวเจาะ

การยิงอิออนฝังผิว

เป็นการยิงอิออนบางตัวลงไปฝังที่ผิวเพื่อเพิ่มความแข็ง เช่น Ionitriding

Ionitriding เป็นการทำ Nitriding แบบหนึ่งโดยการใช้ Nitrogen ที่มีอยู่ในสภาพอิออนบวก (N^+) วิ่งเข้าไปกระแทกผิวงาน ทำให้ผิวงานร้อนและไนโตรเจนซึ่งเข้าไปได้ดี ทำให้งานมีความแข็งที่ผิวงานได้เร็ว เกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ที่ผิวงาน และที่ไนโตรเจนแพร่เข้าไปถึง ทำให้งานมีความแข็งที่ผิวมากขึ้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวได้ดี เพิ่มความต้านทานการล้าตัว

6. โครงสร้างวัสดุเซรามิก

เซรามิกเป็นวัสดุอนินทรีย์ (inorganic) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนและประกอบไปด้วยธาตุโลหะและอโลหะรวมกันเช่น (Al_2O_3) เป็นเซรามิกที่มีอะตอมของอะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะร่วมกับอะตอมของออกซิเจนที่เป็นอโลหะ เป็นต้น เซรามิกจะมีคุณสมบัติทางกลและทางเคมีที่กว้างขวางมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่มาผสมกัน การใช้งานเซรามิกมีตั้งแต่ เครื่องปั้นดินเผา อิฐ กระเบื้อง เครื่องครัว วัสดุทนไฟ สารแม่เหล็ก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ไฟเบอร์ และวัสดุฉนวน เป็นต้น

เนื่องจากเซรามิกมีการยึดเหนี่ยวของอะตอมแบบไอออนิกและโควาเลนต์ จึงทำให้มีความแข็งแรงเปราะหักลอมตัวสูงมาก และการนำไฟฟ้ากับความร้อนต่ำ ทนการกัดกร่อนของสารเคมีดี มีความต้านทานแรงอัดสูงมาก จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้เซรามิกถูกนำมาใช้งานวิศวกรรมทางด้านวัสดุทนไฟในอุตสาหกรรมหลอมโลหะและการอบชุบ การเคลือบผิวแข็งและทนความร้อนของยานอวกาศและเครื่องบิน เครื่องยนต์เทอร์ไบน์ ใช้เป็นวัสดุฉนวน เช่น หินใยหินหรือวัสดุคอมดัด เช่น มัดกลิ้ง เป็นต้น

เซรามิกจำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือเซรามิกธรรมดา (tradition ceramic) และเซรามิกในงานวิศวกรรม(engineering ceramic) หรือเซรามิกสมัยใหม่ (advanced ceramic) เซรามิกแบบธรรมดาประกอบด้วย ดิน(clay) ซิลิกา(silica) และเฟลด์สปาร์(feldspar) ผลิตภัณฑ์ของเซรามิกกลุ่มนี้ได้แก่ วัสดุทนไฟ ซีเมนต์ เครื่องสุขภัณฑ์ กระเบื้อง อิฐ ถ้วยชาม เป็นต้น เซรามิกในงานวิศวกรรมเป็นเซรามิกที่เป็นสารประกอบที่มีความบริสุทธิ์สูงได้แก่

คาร์ไบด์(SiC, BC), ไนไตรด์ (AlN, SiN, SiAlON, BN), บอไรด์ (boride), ออกไซด์บริสุทธิ์ อะลูมินา (alumina), เซอร์โคเนีย (zirconia), ธอเรีย (thoria), เบริลเลีย (beryllia), แมกนีเซีย (magnesia), สปิเนล (spinel), ฟออสเทอไรต์ (forsterite), แมกเนติกเซรามิก (magnetic ceramic), เพอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก (ferroelectric ceramic) และซูเปอร์คอนดักเตอร์เซรามิก (superconductor ceramic) การใช้งานเซรามิกกลุ่มนี้จะใช้ในงานเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น SiC ใช้ทำเครื่องยนต์เทอร์ไบน์และเส้นใยเสริมแรงในวัสดุผสม หรือ Al_2O_3 ก็ถูกใช้เป็นวัสดุฉนวนของหัวเทียน เป็นต้น

6.1 โครงสร้างผลึกของเซรามิก

โครงสร้างของผลึกเซรามิกจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของรัศมีไอออนิกและการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า รัศมีไอออนิกใช้หาการอัดตัวของไอออนที่เป็นประจุลบและบวก หาแรงดึงดูดสูงสุดและแรงผลัkdต่ำสุดระหว่างไอออน ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกหรือแคตไอออน (cation) ถูกล้อมรอบโดยไอออนลบหรือแอนไอออน (anion) หรือเกิดขึ้นในลักษณะที่ตรงกันข้าม พื้นฐานของโครงสร้างผลึกมาจากสมมุติฐานที่ว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่(แอนไอออน) เป็นตัวกำหนดโครงสร้างหน่วยเซลล์ขึ้นมาก่อน จากนั้นไอออนขนาดเล็ก (แคตไอออน) จะไปแทรกตัวอยู่ภายในหรือระหว่างแลตทิซของโครงสร้างหน่วยเซลล์นั้นๆ

การเกิดพันธะของอะตอมในวัสดุเซรามิกมักเป็นพันธะผสมระหว่างพันธะไอออนิกและพันธะโควาเลนต์ ศิกรีของไอออนิกคาแลกเตอร์ (Ionic character) จะขึ้นอยู่กับค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ระหว่างอะตอมต่างชนิดกันในสารประกอบ สำหรับเปอร์เซ็นต์ไอออนิกคาแลกเตอร์ (ionic character) ของวัสดุเซรามิกพื้นฐานหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไอออนิกคาแลกเตอร์} = (1 - e^{(-1/4)(X_A - X_B)^2}) \times 100 \quad \dots (1)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์โควาเลนต์ คาแลกเตอร์} = 100 - \% \text{ ไอออนิกคาแลกเตอร์} \quad \dots (2)$$

เมื่อ X_A และ X_B คือค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของธาตุ A และ B

สารประกอบ เซรามิก	พันธะระหว่าง อะตอม	ความแตกต่าง ของอิเล็กโตร เนกาติวิตี	ไอออนิก คาแลกเตอร์	โควาเลนต์ คาแลกเตอร์
MgO	Mg-O	2.3	73	27
Al ₂ O ₃	Al-O	2.0	63	37
SiO ₂	Si-O	1.7	51	49
Si ₃ N ₄	Si-N	1.2	30	70
SiC	Si-C	0.7	11	89

ตารางที่ 7 แสดงเปอร์เซ็นต์คาแลกเตอร์ของไอออนิกและโควาเลนต์ของเซรามิก [22]

โครงสร้างผลึกชนิด AX-Type

เซรามิกบางชนิดจะมีจำนวนของแคตไอออนและแอนไอออนเท่ากัน ซึ่งจะถูกจัดให้เป็นสารประกอบชนิด AX-Type โดย A คือแคตไอออน และ X คือแอนไอออน โครงสร้างผลึกของสารประกอบกลุ่มนี้มีความแตกต่างและเรียกชื่อตามธาตุที่เข้ามารวมกันเป็นสารประกอบ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

โครงสร้างผลึกเกลือหิน(Rock Salt Structure)

โครงสร้างผลึกชนิด AX-Type พื้นฐานคือ โซเดียมคลอไรด์(NaCl) หรือเกลือหิน มีค่า CN=6 และอัตราส่วน r_C/r_A อยู่ระหว่าง 0.414 และ 0.732 หน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกชนิดนี้ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบ FCC ใน 1 หน่วยเซลล์จะประกอบไปด้วยแคตไอออน 1 ลูก อยู่ที่ศูนย์กลางหน่วยเซลล์

และแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของแอนไอออนที่อยู่ตรงมุมทุกมุมของหน่วยเซลล์รวมทั้งหมด 12 ลูก วัสดุเซรามิกที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ NaCl, MgO, MnS, LiF และ FeO

โครงสร้างผลึกซีเซียมคลอไรด์ (Cesium Chloride Structure)

หน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกซีเซียมคลอไรด์ ค่าเลขโคออร์ดิเนตคือ 4 ตำแหน่งของแอนไอออนจะอยู่ที่มุมแต่ละมุมของหน่วยเซลล์ และที่ศูนย์กลางของหน่วยเซลล์จะเป็นตำแหน่งของแคตไอออนเพียง 1 ลูก การที่มีแคตไอออนของซีเซียมอยู่ตรงกลางแอนไอออนของคลอไรด์จะทำให้มีการจัดตัวแน่นขึ้น สารประกอบที่ได้นี้จะยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไอออนิก ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ CsBr, TiCl และ TiBr

6.2 คุณสมบัติของเซรามิก

เซรามิกมีคุณสมบัติเฉพาะตัวหลายอย่างที่โดดเด่น เช่น มีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก และมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำ ด้วยเหตุนี้เซรามิกจึงถูกนำไปใช้งานเป็นวัสดุทนความร้อน ไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมหลอมโลหะหรืองานอบชุบด้วยความร้อน สมบัติทางกลที่เซรามิกมีอยู่คือ มีความแข็งและเปราะ ซึ่งทำให้เกิดความแตกร้าวได้ง่าย ความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำ แต่ความแข็งแรงเมื่อรับแรงอัดนั้นมีสูงมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานแรงดึงแล้ว อาจมีค่าสูงกว่าถึง 5 – 10 เท่าตัว สมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของเซรามิกคือ มีความนำไฟฟ้าที่ต่ำ ดังนั้นเซรามิกหลายชนิดจึงถูกนำไปใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้าและตัวเก็บประจุต่างๆ ที่มีขนาดเล็ก

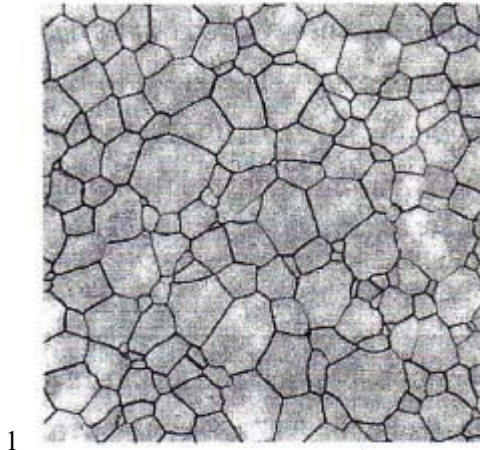
6.2.1 คุณสมบัติเชิงกลของเซรามิก

วัสดุเซรามิกโดยทั่วไปจะแข็งและเปราะ มีความต้านทานแรงดึงต่ำ แต่มีความต้านทานแรงอัดที่สูงและมีความต้านทานการแตกหักเนื่องจากมีรอยแตกร้าวหรือแฟร็กเจอร์ทัพเนสส์ (fracture toughness) ที่ต่ำ ดังตารางที่ 8 แสดงสมบัติทางกลของวัสดุเซรามิกทางวิศวกรรม ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงอัดและแฟร็กเจอร์ทัพเนสส์

ชนิดเซรามิก	ความหนาแน่น (g/ cm ³)	ความต้านทานแรงดึง (psi)	ความแข็งแรงแตกหัก (psi)	ความต้านทานแรงอัด (psi)	มอดุลัสของยัง (psi)	แฟร็กเจอร์ทัฟเนสส์ (psi)
Al ₂ O ₃	3.98	30,000	80,000	400,000	56 × 10 ⁶	5,000
SiC (ซินเทอร์ริง)	3.1	25,000	80,000	560,000	60 × 10 ⁶	4,000
Si ₃ N ₄ (รีแอชันบอนด์)	2.5	20,000	35,000	150,000	30 × 10 ⁶	3,000
Si ₃ N ₄ (อัครีออน)	3.2	80,000	130,000	500,000	45 × 10 ⁶	5,000
ไซลอน (sialon)	3.24	60,000	140,000	500,000	45 × 10 ⁶	9,000
ZrO ₂ (พาร์เซียลสเตบิลไซ์)	5.8	65,000	100,000	270,000	30 × 10 ⁶	10,000
ZrO ₂ (ทรานส์ฟอร์มเมชันทัฟเทน)	5.8	50,000	115,000	250,000	29 × 10 ⁶	11,000

ตารางที่ 8 สมบัติทางกลของวัสดุเซรามิกวิศวกรรม [20]

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเซรามิกประกอบไปด้วย การเชื่อมต่อกันระหว่างขอบเกรน สิ่งเจือปนในเนื้อเซรามิก และโพรงอากาศหรือช่องว่างที่มีอยู่ในเนื้อเซรามิก รูปที่ 31 แสดงให้เห็นลักษณะของเกรนและขอบเกรนเซรามิกที่มีผลอย่างมากในการทำให้เกิดจุดบกพร่องที่บริเวณผิวของเซรามิกได้ ปกติแล้วเกรนที่มีขนาดเล็กจะให้ความแข็งแรงที่ดีกว่าเกรนขนาดใหญ่ ซึ่งเกรนขนาดเล็กจะช่วยลดความเค้นบริเวณขอบเกรนที่เกิดขึ้นขณะมีการขยายตัวหรือหดตัว เนื่องจากแรงกระทำแบบไร้ทิศทางได้ดี เกรนขนาดเล็กจะได้จากกระบวนการผลิตที่เตรียมวัตถุดิบที่มีความละเอียดสูง



รูปที่ 31 โครงสร้างเกรนของ PLZT (Lead-lanthanum-zirconium-titanate)
ที่ใช้เป็นวัสดุเซรามิคตัวรับรู้ (sensor ceramic) [20]

ความพรุนตัวหรือช่องว่างในเนื้อเซรามิกก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเซรามิก ซึ่งจะมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณ ขนาด การกระจายตัว และความต่อเนื่องของช่องว่างดังกล่าว ความพรุนตัวและช่องว่างจะมีทั้งลักษณะที่ปรากฏให้เห็นและไม่ปรากฏให้เห็น ความพรุนปรากฏ (apparent porosity) หรือรูพรุนที่มีการเชื่อมต่อกันของโพรงอากาศขนาดเล็กๆ จะหาได้จากสมการที่ (3) คือ

$$\text{ความพรุนปรากฏ} = \frac{W_w - W_d}{W_w - W_s} \times 100 \quad \dots (3)$$

เมื่อ W_w คือน้ำหนักเซรามิกเมื่อเอาน้ำออก

W_d คือน้ำหนักเซรามิกแห้ง

W_s คือน้ำหนักเซรามิกเมื่อแช่น้ำจนลอยในน้ำ

ปริมาตรของความพรุนทั้งหมดหาได้จากผลรวมของปริมาตรของทั้งความพรุนปรากฏและความพรุนแบบปิดรวมกัน ซึ่งหาได้จากสมการที่ (4)

$$\text{ความพรุนรวม} = \frac{\rho_T - \rho_B}{\rho_T} \times 100 \quad \dots (4)$$

เมื่อ ρ_T คือความหนาแน่นจริงของเซรามิก

ρ_B คือความหนาแน่นรวม (bulk density) หรือน้ำหนักของเซรามิกหารด้วยปริมาตร เมื่อ

$$\rho = \frac{W_d}{W_w - W_s} \quad \dots (5)$$

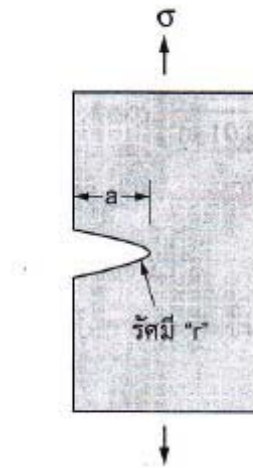
โดยปกติแล้ว ความพรุนจะมีผลต่อสมบัติทางกลและทางเคมีของเซรามิกอย่างมาก ดังนั้นเราจึงต้องการให้มีความพรุนน้อยที่สุดหากต้องการให้สมบัติทั้งสองประการดีขึ้น อย่างไรก็ตาม หากเราใช้เซรามิกเป็นฉนวนไฟฟ้า จำนวนของความพรุนที่มีมากจะช่วยให้ความเป็นฉนวนดีขึ้น และยังทำให้เซรามิกมีน้ำหนักเบาอีกด้วย สมบัติทั้งสองประการเป็นสิ่งที่ต้องการมากสำหรับโครงสร้างของยานอวกาศของนาซ่า มีชื่อว่า อิฐพอร์ซซิลิกา (porous silica brick) ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันความร้อนให้กับโครงสร้าง (thermal protection structure; TPS) ในส่วนที่ต้องโดนความร้อนสูง การเพิ่มความพรุนในเนื้อเซรามิกอาจทำได้โดยผสมสารที่เผาไหม้ได้ง่ายเข้าไปในเนื้อเซรามิกขณะเป็ยก เช่น ผงขี้เลื่อย หรือสารระเหยที่เป็นของแข็ง เช่น แนฟทาซีน หรืออาจจะใช้การเติมฟองอากาศเข้าไปในเนื้อเซรามิกขณะเป็ยก หรือวิธีการเติมสารเคมีที่ให้ปฏิกิริยาแล้วเกิดฟองก๊าซขณะผสมเซรามิกก็ได้

การแตกหักทางกลของเซรามิก

วัสดุเซรามิกไม่ว่าจะมีโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบหรือไม่ก็ตาม ต่างก็มีความเปราะสูง ทั้งที่อุณหภูมิสูง ปัญหาของการแตกหักของวัสดุเปราะอย่างเซรามิกนี้เริ่มต้นจากรอยแตกร้าวขนาดเล็กๆ ขนาด รูปร่าง และทิศทางรอยตำหนิหรือรอยแตกร้าวขนาดเล็กๆ จะเป็นตัวจำกัดความสามารถของเซรามิกในการรับความเค้นแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Griffith flaw) จะเป็นจุดศูนย์กลางของความเค้นที่มีความเข้มข้นสูง รูปที่ 32 แสดงให้เห็นรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่มีความยาว a และรัศมี r เมื่อมีความเค้นดึง กระทำที่วัสดุ จะเกิดความเค้นจริงที่ปลายของรอยแตกดังสมการ

... (6)

สำหรับรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่มีรัศมี r น้อย แต่มีความยาว a มาก จะทำให้อัตราส่วนของ $\sigma_{จริง}/\sigma$ สูงไปด้วยหรือความเค้นจะมีกำลังขยายมากขึ้นนั่นเอง และเมื่อกำลังขยายของความเค้นมีสูงถึงความเค้น σ_c จุคราก รอยร้าวขนาดเล็กจะขยายตัวใหญ่ขึ้นและเกิดการแตกหักในที่สุด ถึงแม้ว่าค่าของความเค้นที่กระทำหรือ σ จะมีค่าน้อยก็ตาม



รูปที่ 32 ลักษณะรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่เกิดกับเซรามิก

ความเค้นที่เกิดขึ้นกับรอยแตกร้าวที่ยังมีความเกี่ยวข้องกับความเร็วในสภาวะยืดหยุ่นหรือโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's modulus) โดยเมื่อรอยร้าวเกิดการขยายตัวหรือลุกลามเกิดขึ้น พลังงานความเร็วจะลดลง ในขณะนั้นจะเกิดพื้นผิวขึ้นมาใหม่ 2 พื้นผิวที่เกิดจากการขยายตัวของรอยแตกร้าว และทำให้พลังงานที่มีความเกี่ยวข้องกับพื้นผิวเกิดการเพิ่มขึ้น จากการสมดุลพลังงานความเร็วและพลังงานพื้นผิว เราพบว่าความเค้นวิกฤตที่จะทำให้เกิดการขยายตัวของรอยแตกร้าวจะเป็นไปตามสมการกริฟฟิธ (Griffith equation) ดังนี้

... (7)

เมื่อ a คือความยาวของพื้นผิวรอยแตก ($1/2$ ของความยาวรอยแตกภายใน)

γ คือพลังงานพื้นผิว (ต่อหน่วยพื้นที่)

จากสมการที่(1.5) เราสามารถจัดสมการใหม่และอธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นที่มีต่อแฟร็กเจอร์ของความเข้มของความเค้น (K) ได้ดังสมการ

$$\sigma = \frac{K}{f\sqrt{\pi a}} \quad \dots (8)$$

สมการแต่ละสมการจะแสดงให้เห็นความเกี่ยวข้องของรอยแตกกับสมบัติทางกลของเซรามิก ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเซรามิก การหาวิธีการผลิตที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวน้อยที่สุดจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงกับเซรามิกได้

เราสามารถวัดรัศมีของรอยแตกร้าวได้ด้วยกรรมวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายสภาพ ดังนั้นสมการ (8) จะช่วยให้เราทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการขยายตัวของรอยแตกร้าวในวัสดุเปราะ แต่ไม่ได้ช่วยในการหาค่าความแข็งแรงที่แท้จริงของวัสดุเซรามิกโดยตรง

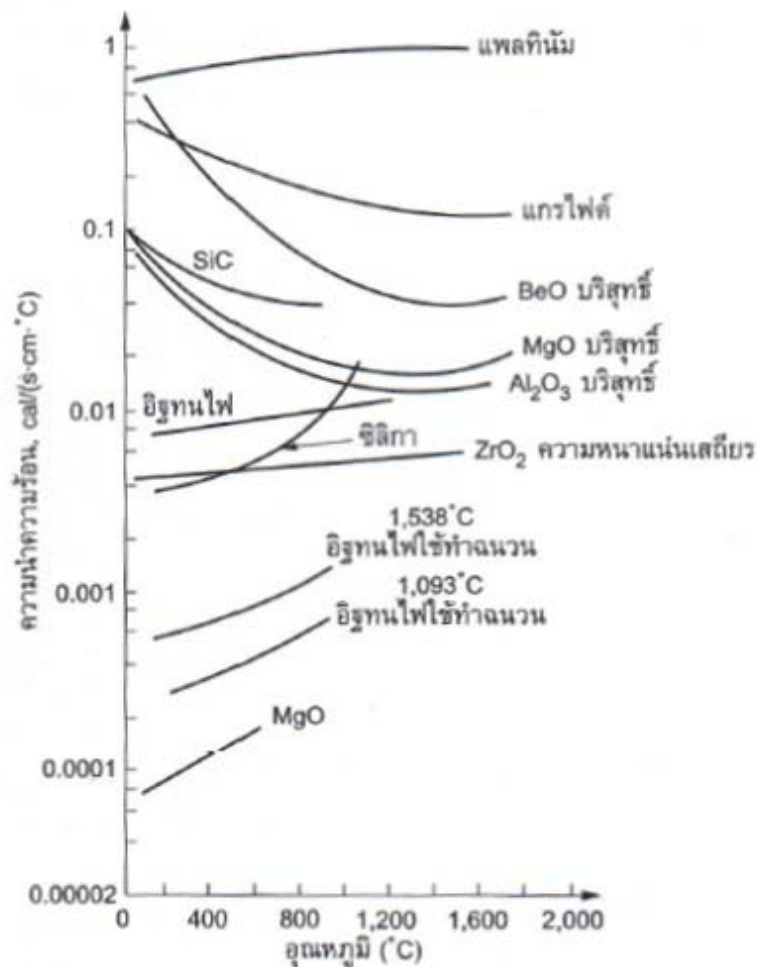
การวิเคราะห์ความแข็งแรงแตกหักโดยการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution) [20]

วัสดุเปราะอย่างเซรามิกและแก้วจะมีลักษณะการแตกหักจากความเค้นที่แตกต่างจากวัสดุเหนียว วัสดุเหนียวจะแตกหักจากความเค้นที่มีการแจกแจงที่แคบมาก (Gaussian distribution) แต่วัสดุเปราะจะมีการแตกหักจากความเค้นที่มีการแจกแจงกว้าง (Weibull distribution) โดยการแจกแจงแบบไวบูลล์เป็นการวัดความเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงของวัสดุที่มีผลมาจากการกระจายตัวของขนาดของรอยแตกร้าวขนาดเล็กๆ การแจกแจงแบบไวบูลล์ [20]

วัสดุเหนียวและเปราะที่แตกหักจากสัดส่วนของความเค้นต่างๆ ที่ความเค้นต่ำ หากชิ้นวัสดุมีรอยแตกร้าวที่ใหญ่พอ ก็อาจจะทำให้เกิดการแตกหักขึ้นได้แม้สัดส่วนของความเค้นจะต่ำก็ตาม โดยทั่วไปแล้ว วัสดุเกิดการหักจากความเค้นที่ปานกลาง ส่วนชิ้นวัสดุที่มีรอยแตกร้าวขนาดเล็กจะแตกหักเมื่อมีความดันสูงมากกระทำ

6.2.2 คุณสมบัติทางความร้อนของเซรามิก

โดยปกติแล้วเซรามิกจะมีความนำไฟฟ้าที่ต่ำ เนื่องจากมีพันธะไอออนิกโคเวเลนต์ที่แข็งแรงและมีความเป็นฉนวนทางความร้อน รูปที่ 33 เปรียบเทียบความนำความร้อนของเซรามิก ชนิดต่างๆ ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และด้วยสาเหตุที่เซรามิกมีความต้านทานความร้อนสูง จึงถูกนำไปใช้งานเป็นวัสดุทนไฟ (refractory) ที่มีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงทั้งสถานะของเหลวและก๊าซ วัสดุทนไฟมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมโลหะ เคมี เซรามิก และแก้ว



รูปที่ 33 แผนภาพการนำความร้อนของวัสดุเซรามิกที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ[18]

ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) [20]

ถูกค้นพบและเตรียมขึ้นจากกระบวนการผลิตซิลิคอนคาร์ไบด์ หรือ คาร์โบรันดัม โดย เตาหลอมไฟฟ้า (Acheson) ตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 19 ในช่วงแรกของการค้นพบซิลิคอนคาร์ไบด์ นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุขัดถูและใช้เป็นวัสดุสำหรับการตัดเนื่องจากมีความแข็ง ซิลิคอนคาร์ไบด์ ยังมีคุณสมบัติเด่นในการนำความร้อน การนำไฟฟ้าที่ดีกว่าเซรามิกชนิดอื่น ความทนทานต่อการสึกกร่อนและทนการกัดกร่อนสูง มีความแข็งแรงและคงรูปได้เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง จึงนิยมใช้ในการผลิตเป็นวัสดุทนไฟและวัสดุให้ความร้อนในเตา (heating element) ตลอดจนเป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ในเครื่องจักรเครื่องยนต์ต่างๆ ซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถขึ้นรูปให้มีเนื้อแน่นและมีรูพรุนได้ การขึ้นรูปให้มีเนื้อแน่น นิยมใช้ขึ้นรูปชิ้นส่วนที่ต้องการความทนทานต่อการเสียดสีสูง

และทนความร้อนสูง เช่น seal ring, bearing และ turbine blade เป็นต้นสำหรับการขึ้นรูปให้มีความพรุนตัวสูง มีการใช้งานด้านการกรอง งานทางการแพทย์ กระบวนการทางเคมี เช่น แผ่นกรองโลหะและ catalytic carrier เป็นต้น

โครงสร้างผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ [17]

ซิลิกอนคาร์ไบด์มีโครงสร้างผลึกอยู่หลายรูปแบบ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ ชนิดที่มีโครงสร้างเป็นคิวบิก (cubic) เรียกว่า เบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ (β -SiC) และชนิดที่มีโครงสร้างนอนคิวบิก (non-cubic) เรียกว่า แอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ (α -SiC) พวกนอนคิวบิก ได้แก่ ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) และรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) ได้จากการสังเคราะห์สารโดยวิธีเพอริต์คั่นทรายแก้วที่อุณหภูมิสูง ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยทั่วไปจะได้จากกระบวนการผลิตที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์

คุณสมบัติของสารซิลิกอนคาร์ไบด์

ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นสารประกอบที่มีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงมาก ดังนั้นการสลายตัวให้เกิดเป็นแก๊สของซิลิกอนและ แกรไฟต์นั้น ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากกว่า 2,200 องศาเซลเซียสขึ้นไป ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์มากๆ จะไม่มีสีหรือมีสีเขียวนอ่อน แต่ถ้ามีธาตุไนโตรเจนปะปนอยู่จะทำให้มีสีเขียว อลูมิเนียมปะปนจะมีสีฟ้า หรือมีธาตุเจอปนหลายชนิดจะมีสีดำ

คุณสมบัติของผงซิลิกอนคาร์ไบด์

ชนิด คุณสมบัติ	แอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ (α -SiC)	เบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ (β - SiC)
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	3.20 – 3.22	3.17 – 3.20
ระบบผลึก (crystalline form)	เฮกซะโกนอลและ รอมโบฮีดรอล	คิวบิก
น้ำหนักโมเลกุล (M.W.)	40.097	40.097
จุดหลอมเหลว (M.P.)	2,300 – 2,500 °c	2,300 – 2,500 °c
พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area, m ² /g)	15.7	9.4-13.6
ความร้อนจำเพาะ (specific heat, cal/g °c)	0.34	0.31 ที่ 600 °c
ความแข็งที่แรงกด 100 กรัม (knoop hardness, kg/mm ²)	2,600-2,800	2,800
การนำความร้อน (thermal conductivity, cal/cm sec °c)	0.1 ที่อุณหภูมิ 20 °c	0.17 – 0.21 ที่ อุณหภูมิ 20 °c

ตารางที่ 9 ตารางแสดงคุณสมบัติของผงซิลิกอนคาร์ไบด์ [17]

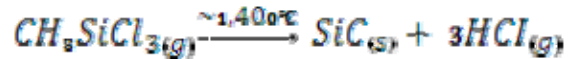
กระบวนการผลิตสารซิลิกอนคาร์ไบด์

สารซิลิกอนคาร์ไบด์เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างทราย(ซิลิกา) และถ่านโค้กในเตาไฟฟ้า
วิธีนี้รู้จักกันดีในชื่อของ Acheson process ปฏิกิริยาเป็นดังสมการ

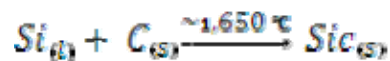


อุณหภูมิของปฏิกิริยา คือ 2,700 องศาเซลเซียส หลังจาก 2 – 3 วันของการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดผลึก
ของซิลิกอนคาร์ไบด์ซึ่งมีสีเขียวหรือดำ จากนั้นนำมาบดให้ได้ขนาดที่ต้องการ
ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน ไม่สามารถจะนำมาเผาซินเทอร์ให้ได้ชิ้นงานที่มีความ
หนาแน่นสูงได้ เหมาะกับการใช้งานด้านวัสดุทนไฟซึ่งไม่ต้องการความหนาแน่นสูงมากนัก

ซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถถูกสังเคราะห์ได้จากการสลายตัวของแก๊ส CH_3SiCl_3 ในบรรยากาศอาร์กอน วิธีนี้เรียกว่า Chemical Vapor Decomposition (CVD) ซึ่งมีปฏิกิริยาแสดงดังสมการ



สำหรับการสังเคราะห์ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่มีขนาดละเอียดมากๆ สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ซิลิกอนเหลวกับผงคาร์บอน ผลึกซิลิกอนคาร์ไบด์เกิดที่อุณหภูมิประมาณ $1,650^\circ\text{C}$ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงไว้ดังสมการ



ลักษณะของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีการนำมาใช้ประโยชน์

ปัจจุบันได้มีการนำเอาซิลิกอนคาร์ไบด์ไปใช้ในงานต่างๆ มากมาย ได้แก่ อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ อุตสาหกรรมเซรามิกต่างๆ ใช้ทำหัวสำหรับพ่นไอร้อนที่ใช้ในการขับเคลื่อนจากจรวด ทำเบ้าหลอมโลหะ ตัวต้านทานไฟฟ้า เป็นส่วนประกอบในเตาเผา เป็นต้น เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นสารที่ทำการซินเทอร์ริงยาก เพราะมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง ดังนั้น การจำแนกซิลิกอนคาร์ไบด์จึงจำแนกจากกระบวนการซินเทอร์ริงซึ่งสามารถแบ่งลักษณะของผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความหนาแน่นสูง (High – Density Silicon Carbide Materials)
- ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เป็นเส้นใย (Silicon Carbide Fibers)
- ซิลิกอนคาร์ไบด์ชนิดพรุนตัว (Porous Silicon Carbide)

ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความหนาแน่นสูง

วัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความหนาแน่นสูงนิยมใช้กับชิ้นส่วนวิศวกรรม เช่น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ *gas turbines* การใช้งานเป็นวัสดุโครงสร้างหรือการพัฒนาสารซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต เป็นต้น การพัฒนาวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความหนาแน่นสูงทำโดยใช้เทคนิคต่างๆ ได้แก่

- Reaction – Bonded Silicon Carbide
- Hot – Pressed Silicon Carbide
- Chemical – Vapor – Deposited Silicon Carbide
- Pressureless Sintering Silicon Carbide

ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เป็นเส้นใย

ซิลิกอนคาร์ไบด์ไฟเบอร์นิยมใช้เป็นเส้นใยเสริมความแข็งแรงในวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุกลุ่มเซรามิก เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการแตกหักและความทนต่อแรงกระแทก เส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 – 150 ไมครอน เตรียมโดยวิธี Chemical vapor deposit ของสารซิลิกอน – คาร์ไบด์บนเส้นทั้งสแตนหรือคาร์บอน ซึ่งมีความหนาประมาณ 40 ไมครอน สำหรับเส้นใยที่มีขนาดเล็กมากคือเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 – 30 ไมครอน เตรียมได้โดยวิธี heat treatment สารละลายโพลิเมอร์ Organosilicon

ซิลิกอนคาร์ไบด์ชนิดพรุนตัว

เซรามิกที่มีรูพรุนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ “reticulate ceramic” และ “foam ceramic” ลักษณะ reticulate ceramic เป็นวัสดุที่มีรูพรุนแบบเปิดอย่างต่อเนื่อง โดยมีเนื้อสารเซรามิกอยู่ในลักษณะที่เป็นตาข่ายคล้ายโครงสร้างของฟองน้ำ ในขณะที่ foam ceramic จะประกอบด้วยรูพรุนที่เป็นรูปปิดภายในเนื้อสารเซรามิก การที่สารเซรามิกมีโครงสร้างเป็นรูพรุน ทำให้น้ำหนักเบา ความหนาแน่นน้อย และความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ ดังนั้น จึงได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานได้หลายด้าน เช่น ใช้เป็นตัวกรองที่อุณหภูมิสูงในโรงงานหล่อโลหะเป็นส่วนประกอบของเครื่องยนต์ในรถยนต์ ใช้เป็นวัสดุทนไฟในเตาเผาอุณหภูมิสูงหรือเป็นตัวกรองแก๊สหรือฝุ่นร้อน

วิธีการขึ้นรูปซิลิกอนคาร์ไบด์ให้มีรูพรุน โดยทั่วไปมี 2 วิธีหลักคือ Polymeric sponge เป็นการจุ่มฟองน้ำ ลงในส่วนผสมเซรามิกที่เป็นของเหลว เมื่อนำการเผาฟองน้ำก็จะสลายตัวออกไปเหลือแต่สารซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับฟองน้ำที่ใช้วิธีนี้ทำให้ได้ ซิลิกอนคาร์ไบด์กับพอลิเมอร์ เมื่อทำการเผา พอลิเมอร์จะสลายออกจาก เนื้อสารซิลิกอนคาร์ไบด์ไป ทำให้เหลือเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน วิธีนี้สามารถใช้ผลิตได้ทั้งชนิดที่มีรูพรุนแบบเปิดและแบบปิด

ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุนนอกจากเตรียมได้โดยวิธี Polymeric sponge และ foaming ซึ่งวิธีนี้เป็นการเตรียมเนื้อเซรามิกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ยังสามารถเตรียมให้มีรูพรุนขนาดเล็ก สำหรับการใช้งานของอนุภาคนาโนขนาดเล็ก โดยการอัดขึ้นรูปซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนต่างๆ ซึ่งมีการศึกษาพบว่า การกระจายขนาดอนุภาคและลักษณะรูปร่างของอนุภาคมีผลต่อความหนาแน่น ลักษณะรูปร่างและขนาดของรูพรุนของชิ้นงาน การอัดขึ้นรูปขนาดอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันหมด ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจะแปรตาม Coordination number และเมื่อใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะให้ชิ้นงานที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เล็กด้วยอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแผ่น (Platelike) หรือเส้น (Fibrous) การจัดเรียงตัวของอนุภาคมีผลต่อความพรุนตัวและขนาดรูพรุน

การนำเซรามิกที่มีรูพรุนไปใช้งานขึ้นอยู่กับชนิดของสารเซรามิก เช่น สารเซรามิกพวกอะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ มัลไคต์คอดีไรต์ สามารถใช้เป็นตัวกรองที่อุณหภูมิสูง เป็นส่วนประกอบของเครื่องยนต์ภายในรถยนต์ และพวกที่มีโครงสร้างแบบ Honeycomb สามารถใช้เป็น catalyst carrier

สำหรับกระบวนการทางเคมีในโรงงานต่างๆ เซรามิกที่มีรูพรุนสามารถกรองได้ทั้งฝุ่นละอองหรือแก๊สพิษในโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนกรองโลหะหลอมเหลวในโรงงานหล่อโลหะได้ นอกจากนี้ยังใช้เป็นฉนวนกันความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาและวัสดุทนไฟสำหรับใช้ในเตาเผา สำหรับด้านเทคโนโลยีชีวภาพมีการนำเซรามิกที่มีรูพรุนไปใช้ เช่น ไคอะคอมไมด์ หรือ แมกนีเซีย – ซิลิกา เป็น ceramic carriers และใช้เป็น bioreactors ในกระบวนการหมัก ซึ่งจะช่วยลดเวลาการเกิดปฏิกิริยาด้วย และทางการแพทย์สามารถใช้เซรามิกที่มีรูพรุนทดแทนกระดูก ได้แก่ สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ร่วมกับ partially stabilized zirconia

6.2.3 อะลูมินาเซรามิก

คุณสมบัติเฉพาะของอะลูมินาเซรามิก

สมบัติ	หน่วย	85% อะลูมินา	95% อะลูมินา	99% อะลูมินา
ลักษณะปรากฏ	-	-	ขาว	-
ความหนาแน่น	Kg m ³	3400	3700	3900
รูพรุน	% โดยปริมาตร	<0.1	<0.1	<0.1
ขนาดเกรนเฉลี่ย	μm	8	8	3
การดูดซึมน้ำ	% โดยน้ำหนัก	-	<0.01	-

ตารางที่ 10 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมินาเซรามิก [22]

คุณสมบัติทางเคมี

อะลูมินามีความต้านทานต่อการสึกกร่อนโดยกรดหรือพวกอัลคาไลด์ที่เท่าเทียมกัน หากมีการเพิ่มสารตัวเติมพวกที่มีความเป็นกรดลงในส่วนผสมของอะลูมินา ยกตัวอย่างเช่น ซิลิกา จะทำให้ความต้านทานต่อการสึกกร่อนโดยกรดเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน ความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนด้วยอัลคาไลน์ของชิ้นงานจะลดลง ตัวอย่างสารเคมีที่ทำให้เกิดปัญหาต่อชิ้นงานเช่นอัลคาไลด์ หลอม สารหลอมเหลวชนิด Alkali bisulfates หรือ พวกกรดฟอสฟอริก

คุณสมบัติทางกล.

สมบัติ	หน่วย	85% อะลูมินา	95% อะลูมินา	99% อะลูมินา
ความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers)	Kg mn ⁴		1530	
ความทนแรงดัดโค้ง ที่ 20 °c (Flexural Stength)	MPa	300	350	350
ความทนแรงกดที่ 20 °c (Compressive Strength)	MPa	1800	2000	2500
มอดูลัสของยัง (Young's modulus)	GPa	220	300	350
Welbull modules			12	
Critical stress intensity factor	MN m ^{-3/2}		4	
ผิวสำเร็จ				
1. หลังขัดเงา		1.0	1.2	0.5
2. ขัดหยาบด้วยเพชร		0.8	0.8	0.6
3. ขัดละเอียดด้วยเพชร		0.5	0.2	0.1
ความทนต่อแรงกระแทก			พอใช้	
ความทนต่อการกัดที่ อุณหภูมิสูง			พอใช้	

ตารางที่ 11 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกลของอะลูมินาเซรามิก [22]

คุณสมบัติทางความร้อน

สมบัติ	หน่วย	85% อะลูมินา	95% อะลูมินา	99% อะลูมินา
อุณหภูมิใช้งานอย่างปลอดภัย (ไม่รับน้ำหนัก)	$^{\circ}\text{C}$	1300	1500	1700
สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน (20 – 820 $^{\circ}\text{C}$) (Thermal Expansion Coefficient)	K^{-1}	8.1×10^{-6}	8.2×10^{-6}	8.1×10^{-6}
ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ 50 $^{\circ}\text{C}$ ที่ 200 $^{\circ}\text{C}$ ที่ 400 $^{\circ}\text{C}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	13.8 10.3 8.6	25 17 13	30 19 14
ความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal shock resistance)			พอใช้	

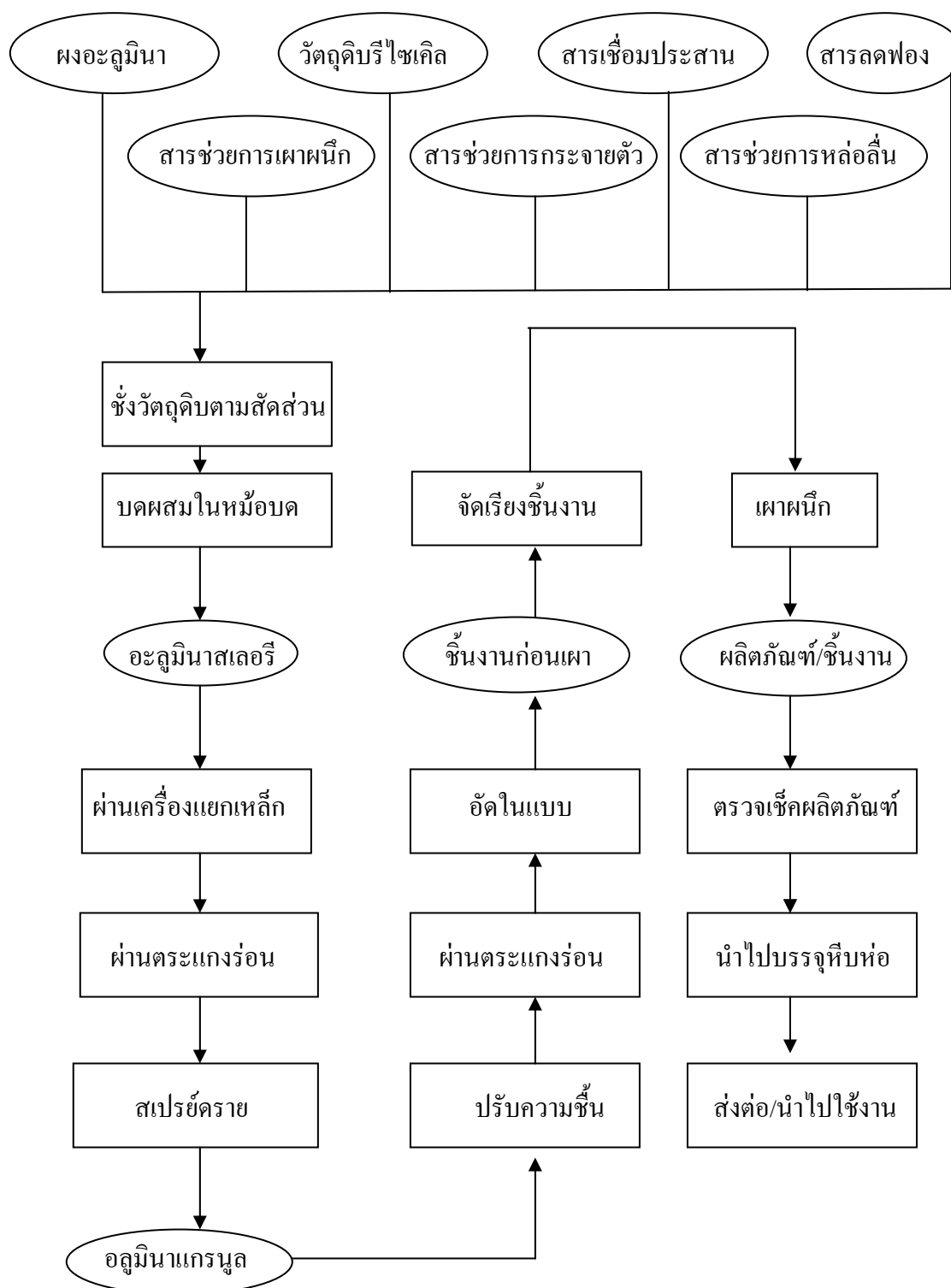
ตารางที่ 12 ตารางแสดงคุณสมบัติทางความร้อนของอะลูมินาเซรามิก [22]

คุณสมบัติทางไฟฟ้า

สมบัติ	หน่วย	85% อะลูมินา	95% อะลูมินา	99% อะลูมินา
Volume resistivity ที่ 600 $^{\circ}\text{C}$	Ω/m	4×10^4	5×10^7	4×10^8
Dielectric strength	V/m		$>10 \times 10^6$	
Dielectric constant (1 MHz)		7.1	8.1	8.5
Dielectric loss angle (1 MHz)		1.5×10^4	5×10^4	2×10^4

ตารางที่ 13 ตารางแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอะลูมินาเซรามิก [22]

กระบวนการผลิตอะลูมินาโดยผ่านการสเปรย์ทราย



รูปที่ 34 แผนผังกระบวนการผลิตอะลูมินาโดยผ่านการสเปรย์ทราย

ขั้นตอนหลักที่ต้องมีการควบคุมคุณภาพ

จะพบว่า ในขบวนการผลิตอะลูมินาโครงสร้างรูปร่างซับซ้อนให้มีสมบัติเฉพาะตามที่กล่าวมาข้างต้นนั้น มีขั้นตอนหลายขั้นตอน และเพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพจำเป็นอย่างยั้งที่ว่าการควบคุมคุณภาพอย่างมีประสิทธิภาพตลอดทั้งกระบวนการผลิต ซึ่งในที่นี้หลักๆ ประกอบไปด้วย

1. การควบคุมตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบ (Material acceptance)
2. การควบคุมขนาด อนุภาคของน้ำอะลูมินาสลิกก่อนนำไปผลิตผงอะลูมินาโดยเทคนิคสเปรย์กระจาย (Spray drying)
3. การควบคุมขนาดและน้ำหนักชิ้นงานก่อนเผา
4. การควบคุมขนาด น้ำหนัก ลักษณะภายนอก ตลอดจนสถานะการสุกตัว หรือสถานะการผลึก (Sintering State) ของชิ้นงานหลังการเผา
5. การสุ่มตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ครั้งสุดท้ายก่อนการนำส่งสินค้า ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ควรทำอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง

การควบคุมตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบ

การควบคุมตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบ (material acceptance) ประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบ ว่าเป็นไปตามคุณภาพที่กำหนดไว้หรือไม่
2. การตรวจสอบปริมาณของวัตถุดิบ ว่าเป็นไปตามที่กำหนดไว้หรือไม่
3. การตรวจสอบลักษณะกายภาพภายนอกโดยรวมของวัตถุดิบ หรือสิ่งปลอมปนต่างๆ
4. การตรวจสอบขนาดอนุภาคของวัตถุดิบให้ถูกต้องตามมาตรฐาน
5. การวัดค่าความชื้นของวัตถุดิบ
6. การทดสอบสมบัติหลังเผาของวัตถุดิบโดยการเผา (sintering test)
 - 6.1 สถานะการสุกตัวหลังการเผาของวัตถุดิบ
 - 6.2 การหดตัว (shrinkage)
 - 6.3 ลักษณะทางกายภาพ สี

การควบคุมการผลิต (Production control) และการควบคุมคุณภาพ (Quality control)

กระบวนการ	ตัวแปรคุณภาพ	ตัวแปรการผลิต	เครื่องมือ อุปกรณ์	การควบคุม
1.ตรวจรับวัตถุดิบ	การกระจาย ขนาด อนุภาค ความชื้น		เครื่องวัดการ กระจายขนาด อนุภาค อุปกรณ์ วัดความชื้น	PR
2.ชั่งน้ำหนัก	อัตราส่วนของ วัตถุดิบ		เครื่องชั่ง	QC
3.บดผสมวัสดุ		ระยะเวลาการบด ปริมาณลูกบด	หม้อบด	PR
4.แยกเหล็ก		ลักษณะ ประสิทธิภาพของ ตัวกรองแยก	เครื่องแยก แม่เหล็ก	PR
5.ร่อนผ่าน ตะแกรง		ตะแกรงร่อน	เครื่องร่อนแบบ สั่น	PR
6.วัดขนาด อนุภาค	ขนาดอนุภาค		เครื่องวัดการ กระจายขนาด อนุภาค	QC
7.สเปรย์ทราย	ความชื้น	อุณหภูมิที่ใช้อบ	Spray dryer	PR
8.อบปรับ ความชื้น	ความชื้น	อุณหภูมิที่ใช้อบ	ตู้อบ	PR
9.ร่อนปรับขนาด แกรนูล	ขนาดของ แกรนูล	ตะแกรงร่อน	เครื่องร่อนแบบ สั่น	PR
10.อัดในแบบ		ประสิทธิภาพของ แบบ น้ำมันหล่อลื่น	เครื่องอัด	PR
11.ตรวจสอบ ชิ้นงานก่อนเผา	ขนาดและ น้ำหนักของ ชิ้นงาน	ประมาณผง วัตถุดิบความสูง ของแบบ	เครื่องชั่ง ที่วัดขนาด	QC

ตารางที่ 14 แผนผังแสดงการควบคุมการผลิต และการควบคุมคุณภาพ

กระบวนการ	ตัวแปรคุณภาพ	ตัวแปรการผลิต	เครื่องมือ อุปกรณ์	การควบคุม
12.จัดเรียงเผา		แรงดันลมของ เครื่องจัดเรียง	ตัวรองเผา (Sagger)เครื่อง จัดเรียงเผา	PR
13.เผาผนึก (Sintering)		อุณหภูมิที่ใช้เผา อัตราการเผา		PR
14.ตรวจสอบ ชิ้นงานหลังเผา	ขนาดและ น้ำหนักสถานะ การสุกตัว			QC
15.ตรวจลักษณะ ทั่วไป	ความหนาแน่น ลักษณะ กายภาพ			PR
16.สุ่มตรวจสอบ คุณภาพ	ขนาดและ ลักษณะทั่วไป			QC
17บรรจุหีบห่อ	จำนวนกล่อง บรรจุ		เครื่องชั่ง ที่วัด ขนาด	PR
18.ส่งมอบ ผลิตภัณฑ์		การเทียบ มาตรฐาน		PR

ตารางที่ 15 แผนผังแสดงการควบคุมการผลิต และการควบคุมคุณภาพ

PR การควบคุมการผลิต

QC การควบคุมคุณภาพ

7. ขั้นตอนการเตรียมเซรามิกสำหรับประกอบเป็นเกราะ

7.1 ขั้นตอนการเตรียมเซรามิก

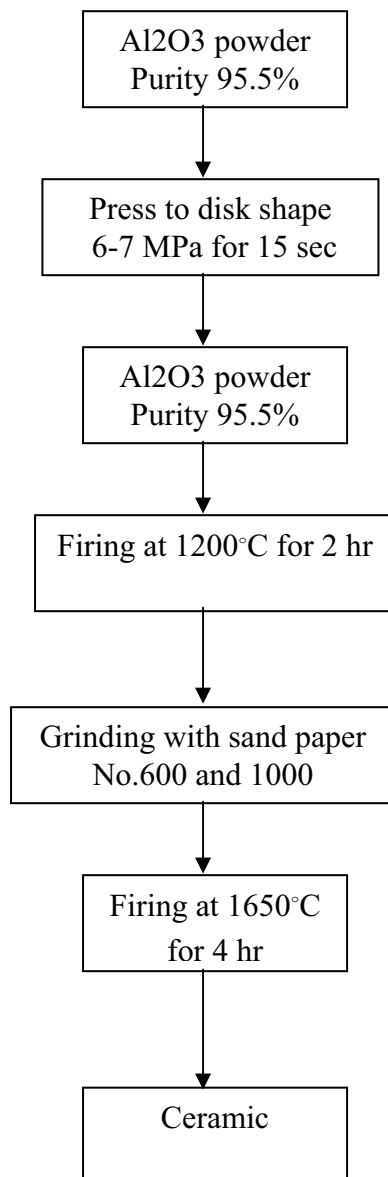
7.1.1 นำผงอลูมินา Al_2O_3 ความบริสุทธิ์ 95.5 % ผสมสารยึดเหนี่ยว PVA(Poly Vinyl Alcohol) และ Ethanol ลงเครื่องกระบอที่มี Ball milling บดผสมกันนาน (ดังรูปที่ 37-38) 20 ชม. จะได้ผงอลูมินา Al_2O_3 แบบเปียก และมีขนาดเกรนเล็ก

7.1.2 นำออกมาให้ความร้อน Heat เพื่อไล่ Ethanol ออก และให้แห้งเป็นผงไม่เกาะติดกัน จากนั้นนำมาร้อนในตะแกรงให้ได้ผงละเอียดแล้วจึงนำมาอัดขึ้นรูปด้วย Pressure Hydraulic ด้วยแรงดัน 6-7 ตัน เป็นเวลา 15 วินาที ดังรูปที่ 39

7.1.3 นำชิ้นงานเข้าเตาเผาซึ่งการเผาจะทำการเผา 2 รอบ การเผาชิ้นงานรอบที่ 1 เผาขึ้นงานด้วยอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ด้วย heating rate $3^{\circ}C/min$ เผาแช่นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1000 ตามลำดับ

7.1.4 นำชิ้นงานเข้าเตาเผารอบที่ 2 เผาขึ้นงานด้วยอุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ด้วย heating rate $2^{\circ}C/min$ เตาเผาเซรามิกแสดงในรูปที่ 40 เผาแช่นาน 4 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกจากเตารอจนเย็นแล้วนำไปประกอบเป็นแผ่นเกราะตามขั้นตอนต่อไป

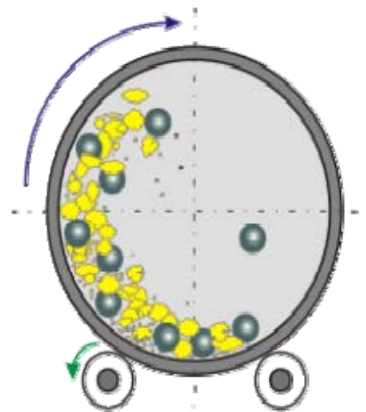
7.2 กระบวนการขึ้นรูปเซรามิค



รูปที่ 35 ภาพแผนผังการขึ้นรูปเซรามิค



รูปที่ 36 ภาพ Ball milling เซอร์โคเนีย (ZnO_2)
ทรงกระบอก



รูปที่ 37 ภาพจำลอง Ball milling ในหม้อบด



รูปที่ 38 เครื่องบดผสม (หม้อบดทรงกระบอก)



รูปที่ 39 เครื่องอัดแบบด้วย Hydraulic



รูปที่ 40 เตาเผาเซรามิค



รูปที่ 41 ชิ้นงานเซรามิคที่ได้จากการเผา

8. การออกแบบแผ่นเกราะและเสื้อเกราะ

8.1 ส่วนประกอบของเกราะและเสื้อเกราะประกอบด้วยส่วนหลักๆดังนี้

รูปแบบแผ่นเกราะ 5 รูปแบบ ได้แก่

8.1.1 เกราะแข็ง ผลิตจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กเหนียวและเหล็กเหนียวชุบแข็ง ซึ่งใช้ กำหนดรหัสวัสดุไว้คือ เหล็กกล้าไร้สนิม เรียก “BJS” เหล็กเหนียวเรียก“BJ” เหล็กเหนียวชุบแข็ง เรียก “BJH” แนวทางในการผลิตเป็นเกราะโดยการนำแผ่นเหล็กชนิดต่างๆ มา ประกบติดกัน ครั้งละคู่ หรือใช้แผ่นเดียว และเลือกขนาดความหนาของแผ่นเหล็ก เพื่อใช้ทดสอบ ให้มีคุณสมบัติสามารถป้องกัน อำนาจสังหารของอาวุธกระสุนปืนพกได้

8.1.2 เกราะเหล็กประกบกับเซรามิค โดยเกราะเซรามิค เป็นแผ่นเซรามิคที่เป็น ผลงานวิจัย และพัฒนามาแล้วโดยส่วนราชการ สถานศึกษา และหรือบริษัทเอกชนทั้งในและ ต่างประเทศ และยังมีคุณสมบัติสามารถป้องกันอำนาจสังหารของกระสุนปืนได้

8.1.3 เกราะเหล็กประกบกับเกราะเส้นใยสังเคราะห์ โดยเส้นใยสังเคราะห์ เป็น เส้นใย สังเคราะห์ที่มีคุณลักษณะเป็นเกราะอ่อนที่เป็นผลงานวิจัยและพัฒนามาแล้ว แต่ยังมีคุณสมบัติ ไม่สามารถป้องกันอำนาจการสังหารของ กระสุนปืน และมีคุณลักษณะไม่ตรงหรือไม่เหมาะสม กับ ความต้องการ ในการใช้งานตามเป้าหมายและ ขอบเขตของการวิจัย

8.1.4 เกราะเหล็กประกบกับเกราะเซรามิคและเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยการผสมผสาน คุณลักษณะความเป็นเกราะของทั้งสามประเภทมารวมกันให้ได้ คุณสมบัติ คุณลักษณะของเกราะตาม ขอบเขต ของการวิจัย

8.1.5 เกราะโลหะหรือวัสดุสังเคราะห์อื่นๆ ที่เป็นเกราะแข็ง ซึ่งอาจได้แก่ กระฉก, ยาง แข็ง, โพลีคาบอนเนต เป็นวัสดุสำเร็จรูปภายในประเทศนำมาผสมผสานคุณลักษณะ เช่นเดียวกับในข้อ 8.1.2 เพื่อให้ได้คุณลักษณะของเกราะตามขอบเขตของการวิจัย

เกราะที่ประกอบแล้วทุกแบบ จะออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น เกราะเหล็กหรือเกราะ โลหะที่เป็นเกราะแข็งที่ใช้ทำเสื้อเกราะ จะต้องดัดโค้งให้เหมาะสมกับการสวมใส่กับร่างกาย

8.2 ชุดเสื้อเกราะ

8.2.1 วัสดุที่ใช้ตัดเย็บ จัดซื้อเป็นผ้ากึ่งสังเคราะห์ และอุปกรณ์/วัสดุประกอบ สำหรับการ ตัดเย็บตามรูปแบบที่ออกแบบ

8.2.2 คุณลักษณะของเสื้อเกราะที่ต้องการ ผลิตเป็น 3 ขนาด คือ S, L และ XL (ขนาด L และ XL มีขนาดใหญ่กว่าขนาด S แต่มีแผ่นเกราะขนาดเท่ากัน) รูปแบบของเสื้อ

เป็นแบบไม่มีแขน ใช้สวมทับ ด้านนอกของชุดปฏิบัติงานของทหาร ดำรงได้ โดยสามารถสวมทาง ศีรษะ หรือทางด้านข้างได้ ด้านข้างและที่ ไหล่ของเสื้อที่แถบเกราะยึดโดยใช้แถบผ้าตีน

ตุ๊กแก สามารถปรับขนาดของตัวเสื้อให้เหมาะสมกับขนาดลำตัว ผู้สวมใส่ในด้านหน้า และ

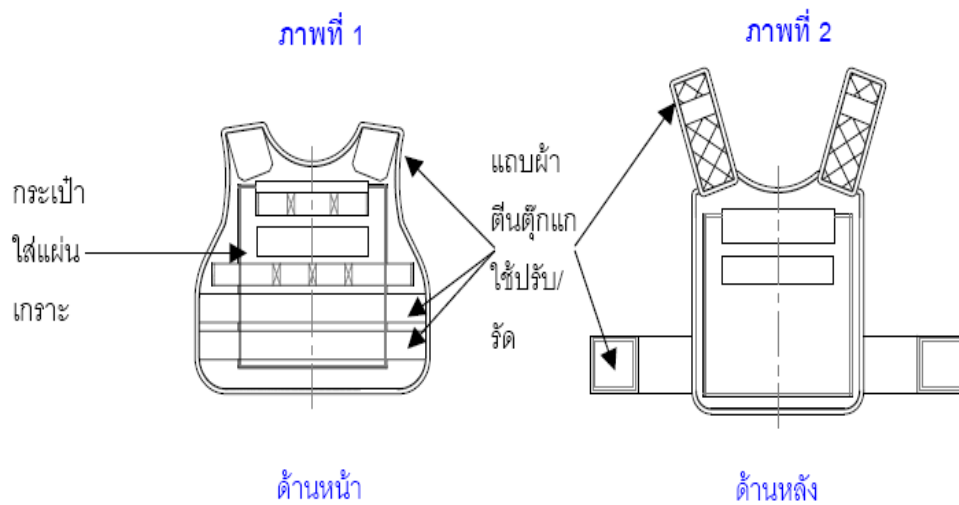
ด้านหลังจะมีช่องกระเป๋าสําหรับสอดใส่แผ่นเกราะได้อย่างน้อยครั้งละ 2 ชุด และสามารถถอดหรือใส่ เพิ่มแผ่นเกราะได้ ระหว่างชั้นของกระเป๋ากราะจะออกแบบให้สามารถเสริม

แผ่นโฟม หรือแผ่นยาง เพื่อลดแรงปะทะของหัวกระสุนปืน ตามความเหมาะสม

ผ้ากึ่งสังเคราะห์จะต้องมีคุณสมบัติทน แรงฉีกขาดได้ดี สามารถรับน้ำหนักของแผ่นเกราะได้และควรมี คุณสมบัติกันน้ำ หรือเคลือบสารกันน้ำ และมีอายุการใช้งานได้นาน

8.2.3 อุปกรณ์ประกอบเสื้อเกราะเพื่อใช้ในการยึดติด หรือใส่อาวุธยุทธโปกรณ์ จะ ออกแบบ ให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้งานแต่ละหน่วยงาน และแต่ละภารกิจ โดยใช้แถบผ้า ตีนตุ๊กแกประกอบแถบ ผ้าไนลอน เพื่อให้เกิดความคล่องแคล่วและความสะดวกในการใช้งาน

8.3 ภาพร่างแบบชุดเสื้อเกราะสำหรับการผลิต



รูปที่ 8-1 ภาพร่างแนเกราะที่ใช้ทำเกราะชนิดต่างๆ และรูปแบบการทดสอบ

การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการประกบกัน ระหว่างแผ่นเกราะ

การกำหนดสัญลักษณ์ของแผ่นเกราะ ด้วยภาพหน้าตัดของแผ่นเกราะ

8.4 การกำหนดสัญลักษณ์แผ่นเกราะ

การกำหนดสัญลักษณ์ของแผ่นเกราะ ด้วยภาพหน้าตัดของแผ่นเกราะ



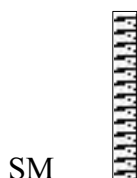
8.1 เหล็กกล้าไร้สนิม



8.2 เหล็กอลูมิเนียมอัลลอย



8.3 เหล็กเหนียวชุบแข็ง



8.4 เซรามิก



8.5 โยสังเคราะห์

รูปที่ 8-2 ภาพสัญลักษณ์แผ่นเกราะ

รูปแบบการจัดเรียงวัสดุเกราะ

(Possible configurations of the amour plate arrangement)

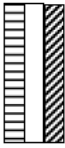
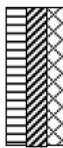
ที่คาดว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกันกระสุนได้ จำนวน 12 รูปแบบ

		
รูปที่ 4.1: BJS + BJ	รูปที่ 4.2: BJS + BJH	รูปที่ 4.3: BJ + BJH

		
รูปที่ 4.4: SM + BJ	รูปที่ 4.5: SM + BJS	รูปที่ 4.6: SM + BJH

		
รูปที่ 4.7: BJS + UD	รูปที่ 4.8: BJ + UD	รูปที่ 4.9: BJH + UD

รูปที่ 8-3 ภาพรูปแบบการจัดเรียงวัสดุเกราะแบบต่างๆ

		
รูปที่ 4.10: SM + BJS + BJ	รูปที่ 4.11: SM + BJ + BJH	รูปที่ 4.12: SM + BJH + UD

รูปที่ 8-4 ภาพรูปแบบการจัดเรียงวัสดุเกราะ

Note: -รูปที่ 4.1-3 แสดงการจัดเรียงวัสดุเกราะที่เป็นเหล็กแผ่นต่างชนิดกัน โดยทำการศึกษาผลกระทบของการชุบผิวแข็ง/ความลึก และขนาดความหนาที่เหมาะสมของแผ่นเหล็กเหนียวต่อประสิทธิภาพการเจาะทะลุ

-รูปที่ 4.4-6 แสดงการนำแผ่นเซรามิกมาเสริมด้านหน้า โดยมีแผ่นเหล็กเป็นวัสดุรองรับ (Reinforced backup plate) กรณีนี้ต้องจัดวางแผ่นเซรามิกไว้ด้านหน้าเท่านั้น เนื่องจากเซรามิกเป็นวัสดุแข็ง เปราะจึงมีคุณสมบัติทำลายหัวกระสุน

-รูปที่ 4.7-9 แสดงการจัดเรียงแบบระหว่างแผ่นเกราะเหล็กกับแผ่นเกราะที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์(วัสดุเกราะอ่อน) กรณีนี้แผ่นเส้นใยสังเคราะห์ต้องซ่อนอยู่ด้านหลังเสมอ โดยแผ่นเหล็กทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุน

-รูปที่ 4.10-12 แสดงการจัดเรียงแผ่นกันกระสุนแบบ 3 แผ่น โดยมีวัสดุแข็งเปราะเช่น แผ่นเซรามิก อยู่ด้านหน้าสุด แผ่นกลางเป็นแผ่นเกราะเหล็ก และเกราะชั้นในสุดอาจเป็นวัสดุเกราะอ่อนใยสังเคราะห์ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

การจัดเรียงของชั้นวัสดุเสื้อเกราะทั้ง 12 รูปแบบ ยังไม่คำนึงถึงการเก็บสะเก็ดกระสุนและแผ่นชั้น กันแรงอัดของลูกปืนที่ติดกับตัวผู้สวมใส่

9. ขั้นตอนการประกอบแผ่นเกราะ

ระดับความสามารถในการกันกระสุน ระดับ 3

เป็นระดับที่สามารถป้องกันกระสุนปืนเล็กยาวได้ ตามมาตรฐาน NIJ STANDARD 0101-04

คุณลักษณะทั่วไป

9.1 น้ำหนักสุทธิเสื้อเกราะ ขนาด L = 7.3 ± 0.5 กก. และ ขนาด XL = 7.5 ± 0.5 กก.

9.2 อายุการใช้งานเสื้อเกราะ 6 ปี (หากเซรามิคไม่แตกชำรุดเสียหาย)

9.3 เสื้อเกราะมีลักษณะเป็นเกราะแข็ง ซึ่งเสื้อเกราะ 1 ตัว จะประกอบด้วยแผ่นเกราะแข็งอยู่ที่ตัวเสื้อด้านหน้า 1 ชุด และอยู่ที่ตัวเสื้อด้านหลัง 1 ชุด โดยที่ตัวเสื้อด้านนอกของตัวเสื้อด้านหน้า และด้านหลังจะมีช่องหรือกระเปาะสำหรับสอดใส่แผ่นเกราะทั้งนี้ แผ่นเกราะทุกชุดจะห่อหุ้มด้วยผ้าชนิดไม่ดูดซับน้ำ หรือห่อหุ้มด้วยวัสดุสังเคราะห์ และบรรจุในช่องผ้าร่มชนิดกันน้ำจะมีฉลากบอกชื่อบริษัทผู้ผลิต, ชนิด และระดับของแผ่นเกราะ, วัน เดือน ปีที่ผลิต, วันหมดอายุของแผ่นเกราะหรืออื่น ๆ

9.4 เสื้อเกราะมี 2 ขนาด คือ ขนาด L กับ XL (ขนาด XL มีวัสดุผ้าตัวเสื้อใหญ่กว่าขนาด L แต่มีแผ่นเกราะขนาดเท่ากันคือ กว้าง 9 นิ้ว ยาว 10 นิ้ว โดยประมาณ) เสื้อเกราะเป็นชนิดไม่มีแขนเป็นแบบเสื้อกั๊กใช้สวมทับด้านนอกของชุดปกติ โดยสวมทางศีรษะ หรือทางด้านข้างก็ได้ที่บริเวณด้านข้างและที่ไหล่ของเสื้อมีแถบเกาะยึด ปิด – เปิด แบบผ้าตีนตุ๊กแก สามารถปรับขนาดของตัวเสื้อให้เหมาะสมกับลำตัวผู้สวมใส่ได้ตามต้องการ

9.5 เสื้อเกราะไม่ดูดซับน้ำ แผ่นเกราะทุกชุดมีผิวด้านหน้าโค้งแนบกับลำตัวผู้สวมใส่

10. คุณลักษณะเฉพาะทางวิชาการ

10.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตแผ่นเกราะ แผ่นเกราะประกอบด้วย โลหะ เซรามิค โยสังเคราะห์ โดยโลหะแผ่นหน้าคือ เหล็กกล้า (ใช้รหัสวัสดุว่า BJH) ต่อจากเหล็กเป็นโยสังเคราะห์ ต่อจากโยสังเคราะห์เป็นเซรามิค ต่อจากเซรามิคเป็นโยสังเคราะห์อัดแข็ง

10.2 น้ำหนักต่อพื้นที่ของแผ่นเกราะ 12.57 กรัม/ซม.² (0.18 ปอนด์/นิ้ว)

10.3 ความหนาของแผ่นเกราะ 24⁺⁵ มม. ซึ่งสนธิมาจากแผ่นเกราะเหล็ก BJH หนา 2.0 ± 0.2 มม. (0.078 ± 0.007 นิ้ว) โยสังเคราะห์จำนวน 20 ชั้น แต่ละชั้นมีความหนา 0.2 ไมคอน, แผ่นยางหรือโฟม

หนา หนา 1.0 มม. (0.039 นิ้ว), เซรามิค ขนาด 2 × 2 นิ้ว หนา

7.0 ± 1.0 มม. (0.273 ± 0.039 นิ้ว) เรืองสลักกันแบบลายก่อกออิฐจนเต็มแผ่นและโยสังเคราะห์ 60 ชั้นอัดแข็ง)

10.4 พื้นที่ป้องกันอันตราย พื้นที่ด้านหน้า = ด้านหลัง ขนาด L และ XL = 67 ± 1 ซม.²

11. วิธีการผลิตเสื้อและแผ่นเกราะกันกระสุน เสื้อเกราะเซรามิกมาตรฐาน



ตัวเสื้อด้านหน้า



ตัวเสื้อด้านหลัง

การควบคุมคุณภาพวัสดุกันกระสุน (BALLISTIC MATERIAL QUALITY CONTROL)

11.1. จัดหาวัสดุกันกระสุนทุกชนิดตามคุณสมบัติ SPEC ที่กำหนด อาทิเช่น

11.1.1 แผ่นเหล็ก IRON STEEL ความหนา 2.0 มม.

11.1.2 เซรามิก CERAMIC ขนาด 2×2 นิ้ว หนาไม่น้อยกว่า 6.5 มม.

11.1.3 โพลีเอทิลีน PE. POLYETHYLENE ความหนา 0.2 ไมคอน/แผ่น

12. การควบคุมคุณภาพผ้าและวัสดุประกอบสำหรับการตัดเย็บตัวเสื้อ

สั่งซื้อผ้ากึ่งสังเคราะห์ (ชนิด, เบอร์ผ้า, และสี) และวัสดุประกอบสำหรับการตัดเย็บตัวเสื้อตาม SPEC ที่กำหนด

13. การผลิตแผ่นเกราะ (ARMOR PANEL)

13.1. การผลิตแผ่นเกราะ 1 ชุด

13.2 จัดเตรียมแผ่นเหล็กกล้า (BJH) ความหนา 2.0 ± 0.2 มม. วาดแบบ (PATTERN) ขึ้นงานลงบนแผ่นเหล็ก นำไปตัดเข้าเครื่องตัดตามแบบที่วาด เมื่อตัดแล้วนำมาปั๊มขึ้นรูปให้มีผิวโค้ง แล้วทำการตกแต่งรอยคม และลบมุม (ดังรูปที่ 1, รูปที่ 2, รูปที่ 3)

13.3 นำแผ่นเหล็ก (BJH) ที่ผ่านขบวนการในข้อ 13.2 แล้วไปชุบแข็งผิวทั้ง 2 ด้านให้มีความแข็งตามที่กำหนด โดยการตรวจความแข็งจากเจ้าหน้าที่ควบคุมคุณภาพทุกแผ่น โดยการตรวจความแข็งจะวัดค่าความแข็งของเหล็กแต่ละแผ่น จำนวน 3 จุด (ดังรูปที่ 4)



(รูปที่ 1) **PATTERN** ชิ้นงานแผ่นเหล็ก (BJH)



(รูปที่ 2) เครื่องปั๊มตัดชิ้นงาน



(รูปที่ 3) เครื่องปั๊มขึ้นรูปผิวโค้ง



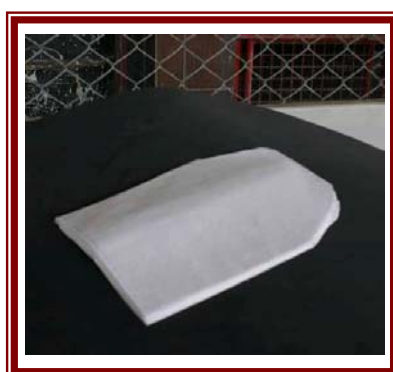
(รูปที่ 4) การตรวจวัดความแข็ง

13.4 จัดเตรียมใยสังเคราะห์ (PE) ความหนา 0.2 มม. วาดแบบ (PATTERN)

ชิ้นงานลงบนแผ่นใยสังเคราะห์ ตัดตามแบบแล้วนำมาทาบด้วยกาววางเรียงซ้อนกันให้ได้จำนวนความหนาตามต้องการ นำเข้าเครื่องอัดให้แข็งตัว และขึ้นรูปให้มีผิวโค้งเล็กน้อย (ดังรูปที่ 5 และ 6)



(รูปที่ 5) **PATTERN** ชิ้นงานบนใย PE



(รูปที่ 6) แผ่นใยสังเคราะห์อัดแข็งแล้ว

13.5 นำแผ่นใยสังเคราะห์ (PE) ที่อัดแข็งขึ้นรูปแล้ว มาติดด้านหน้าด้วยแผ่นเซรามิกชนิดพิเศษด้วยกาว แผ่นเซรามิกที่นำมาใช้ติดเป็นแผ่นเกราะมีขนาด (กว้าง × ยาว) 2×2 นิ้ว



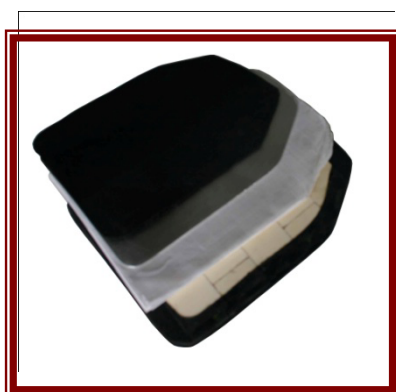
(รูปที่ 7) แผ่นเซรามิกที่นำมาติดบนใย PE อัดแข็ง



(รูปที่ 8) แผ่นเหล็ก BJH ปิดด้านหลัง

13.6 เมื่อนำแผ่นใยสังเคราะห์ที่อัดแข็งขึ้นรูปติดด้านหน้าด้วยแผ่นเซรามิกแล้วใช้แผ่นใยสังเคราะห์ PE อีกแผ่นจำนวน 20 ชั้น ปะติดทับด้านหลังของเซรามิกอีกครั้งหนึ่ง

13.7 นำแผ่นเหล็กกล้า (BJH) ขนาด 2.0 ± 0.2 มม. ที่ป้อนขึ้นรูป และผ่านขบวนการชุบแข็ง ที่ผ่านการควบคุมคุณภาพแล้ว นำโฟมยางที่มีความหนา 1.0 มม. มาปิดด้านหลังของแผ่นเหล็กกล้า แล้วนำแผ่นเหล็กกล้าที่ติดโฟมยางมาปะติดทับด้านหลังของแผ่น PE อัดแข็ง และเซรามิกอีกครั้งหนึ่ง (ดังรูปที่ 8)



(รูปที่ 9) การเรียงวัสดุ
เกราะเป็นชุดด้วยการติดยึดด้วยกาว



(รูปที่ 10) แผ่นเกราะประกอบแล้วเสร็จ
พร้อมติดสลากบอกชนิด
และระดับของแผ่นเกราะ

14. การผลิตตัวเสื้อ (FRONT AND BACK CARRIER PROCESS)

14.1. เตรียมผ้าไนลอนเบอร์ 210 กันน้ำ สีดำหรือผ้า 600 ดี สีดำชนิดหนา และวัสดุประกอบการตัดเย็บตัวเสื้อ

14.2 วาดแบบ (PATTERN) (ดังรูปที่ 11) และตัดผ้าตามแบบ (ดังรูปที่ 12)



(รูปที่ 11) การวาด PATTERN บนผ้า



(รูปที่ 12) การตัดผ้าตามแบบ

14.3. นำชิ้นส่วนผ้าตามข้อ 14.2 และวัสดุประกอบตามข้อ 14.1 มาเย็บเป็นตัวเสื้อ

15. ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน

การทดสอบเกราะกันกระสุน ครั้งที่1

การทดสอบเกราะกันกระสุน รอบที่1 ทดสอบโดยการยิงด้วยกระสุนจริงกับเกราะกันกระสุนปืนพก และเกราะกันกระสุนปืนเล็กยาวที่เป็นอาวุธสงคราม ซึ่งเกราะที่นำมาใช้ทดสอบถูกพัฒนาขึ้นโดย บริษัท พีซีพาร์ท จำกัด

วิธีการทดลอง

การยิงทดสอบ

การยิงทดสอบแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ ทดสอบเกราะปืนพกและเกราะปืนเล็กยาวและมีรูปแบบต่างๆ ดังนี้

1 ทดสอบเกราะปืนพก

เกราะปืนพกที่ใช้ทดสอบครั้งนี้มีรูปแบบเดียว แต่ยิงทดสอบด้วยกระสุนสองขนาดคือ .44 REM MAG และ .357 MAG WINCHESTER ตามมาตรฐานระดับ 3A

1.1 เกราะปืนพกยิงด้วยกระสุน .44 (SS2+AI2-.44)

1.2 เกราะปืนพกยิงด้วยกระสุน .357 (SS2+AI2-.357)

2 ทดสอบเกราะปืนเล็กยาว

เกราะปืนเล็กยาวทดสอบยิงด้วยกระสุน M16 อย่างเดียว และมีการจัดรูปแบบเกราะ 3 รูปแบบ โดยการเพิ่มความหนาและชั้นวัสดุเข้ามาช่วยรับภาระจากกระสุน

2.1 เกราะ 2 ชั้น (HS3.7+HS3.7)

2.2 เกราะ 3 ชั้น (HS3.7+AI1+HS3.7)

2.3 เกราะ 4 ชั้น (HS3.7+AI1+HS3.7+AI2)

กำหนดสัญลักษณ์

รูปแบบ	กระสุน	ชิ้นงาน		
SS2+AI2	.44	44-SS	44-AI	
SS2+AI2	.357	357-SS	357-AI	
HS3.7+AI1+HS3.7	M16	2-1	3-1	
HS3.7+HS3.7	M16	2-2	3-2	
HS3.7+AI1+HS3.7+AI2	M16	2-3	3-3	4-3

AI1	อลูมิเนียม 1 มม.
AI2	อลูมิเนียม 2 มม.
SS2	เหล็กกล้าไร้สนิม 2 มม
HS3.7	เหล็กกล้าชุบแข็ง 3.7 มม.

ผลการทดลอง

1 ผลการยิง

ผลการยิงทดสอบพบว่าเกราะสามารถกันกระสุนได้ โดยที่กระสุนไม่สามารถทะลุแผ่นเกราะได้ทั้งหมด

เกราะ	กระสุน	ผล
SS2+AI2	.44	ไม่ทะลุ
SS2+AI2	.357	ไม่ทะลุ
HS3.7+AI1+HS3.7	M16	ไม่ทะลุ
HS3.7+HS3.7	M16	ไม่ทะลุ
HS3.7+AI1+HS3.7+AI2	M16	ไม่ทะลุ

2 ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

การทดสอบใช้วัสดุ 3 ชนิด คือเหล็กกล้าไร้สนิม, เหล็กกล้าชุบแข็ง และอลูมิเนียม ได้ผลการตรวจสอบเป็นองค์ประกอบทางเคมี เทียบกับมาตรฐานได้ดังนี้

เหล็กกล้าไร้สนิม

Grade		C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%
UNS S30400	304	0.08	1.00	2.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-10.5
Related Grades								
UNS S30403	304L	0.03	1.00	2.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-12.0
UNS S30409	304H	0.04-0.10	1.00	2.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-12.0

ตารางที่16 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ Stainless Steel grade 304

ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (% มวล)

Grade		C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%
UNS S30409	304H	0.0498	0.348	1.15	<0.01	<0.01	18.19	8.09
		Mo%	V%	W%	Co%	Cu%	Sn%	Al%
		0.146	0.0735	<0.1	0.122	0.223	0.0271	0.0081
		Ti%	Pb%	Nb%	Fe%			
		<0.01	<0.01	0.0133	<71.42			

ตารางที่17 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

จากผลการทดลองพบว่าวัสดุมีองค์ประกอบทางเคมีเข้าได้กับ เหล็กกล้าไร้สนิม 304H เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของคาร์บอนที่อยู่ระหว่าง 0.04-0.10 %

เหล็กกล้าชุบแข็ง

Grade	C%	Mn%	Cr%	Ni%
SK 5	0.85	0.5	0.2	0.2
SK 6	0.75	0.5	0.2	0.2
SK 7	0.65	0.5	0.2	0.2

ตารางที่ 18 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุมาตรฐาน Stainless Steel 304

ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าชุบแข็ง

Grade	C%	Mn%	Cr%	Ni%
SK 5	0.744	0.421	0.111	<0.01
	Si%	P%	S%	Mo%
	0.265	0.0217	<0.01	<0.01
	V%	Al%	Ti%	Pb%
	0.0163	0.0069	0.0022	<0.01
	W%	Co%	Cu%	Sn%
	<0.1	<0.01	0.0241	<0.01
	B%	Mg%	Nb%	Fe%
	<0.01	0.005	0.0041	98.14

ตารางที่ 19 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าชุบแข็ง

จากผลการทดลองพบว่าวัสดุมีองค์ประกอบทางเคมีเข้าได้กับ เหล็กกล้าคาร์บอน SK 6 เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของคาร์บอนอยู่ในระหว่าง 0.65-0.75 % อาจเป็นผลที่เกิดจากการสูญเสียคาร์บอนในขั้นตอนของการชุบแข็งดังนั้นจึงสรุปว่าเป็นโลหะเกรด SK 5

อลูมิเนียม

ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุอลูมิเนียม

Grade	Al%	Si%	Fe%	Cu%
1XXX	99.20947	0.139	0.514	0.076
	Mn	Mg	Cr	Ni
	0.0242	<0.00049	0.00238	0.00902
	Zn	Pb	Sn	Zr
	<0.00126	0.0123	0.00122	0.0102
	Ti			
	0.0313			

ตารางที่ 20 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุอลูมิเนียม

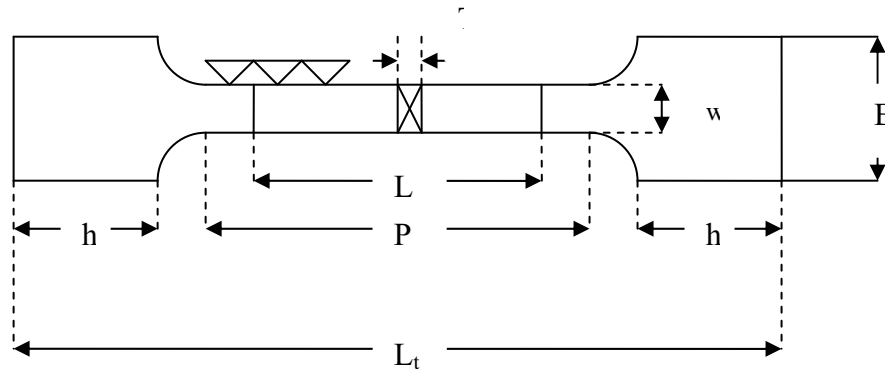
จากการตรวจสอบพบว่าอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบถึง 99.21% โดยมวลนั้น จึงจัดเป็นอลูมิเนียมเกรด 1XXX ซึ่งเป็นกลุ่มของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (ความบริสุทธิ์มากกว่า 99%)

จากผลการทดสอบสามารถสรุปวัสดุที่ใช้ในการทดสอบได้ดังนี้

Al1	อลูมิเนียม 1XXX หนา 1 มม.
Al2	อลูมิเนียม 1XXX หนา 2 มม.
SS2	เหล็กกล้าไร้สนิม 304H หนา 2 มม
HS3.7	เหล็กกล้า SK6 ชุบแข็ง หนา 3.7 มม.

3 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การดึงทดสอบวัสดุ ที่ทำการทดสอบในครั้งนี้ กระทำตามมาตรฐาน JIS 2201 type 13B



รูปที่ 47 แบบชิ้นทดสอบวัสดุมาตรฐาน JIS 2201 Type 13 B

Type	Width	Gauge length	Parallel length	Radius of fillet	Thickness	Width of gripped portion
	w	L	P	R	T	B
13 B	12.5	50	60 approx.	20 to 30	Thickness of material	20 min

ตารางที่ 21 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน JIS 2201 Type 13 B

Type	w	L	P	h	L_t	R	T	B
13 B	12.5	50	60	60	25	25	2	20

ตารางที่ 22 ขนาดชิ้นทดสอบที่จัดทำตามมาตรฐาน JIS 2201 Type 13 B

รายละเอียดการทดสอบชิ้นงาน

Instron Corporation Series IX Automated Materials Testing System 7.27.00

Operator name: Mr.Supachai

Interface Type: 4200

Full Scale Load Range: 600 kN

Sample Rate: 6.667 pts/secs

Humidity: 52 %

Crosshead Speed: 30 mm/min

Temperature: 25 °C

ผลการทดสอบแรงดึง

Specimen	เหล็กกล้าไร้สนิม		อลูมิเนียม	
	แนวตั้ง	แนวนอน	แนวตั้ง	แนวนอน
Yield Stress (MPa)	360	354	119	119
Tensile Strength (MPa)	694	673	126	128
Elongation %	50.3	51.8	7.1	8.1

ตารางที่ 23 ผลการดึงทดสอบวัสดุ

จากผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงที่ได้จากแนวการดึงทดสอบทั้ง 2 แนว ไม่แตกต่างกันมาก

4 ผลการทดสอบ Micro Hardness Test

การทดสอบ Micro Hardness เพื่อวัดค่าความแข็ง บริเวณรอยกระสุน เพื่อหาผลกระทบการรีดตัวของวัสดุที่เกิดกับความแข็งของวัสดุ (Strain Hardening Effect)

โดยการนำชิ้นงานทดสอบจากการยิงเกราะปืนพกด้วย กระสุน .44 กับ .357 และจากการยิงเกราะกันอาวุธสงครามด้วยกระสุน M16 ซึ่งมีเกราะทดสอบ 3 รูปด้วยกัน

ทดสอบด้วยเครื่อง Mitutoyo MVK-H11

รูปแบบ	กระสุน	ชิ้นงาน		
SS2+Al2	.44	44-SS	44-Al	
SS2+Al2	.357	357-SS	357-Al	
HS3.7+Al1+HS3.7	M16	2-1	3-1	
HS3.7+HS3.7	M16	2-2	3-2	
HS3.7+Al1+HS3.7+Al2	M16	2-3	3-3	4-3

Al1ถูกละลายจนเป็นรูกว้าง จึงไม่ได้นำมาทดสอบ

ตารางที่ 24 การจำแนกรูปแบบยิงการทดสอบ

หมายเลขชิ้นงาน	ความหมาย
44-SS	เหล็กกล้าไร้สนิมรับกระสุน .44
44-Al	อลูมิเนียมรับกระสุน .44
357-SS	เหล็กกล้าไร้สนิมรับกระสุน .357
357-Al	อลูมิเนียมรับกระสุน .357
2-1	เหล็กชุบแข็งแผ่นหน้า ในเกราะชุดที่ 1
2-2	เหล็กชุบแข็งแผ่นหน้า ในเกราะชุดที่ 2
2-3	เหล็กชุบแข็งแผ่นหน้า ในเกราะชุดที่ 3
3-1	เหล็กชุบแข็งแผ่นหลัง ในเกราะชุดที่ 1
3-2	เหล็กชุบแข็งแผ่นหลัง ในเกราะชุดที่ 2
3-3	เหล็กชุบแข็งแผ่นหลัง ในเกราะชุดที่ 3
4-3	อลูมิเนียมแผ่นหลัง ในเกราะชุดที่ 3

ตารางที่ 25 หมายเลขชิ้นงานและความหมาย

การยิงทดสอบเกราะปืนพกด้วยกระสุน .44

ทิศทางการยิง / กระสุนเข้าปะทะ



ยิงด้วยกระสุน .44

เกราะแผ่นหน้า

SS2

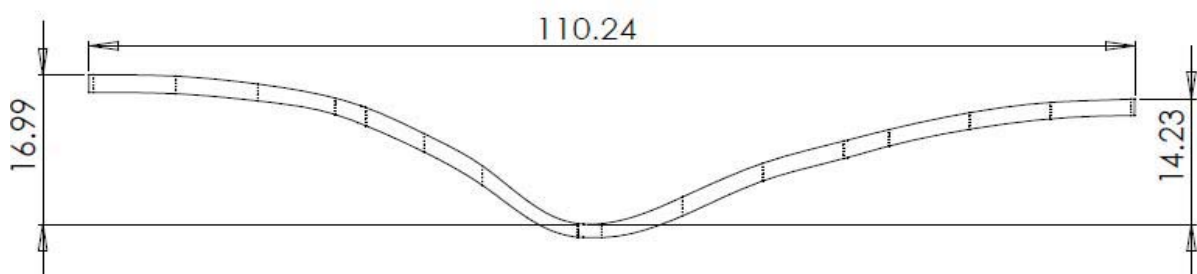


เกราะแผ่นหลัง

A12

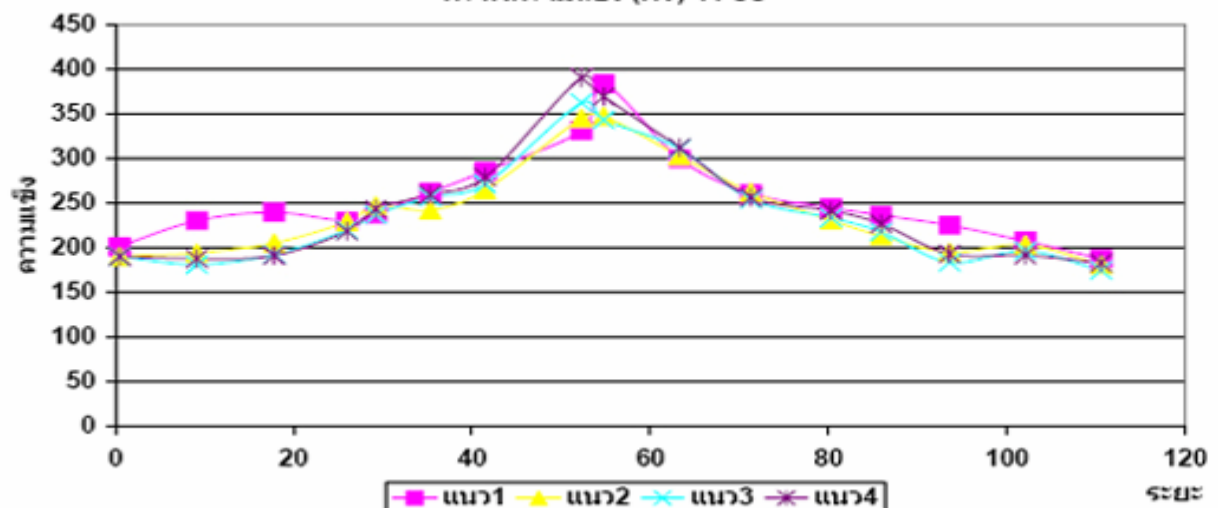


รูปแสดงรูปแบบการยิงทดสอบเกราะปืนพกด้วยกระสุน .44

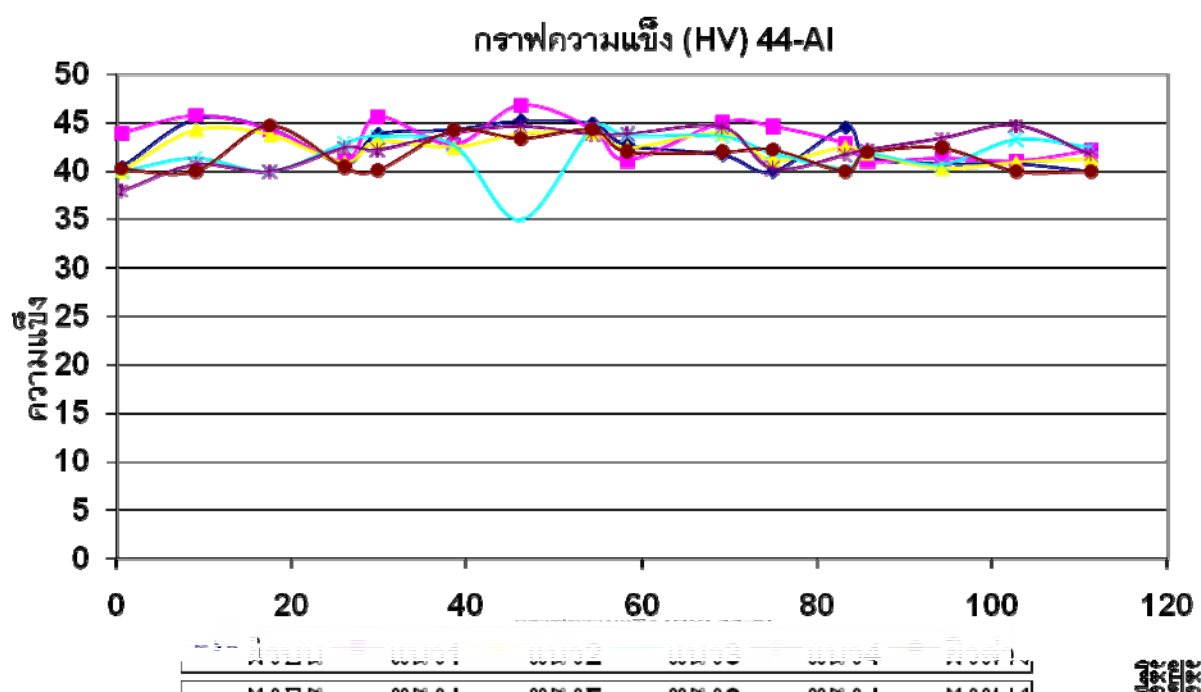
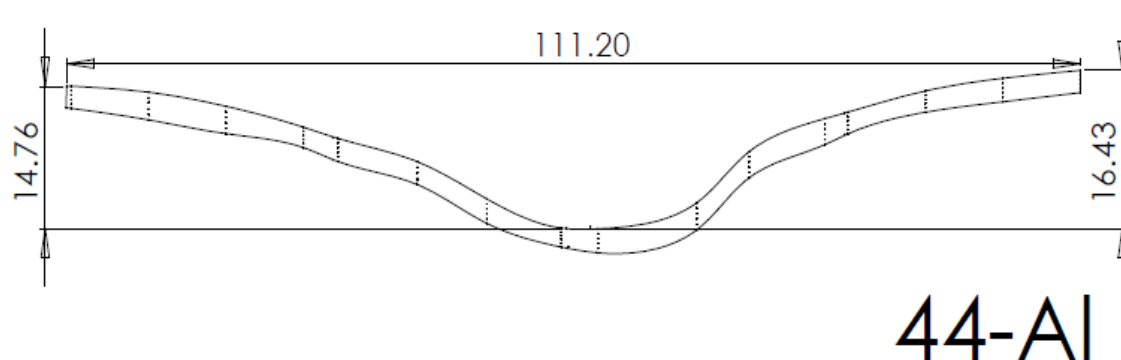


44-SS

กราฟความแข็ง (HV) 44-SS



รูปที่ 48 ค่าความแข็ง ที่เป็นผลกระทบจากการยิงด้วย กระสุน .44
ที่ระยะความหนา 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 มม.บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 49 ค่าความแข็ง ที่เป็นผลกระทบจากการยิงด้วย กระสุน .44 ที่ระยะความหนา 0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 มม.ของแผ่นอลูมิเนียม

การยิงทดสอบเกราะปืนพกด้วยกระสุน .357

ทิศทางการยิง / กระสุนเข้าปะทะ



ยิงด้วยกระสุน .357

SS2



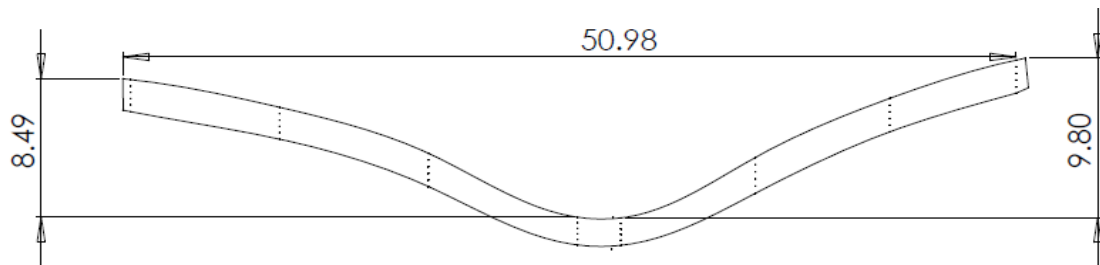
เกราะแผ่นหน้า

AI2



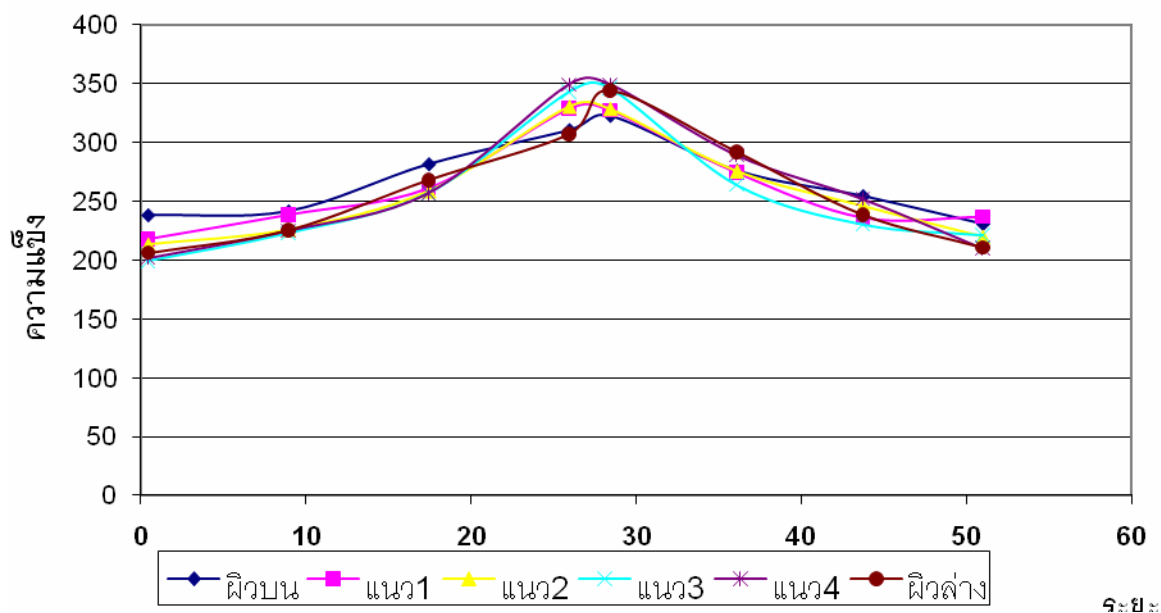
เกราะแผ่นหลัง

รูปแสดงรูปแบบการยิงทดสอบเกราะปืนพกด้วยกระสุน 357



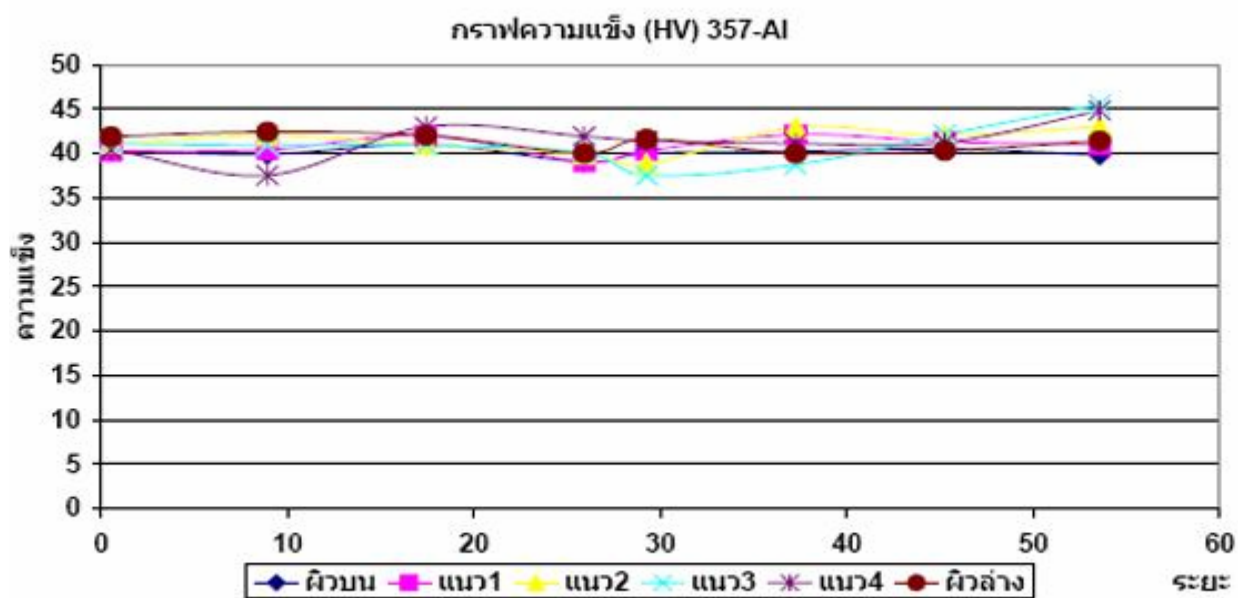
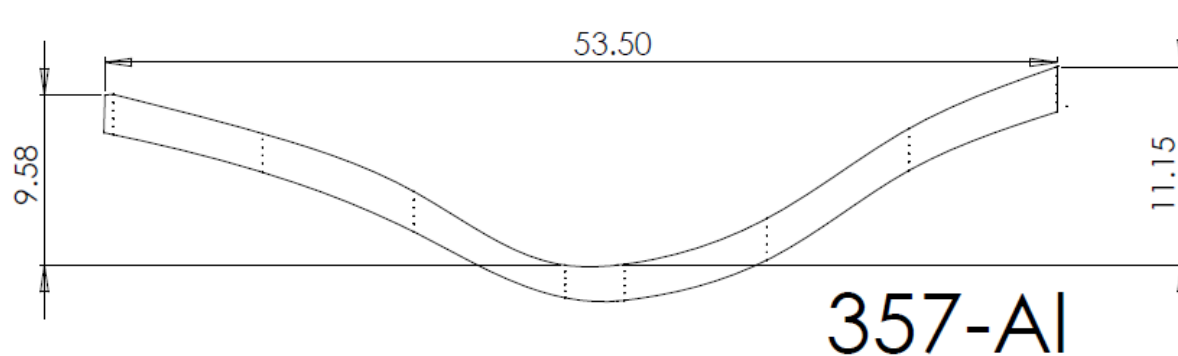
357-SS

กราฟความแข็ง (HV) 357-SS



รูปที่ 50 ค่าความแข็งที่เป็นผลกระทบจากการยิงด้วย กระสุน .357

ที่ระยะความหนา 0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 มม.ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 51 ค่าความแข็งที่เป็นผลกระทบจากการยิงด้วย กระสุน .357 ที่ระยะความหนา 0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 มม.ของแผ่นอลูมิเนียม

การยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 1

ทิศทางการยิง / กระสุนเข้าปะทะ



ยิงด้วยกระสุน M16

HS 3.7 2-1



เกราะแผ่นหน้า

AI 1



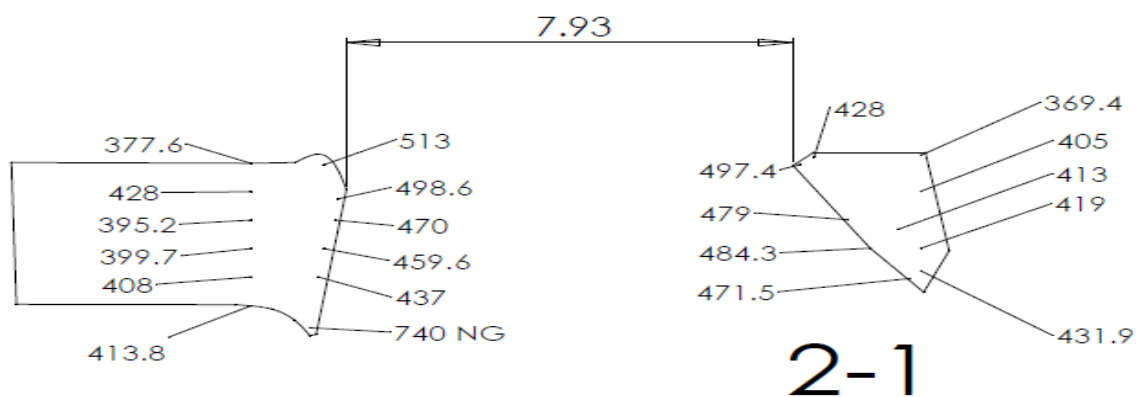
เกราะแผ่นกลาง

HS 3.7 3-1

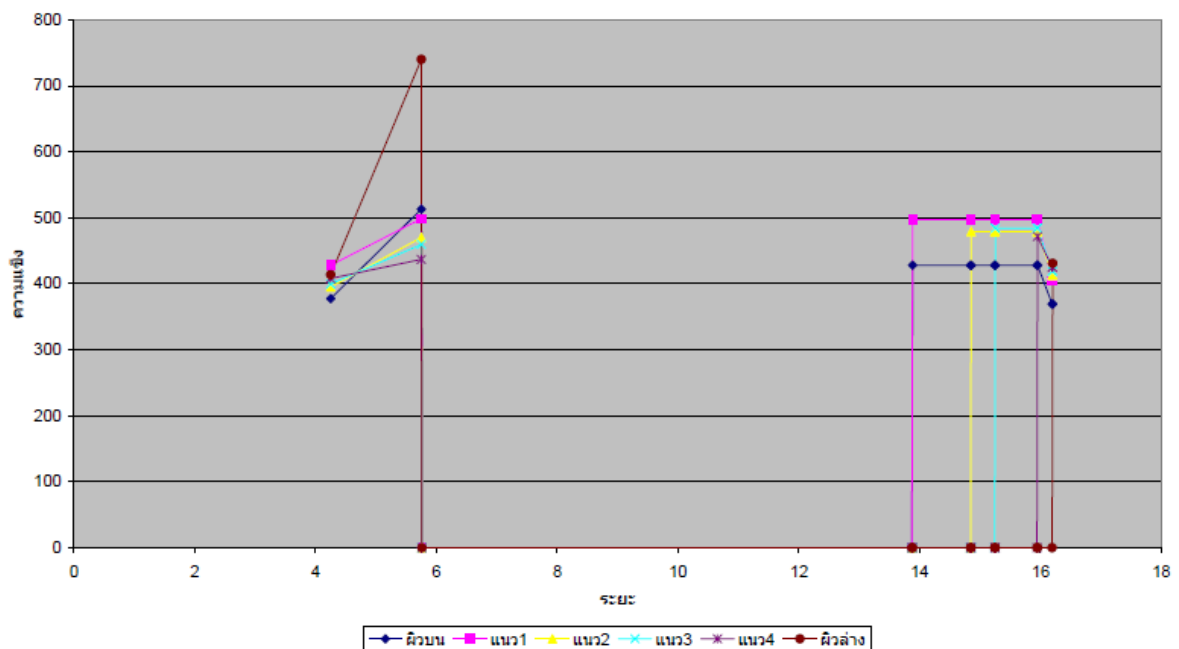


เกราะแผ่นหลัง

รูปที่ 52 รูปแบบการยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 1

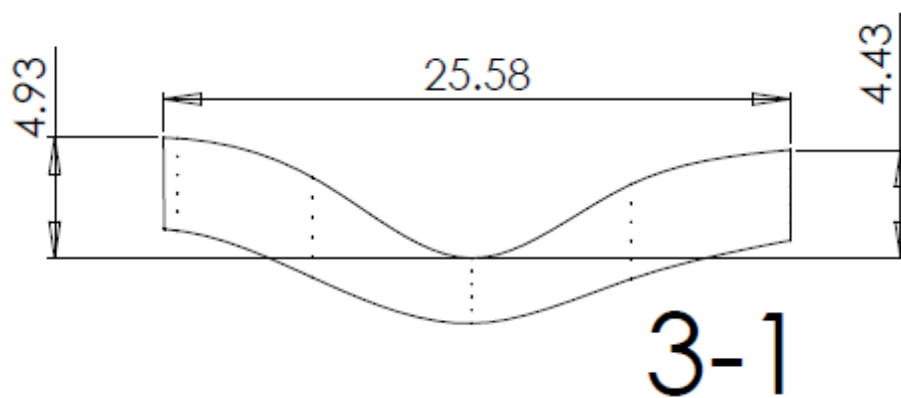


กราฟความแข็ง (HV) 2-1

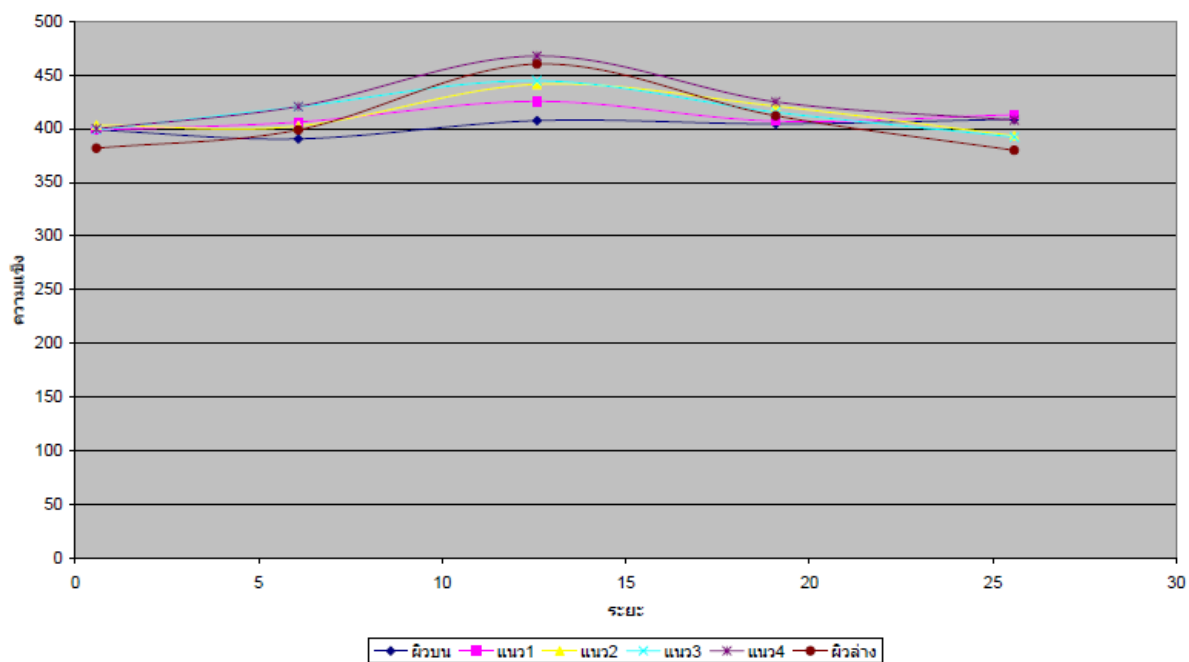


รูปที่ 53 ค่าความแข็งที่เป็นผลกระทบจากการยิงด้วย กระสุน M16

บนแผ่นเหล็กกล้าชุบแข็ง แผ่นหน้า ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 1



กราฟความแข็ง (HV) 3-1



รูปที่ 54 ค่าความแข็งที่เป็นผลกระทบจากการยิงด้วย กระสุน M16
บนแผ่นเหล็กกล้าชุบแข็ง แผ่นหลัง ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 1

การยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 2

ทิศทางการยิง / กระสุนเข้าปะทะ



ยิงด้วยกระสุน M16

HS 3.7 2-2



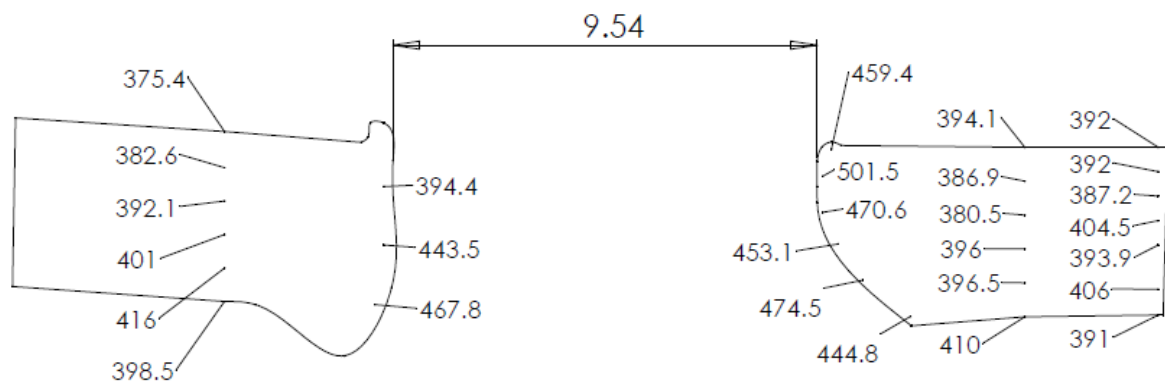
เกราะแผ่นหน้า

HS 3.7 3-2



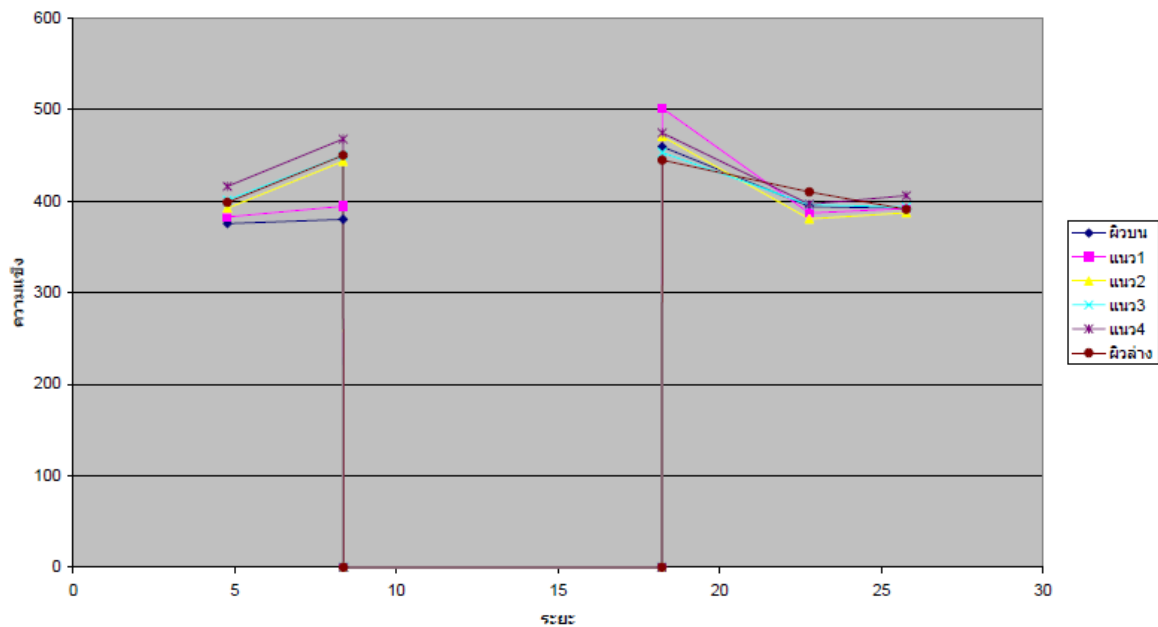
เกราะแผ่นหลัง

รูปที่ 55 รูปแบบการยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 2



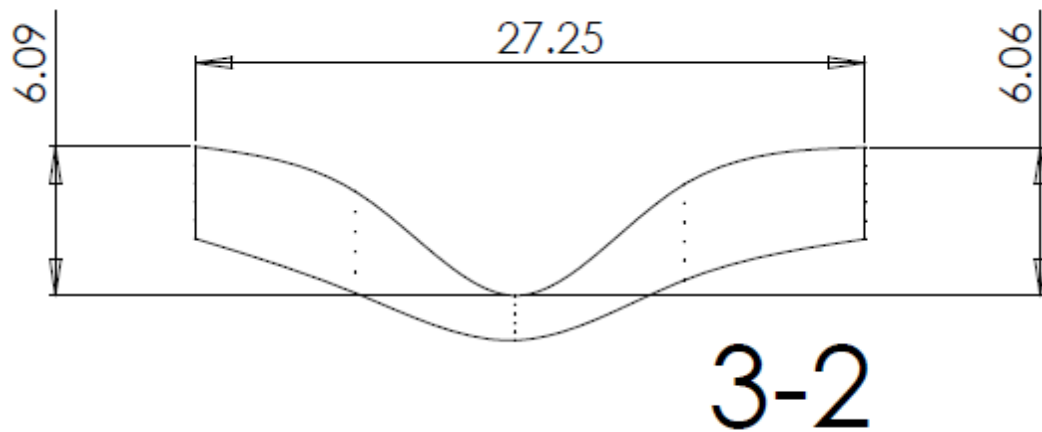
2-2

กราฟความแข็ง (HV) 2-2

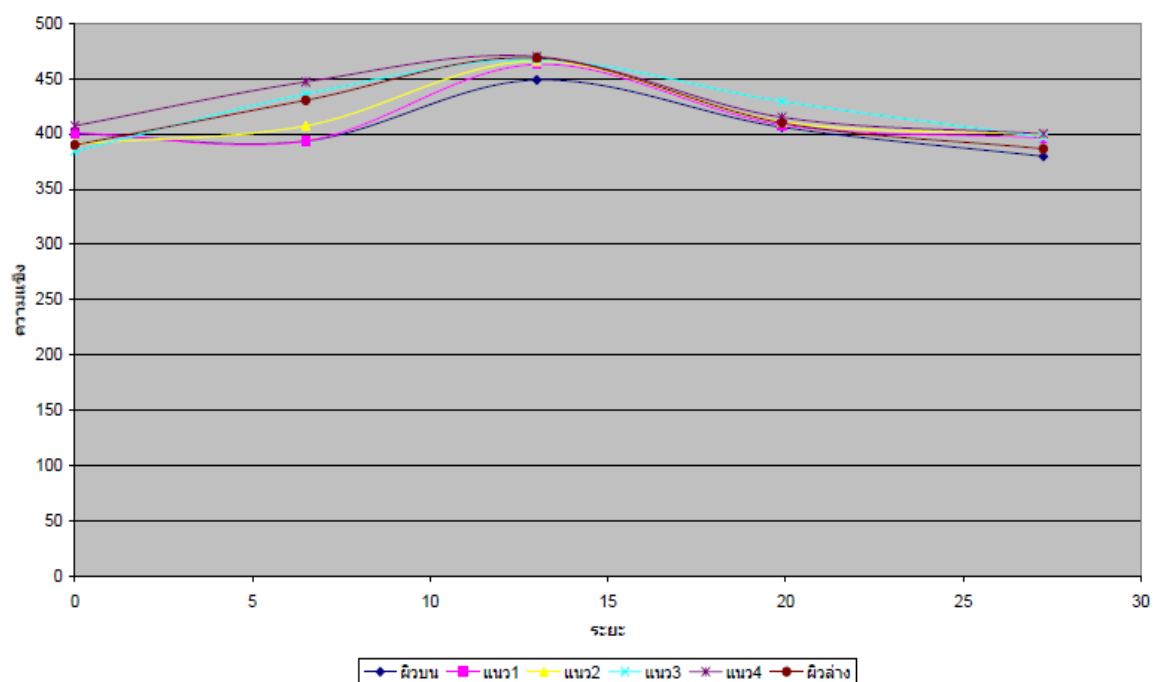


รูปที่ 56 ค่าความแข็งที่เป็นผลกระทบจากการยิงด้วย กระสุน M16

บนแผ่นเหล็กกล้าชุบแข็ง แผ่นหน้า ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 2



กราฟความแข็ง (HV) 3-2



รูปที่ 57 ค่าความแข็งที่เป็นผลกระทบจากการยิงด้วย กระสุน M16
บนแผ่นเหล็กกล้าชุบแข็ง แผ่นหลัง ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 2