



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย และพัฒนา เกราะป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาด และ กระสุนปืนเล็ก  
ยาวที่เป็นอาวุธสงคราม

The Research and Development of Ballistic Body Armour

โดย

พลเอก อภิชาติ ทิมสุวรรณ และคณะ

## รายงานວิจัยฉบับສມບູຮົນ

### ໂຄງກາຣວິຈີຍແລະພັນນາເກຣະປຶກກັນກະສຸນປິນພົກຖຸກຂາດ ແລະ ກະສຸນປິນເລື້ອຍາວທີ່ເປັນອາວຸໂສງຄຣາມ

The Research and Development of Ballistic Body Armour

#### ຄະນະຜູ້ວິຈີຍ

#### ສັງກັດ

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| 1. ພລເອກ ອກີຫາຕີ ທິມສຸວຽນ    | ສຳນັກວິທະຍາສາສຕົວແລະເທັກໂນໂລຢີກລາໂຮມ               |
| 2. ພັນຕັງ ຖະພລ ເໝື່ຍນບຸນູຄຖື | ບຣີ່ຊັ້ນ ພຣີ່ຊີ່ພາວົງ ຈຳກັດ                        |
| 3. ດຣ. ຊັບຄົງ ສອງຄົງ         | ມາຮັກວິທະຍາລັບເທັກໂນໂລຢີພະຈອມເກຳລ້າ<br>ພຣະນຄຣເໜື່ອ |
| 4. ວະ. ສມນິກ ວັດນາສອງຄົງ     | ມາຮັກວິທະຍາລັບເທັກໂນໂລຢີພະຈອມເກຳລ້າ<br>ພຣະນຄຣເໜື່ອ |
| 5. ດຣ. ເນີມາ ສວ່າງວຽນ        | ມາຮັກວິທະຍາລັບເທັກໂນໂລຢີພະຈອມເກຳລ້າ<br>ພຣະນຄຣເໜື່ອ |
| 6. ນາຍ ມົງຄລ ພູມແກ້ວ         | ມາຮັກວິທະຍາລັບເທັກໂນໂລຢີພະຈອມເກຳລ້າ<br>ພຣະນຄຣເໜື່ອ |

#### ຊຸດໂຄງກາຣອຸດສາຫກຮຽມປຶກກັນປະເທດ

ສັນບັນດາໂດຍສຳນັກງານກອງທຸນສັນບັນດາກາຣວິຈີຍ (ສກວ.)

## สารบัญ

หน้า

### ส่วนรายงานเนื้อหา

1. กลไกในการเจาะทะลุของภัยสุน	1
2. คุณลักษณะที่สำคัญของเกราะภัยสุน	7
2.1 เกราะปืนพก	7
2.2 เกราะปืนเล็กๆ	7
3. ประเภทของเสือเกราะภัยสุน	8
3.1 วัสดุโลหะ	8
3.2 วัสดุเซรามิก	9
3.2.1 ผลกระทบจากการอยแตกเริ่มต้น	10
3.2.2 ผลกระทบของการหดตัวของวัสดุยึดติด	12
3.3 วัสดุเส้นใย	18
3.4 เกราะวัสดุผสม (Composite)	18
4. เกราะโลหะ	20
4.1 ผลกระทบของรูปทรงหัวภัยสุนต่อความเสียหายของแผ่นเกราะ	21
4.2 ผลกระทบจากการแข็งของแผ่นเกราะ	25
4.3 ผลกระทบจากการซั่นของแผ่นเกราะ	26
4.4 ผลกระทบจากการหดตัวของแผ่นเกราะ	26
4.5 ผลกระทบทางความร้อน	27
5. การปรับปรุงคุณภาพโลหะ	28
5.1 กระบวนการร้อนของเหล็กกล้า	28
5.2 โครงสร้างเหล็กที่ได้จากการร้อน	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 การปรับปรุงความเนื้อๆ (Normalizing)	34
5.9 การชุบผิวแข็งโดยการอบคาร์บอน (Carburization Hardening)	44

<b>6. โครงสร้างวัสดุเซรามิก</b>	<b>47</b>
6.1 โครงสร้างผลึกของเซรามิก	47
6.2 คุณสมบัติของเซรามิก	49
6.2.1 คุณสมบัติเชิงกลของเซรามิก	49
6.2.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเซรามิก	54
6.2.3 อะลูมินาเซรามิก	60
<b>7. ขั้นตอนการเตรียมเซรามิกสำหรับประกอบเป็นเกราะ</b>	<b>67</b>
7.1 ขั้นตอนการทำเซรามิก	67
7.2 กระบวนการขึ้นรูปเซรามิก	68
<b>8. การออกแบบเสื้อเกราะและแผ่นเกราะ</b>	<b>70</b>
8.1 ส่วนประกอบของเกราะและเสื้อเกราะ	70
8.2 ชุดเสื้อเกราะ	71
8.3 ภาพร่างแบบชุดเสื้อเกราะสำหรับทำการผลิต	72
8.4 การกำหนดสัญลักษณ์แผ่นเกราะ	72
<b>9. ขั้นตอนการประกอบแผ่นเกราะ</b>	<b>75</b>
<b>10. คุณลักษณะเฉพาะทางวิชาการ</b>	<b>75</b>
<b>11. วิธีการผลิตเสื้อเกราะและแผ่นเกราะกันกระสุน</b>	<b>76</b>
12. การควบคุมคุณภาพผ้าและวัสดุประกอบสำหรับการตัดเย็บตัวเสื้อ	76
13. การผลิตแผ่นเกราะ (ARMOR PANEL)	76
14. การผลิตตัวเสื้อ (FRONT AND BACK CARRIER PROCESS)	79
<b>15. ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน</b>	<b>80</b>
ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน ครั้งที่ 1	80
ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	82
ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile test)	85
ผลการทดสอบ Micro Hardness Test	87
การยิงทดสอบเกราะปืนพกด้วยกระสุน .44	88
การยิงทดสอบเกราะปืนพกด้วยกระสุน .357	90
การยิงทดสอบเกราะกันอาชุธสงครามแบบที่ 1	92
การยิงทดสอบเกราะกันอาชุธสงครามแบบที่ 2	94
การยิงทดสอบเกราะกันอาชุธสงครามแบบที่ 3	96
ผลการตรวจสอบเกณฑ์ (Microstructures)	100

ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน รอบที่ 2	102
แบบฟอร์มบันทึกผลการยิงทดสอบเกราะกันกระสุน	103
รูปแบบการประกอบเกราะ	126
ตารางแสดงความหมายสัญลักษณ์	129
ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน รอบที่ 3	132
แบบฟอร์มบันทึกผลการยิงทดสอบเกราะกันกระสุน	142
<b>16. การทดสอบความแข็ง</b>	<b>148</b>
16.1 ผลการทดสอบความแข็ง Tensile test	148
กราฟผลการทดสอบแรงดึง Tensile test	150
<b>17. การตรวจสอบความลึกความกว้างของรูกระสุนปืน</b>	<b>152</b>
17.1 วิธีการทดสอบการวัดความลึกและความกว้างของรูกระสุนปืน ด้วยเครื่อง 3D OPTICAL SCANNING	152
17.2 ผลการทดสอบ การวัดความลึกและความกว้างของรูกระสุนปืน	158
<b>18. ผลการทดสอบด้วยปืนเล็กๆน้ำ กระสุนปืน M16 และ AK47 AP</b>	<b>165</b>
<b>สรุปผลการทดลอง</b>	<b>166</b>
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>167</b>

## 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 ขึ้นกับองค์ประกอบหลักๆ ของการ ดังนี้

- คุณสมบัติวัสดุ
- ความเร็ว
- รูปร่างของหัวกระสุน
- รูปแบบการรองรับของเป้าหมาย
- อัตราส่วนตามขนาด ของกระสุนกับแผ่นเกราะ

1. คุณสมบัติ : วัสดุที่แตกต่างกันจะมีรูปแบบการแตกหักที่แตกต่างกัน เช่นเซรามิก กับโลหะ โดยเซรามิกซึ่งเป็นวัสดุเปราะ (Brittle material) จะมีรูปแบบการแตก ขยายตัวออกเป็นวงกว้าง ในลักษณะรอยร้าว เนื่องจากวัสดุเซรามิกในขณะรับแรงกระแทกของกระสุนจะเป็นแรงในลักษณะ แรงกระทำด้านข้างหรือตามแนวภาชนะด้วยแรงน้ำหนักตัวของแผ่นเกราะ ซึ่งส่งผลให้เกิดโมเมนต์ดัด ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างแรงดึง แรงดันในเนื้อวัสดุ

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

ในส่วนของโลหะโดยทั่วไปมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้ดี และมีความยืดหยุ่น (Elongation) . ในการนีนี้ รอยแตกหักจะมีลักษณะที่แตกต่างโดยสิ้นเชิงกับวัสดุเซรามิก โดยวัสดุจะมีการยืดตัวตามแรงกระสุน ก่อนเกิดการฉีกขาด

2. ความเร็ว : ความเร็วจัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจากสามารถป้องกันพลังงาน จลน์ของกระสุนได้

ความเร็ว สามารถแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ ความเร็วเชิงเส้น และความเร็วเชิงมุม ทั้งนี้ความเร็วเชิงเส้นมีผลต่อรูปแบบการเสียหายอย่างชัดเจน เนื่องจากมีทิศทางเดียวกับแนวการเจาะทะลุของกระสุน โดยเมื่อพลังงานจลน์เชิงเส้นของกระสุนมีมากกว่างานที่เกิดจากการเจาะทะลุของกระสุนในวัสดุได้แสดงว่ากระสุนยอมสามารถเจาะรูผ่านวัสดุนั้นได้ โดยที่

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

$E_k$  : พลังงานจลน์

$E_{k1}$  : พลังงานจลน์เชิงเส้น

$E_{k2}$  : พลังงานจลน์เชิงมุม

ผลลัพธ์ของกระสุน ย่อมมาจากการระเบิดตัวของดินปืนของลูกกระสุนนั้นๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการระเบิดตัวของดินปืนได้เปลี่ยนเป็นผลลัพธ์ในส่วนต่างๆ หลายประการ เช่น ผลลัพธ์ความร้อน ผลลัพธ์เสียง ผลลัพธ์การสั่นสะเทือนของลำกล้อง ผลลัพธ์ของดินปืน เป็นต้น

เมื่อพิจารณาว่าผลลัพธ์ของดินปืน เชิงเส้น เป็นผลลัพธ์ที่ต้องการจากกระบวนการยิง ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าผลลัพธ์ของดินปืน เป็นผลลัพธ์ของกระบวนการ (Lost) ดังนี้

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

$E$  : ผลลัพธ์ของดินปืน

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

$E_{k1}$  : ผลลัพธ์ของดินปืน

$m$  : มวล

$v$  : ความเร็ว

พิจารณาจะต้องคำนวณด้วยการทดสอบตามมาตรฐานของกระทรวงกลาโหมได้ดังตารางด้านไปนี้

มาตรฐาน	ขนาด	น้ำหนัก	ความเร็ว	ผลลัพธ์ของดินปืน
		กรัม	เมตร/วินาที	จูล
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 แสดงระดับผลลัพธ์ของดินปืน [1]

จากการพิจารณาในเรื่องของผลลัพธ์ของดินปืนสามารถกล่าวได้ว่า กระสุนจะสามารถทะลุผ่านวัสดุใดๆ ก็ได้ เมื่อกระสุนมีผลลัพธ์ของดินปืนมากกว่างานที่เกิดจากการเจาะทะลุของแผ่นเกราะ

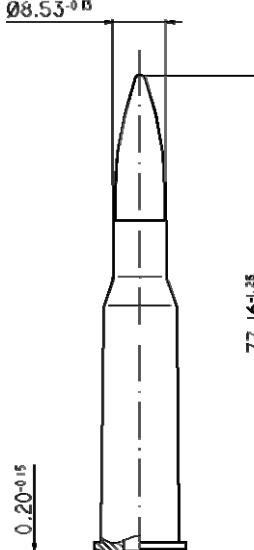
$$E_{k1} > W$$

$W$  : งานที่เกิดจากการเจาะทะลุของแผ่นเกราะ

จากสมการข้างต้นยังไม่สามารถใช้คำนวณได้ว่าจะเกิดการเจาะทะลุแผ่นเกราะหรือไม่ เนื่องจากงานที่เกิดจากการเจาะทะลุแผ่นเกราะนั้นขึ้นกับกระบวนการ และรูปแบบการเสียหายของเกราะนั้นๆ ทำให้ไม่สามารถคำนวณได้โดยง่าย ซึ่งจำเป็นต้องมีการทดลองถึงจะประเมินงานที่เกิดจากการเจาะทะลุแผ่นเกราะ ตามองค์ประกอบนั้นๆ ได้ (Environments)

3. รูปร่างของหัวกระสุน : รูปร่างที่แตกต่างกันส่งผลให้รูปแบบการเสียหายต่างกันดังตาราง

ด้านล่างแสดงลักษณะหัวกระสุน

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

ตารางที่ 2 แสดงรูปร่างของกระสุน

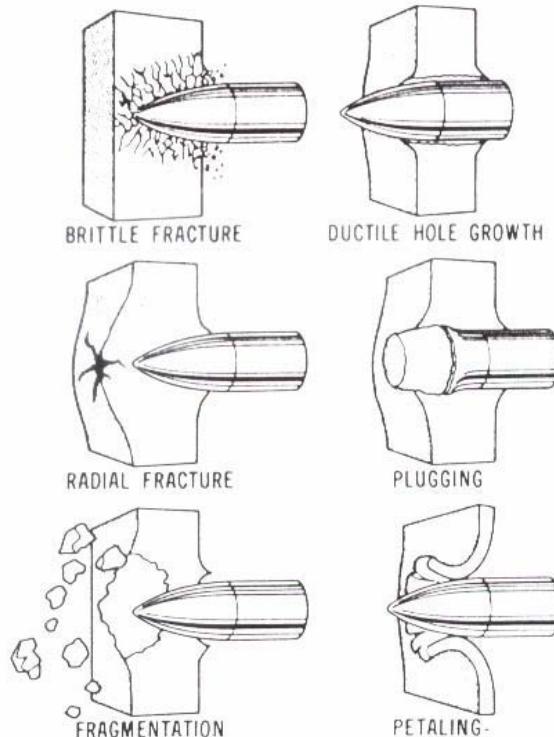
จากตารางแสดงให้เห็นว่ารูปร่างหัวกระสุนแต่ละชนิดแตกต่างกัน จากรูปร่างที่แตกแต่งกันนี้ทำให้ภาระของแผ่นเกราะที่เกิดจากการกระทำของหัวกระสุนชนิดต่างหากต่างกันออกไปและมีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุแผ่นเกราะด้วย โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4. รูปแบบการรองรับของเป้าหมาย : มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเป้าหมาย และแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระแทกของกระสุน เช่นเมื่อมีวัสดุรองหลัง กับไม้มีวัสดุรองก็มีผลต่อการยุบตัวที่ต่างกัน เพราะมีแรงต้านทานการเคลื่อนที่ ที่ต่างกัน

ในการทดสอบแผ่นเกราะมาตรวัดฐานของกระตรวจกลาให้มีระดับเจนว่าจะต้องรองหลังแผ่นเกราะด้วยดินน้ำมัน ที่มีความหนืดตามที่กำหนด ทั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดแรงปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน กับเกราะขณะที่สวมใส่กับร่างกายมนุษย์นั้นเอง

### รูปแบบการเจาะทะลุของข่องแผ่นวัสดุเมื่อรับแรงกระแทก

จากการสรุป ของ Backman & Goldsmith (1978) และ Backman (1976) ซึ่งอ้างอิงในเอกสาร [4] สามารถแบ่งรูปแบบการเสียหาย ของขึ้นงาน แผ่นบาง จนถึงขึ้นงานที่มีความหนาปานกลาง ได้ดัง รูปที่ 1



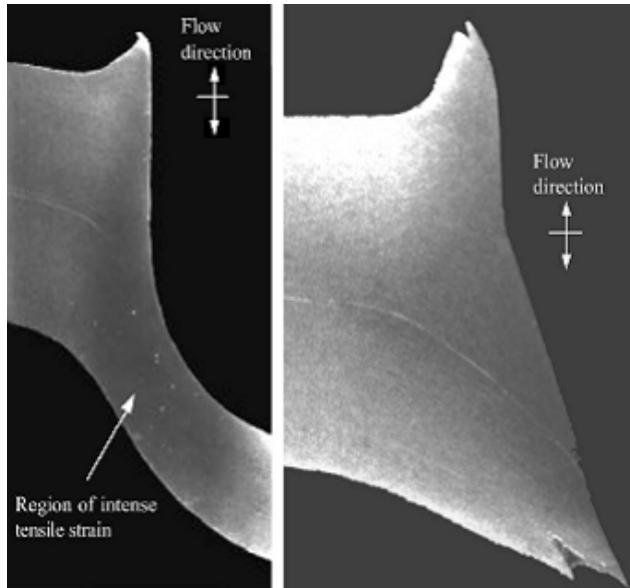
รูปที่ 1 รูปแบบการเสียหายแบบต่างๆ [4]

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

อย่างไรก็ตาม ในการเสียหายจริงๆ นั้น อาจเกิดการเสียหายในหลายรูปแบบ ร่วมกัน เช่น เกิด Ductile Hole Growth และ เกิดความเสียหาย Plugging ร่วมด้วย

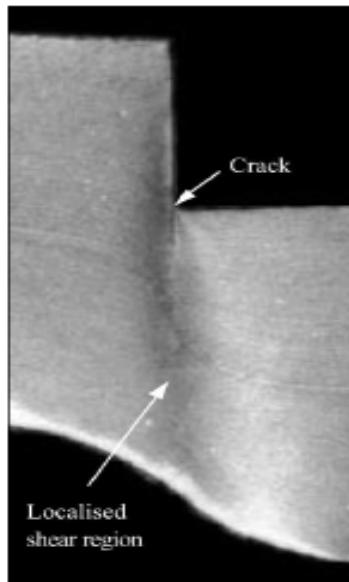
1. Brittle Fracture: เป็นรูปแบบที่เกิดกับวัสดุที่ทนความเค้นอัดได้น้อย
2. Radial Fracture: มักเกิดกับวัสดุจำพวกเซรามิก เป็นจากเป็นวัสดุที่ทนความเค้นอัด ได้ดี แต่ ทนต่อความเค้นดึงได้น้อย และบริเวณด้านหลังของการชนจะเกิดความเค้นแรงดึงมากในเวลาอัน สั้น ทำให้วัสดุเริ่มแตกจากด้านหลังก่อนแล้วแพร่คลุมไปในวงกว้าง

3. Fragmentation: มักเกิดขึ้นคู่กับ Radial Fracture ในวัสดุจำพวกเซรามิก
4. Ductile Hole Growth: เป็นรูปแบบที่เกิดกับวัสดุโลหะเนื้อเยื่า ที่ถูกกระแทกด้วย วัตถุหัวครึ่งวงกลม และวัตถุหัวแหลมดังรูปที่ 2 เนื่องจากจะเกิดเป็นชั้นๆ และขยายวงออกไป



รูปที่ 2 แสดงการเสียหายในรูปแบบ Ductile Hole Growth [5]

5. Plugging: เป็นรูปแบบที่มีการศึกษา และทดลอง เป็นจำนวนมากมาก เกิดขึ้นจากการกระแทกับ วัตถุหัวครึ่งวงกลม และวัตถุหัวตัดตรง โดยที่ความเร็วในการกระแทกหรือ การชนนั้นมีความเร็ว ใกล้เคียงกับ Ballistic Limit หรือความเร็วที่ต้องการน้อยสุด สำหรับการเจาะทะลุ โดยการชนกับ แผ่นที่มีความหนานั้น จะเกิดเศษรูปทรงกระบอกที่มีรัศมีใกล้เคียงกับวัตถุที่พุ่งมาชน การเสียหาย แบบ Plugging เป็นการเสียหายที่เกิดจากแรงตัดเฉือน หรือที่เรียกว่า Adiabatic shearing ซึ่ง มีคุณลักษณะเฉพาะในการเกิดแนวการตัดเฉือนแคบๆ ดังรูปที่ 3 พลังงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลง รูปร่างจะเปลี่ยนเป็นความร้อนทั้งหมด และเปลี่ยนรูปร่างด้วยความเร็วสูง (High strain rate) จาก รายงานของ Moss (1980) ซึ่งอ้างอิงในเอกสาร [4] ให้ผล Strain rate ที่เกิดกับ Adiabatic shear band สูงถึง  $10000000\text{ s}^{-1}$  และอุณหภูมิภายใน adiabatic shear band สูงถึง  $100000^\circ\text{C}$  ผล จากรูปแบบการเสียหายในระบบ Maximum shear stress การเกิดความเสียหายแบบ Plugging ค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลง หมุนตอกกระแทบ และรูปทรงของหัววัตถุ กล่าวคือเมื่อ เปลี่ยนรูปร่าง และหมุนตอกกระแทบเล็กน้อย ก็อาจไม่เกิดความเสียหายแบบ Plugging อย่างเห็นได้ ชัด



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 โดยการลดมุมตกรอบ และปัจจัยอื่นๆ เช่นความแข็งผิวที่เหมาะสม (Optimized surface hardness) ของวัสดุเกราะ

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าวัสดุเกราะที่เป็นโลหะแข็ง เปราะ มีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุได้ไม่ดีนัก เมื่อเทียบกับเกราะที่มีความแข็งสูงแต่ยังมีคุณสมบัติเหนียวในเนื้อวัสดุ

## 2. คุณลักษณะที่สำคัญของเกราะกันกระสุน

จากการศึกษารูปแบบการเสียหายของวัสดุและการทดสอบต่างๆ ที่เกี่ยวกับเกราะกันกระสุน จะพบว่า พารามิเตอร์สำคัญอื่นๆ กับ รูปแบบหัวกระสุน, ความเร็ว, และคุณสมบัติวัสดุที่นำมาทำเกราะ มีผลต่อรูปแบบความเสียหายของเกราะ การออกแบบโดยปรับปรุงพารามิเตอร์เหล่านี้ เพื่อให้เกิดรูปแบบการเสียหายที่ใช้พลังงานมากที่สุด ย่อมมีผลดีก่อการเพิ่มความหนาของวัสดุเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นคุณลักษณะที่สำคัญของเกราะจะต้องจัดการกับรูปแบบการเสียหายที่เหมาะสมต่อสภาพการใช้งาน ซึ่งในโครงการนี้ แบ่งการใช้งานเกราะ 2 ประเภท คือเกราะปืนพก และเกราะปืนเล็กๆที่เป็นอาชญากรรม

### 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 จากการศึกษา可知 ในการเสียหายของวัสดุ และการทดสอบ สามารถสรุปได้ว่าควรใช้วัสดุเนื้อยา และบางพอที่จะให้เกิดการดัดโค้ง เพื่อเป็นการเพิ่มภาระให้กับหัวกระสุน

#### คุณลักษณะที่สำคัญของเกราะกันกระสุนปืนพก

- ความแข็งผิวสูงพอที่รับแรงกระแทก แต่ไม่ทำให้วัสดุเสียหายแบบ Plugging
- การยึดตัวสูง จะทำให้เปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของหัวกระสุนไปเป็นพลังงานที่ทำให้ยึดตัว
- ความแข็งแรงสูง
- น้ำหนักเบา

### 2.2 เกราะปืนเล็กๆ

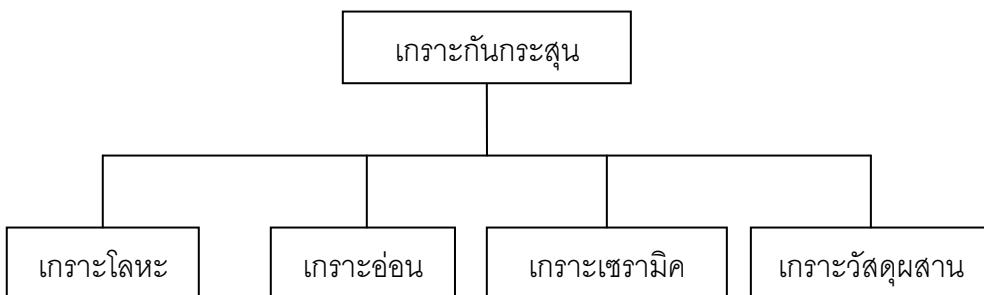
เกราะปืนเล็กๆ จะต้องผ่านการทดสอบ กับกระสุน 7.62 mm. 308 Winchester FMJ น้ำหนักหัวกระสุน 10.8 กรัม ความเร็ว 838 m/s กระสุนที่ใช้มีความเร็วสูง หัวกระสุนรูปทรงแหลม มีอำนาจการเจาะทะลุสูง ดังนั้นจึงควรลดอัตราการทะลุทะลวงของกระสุนโดยการทำลายหัวกระสุนด้วยวัสดุชั้นแรก โดยการใช้วัสดุที่แข็งมากๆ เพื่อทำลายหัวกระสุน และให้วัสดุชั้นต่อๆ ไป รับพลังงานจลน์ และความเร็วที่เหลืออยู่

## คุณลักษณะที่สำคัญของเอกสาระกันกระสุนปืนเล็กๆ

1. แผ่นเอกสาระชั้นแรกมีคุณลักษณะความแข็ง และความแข็งที่ผิวสูงมาก เพื่อทำลายหัวกระสุน
2. แผ่นเอกสาระชั้นต่อไปต้องมีความหนึ่งและแข็งแรงพอที่รับพลังงานที่เหลือ
3. น้ำหนักรวมของชุดเอกสาระต้องมีน้ำหนักเบา
4. สามารถกันสะเก็ดที่เกิดจากการทำลายหัวกระสุนได้

## 3. ประเภทของเสื้อเอกสาระกันกระสุน

เสื้อเอกสาระกันกระสุนสามารถแบ่งประเภทได้ตามวัสดุหลักที่ใช้ในการลดอำนาจการทะลุทะลวงของกระสุน ซึ่งทำให้มีกระบวนการในการหยุดยั้งกระสุนต่างๆ กัน โดยชั้นกัปคุณสมบัติเฉพาะตัว ของวัสดุกันกระสุนแต่ละชนิด ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้



### 3.1 วัสดุโลหะ

เอกสาระที่ใช้วัสดุประเภทโลหะ จะใช้คุณสมบัติเด่นของโลหะในด้านความแข็งแรงของโลหะ ซึ่งโลหะ มีการได้ถูกใช้เพื่อทำเป็นเอกสาระตั้งแต่สมัยโบราณแล้ว และในปัจจุบันโลหะก็ยังสามารถนำมาใช้ทำ

เอกสาระกันกระสุนได้ โดยจุดเด่นของเอกสาระโลหะคือเป็นเอกสาระแข็ง ทำให้สามารถลดการกระทบกระเทือน ต่อร่างมนุษย์เมื่อถูกยิงได้มากกว่าเอกสาระอ่อน

ความสามารถในการกันกระสุนของเอกสาระ มีประสิทธิภาพดีในการกันกระสุนปืนพก เนื่องจาก กระสุนปืนพกมีความเร็วต่ำ หัวกระสุนมน ไม่มีคมตัด ทำให้สามารถใช้แผ่นโลหะ ในการทำเอกสาระ โดยใช้แผ่นโลหะซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดตัวสูง ดูดซับพลังงานของกระสุนปืนจากการยึดตัวของแผ่นเอกสาระ

### 3.2 วัสดุเซรามิก

เกราะที่ใช้วัสดุประเภทเซรามิกเป็นวัสดุหลัก จะใช้คุณสมบัติเด่นของเซรามิกในด้านความแข็ง ซึ่งทำให้สามารถป้องกันหรือลดจำนวนการเจาะทะลุของกระสุนที่มีความคม มีความเร็ว และความสามารถในการเจาะทะลุสูง

หลักการที่ทำให้สามารถกันกระสุนที่มีความคมได้เนื่องจาก เซรามิกมีความแข็งสูงมาก เมื่อเทียบกับโลหะที่นำมาเป็นลูกกระสุน ทำให้ลูกกระสุนโดยหลักที่ทำลายทำให้ลดจำนวนในการเจาะทะลุไป การดูดซับพลังงานของหัวกระสุนของเกราะที่ใช้เซรามิกเป็นวัสดุหลักคือ พลังงานของกระสุนจะถูกใช้ในสองส่วน คือพลังงานที่ใช้ในการทำลายหัวกระสุนเองเพรำะแข็งน้อยกว่าเซรามิก และพลังงานที่ใช้ในการทำให้แผ่นเซรามิกแตกหัก

องค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ของเกราะที่ใช้วัสดุหลักเป็นเซรามิกคือ แผ่นรองหลังเนื่องจากเซรามิก เป็นวัสดุ perverse ที่จะแตกหักเมื่อถูกแรงกระแทก จึงจำเป็นต้องมีแผ่นรองหลังรับภาระ ในส่วนที่เหลือ และไม่ให้กระสุน และเซรามิกที่แตกออกทะลุเข้ามาทำอันตรายได อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความสามารถให้กับแผ่นเซรามิกด้วย

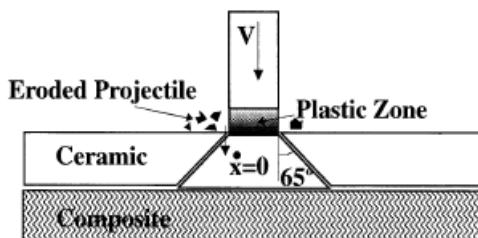


Fig. 1. Configuration at the end of the first phase.

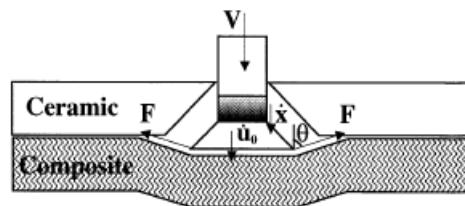


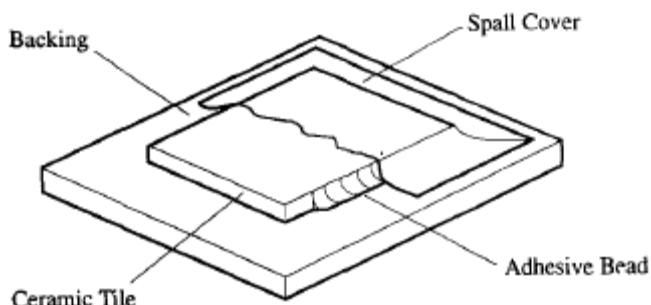
Fig. 2. Phenomenological description of the second phase.

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

ในการป้องกันกระสุนที่มีความเร็วสูง วัสดุที่สำคัญคือ เซรามิก ซึ่งนับว่าเป็นวัสดุที่เหมาะสมมากในการ เกราะกันกระสุน เพราะสามารถใช้ความหนามาก ๆ ได้เนื่องจากน้ำหนักเบา อีกทั้งมีความแข็งแรงสูงมาก และความแข็งที่ผิวของเซรามิกสูงมาก หมายความว่าการทำลายหัวกระสุน และเกิดการแตกหักในรูปแบบผสมระหว่าง Radial Fracture กับ Fragmentation ซึ่งเกิดจากการที่มีความแข็งสูง และเป็นวัสดุ perverse

### 3.2.1 ผลการทดสอบจากรอยแตกเริ่มต้น

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



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

	Alumina F A	E-glass composite	Sikaflex 221
Size (mm)	100 x 100	150 x 150	
Thickness (mm)	6	9(17 ply plain weave)	1 (approx.)
Composition	95% $\text{Al}_2\text{O}_3$	27% chlorinated polyester resin	polyurethane
Density ( $\text{kg m}^{-3}$ )	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 (m s <sup>-1</sup> )	Residual energy (g m s <sup>-1</sup> )	Velocity (m s <sup>-1</sup> )	Residual energy (g m s <sup>-1</sup> )	Distance from pre-crack (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 ผลการทดลองเบริ่งเทียบ ballistic limit velocity

ระหว่างชิ้นเซรามิกมาตรฐาน กับชิ้นที่มีรอยแตก[8]

Standard panels			Pre-cracked panels-all panels		Pre-cracked panels less than 5 mm from crack	
Designation	Range	V <sub>so</sub>	Range	V <sub>so</sub>	Range	V <sub>so</sub>
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		

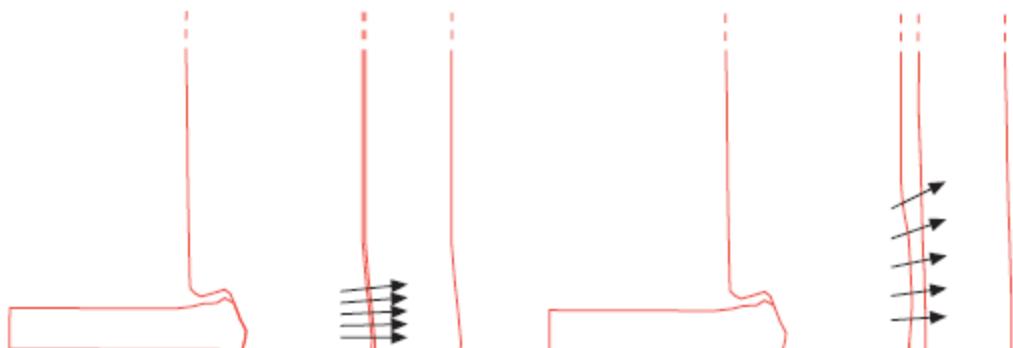
ตารางที่ 5 ผลการทดลองเบริ่งเทียบ ballistic limit velocity ระหว่างชิ้นเซรามิกมาตรฐาน กับชิ้นที่มีรอยแตก [8]

ขออภัย [8]

รายงานของ I. HORSFALL และ D. BUCKLEY [8] ได้สรุปผลการทดลองว่า เมื่อมีรอยแตกเริ่มต้นความสามารถในการกันกระสุนจะลดลง จากผลการทดลอง ความเร็วน้อยสุดที่กระเจาะสามารถกันกระสุนได้นั้นได้ลดลงจาก  $764 \text{ m s}^{-1}$  เป็น  $740 \text{ m s}^{-1}$  หรือลดลง 3%

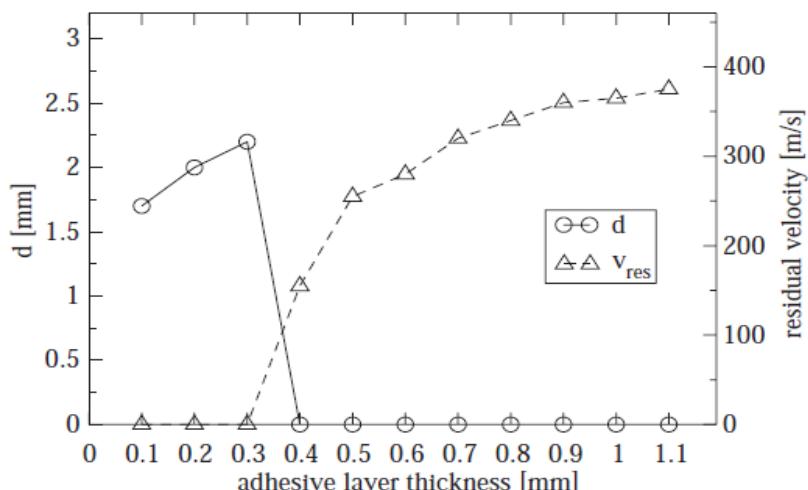
### 3.2.2 ผลกระทบของความหนาของวัสดุยึดติด

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



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

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นเมื่อชั้นวัสดุยึดติดมีความหนามากขึ้น มีผลให้แนวการส่งผ่านแรงกว้างขึ้น ทำให้วัสดุรับภาระน้อยลงได้ แต่การเพิ่มความหนาให้ชั้นวัสดุยึดติดประสานนั้นก็มีข้อจำกัดดังรูปที่ 7

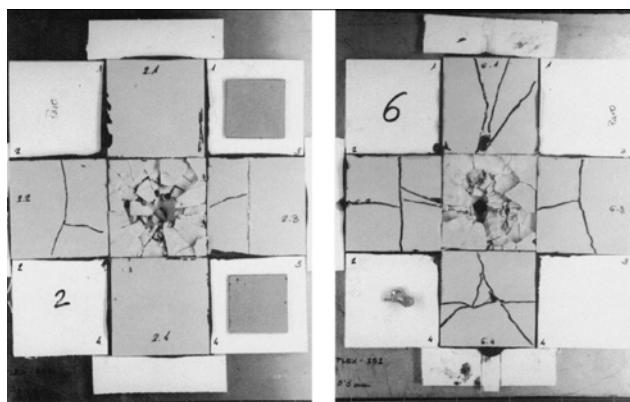


รูปที่ 7 แสดงความหนาที่ยังคงเหลือของเกราะ และความเร็วคงเหลือของกระสุน เปรียบเทียบกับความหนาของวัสดุยึดติด [9]

จากการพูดคุยของวัสดุยึดติด มีความหนาที่ดีที่สุดจากการทดลองคือ 0.3 ม.ม. เป็นจุดที่เกราะยังเหลือความหนามากที่สุด 2.25 mm กระสุนไม่ทะลุ หรือไม่มีความเร็วคงเหลือ กราฟในรูปที่ 7 เกิดจากการทดลองเปลี่ยนความหนาของชิ้นวัสดุยึดติดครั้งละ 0.1 mm กราฟในรูปที่ 7 จึงไม่ต่อเนื่อง ในช่วงความหนาของวัสดุยึดติดที่ 0.3-0.4 mm แสดงว่ากระสุนจะสามารถทะลุแผ่นเกราะได้ในช่วง 0.3-0.4 mm

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ทำให้มีความสามารถในการต้านทานกระสุนได้ ยกตัวอย่างเช่น ในการทดลองนี้ ชิ้นความหนาที่เหมาะสมคือ 0.2-0.3 mm จะได้เกราะที่มีประสิทธิภาพดี

การเพิ่มความหนาให้ชิ้นวัสดุยึดติดทำให้บริเวณการส่งผ่านแรงจากแผ่นเกราะเซรามิกกว้างมากขึ้น ดังรูปที่ 6 ทำให้แผ่นรองหลังรับได้มากขึ้น แต่ที่ความหนามากกว่า 0.3 ม.ม. วัสดุยึดติดไม่ได้ส่งผลในการขยายพื้นที่รับแรง เนื่องจากความหนาที่มากเกินทำให้แผ่นเซรามิกต้องถูกดัดตามแรงกระแทกมากเกินกว่าที่เซรามิกจะสามารถถูกดัดได้ จึงทำให้แผ่นเซรามิกแตกหักก่อนที่จะถ่ายภาระให้แผ่นรองรับ

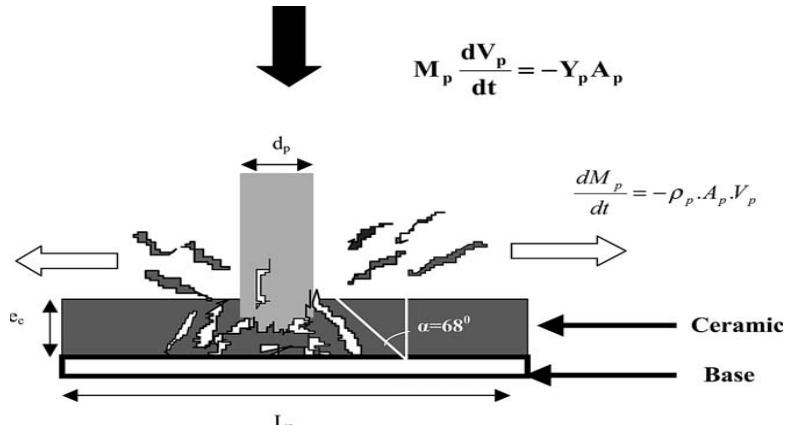


รูปที่ 8 แสดงผลการแตกกระเจาของแผ่นเซรามิกแผ่นชั้งเคียง ภาพด้านซ้ายชิ้นวัสดุยึดติดหนา และภาพด้านขวาชิ้นวัสดุยึดติดบาง [10]

D.P. Goncalves, และคณะ [15] ได้ทำการออกแบบวัสดุเกราะโดยใช้ เซรามิก 2 ชนิดด้วยกันคือ ใช้เซรามิกที่มีส่วนผสมทางเคมี 2 ชนิด และมีคุณสมบัติ ทางกลเหมือนกันแต่ทั้ง 2 ชนิดแต่จะมีลักษณะของ Grain size ไม่เท่ากัน เป็นเกราะชั้นแรกและชั้นที่ 2 เป็นโลหะ และได้ทำการทดสอบความสามารถค่าของการสูญเสียมวลของกระสุนปืน ความเร็วกระสุนปืน และการยุบตัวของเกราะแผ่นหลังที่เป็นโลหะ

จากการทดสอบจากการกรอบแผ่นเกราะของกระสุนปืนได้ผลการทดสอบดังนี้

### ขั้นตอนที่ 1



รูปที่ 9 แสดงผลการกระแทบจากการทดลองยิงเกราะเซรามิก และโลหะขั้นตอนที่ 1 [15]

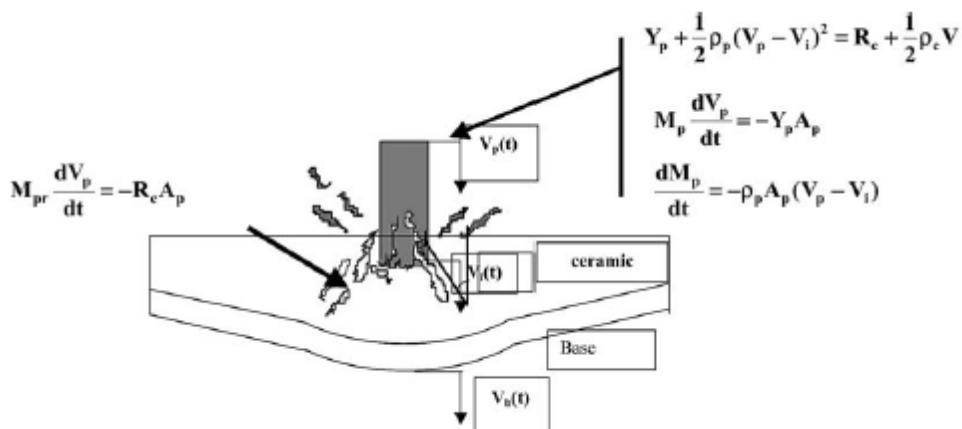
กระสุนกระแทบแผ่นเซรามิกจะเกิดการกระแทกและสั่นสะเทือนเป็นคลื่น(COMPRESSIVE shock wave) กระเจ้ายังออกไปทำให้เกิดการประลัยโดยวัสดุแตกกระเจาเป็นรูปกรวย มุมกระแทบ  $68^{\circ}$  C สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

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

โดย  $M_p$  คือมวลของแผ่นเซรามิก,  $Y_p$  คือ ค่าความยืดตัวของวัสดุ (Dynamic yield of the projectile material),  $\rho_p$  คือความถ่วงจำเพาะกระสุน,  $A_p$  คือหน้าตัดหัวกระสุน และ  $V_p$  คือความเร็วกระสุนเป็น

### ขั้นตอนที่ 2

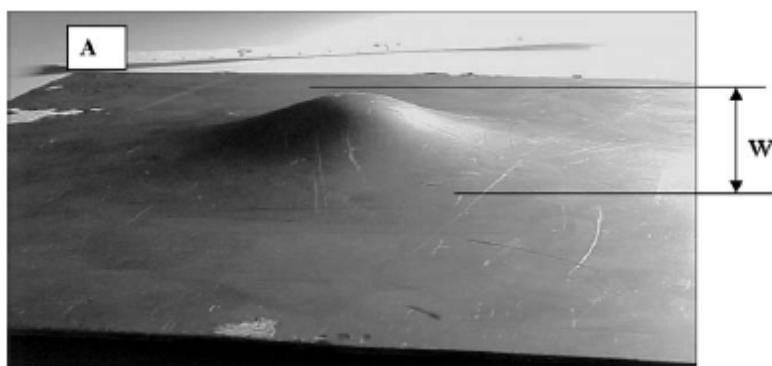


รูปที่ 10 แสดงผลการกระแทบจากการทดลองยิงเกราะเซรามิก และโลหะขั้นตอนที่ 2 [15]

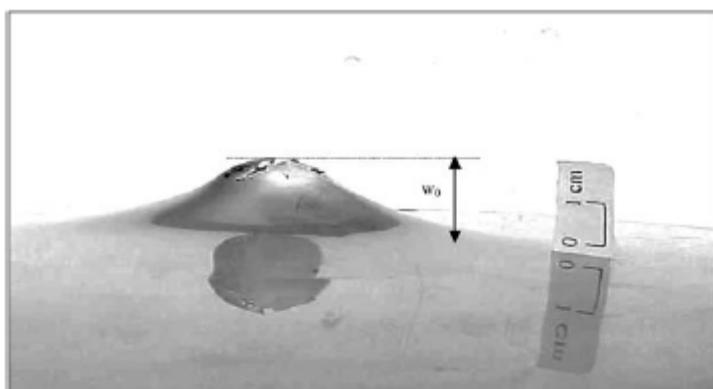
กระสุนผ่านชั้นเซรามิกมีความแตกต่างในผลของการกระแทกและความด้วยแรงอัดหัวกระสุนทำให้เซรามิกแตกกระจาย ในขณะเดียวกันแผ่นรองหลังเริ่มเปลี่ยนรูปแบบ Elastic ความเร็วจะแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือความเร็วกระสุนเป็นส่วนหลังของกระสุนปืน ( $V_p$ ) ส่วนที่สองคือ ความเร็วกระสุนส่วนหน้าที่หัวกระสุนกระแทบผ่านชั้นเซรามิก ( $V_i$ ) ดังนั้นความแตกต่างระหว่าง  $V_p$  และ  $V_i$  คืออัตราการแพร่ตัวผ่านชั้นเซรามิก ซึ่งสามารถเขียนได้สมการดังนี้

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

### ขั้นตอนที่ 3



ที่ 11.1 แสดงผลการกระแทบจากการทดลองยิงเกราะเซรามิก และโลหะ [15]



รูปที่ 11.2 แสดงผลการกระแทบจากการทดลองยิงเกราะเซรามิก และโลหะขั้นตอนที่ 3 [15]

คณานักวิจัย ได้วิเคราะห์การเสียรูปของแผ่นรองหลัง Aluminum จากการ平均ของกระสุนขนาด 5.56 mm. ดังนี้ เมื่อกระสุนปืนผ่านชั้นเซรามิกมีความแตกต่างในผลของการกระแทกและทำให้เกิดรอยนูนหรือเกิดการยืดขึ้นในแผ่นโลหะ สำหรับพลังงานการยุบตัว และพลังงานการดูดซับการกระแทก สามารถคำนวณหาได้จากสมการดังนี้

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

$E_p$  คือพลังงานจลน์,  $h$  คือความหนาของแผ่นวัสดุ,  $k$  คือ Deflection profile constant,  $n$  คือ Stress Constant,  $D$  คือ รัศมีลูกกระสุนปืน A คือค่าคงที่ของ Power law model  
ซึ่งสามารถนำไปใช้คำนวนหาพลังงาน และเลือกความหนาของแผ่นโลหะมาประกอบแผ่นเซรามิกได้ สรุปงานวิจัยของ Goncalves, [15]

การเพิ่มความแข็งของเซรามิกสามารถเพิ่มความต้านทานของกระสุนปืนได้ และการเพิ่มขนาดของ Grain Size จะเพิ่มประสิทธิภาพของเกราะด้วย โดยที่ไม่ได้เพิ่มความหนาของแผ่นเซรามิก ทั้งนี้ Grain Size จะมีสภาวะที่ดีที่สุดอยู่ที่ความบริสุทธิ์ของอัลูมินา 85% ที่สำคัญแผ่นรองหลังเซรามิกมีส่วนช่วยอย่างมากในการออกแบบ และพัฒนาแผ่นเกราะเชิงป้องกันโดยใช้วัสดุ เซรามิก/ โลหะ/ เส้นใย ได้ดีต่อไปได้

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

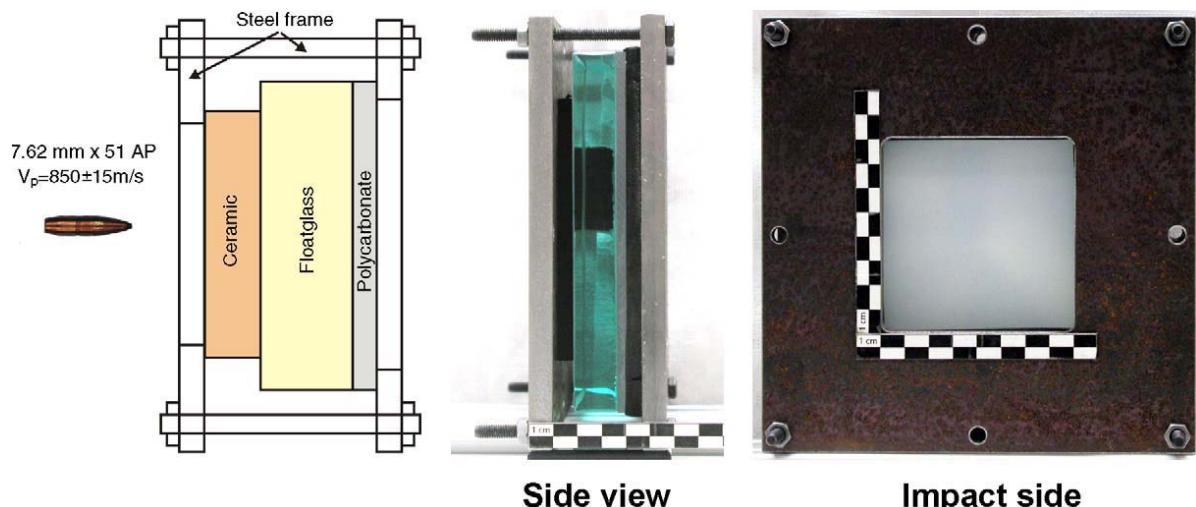
1. อัลูมิเนียมออกซิไนท์ Aluminim oxynitride (AlON)
2. แมกนีเซียม อัลูมิเนท สปินেล Magnesium aluminate spinel ( $MgAl_2O_4$ )
3. อัลูมินา Polycrystalline ( $Al_2O_3$ )

และนำวัสดุเซรามิกทั้ง 3 ชนิดมาทำการทดสอบหาค่าความแข็ง

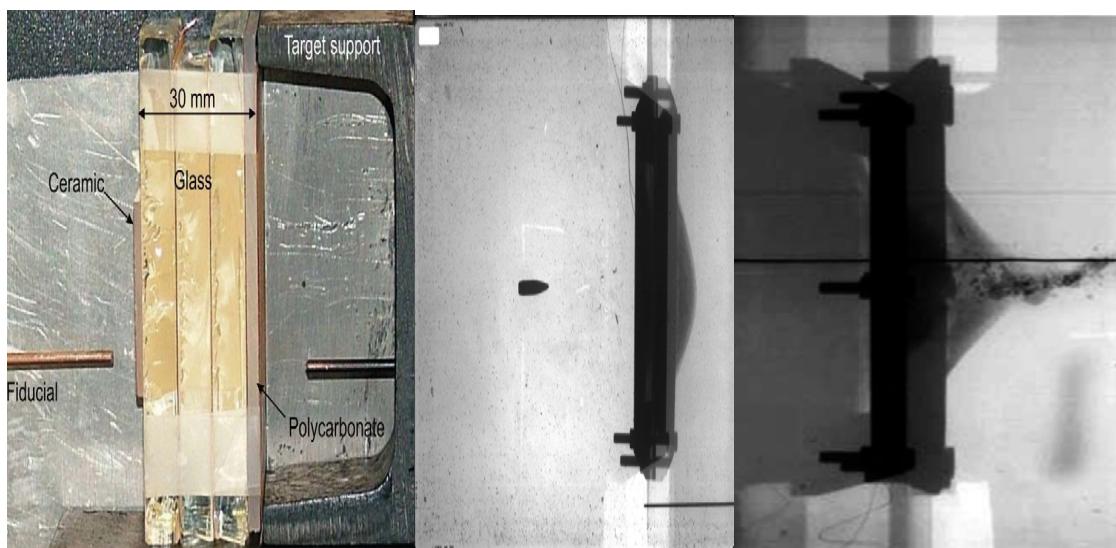
Properties of transparent ceramics		
Materials	Young's Modulus (GPa)	Hardness HV10 (GPa)
AION	323	1850 (MPa)
$MgAl_2O_4$	275	15.0 (GPa)
$Al_2O_3$	400	21.5 (GPa)

ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติเชิงกลได้แก่ โมดูลัสความยืดหยุ่นและค่าความแข็งของเซรามิก

จากการทดลองของ Straßburger ในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นได้ว่า อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) มีความแข็งมากที่สุดที่ 21.5 (GPa) จึงได้เลือกนำเอาระดับ อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) มาเป็นเกราะแผ่นหน้าโดยที่จะเลือกความหนาที่ต่างกัน ซึ่งความหนาอยู่ระหว่าง 1.3 ม.ม. ถึง 8.3 ม.ม. เป็นเกราะแผ่นแรก ในชั้นที่สองจะเป็น soda-lime float glass ความหนาจะมี ตั้งแต่ หนึ่งชั้น จนถึงสามชั้น ส่วนชั้นสุดท้ายคือชั้นที่สามจะประกอบด้วย Polycarbonate ที่มีความหนา 4 ม.ม. ซึ่งนำรัศดทั้ง 3 ชั้นนี้มาประกอบกันโดยในแต่ละชั้นไม่ใช้วัสดุปะalan ดังรูปที่ 12 แล้วทดสอบโดยการยิงด้วยกระสุน 7.62 mm. x 51 AP ที่ความเร็วเฉลี่ย  $850 \pm 15 \text{ m/s}$ .



รูปที่ 12 แสดงการทดสอบและการเรียงชั้นของวัสดุเกราะเซรามิก [16]



รูปที่ 13 แสดงการทดสอบของวัสดุเกราะเซรามิก [16]

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

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

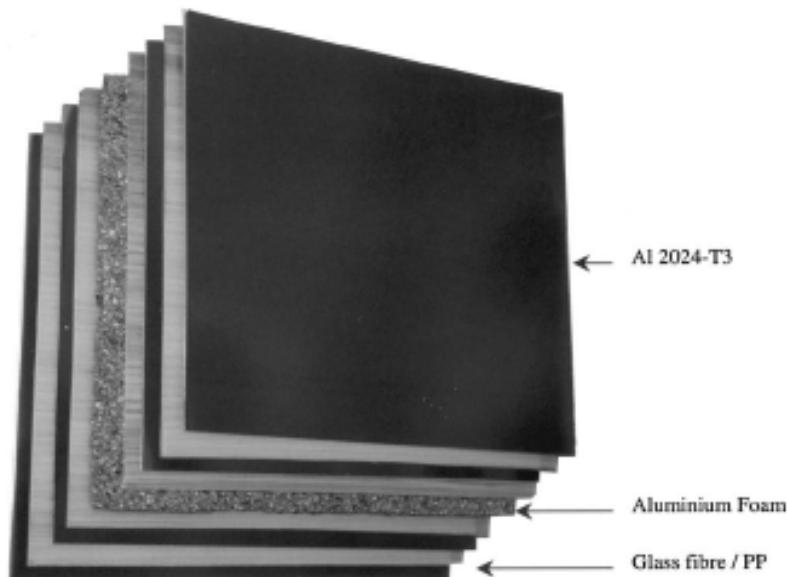
จากการวิจัยของ E. Straßburger สรุปได้ว่า วัสดุเซรามิก  $\text{Al}_2\text{O}_3$  จากการทดลองใช้ความหนาเซรามิกตั้งแต่ 1.3 ม.m. ถึง 8.3 ม.m. เป็นเกราะแผ่นแรก เซรามิกที่ใช้มีความหนาอยู่ที่ 4 ม.m. ถ้ามีการเพิ่มความหนาขึ้นไป ก็จะไม่ได้ช่วยเพิ่มความแข็งเพิ่มขึ้นอีกเลย การเพิ่มความหนาเข้าไป จะยิ่งทำให้มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และยังสรุปได้อีกว่าถ้าน้ำหนักของวัสดุทั้งหมดจะสามารถลดลงได้อีก 15% ถ้าวัสดุเซรามิก  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีความหนาที่อยู่ที่ 1.5 ม.m. ดังนั้นวัสดุที่ควรนำมาใช้ควรจะเป็นวัสดุเซรามิก  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีความหนาอยู่ที่ 4 ม.m.

### 3.3 วัสดุเส้นใย

เกราะที่ใช้วัสดุประเภทเส้นใย จะใช้คุณสมบัติเด่นของเส้นใย ในด้านความเหนียว โดยเกราะที่ได้จะเป็นเกราะอ่อน น้ำหนักเบาอ่อนนุ่ม สะดวกต่อการสวมใส่ แต่ไม่สามารถป้องกันกันอันตรายจากวัสดุ มีค่าได้ เมื่อถูกยิงก็ไม่สามารถลดแรงที่กระทำต่อร่างกายได้มาก เพียงแต่สามารถกันกระสุน ไม่ให้ทะลุเข้าร่างกายได้เท่านั้น

### 3.4 เกราะวัสดุผสม (Composite)

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



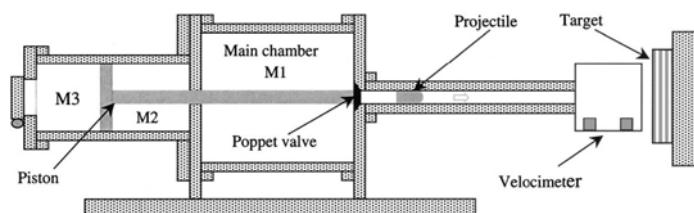
รูปที่ 14 รูปตัวอย่างชั้นเกราะวัสดุผสม [11]

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

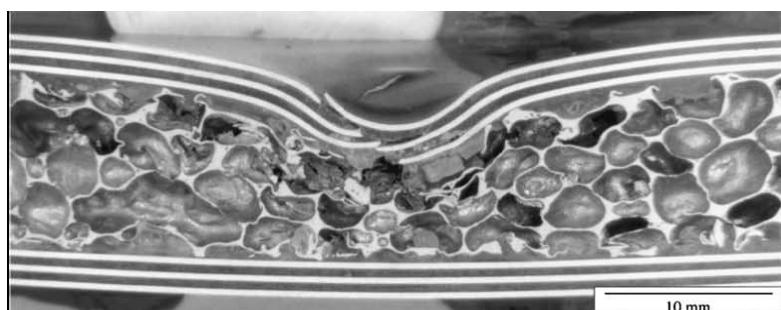
1. Woven glass fibre polypropylene (Twintex PP60 from Vetrotex Ltd.)
2. Aluminium 2024-T3 alloy
3. Aluminium foam (Alporas from the Shinko Wire Company)

วัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้ถูกจัดเรียงตามรูปที่ 14 และยิงทดสอบด้วยเครื่อง Nitrogen gas gun

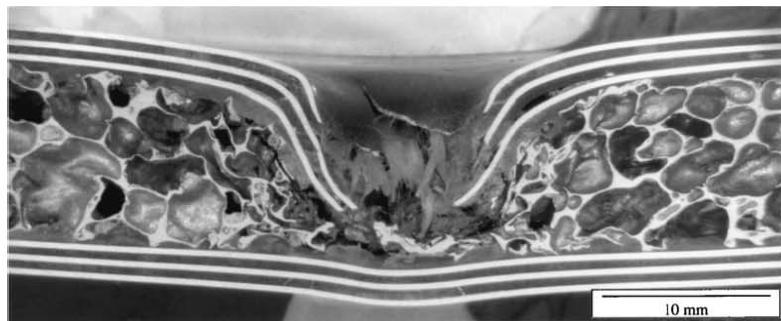
ดังรูปที่ 15



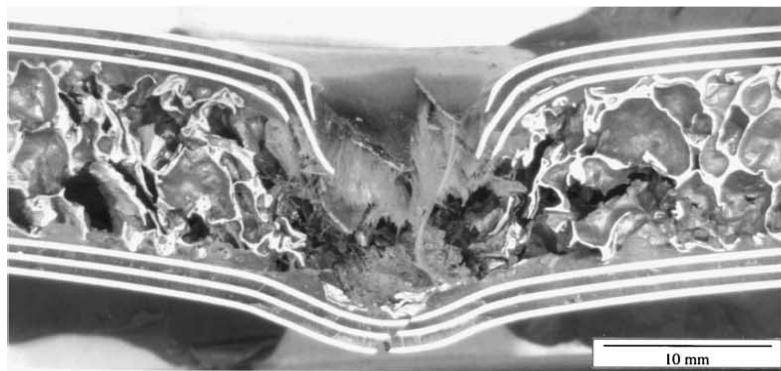
รูปที่ 15 เครื่องยิงทดสอบของ G. Reyes Villanueva และคณะ [11]



รูปที่ 16.1 Impact energy = 48 Joules

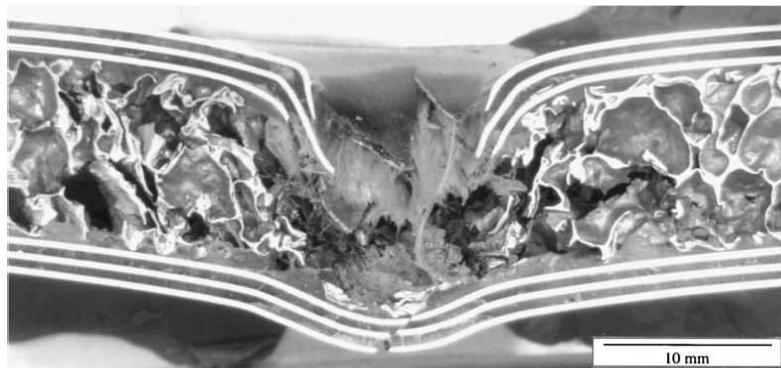


รูปที่ 16.2 Impact energy = 63 Joules



รูปที่ 16.3 Impact energy = 97 Joules

รูปที่ 16.1 แสดงการทดลองยิงเกราะวัสดุผ่านที่ระดับพลังงานต่างๆ [11]



รูปที่ 16.4 Impact energy = 129 Joules

รูปที่ 16.2 แสดงการทดลองยิงเกราะวัสดุผ่านที่ระดับพลังงานต่างๆ [11]

#### 4. เกราะโลหะ

โลหะที่สามารถใช้ทำเกราะกันกระสุนได้มีอยู่หลายชนิด ซึ่งคุณสมบัติที่เด่นที่เลือกใช้เพื่อทำเกราะกันกระสุนคือ

1. ความแข็งแรงสูง
2. ยืดตัวดี
3. น้ำหนักเบา
4. มีความแข็งทึบแผ่นเพียงพอในการรับแรงกระแทก

เกราะ่โลหะมีใช้กันมานานตั้งแต่สมัยโบราณ ซึ่งปัจจุบันก็ยังสามารถใช้โลหะในการทำเกราะกันกระสุนได้ เช่นเดียวกัน ความต้านทานการยิงทะลุของวัสดุที่เป็นโลหะขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

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

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ และจะได้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดกับวัสดุนำไปสู่วิธีการออกแบบเกราะกันกระสุนโลหะ โดยการควบคุมรูปแบบความเสียหายที่จะเกิดกับแผ่นเกราะต่อไป

#### 4.1 ผลกระทบของรูปทรงหัวกระสุนต่อความเสียหายของแผ่นเกราะ

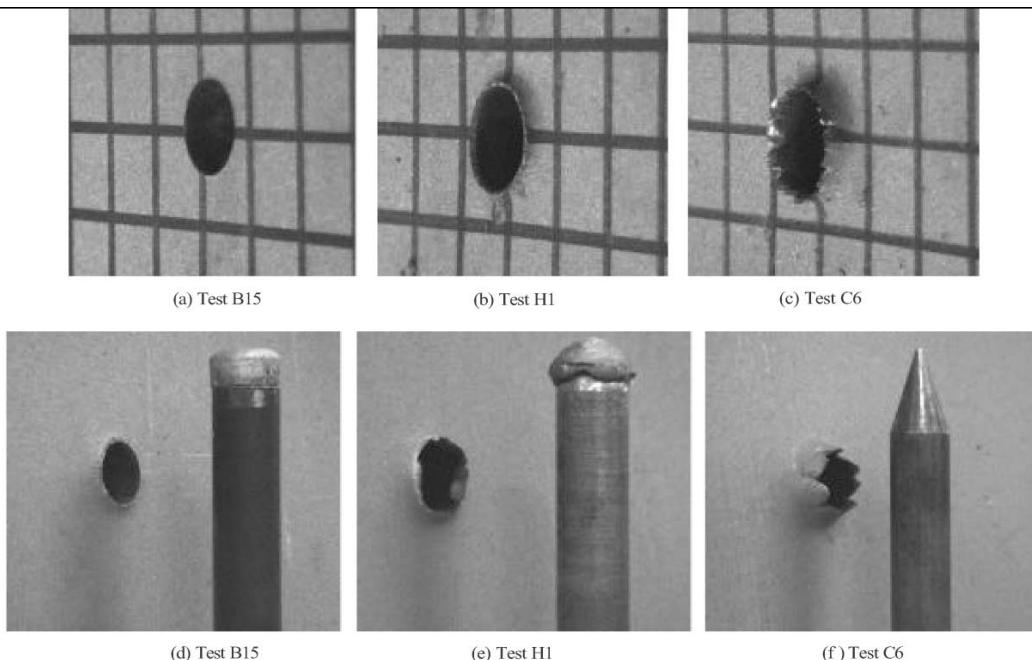
ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเกราะ่โลหะเป็นผลกระทบมาจากรูปทรงของหัวกระสุน โดยสามารถแบ่งรูปทรงของหัวกระกระสุน ได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือกระสุนหัวมน (Hemispherical nose) และ กระสุนหัวแหลม (Conical nose)

กระสุนหัวมน ส่วนมากเป็นกระสุนปืนพกทั่วไป กระสุนหัวแหลม จะเป็นกระสุนปืนยาว และยิงด้วยความเร็วสูง การทดลองของ T. Borvik [5] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะรูปทรงหัวกระสุน กับการเสียหายที่เกิดขึ้นบนแผ่นโลหะ โดยใช้แท่ง เหล็กเครื่องมือ ความแข็ง 53 HRC ยิงด้วยปืนอัดแก๊ส กระแทบกับแผ่นเหล็ก Weldox 460 E

กว้าง 500 ม.ม. หนา 12 ม.ม. ทดลองยิงเพื่อหา ballistic limit velocity(BVL) พบร้า หัวทรงมน กับ หัวทรงแหลมได้ BVL 300 m/s ในขณะที่ หัวทรงทูได้ BVL 185 m/s แสดงว่าหัวทรงหัวทูน้ำเจ้าทะลุเข้าแผ่นเกราะได้ง่ายกว่า

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

### ที่ใช้ในการเจาะทะลุ

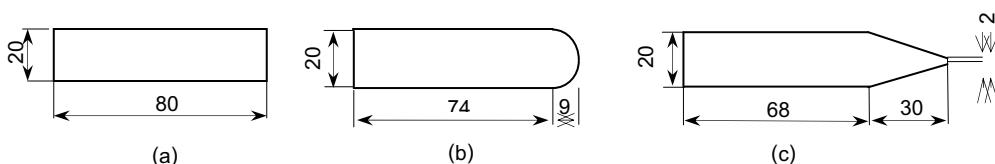


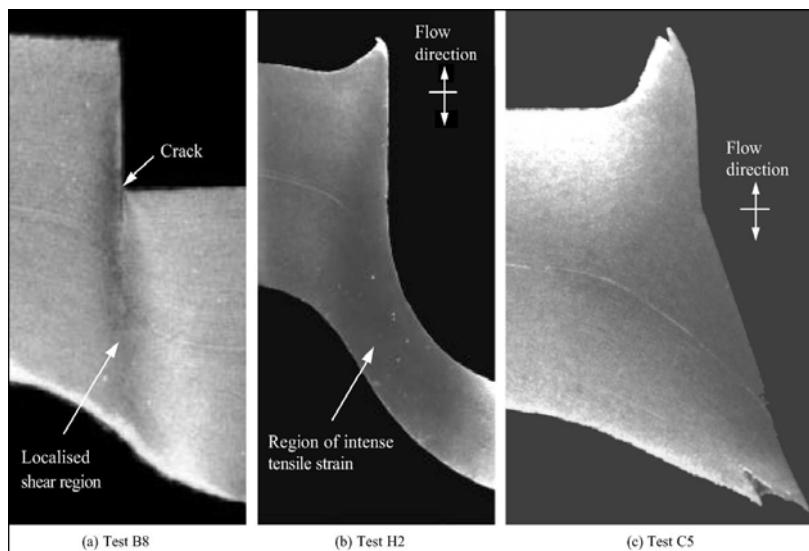
รูปที่ 17 รูปแสดงลักษณะของรอยเจาะ และ plugs ที่เกิดจากการเจาะ [5]

จากรูปที่ 17 แสดงลักษณะของรูเจาะด้านหน้า ด้านล่างแสดงลักษณะด้านหลังกับ plugs ที่เกิดจากการเจาะ สังเกตได้ว่ารอยเจาะ และปลั๊กที่เกิดจากการเจาะของหัวทรงทุนนั้น มีลักษณะเรียบเมื่อ nhìnดูตัด แสดงให้เห็นว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นเกิดจากการตัดเดือน

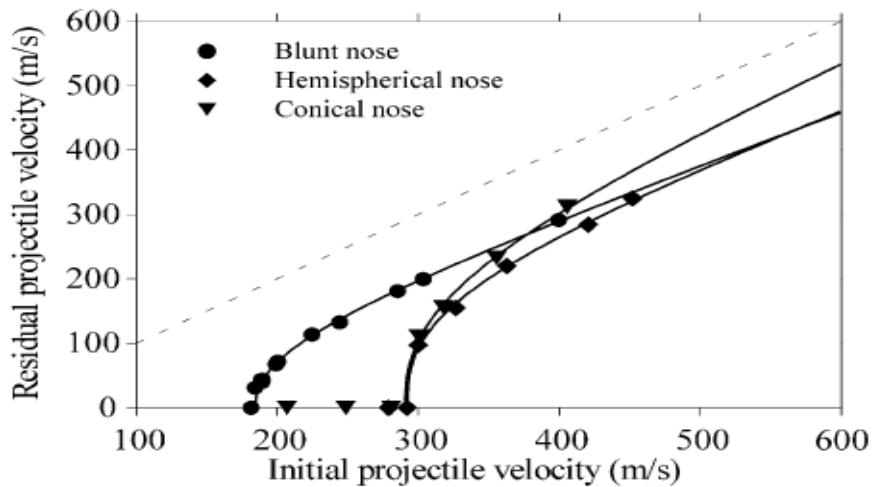
ปลั๊กของการเจาะด้วยหัวทรงมนุษย์ไม่เรียบ เพราะเป็นการเสียหายที่เกิดจากแรงดึง ในขณะที่การเจาะด้วยกระสุนหัวทรงแหลมนั้นไม่มีปลั๊ก แต่เนื้อวัสดุจะถูกผลา��ออกมาเป็นครีบแทน การที่ตัดผลต่างกันเป็นเพราะมีรูปแบบการเสียหายที่ต่างกันด้วย

ความเสียหายที่เกิดจากการเจาะกระสุนหัวทรงแหลม และกระสุนหัวทรงมนุน ต่างเป็นการเกิดความเสียหายที่เกิดจากแรงดึงในเนื้อวัสดุ สังเกตได้จากรูปที่ 18 บริเวณที่เกิดการฉีกขาดของรอยการเจาะด้วยกระสุนหัวทรงมนุนนั้นจะเกิดที่บริเวณลูกศร ส่วนบริเวณที่เกิดการฉีกขาดของรอยการเจาะด้วยกระสุนหัวทรงแหลม นั้นจะเกิดบริเวณปลายแหลมดังรูป





รูปที่ 18 รูปตัดแสดงร่อง และลักษณะความเสียหายจากหัวปืนร่างต่างๆ [5]



รูปที่ 19 กราฟเปรียบเทียบความเร็วคงเหลือของวัตถุที่มีความเร็วเริ่มต้น และรูปร่างต่างๆ [5]

การวิเคราะห์กราฟความเร็วคงเหลือของวัตถุถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Recht and Ipsen (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

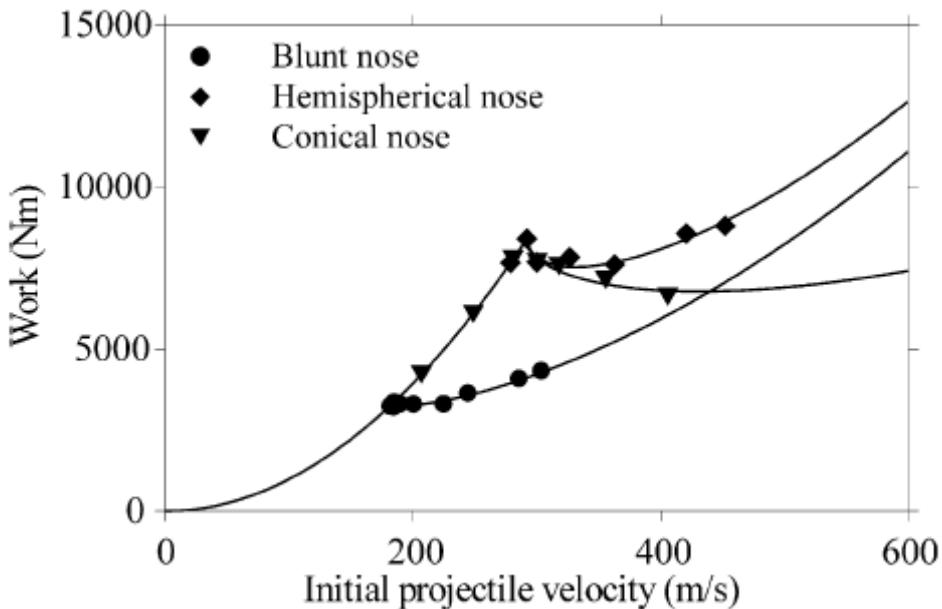
$v_{bl}$  ballistic limit velocity

$m_p$  น้ำหนักกระสุน

$m_{pl}$  น้ำหนักเกราะ

$p$  ค่าคงที่

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



รูปที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนพลังงานเริ่มต้นไปเป็นงานที่ใช้ทำความเสียหาย [5]

กราฟพลังงาน วิเคราะห์จากสมการอนุรักษ์พลังงาน  $\Delta E = 0$

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta K - \Delta W \\ \Delta K &= \frac{1}{2} m_p v_i^2 - \frac{1}{2} m_p v_r^2 - \frac{1}{2} m_{pl} v_{rpl}^2 \\ \Delta K &= \Delta W = W_1 + W_2 + W_3 \\ \Delta W &= \frac{1}{2} m_p v_i^2 - \frac{1}{2} m_p v_r^2 - \frac{1}{2} m_{pl} v_{rpl}^2\end{aligned}$$

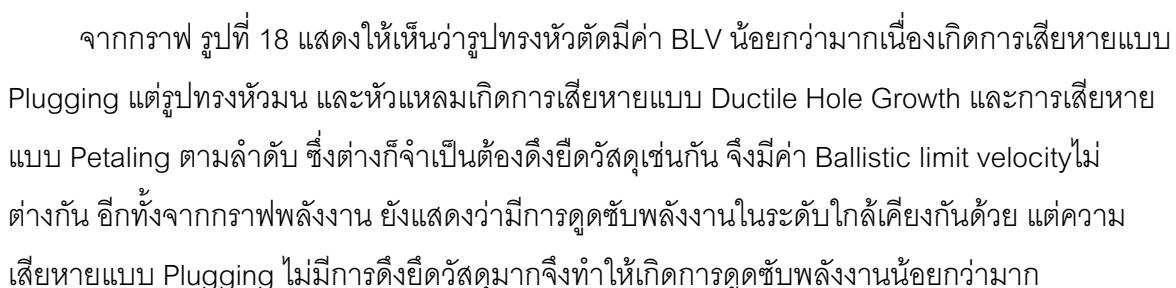
โดยที่	$\Delta K$	เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานจน
	$\Delta W$	เป็นงานที่เกิดจากการตกรอบทั้งหมด
	$W_g$	เป็นงานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นเกราะ
	$W_l$	เป็นงานที่เกิดจากการไฟลตัวแบบพลาสติกและความเสียหาย
	$W_p$	เป็นงานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของกระสุนเอง
	$\frac{1}{2} m_p v_i^2$	เป็นพลังงานจนเริ่มต้นของกระสุน
	$\frac{1}{2} m_p v_r^2$	เป็นพลังงานจนหลังตกรอบของกระสุน

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

จากรูปที่ 17 ลักษณะของรอยเจาะหัวทรงแหลมจะเสียพลังงานน้อยกว่าหัวทรงมน และเมื่อมีความเร็วต้นที่สามารถเจาะทะลุเกราะได้ ก็ยังคงมีความเร็วปลายเหลืออยู่มากกว่าหัวทรงมน กรณีหัวทรงมน และหัวทรงแหลมต่างมีความเร็วต้นเท่ากันและไม่สามารถเจาะเกราะให้ทะลุ

\*ได้เหมือนกันแล้วก็จะมีการเสียพลังงานที่ใกล้เคียงกัน [5]

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

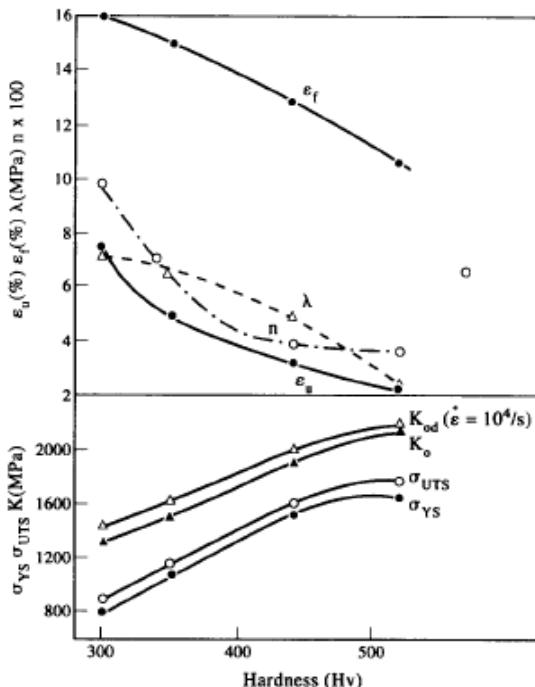
จากการ  รูปที่ 18 แสดงให้เห็นว่ารูปทรงหัวตัดมีค่า BLV น้อยกว่ามากเนื่องเกิดการเสียหายแบบ Plugging แต่รูปทรงหัวมน และหัวแหลมเกิดการเสียหายแบบ Ductile Hole Growth และการเสียหายแบบ Petaling ตามลำดับ ซึ่งต่างก็จำเป็นต้องดึงยึดวัสดุเข่นกัน จึงมีค่า Ballistic limit velocity ไม่ต่างกัน อีกทั้งจากการพัฒนา ยังแสดงว่ามีการดูดซับพลังงานในระดับใกล้เคียงกันด้วย แต่ความเสียหายแบบ Plugging ไม่มีการดึงยึดวัสดุมากจึงทำให้เกิดการดูดซับพลังงานน้อยกว่ามาก

ผลการทดลองของ T. Borvik [5] สรุปได้ว่า BLV ของแผ่นเกราะนั้น ขึ้นกับรูปทรงของหัวกระสุน ด้วย โดยที่ หัวทรงมน และหัวแหลม มี BLV ประมาณ 300 m/s ส่วนหัวทรงทึบ มี BLV ประมาณ 185 m/s ดังที่แสดงในรูปที่ 17 และจากรูปที่ 18 สามารถได้ว่า เมื่อความเร็วเริ่มสูงมากถึง 400 m/s รูปทรงแหลมจะมีความเร็วคงเหลือมากที่สุด ดังนั้นกระสุน ปืนเล็กๆ ที่มีความเร็วสูง จึงมีหัวทรงแหลมเพื่อให้มีความเร็วสูง สำหรับเจาะทะลุในชั้นต่อๆ ไปได้ ในทางกลับกันกระสุนปืนสั้นที่มีความเร็วต่ำกว่า BLV ของหัวทรงมน กับหัวทรงแหลม จะทำหัวกระสุนที่ค่อนข้างทึบเพื่อ ให้ BLV ของระบบลดลง หัวกระสุนจึงสามารถเจาะทะลุได้ดีขึ้น โดยสามารถทำให้เกราะโลหะ มีการขาดแบบ Plugging ได้ง่ายขึ้น

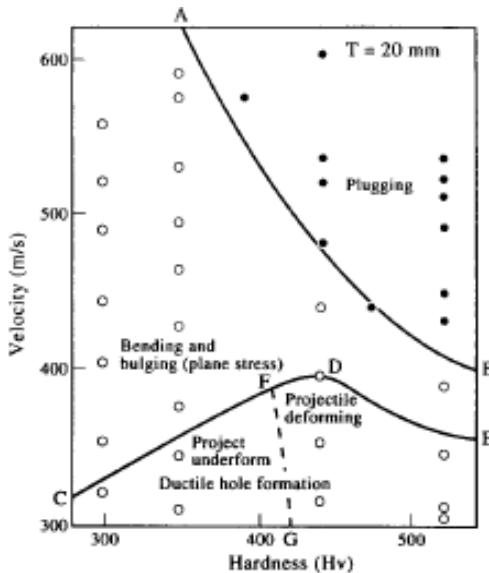
## 4.2 ผลกระทบจากความแข็งของแผ่นเกราะ

ความแข็งของแผ่นเกราะจะทำให้ สามารถต้านกระสุนได้ดีขึ้นอยู่กับ ระดับของ ความแข็ง ความหนา ขนาดกระสุน

เมื่อเพิ่มความแข็งของแผ่นเกราะเหล็กกล้าขึ้นไปเรื่อยๆ ความสามารถในการต้านกระสุนจะลดลง เนื่องจากเป็นปัจจัยให้เกิดความเสียหายแบบ Plugging ซึ่งเกิดจากแนวความเดินเฉือน และเป็นรูปแบบความเสียหายที่ใช้พลังงานน้อยกว่า ความเสียหายแบบ Ductile Hole Growth เป็นผลมาจากการยึดตัวของแผ่นเกราะลดลงเมื่อเพิ่มความแข็ง ดังที่แสดงในภาพจากการทดลองของ DIKSHIT [12]



รูปที่ 21 แสดงความแข็งแรง และการยืดตัว เทียบกับความแข็ง ที่เพิ่มขึ้นในเหล็กกล้า [12]



รูปที่ 22 แผนภูมิ ความเร็ว-ความแข็ง แสดงบริเวณที่มีผลต่อการเจาะทะลุในรูปแบบต่างๆ [12]

ในรูปที่ 22 เส้นที่บีบแน่นของเส้นเดาด้วยการเจาะทะลุในรูปแบบต่างๆ จุดวงกลมแสดงจุดที่มีการทดลอง โดยที่จุดที่บีบหมายถึงจุดที่เกิด Plugging ส่วนจุดไม่บีบหมายถึงจุดที่เกิด Bulging หรือจุดที่แผ่นทดสอบโป่งนูนขึ้นก่อนแล้วขาดที่บริเวณรอยกระสุน

จากรูปที่ 22 เส้น AB และ CDE สามารถแบ่งโซนประเภทของความเสียหายได้ออกเป็น 3 โซน ตามกราฟ เมื่อเพิ่มความแข็ง จะทำให้เกิดความเสียหายแบบ plugging ได้ง่ายขึ้นโดยความเร็วในการเจาะทะลุจะลดลง ซึ่งความเสียหายแบบ plugging ใช้พลังงานน้อยที่สุดในการทำให้เกราะทะลุดังนั้นการเพิ่มความแข็งให้กับแผ่นเกราะโลหะจึงไม่ควรเพิ่มความแข็งจนทำให้เกิดความเสียหายแบบ plugging

สรุปผลกระทบของความแข็งของแผ่นเกราะ ขึ้นกับรูปแบบ ของการเกิดความเดิน ความเครียด ในกรณีความเครียดระนาบ (ตัวอย่างเกราะเหล็กหนา 80 ม.ม.) การเพิ่มความแข็งจะเพิ่ม ความสามารถในการต้านทานกระสุนเนื่องจากเพิ่มการสูญเสียพลังงานในพลาสติกโซนเพิ่มมากขึ้น และ เพิ่มความเสียหายให้แก่หัวกระสุน

ในกรณีความความเค้นระนาบ การเพิ่มความแข็งสามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทาน กระสุนได้ในตอนแรก แต่เมื่อความแข็งมากขึ้นจะทำให้ความความสามารถในการต้านทานกระสุนลดลง เนื่องจากการเริ่มเกิดความเสียหายแบบ plugging ดังนั้นในกรณีความความเค้นระนาบ ควรใช้ความแข็งใน ระดับกลาง

ในการทำเลือกเกราะกันกระสุนนั้นจะต้องคำนึงถึงน้ำหนัก ดังนั้นการใช้ความหนาของโลหะให้เกิด กรณีความเครียดระนาบ นั้นจะทำให้เลือกเกราะมีน้ำหนักมากเกินไป อีกทั้งความเร็วของหัวกระสุนปืน เล็กๆที่เป็นอาชญากรรมมีความเร็วสูงมาก มีรูปทรงแหลมคม มีความแข็งของหัวกระสุนมาก ดังนั้น จะต้องหารูปแบบ และวัสดุที่เหมาะสมสมด่อไป

#### 4.3 ผลกระทบจากชั้นของแผ่นเกราะ

จากการวิเคราะห์ในบทความ Effect of air gaps on ballistic resistance of targets for conical impactors [11] สรุปไว้ได้ว่า จากการวิเคราะห์สำหรับหัวทรงแหลม ballistic limit velocity จะ เพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะห่างระหว่างแผ่นเกราะมากขึ้น หรือเมื่อมีจำนวนแผ่นมากขึ้น ในขณะที่ผลกระทบความ หนาของแผ่นเท่ากัน ทั้งนี้ก็ขึ้นกับวัสดุ และรูปแบบความเสียหายที่เกิดกับแผ่นเกราะในแต่ละชั้นด้วย

#### 4.4 ผลกระทบจากความหนาของแผ่นเกราะ

การเพิ่มช่องว่างระหว่างแผ่นยังสามารถเพิ่ม Ballistic limit velocity ขึ้นได้ด้วยการเพิ่มความหนา ของแผ่นเกราะย่อมเพิ่ม ballistic limit velocity [5] ขึ้นได้เช่นกัน การเพิ่มความหนาของแผ่นเกราะมีผล ทำให้ความหนาของชั้นที่ถูกดึงยึดออก ในการเสียรูป มีความหนามากขึ้นดังนั้นค่าความเดินก็จะลดลง

#### 4.5 ผลกระทบทางความร้อน

เมื่อวัสดุมีผลทางด้านความร้อนจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานหัวกระสุนได้มากขึ้นโดยจะ สูญเสียออกไปเป็นพลังงานความร้อน ดังเช่นผลการทดลองของ S. Yadav [12] ดังรูปที่ 23 สามารถนิยามได้ว่า เมื่อวัสดุมีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี จะทำให้ความลึกของการเจาะทะลุน้อยลง แต่ขนาดรูจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากผลของความร้อน การทดลองยิงด้วย cylindrical tungsten heavy alloy (WHA) ที่ความเร็ว 1100 m/s เข้ากระแทกกับแผ่นอลูมิเนียม 6061-T6 เปรียบเทียบกับผล การคำนวณด้วยไฟฟ์ในต่อต้านคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ เมื่อมีการคำนึงถึงการนำ ความร้อนของวัสดุแผ่นเกราะจะทำให้ผลของการคำนวณเข้าใกล้ผลที่เกิดจากการคำนวณ

Table 1  
Mechanical constants

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	v	$\sigma_y$ (GPa)	$\dot{e}_0^p$	n	$\dot{e}_0^p$	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)	$\alpha$	$\beta$
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 ( $\alpha$ and $\beta$ as per Table 3)	79	26.0	14.8
8.	Thermal softening in both WHA & Al ( $\mu = 0.01, \alpha$ and $\beta$ 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 ขنวน และอาวุธต่างๆ จนกระทั่งป้องกันอันตรายจากการกระสุนปืนในปัจจุบัน โลหะที่ใช้ในการทำเกราะ คือเหล็กกล้า เนื่องจากมีความแข็งแรง และรับแรงกระแทกได้ดี

โลหะที่จะใช้ทำเกราะกันกระสุนจำเป็นต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญในการรับแรงกระแทก ดังนี้ แข็ง จำเป็นต้องมีการผ่านกระบวนการ การปรับปรุงคุณภาพโลหะ ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพโลหะมีด้วยกัน หลายกระบวนการ โดยขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ด้วย วิธีที่เป็นที่นิยมและได้ผลมาก คือกรรมวิธีทางความร้อน โดยสามารถปรับปรุงคุณภาพของเหล็กให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการได้

### 5.1 กรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า

กรรมวิธีทางความร้อน หรือเรียกว่า “การอบ-ชุบ”

นิยาม Heat Treatment (การอบชุบ) หมายถึง “การรวมເອາ ກາຣທໍາໃຫ້ຮັບ ກາຣທໍາໃຫ້ເຢັນ ເວລາ ແລກກາຣ ປະຍຸກຕີ” ໄສເຂົ້າໄປໃນໂລຫະໂລຫະຜສນໃນສກາພທີ່ຍັງເປັນຂອງແຂງ ແລ້ວທໍາໃຫ້ໄດ້ຄຸນສົມບັດຕາມທີ່ຕ້ອງກາຣ

#### วัตถุประสงค์

- เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ให้ได้ตามที่ต้องการ
  - มีความอ่อนตัวสูง ขึ้นรูปได้ง่าย
  - มีความแข็งสูง เพื่อทนการเสียดสี
  - มีความเหนียว ใช้งานที่มีแรงกระแทกและบิดตัวสูง ได้ทนทาน

หลักการ เผาให้ร้อนและปล่อยให้เย็นตัวที่อัตราต่างๆ กัน เหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างเนื่องจากมีสมบัติ

Allotropy คือเปลี่ยนแปลงระบบผลึกเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

## 5.2 โครงสร้างเหล็กที่ได้จากการมิกซ์ทางความร้อน เบอโนต์ (Bainite)

เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการที่ Austenite เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยชุบให้อุณหภูมิลดลงไปจนถึงช่วงอุณหภูมิ  $200-400^{\circ}\text{C}$  และแข็งตัวที่อุณหภูมนี้เป็นเวลานานพอสมควร  
เบอโนต์เป็นเหล็กคาร์บีดที่มีขนาดเล็กมาก (Submicroscopic carbides) ที่กระจายไปทั่ว Ferrite ที่ถูกบีบเคี้ยว (Strained  $\alpha$ )

### Martensite

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

### Time-Temperature-Transformation (TTT) Diagrams

TTT diagram เป็นแผนภาพที่แสดงเวลาที่จำเป็นสำหรับการให้ Retained austenite เปลี่ยนไปที่อุณหภูมิคงที่กลایเป็นโครงสร้างที่ stable ซึ่งอาจเรียกแผนภาพนี้ว่า Isothermal transformation diagram

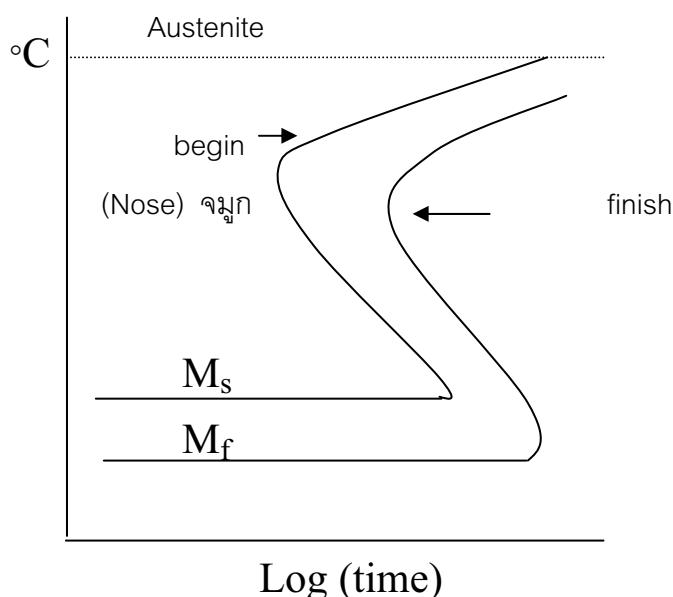
แผนภาพนี้เป็นรูปร่างคล้ายอักษร "S" โดยแกนตั้งเป็นอุณหภูมิและแกนนอนเป็นเวลา (Log scale) โดยมีเส้นต่างๆ คือ

เส้น Transformation begin

เส้น Transformation finish

เส้น Marten site start ( $M_s$ )

เส้น Martenite finish ( $M_f$ )



รูปที่ 24 แผนภาพ Isothermal transformation diagram

$$\begin{aligned}
 \text{Cooling rate} &= (T_1 - T_2)/t \\
 T_1 &= \text{อุณหภูมิที่อบอ่อน (ก่อนชุบ)} \\
 T_2 &= \text{อุณหภูมิหนึ่งที่ต่ำลงมา} \\
 T &= \text{เวลาที่ใช้ขณะชุบให้อุณหภูมิลดลงจาก } T_1 \text{ มา } T_2
 \end{aligned}$$

CCR คือ Critical cooling rate ซึ่งเป็นอัตราการเย็นตัวที่พอดี โดยเส้น cooling curve จะลากผ่านจุด TTT-diagram ซึ่งหมายถึงว่าจะไม่มีการเปลี่ยนสภาพของ retained austenite จนเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า  $M_s$ ,  $M_f$  และจะเปลี่ยนสภาพไปเป็น Martensite

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

### 5.3 ลักษณะการอบ-ชุบ เหล็กกล้า

การอบชุบที่สำคัญ และใช้กันมากที่สุด 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) หรือเพื่อทำให้เหล็กเหนียวขึ้น (Toughening)

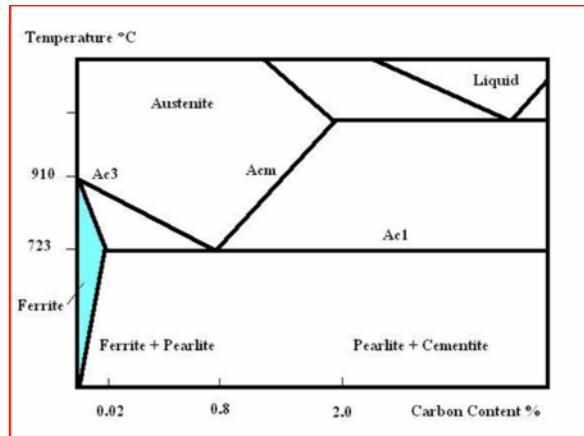
#### วัตถุประสงค์ของการอบเพื่อให้คืนตัว

เนื่องจากเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) หรือการหล่อมามักจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น และไม่สม่ำเสมอ ทำให้การกลึงหรือไส้ได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดความแข็งของเหล็กเพื่อกลึงไส้ได้สะดวก 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 Ac3 ประมาณ  $30-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ส่วนเหล็ก Hyper-eutectoid เผาให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac1 ประมาณ  $30-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ไม่เลย Acm)



รูปที่ 25 แผนภาพการเปลี่ยนโครงสร้างของเหล็ก

2. แข็งเหล็กทิ้งไว้ในเตา ให้เป็น Austenite ทั้งหมด ปล่อยให้เย็นในเตาที่ปิดฝาสนิท (ถ้าเป็นเตาไฟฟ้า ก็เพียงแต่ตัดปลั๊กออก)  
สิ่งที่จะเกิดขึ้น เมื่อเหล็กถูกปล่อยให้เย็นช้าๆ การเปลี่ยนโครงสร้างภายใน ก็จะกลับสู่สภาพใกล้เคียงสมดุลโครงสร้างที่เป็นอยู่เดิม นั่นคือ มาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ จะกลับมาเป็นเฟอร์ไรท์และซีเมนไท์ ทำให้ความแข็งลดลงกลای เป็นเหล็กอ่อนนิ่ม ความมุ่งหมาย เพื่อทำให้เหล็กอ่อนลงเพื่อสะดวกในการกลึงไส

### 5.8 การปรับปรุงความเหนียว (Normalizing)

Normalizing หมายถึง การอบเพื่อให้เหล็กมีเหนียวดีขึ้น โดยการลดขนาดของเม็ดเกรนของเหล็ก (Grain Size) เพื่อทำให้คุณสมบัติของเหล็กสม่ำเสมอ และขณะเดียวกัน ก็ลดความเครียดด้วย

#### วัตถุประสงค์ของ การอบเพื่อให้คืนตัว

โดยทั่วไปเหล็กที่ผ่านการหล่อ (Casting) หรือการริดขึ้นรูปมา มักจะมีความแข็งหรือความเหนียวไม่สม่ำเสมอตลอดหั้งแท่ง จึงจำเป็นต้องนำมาทำ Normalizing

#### กรรมวิธีการทำ Normalizing

1. เหล็ก Hypo-eutectoid เมาให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac<sub>3</sub> กับ Ac<sub>m</sub> ประมาณ 30-50 °C
2. แซ่เหล็กทิ้งไว้ในเตา (30-60 นาที/ความหนาเฉลี่ย 25 มม.) ให้อุณหภูมิเท่ากันหมดทุกจุดตลอดภายในใจกลางด้วย
3. เอาออกจากเตา ปล่อยให้เย็นในอากาศธรรมดากลางที่ เส้นที่เกิดขึ้น เหล็กจะมีความเหนียวดีและคุณสมบัติสม่ำเสมอ เม็ดเกรนของเหล็กจะมีขนาดเล็กกว่าแบบ Annealing เนื่องจากเย็นในอากาศ ดังนั้นอัตราการเย็นตัวจะเร็วกว่า

### Tempering (การอบคืนตัว)

Tempering หมายถึง การอบเพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งาน ลดความเครียด เพิ่มความเหนียว ลดความเปราะบาง

#### วัตถุประสงค์ของ การอบเพื่อให้คืนตัว

เนื่องจากเหล็กที่ผ่านการซุบ ย่อมเกิดความเครียดขึ้นภายใน ถึงมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ขาดความเหนียว (Ductility) ทำให้เปราะ หลังจากซุบแข็งแล้วจึงต้องนำมารอบ Tempering ก่อนนำไปใช้งานจริง กรรมวิธีการทำ Tempering

- 1 นำเหล็กที่ผ่านการซุบแล้วมาเผาในเตา อุณหภูมิประมาณ 200-400 °C

- 2 แซ่เหล็กทิ้งไว้ในเตา 1 - 3 ชั่วโมง

- 3 เอาออกจากเตา ปล่อยให้เย็นในอากาศธรรมดากลางที่

เส้นที่เกิดขึ้น เหล็กที่ผ่านการซุบ จะมีความเหนียวดีขึ้น แต่ความแข็งจะลดลงเล็กน้อย  
ข้อควรระวัง ขณะเผาที่อุณหภูมิต่ำ แมร์เทนไซต์จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย  
จะพยายามเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่สมดุลย์ที่อุณหภูมิบรรยายกาศ ดังนั้น  
ไม่ควรเผาอุณหภูมิกิน 400 °C เพื่อไม่ให้มาร์เทนไซต์คืนตัวหมด

### ผลของระดับอุณหภูมิ

500-650 °C ทำลายความเครียด/เนื้อยาสูง

350-450 °C เนื้อยาสูง/สปริง/ไกล์เดียง Bainite

150-250 °C ลดความเครียด/hardness ลดลงเล็กน้อย

### **การเพรำเนื่องจากการอบคีนตัว (Tempered Brittleness)**

- การอบคีนตัวจะทำให้สมบัติด้านความเนื้อยาดีขึ้น แต่ที่ช่วงอุณหภูมิ 300-500 °C จะได้ทำให้สมบัติทนแรงกระแทก (Impact strength) ลดลง
- เหล็กกล้าคาร์บอนจะเกิดการเพรำเนื่องเล็กน้อย
- เหล็กกล้าผสม (โดยเฉพาะ Mn, Cr และ Mo) จะปราศจากชั้นเด่น
- สาเหตุจาก เกิดการแตกผลึกของคาร์ไบเดที่มาจาก Martensite หรือจากการที่ martensite แตกตัว ควรหลีกเลี่ยงอุณหภูมิดังกล่าว หรือใช้เวลาห้องเย็นที่สุดในช่วงนี้

### **Hardening (การซุบแข็ง)**

Hardening หมายถึง การซุบเพื่อให้เหล็กมีความแข็งขึ้น

การซุบแข็งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- Full hardening
- Case (surface) hardening

### Full hardening (การซุบแข็งทั้งชิ้นงาน)

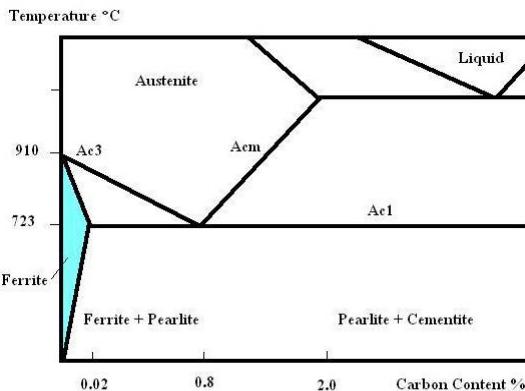
การซุบแข็งทั้งชิ้นงานของเหล็กกล้าเป็นกระบวนการที่อาศัยการเผาอบเหล็กให้เปลี่ยน

โครงสร้างเป็น Austenite และจึงทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการฉุ่มสารซุบได้โครงสร้างใหม่ เป็น Martensite

การซุบแข็งทั้งชิ้นงานแยกเป็น

- การซุบแข็งด้วยน้ำ (Water quench)
- การซุบแข็งด้วยน้ำมัน (Oil quench)
- การซุบแข็งด้วยอากาศ (Air quench)
- การซุบแข็งแบบมาเทมเพอร์ิง (Martempering)
- การซุบแข็งแบบออสเทมเพอร์ิง (Austempering)

## หลักการ



รูปที่ 26 ภาพโครงสร้างสถานะของเหล็ก [17]

หลักการในการซับแข็งเหล็กกล้า คือ การทำให้เหล็กกล้าเปลี่ยนโครงสร้างจาก BCC (Ferrite) กลายเป็น FCC (Austenite) โดยให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิเหนือเส้น Ac<sub>3</sub> สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8 % หรือที่เรียกว่าเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ แต่สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.8 % หรือเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ให้ความร้อนแค่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac<sub>1</sub> อุณหภูมิที่ใช้ในการซับแข็งควรอยู่เหนือเส้นดังกล่าวประมาณ 50 °C จากนั้นจึงทำให้เหล็กกล้าเย็นตัวลง ซึ่งความเร็วในการเย็นตัวจะต้องมากพอที่จะทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งเพิ่มขึ้น เพราะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเกรนมาრ์เกนไชต์ เหตุที่อุณหภูมิซับแข็งของเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทกตอยด์อยู่แค่เหนือเส้น Ac<sub>1</sub> ประมาณ 50 °C นั้นเนื่องจากเหล็กกล้าชนิดนี้มีจำนวนคาร์บอนสูง ถ้าใช้อุณหภูมิซับแข็งเหนือเส้น Ac<sub>3</sub> หลังจากการทำให้เย็นตัวลง จะทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งไม่สูงเท่าที่ควร เพราะจะเกิดเกรนที่เรียกว่ารีเทนอสเตอไนต์ (Retained Austenite) หลงเหลืออยู่มาก นอกจานั้นการใช้อุณหภูมิในการซับแข็ง จะมีผลให้ได้เกรนมาร์เกนไชต์ที่หยาบ ซึ่งจะเป็นผลให้ได้ความแข็งไม่มากเท่าที่ควร ถ้าซับแข็งเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทกตอยด์จากอุณหภูมิเหนือเส้น Ac<sub>1</sub> ก็จะทำให้ได้เกรนมาร์เกนไชต์ ซึ่งเกิดจากเกรโนอสเตอไนต์ ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.9 % จะทำให้เกิดรีเทนอสเตอไนต์น้อยกว่า เพราะเกรโนอสเตอไนต์ กล้ายเป็นมาร์เกนไชต์ได้ง่ายกว่า คาร์บอนที่เหลือจะกลายเป็นซีเมนไชต์ ซึ่งมีความแข็งใกล้เคียงกัน เกรนมาร์เกนไชต์ แต่มีความประมวลมากกว่า การใช้อุณหภูมิซับแข็งต่ำเกินไป รวมทั้งการใช้เวลาคงอุณหภูมิที่อุณหภูมิซับแข็งสั้นเกินไป จะทำให้เหล็กcarburizedที่เหลืออยู่นี้ เป็นแกนผลึกสำหรับกรนเพอร์ไอล์ต แทนที่จะกลายเป็นเกรนมาร์เกนไชต์

ถ้าชุบแข็งเหล็กกล้าไฮเป่นเทกตอยด์จากอุณหภูมิระหว่างเส้น Ac3 และ Ac1 จะทำให้เกรนบางส่วนยังคงสภาพเป็นเฟอร์ไรต์อยู่ และทำให้เหล็กที่ชุบมีความแข็งไม่สม่ำเสมอของจุดในเนื้อเหล็กจะอ่อน และบางจุดจะแข็งมาก

ถ้าใช้อุณหภูมิในการชุบแข็งมากเกินไป หรือใช้เวลาคงอุณหภูมินานเกินไป จะเป็นผลให้ได้เกรนมาრ์滕ไซต์หยาบ และมีผลให้ชิ้นงานมีความเปลี่ยนแปลงมากขึ้น

ความแข็งของเหล็กที่ผ่านการชุบ ขึ้นอยู่กับสองสิ่ง คือ

1. ปริมาณ Carbon ในเหล็ก กล่าวคือ ถ้ามีมาก โอกาสที่จะเปลี่ยนเป็น มาาร์滕ไซต์ก็ยิ่งง่าย และทำให้เกิดปริมาณของ มาาร์滕ไซต์ง่าย
2. อัตราความเร็วในการชุบ กล่าวคือ ยิ่งเย็นเร็วๆ โอกาสที่อสเทนไนท์ จะเปลี่ยนเป็นมาาร์滕ไซต์ก็มีมาก ในทางตรงข้ามถ้าเย็นช้าๆ ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์ กับชีเมโน่เตอร์หมด

#### กรรมวิธีการทำ Hardening

1. เผาเหล็กให้ร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ  $800-900^{\circ}\text{C}$  (ขึ้นกับชนิดของเหล็ก)  
ถ้า  $\text{C} < 0.8\%$  ให้ใช้อุณหภูมิเลยเส้น A3 ประมาณ  $50-75^{\circ}\text{C}$   
ถ้า  $\text{C} > 0.8\%$  ให้ใช้อุณหภูมิเลยเส้น A1 ประมาณ  $50-75^{\circ}\text{C}$  เท่านั้น
2. เมื่อเหล็กกล้ายเป็น ออสเทนไนท์ แซ่ อุณหภูมิไว้ประมาณ 1 ซม./ความหนา 25 มม.
3. เอาออกจากเตาทำให้เย็นโดยเร็ว ด้วยการจุ่มในน้ำ (Water Quench)  
หรือในน้ำมัน (Oil Quench)

สิ่งที่เกิดขึ้น ออสเทนไนท์เปลี่ยนกลับเป็นเฟอร์ไรต์และเพริลิตที่ไม่ทัน  
แต่ให้โครงสร้างที่มีความแข็งสูง เรียกว่า มาาร์滕ไซต์

## อัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะสม

- อัตราการเผาช้า

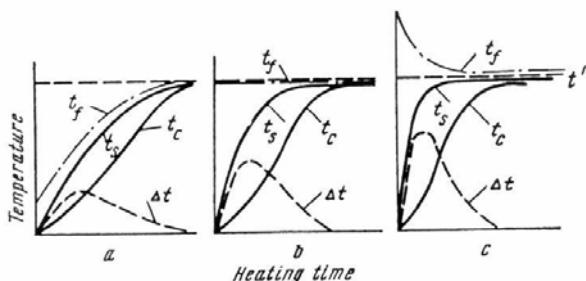
- เผาเหล็กให้ร้อนไปพร้อมๆ กับเตา อุณหภูมิของเหล็กจะต่ำกว่าเตาเพียงเล็กน้อย (ดูภาพ)
- เหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีส่วนหนาบางต่างกัน

- อัตราการเผาสูง

- บรรจุเหล็กเข้าเตาที่มีอุณหภูมิที่ต้องการ โดยพบว่าเหล็กจะมีอุณหภูมิที่ต่างกันมากในตอนเริ่มต้นจากนั้นจะเท่ากัน โดยใช้เวลาห้อยกว่าอัตราการเผาช้า
- เหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน และมีปริมาณคาร์บอนปานกลาง
- สามารถลดความต่างของอุณหภูมิโดยบรรจุเหล็กไว้ในหีบปิดคลุมมิดชิดก่อนบรรจุเข้าเตา

- อัตราการเผาที่สูงมาก

- “ไม่ค่อยนิยม เพราะอุณหภูมิระหว่างผิว กับ ใจกลางต่างกันมาก ซึ่งอาจทำให้เหล็กบิดเบี้ยวหรือแตกหักได้ ซึ่งสามารถลดความต่างของอุณหภูมิโดยบรรจุเหล็กไว้ในหีบปิดคลุมมิดชิดก่อนบรรจุเข้าเตาเข่นกัน”



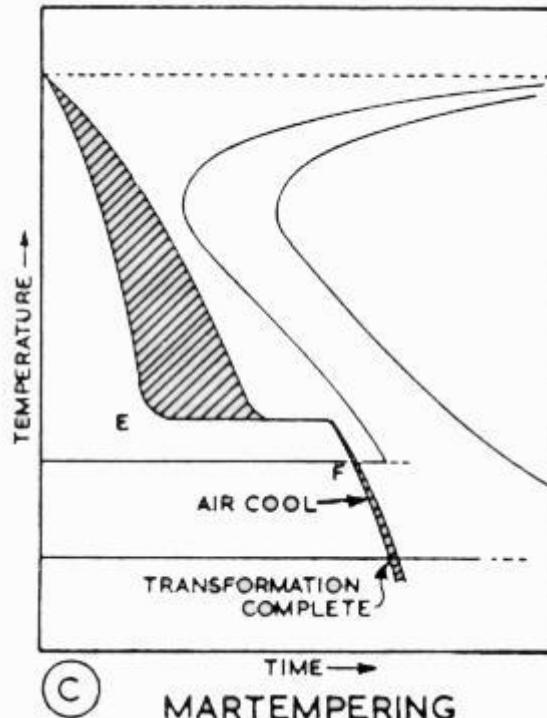
Three possible procedures for heating parts in a furnace  
(after A. A. Shmykov):  
 $t'$ —specified heating temperature,  $t_s$ —surface temperature of heated parts,  $t_c$ —temperature in the core of heated part,  $\Delta t$ —temperature difference between surface and core,  $t_f$ —furnace temperature

รูปที่ 27 แผนภาพอุณหภูมิกับเวลาการให้ความร้อน [17]

### ของเหลวสำหรับการซูบแข็ง

- ต้องมีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤติ
- มีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลงในช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงจาก Austenite ไปเป็น Martensite (ประมาณ 200-400 °C) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเครียดภายในจนเกิดการบิดงอ หรือแตกร้าว เสียหายได้
- ของเหลวสำหรับการซูบแข็งที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ น้ำ, น้ำเกลือ, น้ำด่าง, เกลือละลาย และอากาศ
- การถ่ายเทความร้อนที่ของเหลวภายในเป็นไออกเมื่อสัมผัสแห่งเหล็กร้อน แบ่งเป็น 3 ลักษณะ
  - **ขันแรก** ของเหลวที่สัมผัสกับแห่งเหล็กร้อนจะกลายเป็นไอห้มแห่งเหล็กไว้ในลักษณะพิล์มนบางๆ การถ่ายเทความร้อนช่วงนี้จะช้า แต่จะเป็นอยู่ในระยะสั้นๆ
  - **ขันที่สอง** พิล์มนบางๆ ที่ห้มอยู่แตกออก ของเหลวสัมผัสกับแห่งเหล็ก จะเดือดและกลายเป็นไอ มีลักษณะเหมือนการกวน ขันตอนนี้อัตราการเย็นจะสูงมาก
  - **ขันที่สาม** อัตราการเย็นตัวช้าลง เพราะแห่งเหล็กเย็นน้อยลง ของเหลวมีอุณหภูมิลดลง ต่ำกว่าจุดเดือด ความร้อนจึงถ่ายเทออกไปโดยการพาด้วยของเพียงอย่างเดียว อัตราการเย็นตัวจะลดลงจนถึงจุดที่ของเหลว กับแห่งเหล็กมีอุณหภูมิเท่ากัน

### Mar-Tempering Hardening



รูปที่ 28 แผนภาพกรรมวิธี Mar-tempering Hardening [19]

- นิยมใช้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน มีความหนาบางแตกต่างกันมาก (ถ้าชุบแบบปกติชิ้นงานอาจบิดงอ เกิดความเครียดจาก การเย็นตัวเร็ว อาจแตกร้าวในที่สุด)
- ความมีการอบคืนตัวเพื่อลดความเครียด

#### กรรมวิธีการทำ Mar-tempering

1 เผาเหล็กให้ร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ  $800-900\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ขึ้นกับชนิดของเหล็ก)

ถ้า  $\text{C} < 0.8\%$  ให้ใช้อุณหภูมิเลยเส้น A3 ประมาณ  $50-75\text{ }^{\circ}\text{C}$

ถ้า  $\text{C} > 0.8\%$  ให้ใช้อุณหภูมิเลยเส้น A1 ประมาณ  $50-75\text{ }^{\circ}\text{C}$  เท่านั้น

2 เมื่อเหล็กกล้ายเป็น ออสเทนไนท์ แซอุณหภูมิไว้ประมาณ 1 ชม./ความหนา 25 มม.

3 ชุบลงในอ่างเกลือหลอมละลาย ( $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เกลือโซเดียมในเตารด

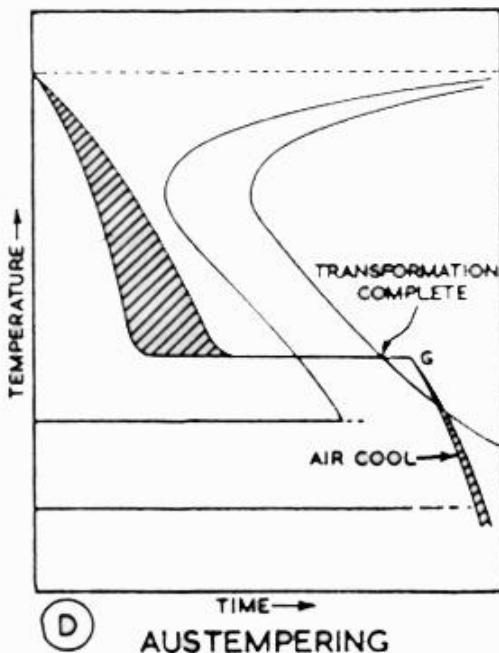
กับโปแตสเซียมในเตารด (40-50%) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่  $145\text{ }^{\circ}\text{C}$

ที่อุณหภูมิเหนือเส้น  $\text{Ms}$  โดยเวลาต้องไม่ถึงช่วงที่เกิด Bainite (ดูจาก TTT diagram)

4 เอาออกจากเตาทำให้เย็นโดยเร็ว ด้วยการจุ่มน้ำ หรือในน้ำมัน

## 5 ได้ที่มีโครงสร้าง Martensite ความแข็งสูง

Aus-Tempering Hardening



รูปที่ 29 แผนภาพกรรมวิธี Aus-Tempering Hardening [19]

### กรรมวิธีการทำ Aus-tempering

1. เพาเหล็กให้ว้อนถึงอุณหภูมิประมาณ  $800-900\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ขึ้นกับชนิดของเหล็ก)  
ถ้า  $\text{C} < 0.8\%$  ให้ใช้อุณหภูมิเลยเส้น A3 ประมาณ  $50-75\text{ }^{\circ}\text{C}$   
ถ้า  $\text{C} > 0.8\%$  ให้ใช้อุณหภูมิเลยเส้น A1 ประมาณ  $50-75\text{ }^{\circ}\text{C}$  เท่านั้น
2. เมื่อเหล็กกล้ายเป็น ออสเทนไนท์ แซ่ อุณหภูมิไว้ประมาณ 1 ซม./ความหนา 25 มม.
3. ชุบลงในอ่างเกลือหลومละลาย ( $\sim 500-600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ถ้าต้องการ Upper bainite (ข่นนก)  
ชุบลงในอ่างเกลือหลอมละลาย ( $\sim 400-500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ถ้าต้องการ Lower bainite (Acicular)  
ทิ้งไว้ระยะนานๆ ใจว่า austenite เป็น Bainite ทั้งหมดแล้ว (ดูจาก TTT diagram)
4. เอกอออกจากการทำให้เย็นโดยเร็ว ด้วยการจุ่มน้ำ หรือในน้ำมัน
5. ได้โครงสร้าง Bainite ตามอุณหภูมิที่ชุบในอ่างเกลือ

### Hardenability

Hardenability (ความสามารถในการชุบแข็ง) ไม่สามารถวัดเป็นปริมาณได้ จะได้จากการเปรียบเทียบลักษณะความแข็งที่ได้จากการทดลอง เหล็กชนิดใดมีความแข็งถึงผิวจราจร สมำเสมอถือว่ามี Hardenability สูง

#### ข้อสังเกตเกี่ยวกับความสามารถในการชุบแข็ง

1. Austenite ที่เกรนโตจะมี Hardenability สูง (มีระยะพักตัวนาน)
2.  $\text{Fe}_3\text{C}$  หรือ Carbide หรือสารมลทิน ที่ไม่เสถายได้หมดใน Austenite จะทำให้ความแข็งลดลง (กราฟ ขับข่าย)
3. เหล็ก 0.8%C เป็นเหล็กที่มี Hardenability สูงที่สุด (กราฟ ขับขวางสุด)
4. ระดับความแข็งที่ผิวภายนอกเรณภายในไม่ต่างกันมาก ถือว่ามี Hardenability สูง (ความซันต์)
5. เหล็กส่วนผสมเท่ากัน ใช้อัตราเย็นตัวที่เท่ากัน ให้ ความแข็งเท่ากัน (ขนาดเหล็กไม่มีผลต่อความแข็ง)

### Case hardening

เป็นการชุบแข็งเฉพาะผิวโดยที่ข้างในยังคงเห็นยอดซึ่งใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ ไม่แข็งมาก ง่ายต่อการขีนรูป จากนั้นจึงนำมาชุบให้เฉพาะที่ผิวแข็ง เพื่อให้ทนต่อการสึกหรอ (wear) ได้แก่ เพลาและเพ่อง เป็นต้น ทั้งนี้แบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

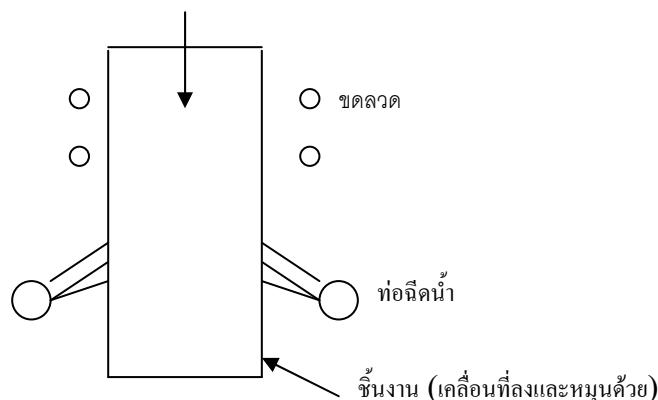
- ก. การชุบด้วยเปลวไฟ (Flame Hardening)
- ข. การชุบแข็งเหนี่ยวนำ (Induction Hardening)
- ค. การชุบแข็งโดยการอาบคาร์บอน (Carburization Hardening)
- ง. การชุบแข็งโดยการอาบไนโตรเจน (Nitride Hardening)
- จ. การชุบแข็งโดยการอาบคาร์บอนไนโตรเจน (Carbo-Nitriding)

### Flame Hardening

การให้ความร้อนชิ้นงานด้วยเปลวไฟ ทำได้โดยการใช้เปลวไฟจากก๊าซเชื้อเพลิง เช่น อาชีทีลิน หรือ โพเพน การชุบจะมีด้วยกันหลายวิธี เช่น ชิ้นงานอยู่กับที่และเปลวไฟพร้อมน้ำพ่นเคลื่อนที่ หรือ อาจจะกลับกันคือ ชิ้นงานเคลื่อนที่ เช่น หมุนรอบตัวเอง และเปลวไฟอยู่กับที่ ข้อดีของการชุบวิธีนี้คือ แกนกลางจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ การบิดรูปของชิ้นงานมีน้อย การชุบเป็นไปอย่างรวดเร็ว เชื้อเพลิงที่ใช้ไม่ถูกเปลี่ยน แต่ข้อเสียคือ ไม่สามารถชุบเพื่อให้ได้ความแข็งลึกน้อยกว่า 1 มม. ได้ วิธีนี้เหมาะสมกับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนปานกลางหรือมีคาร์บอนสูง ( $0.35\text{-}0.60\%$ C)

### Induction Hardening

หลักการของการชุบแข็งวิธีนี้คือถ่ายคลื่นแม่เหล็กดึงกับการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ เพียงแต่พลังงานความร้อนที่ใช้ได้จากขัดลาดเนี่ยวนำ ซึ่งผลิตสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเกิดกระแส(Eddy Current) บริเวณผิวชิ้นงานชุบแข็ง ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนอย่างรวดเร็ว แต่ความร้อนนี้จะอยู่บริเวณผิวชิ้นงานเท่านั้น หลังจากได้รับความร้อนแล้วชิ้นงานก็จะถูกทำให้เย็นด้วยการพ่นน้ำ การชุบแข็งด้วยวิธี Induction นี้จะได้ผิวงานที่แข็งเกร่งและเนื้อในหนึ่งเดียว ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้การชุบแข็งแบบนี้ ได้แก่ พวงกันเพลา สลักต่างๆ Roller รถตีนตะขาบ camshaft หรือ เพ่องที่ใช้กับเครื่องจักรกลการเกษตรที่ทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ ซึ่งเดิมจะมีโครงสร้างจุดภาคเป็น Ferrite และ Pearlite และเมื่อผ่านกระบวนการ Induction hardening แล้วจะได้ Martensite บริเวณผิวในขณะที่ในบริเวณลึกเข้าไปจะมี Ferrite และ Pearlite ปนอยู่กับ Martensite ส่วนบริเวณภายในยังคงเป็น Ferrite และ Pearlite ดังเดิม



รูปที่ 30 ภาพหลักการของ การชุบแข็งแบบ Induction Hardening

## 5.9 การซุบผิวแข็งโดยการอบคาร์บอน (Carburization Hardening)

การซุบผิวนี้จะใช้เมื่อต้องการซุบผิวแข็งขึ้นงาน ซึ่งจะทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งปกติจะไม่สามารถทำการซุบแข็งได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการเพิ่มปริมาณคาร์บอนบริเวณผิวชั้นงานเพื่อให้มีคาร์บอน (เหล็กคาร์บิด) มากพอ

คาร์บอนนี้อาจได้มาจากการเผาของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยจะต้องทำให้อะตอมคาร์บอนแพร่ (diffuse) เข้าไปในผิวเหล็กกล้า ซึ่งชั้นงานจำเป็นต้องทำให้ร้อน จนมีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac3 เพราะที่อุณหภูมนี้ ความสามารถ และความเร็วในการแพร่ของคาร์บอนเข้าไปในเหล็กกล้า เป็นไปได้อย่างมาก บริเวณผิวซึ่งต้องการซุบแข็ง จะต้องให้คาร์บอนแพร่เข้าไปประมาณ 0.8 % และไม่ควรให้มีคาร์บอนมากกว่านี้ เพราะถ้ามีคาร์บอนมากเกินไปหลังจากการซุบจะมี Cementite หลงเหลืออยู่มากเกินไป ซึ่งมีผลเสีย คือมีความเปราะมาก โอกาสที่ผิวแตกร้าวจะมีมาก หรืออาจมี Retained austenite ตกค้างมาก การควบคุมคาร์บอนทำได้โดยหลายวิธี เช่น โดยการเลือกชนิดของสารเติมคาร์บอนซึ่งมีหลายชนิด นอกจากราดผิวสามารถเลือกเวลาและอุณหภูมิเติมคาร์บอน เพื่อความเหมาะสมตามความต้องการ การใช้อุณหภูมิเติมคาร์บอนสูง จะทำให้คาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปได้ลึก และรวดเร็วสำหรับเวลาที่เลือกใช้ชั้นอยู่กับสารเติมคาร์บอน และ ความแข็งลึกที่ต้องการ

### สารเติมคาร์บอน 2 ชนิด

#### 1. Pack carburizing (ใช้สารเติมคาร์บอนที่เป็นของแข็ง)

เป็นการหมักชั้นงานในผงคาร์บอน โดยการหุ้มห่อชั้นงานด้วยผงคาร์บอนที่เตรียมไว้สำหรับการทำคาร์บูโรเจ็งโดยเฉพาะ เมื่อนำเหล็กที่ห่อหุ้มในกล่องเรียบร้อยแล้วนี้ไปเผาบนที่อุณหภูมิสูงคงเหล่านี้จะปล่อยธาตุคาร์บอนที่ซึ่มเข้าผิวเหล็กได้ ทำให้บริเวณผิวบางมีคาร์บอนมากกว่าแกนใน ( $900-1000^{\circ}\text{C}$ )

สารเติมคาร์บอนที่เป็นของแข็งประกอบด้วย ถ่านไม้ ถ่านหิน เช่น ถ่านไม้ 60% ถ่านหินสีน้ำตาล 40% ผสมกับสารเร่งปฏิกิริยาแบบเริ่มคาร์บอนเนต จำนวนหนึ่ง ถ้าบริเวณใดไม่ต้องการซุบผิวแข็ง ก็สามารถทำได้โดยการพอกด้วยดินเหนียว หรือซุบผิวด้วยทองแดง

#### 2. ใช้สารเติมคาร์บอนที่เป็นของเหลวและก๊าซ

สำหรับสารเติมคาร์บอนที่เป็นของเหลว Potassium cyanide (KCN) หรือ Sodium cyanide(NaCN) ผสมกับคลอรีน สารนี้เมื่อได้รับความร้อนสูง เกลือไชยาไนต์จะแตกตัว และคาร์บอนจะแพร่เข้าไปในผิวเหล็ก โดยจะรวมกับเหล็กในเหล็กคาร์บิด การเติมคาร์บอนวินิฟีน์แม้ว่าจะมีราคาแพง

แต่เวลาที่ใช้เติมจะสั้นมาก ซึ่งงานที่มีผิวเรียบดีการแพร์ของคาร์บอนจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและการบิดเบี้ยวของชิ้นงานจะมีน้อย แต่ข้อเสียคือ การปอกปิดบริเวณที่ไม่ต้องการชูบแข็งจะทำได้ยากกว่า สารเติมคาร์บอนที่อยู่ในรูป ก๊าซที่ใช้ได้แก่ ก๊าซเชื้อเพลิง เช่น โพเพน แก๊สปีโตรเลียมเหลว (LPG) ผสมกับแก๊สพาหะ (Carrier Gas) คือ เอ็นไดเทอร์มิกส์แก๊ส (Endothermic Gas) ข้อดีของวิธีนี้ คือ การควบคุมจำนวนcarbon ทำได้ง่าย ใช้พลังงานน้อย และเวลาสั้น ซึ่งงานที่ได้ผิวจะสะอาด แต่ข้อเสีย คือ เครื่องจักรราคาแพง

### **ตัวอย่างเหล็กอบคาร์บอน**

ตัวอย่างเพื่อที่ใช้ในระบบส่งกำลังในเครื่องจักรกล เครื่องยนต์ และยานพาหนะต่างๆ มักจะทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งมีโครงสร้างเดิมที่เป็น Ferrite เกือบ 90 % นอกจากนั้นเป็น Pearlite เมื่อเติมคาร์บอนที่  $920^{\circ}\text{C}$  แล้ว คาร์บอนซึมเข้าไปในเนื้องานทำให้ที่ผิวงานจะมีคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็น 0.8-0.9 % โครงสร้างจะเป็น Pearlite ถัดลึกเข้าไปในเนื้องานก็จะประกอบด้วย Pearlite และ Ferrite ดังนั้นเมื่อนำไปชูบแข็งแล้วผิวงานจะกลายเป็น Martensite ซึ่งแข็งทนการสึกหรอได้ดี ในขณะที่เจกลาดซึ่งงานยังคงเป็น Pearlite และ Ferrite เมื่อเดิม ซึ่งยังคงอ่อนและมีความเหนียวดีเช่นเดิม

### **Nitriding**

ใช้ก๊าซแอมโมเนียในการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนเพื่อซึมเข้าผิวเหล็กที่อุณหภูมิสูง สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนผิวจะแข็งและเปราะมีโครงสร้างเป็นรูปเข็มของคอมเพล็กซ์ไนโตรด์ ในกรณีที่ใช้เหล็กกล้าพสมที่มีธาตุผสมของอะลูมิเนียม โครเมียม นิกเกิล และโมลิบดีนัม รวมกันเกิน 3 เปอร์เซนต์หลังเผาอบด้วยวิธีไนโตรดิنجแล้วนำไปกลึงไสละเอียด เมื่อนำมาชูบแข็งและเทมเปอร์ที่ประมาณ  $500^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศของแอมโมเนียประมาณ 50 ชั่วโมง ผิวเหล็กกล้าจะแข็งเป็นพิเศษคือ มีความแข็งเกิน  $70 \text{ R}_c$

โดยที่วิธีนี้ กระทำที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ จึงไม่เกิดการแตกร้าว บิด งอ ของชิ้นงานซึ่งเป็นข้อดีของกรรมวิธีนี้

### Cyaniding

ชุบด้วย NaCN หรือ KCN ใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ( $0.20-0.25\% \text{ } ^\circ\text{C}$ )

### Carbonitriding

ใช้แก๊สแอมโมเนีย ( $20-30\%$ ) และ Hydrocarbon

$840-860\text{ }^\circ\text{C}$  สำหรับเครื่องจักรที่มีขีนส่วนซับซ้อน

$540-560\text{ }^\circ\text{C}$  สำหรับดอกสว่าน, รีมเมอร์หัวเจาะ

### การยิงอิโอนฟังผิด

เป็นการยิงอิโอนบางตัวลงไปผังที่ผิวเพื่อเพิ่มความแข็ง เช่น Ionitriding

Ionitriding เป็นการทำ Nitriding แบบหนึ่งโดยการใช้ Nitrogen ที่มีอยู่ในสภาพ อิโอนบวก ( $\text{N}^+$ ) วิ่งเข้าไปกระแทกผิวงาน ทำให้ผิวงานร้อนและในต่อเจนซึ่งเข้าไปได้ดี ทำให้งานมี ความแข็งที่ผิวงานได้เร็ว เกิดเป็นสารประกอบไนโตรดที่ผิวงาน และที่ในต่อเจนแพร่เข้าไปถึง ทำให้ งานมีความแข็งที่ผิวมากขึ้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวได้ดี เพิ่มความต้านทานการล้าตัว

## 6. โครงสร้างวัสดุเซรามิก

เซรามิกเป็นวัสดุอินทรีย์ (inorganic) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนและประกอบไปด้วย ธาตุโลหะและอลูมิเนียมกันเซ่น ( $Al_2O_3$ ) เป็นเซรามิกที่มีอะตอมของอลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะรวมกับอะตอมของออกไซเจนที่เป็นอัลูมิเนียม ที่มีความคงทนและแข็งแรงมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการรวมตัวของธาตุต่างๆ ที่มาผสมกัน การใช้งานเซรามิกมีตั้งแต่ เครื่องปั้นดินเผา อิฐ กระเบื้อง เครื่องครัว วัสดุทุนไฟ สารแม่เหล็ก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ไฟเบอร์ และวัสดุขัดถู เป็นต้น

เนื่องจากเซรามิกมีการยึดเหนี่ยวของอะตอมแบบไออกอนิกและโควาเลนต์ จึงทำให้มีความแข็ง เปราะ จุดหลอมตัวสูงมาก และการนำไฟฟ้ากับความร้อนต่ำ ทนการกัดกร่อนของสารเคมี มีความต้านทานแรงอัดสูงมาก จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้เซรามิกถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมทางด้านวัสดุทุนไฟ ในอุตสาหกรรมหลอมโลหะและการอบชุบ การเคลือบผิวแข็งและทนความร้อนของยานอวกาศและเครื่องบิน เครื่องยนต์เทอร์โบในน้ำ ใช้เป็นวัสดุขัดถู เช่น หินเจียระไนหรือวัสดุคอมพัค เช่น มีดกลึง เป็นต้น

เซรามิกจำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือเซรามิกธรรมชาติ (tradition ceramic) และเซรามิกในงานวิศวกรรม(engineering ceramic) หรือเซรามิกสมัยใหม่ (advanced ceramic)

เซรามิกแบบธรรมชาติประกอบด้วย ดิน(clay) ซิลิกา(silica) และเฟลด์สปาร์(feldspar) ผลิตภัณฑ์ของเซรามิกกลุ่มนี้ได้แก่ วัสดุทุนไฟ ซีเมนต์ เครื่องสุขภัณฑ์ กระเบื้อง อิฐ ถ้วยชาม เป็นต้น เซรามิกในงานวิศวกรรมเป็นเซรามิกที่เป็นสารประกอบที่มีความบริสุทธิ์สูงได้แก่

คาร์ไบด์(SiC, BC), ไนไตรด์(AIN, SiN, SiAlON, BN), บอร์ไนเด( boride), ออกไซด์บริสุทธิ์อะลูมีนา(alumina), เซอร์โคเนีย(zirconia), thoaria, เบรลเลีย(beryllia), แมกนีเซีย(magnesia), สปินেล(spinel), ฟอร์สเตอไนเด(forsterite), แมกเนติกเซรามิก(magnetic ceramic), เฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก(ferroelectric ceramic) และซูเปอร์คอนเดกเตอร์เซรามิก(superconductor ceramic) การใช้งานเซรามิกกลุ่มนี้จะใช้ในงานเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น SiC ใช้ทำเครื่องยนต์เทอร์โบในน้ำและเส้นใยเสริมแรงในวัสดุผสม หรือ  $Al_2O_3$  ที่ถูกใช้เป็นวัสดุหน่วยหัวที่ยืน เป็นต้น

### 6.1 โครงสร้างผลึกของเซรามิก

โครงสร้างของผลึกเซรามิกจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของรัศมีไออกอนิกและการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า รัศมีไออกอนิกใช้ทำการอัดตัวของไออกอนที่เป็นประจุลบและบวก หาแรงดึงดูดสูงสุดและแรงผลักตัวสูตระหว่างไออกอน ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากไออกอนบวกหรือแคตไออกอน(cation) ถูกกลบรวมโดยไออกอนลบหรือแอนไออกอน(anion) หรือเกิดขึ้นในลักษณะที่ต้องกันข้าม พื้นฐานของโครงสร้างผลึกมาจากการสมมูลตัวกันที่ว่าไออกอนที่มีขนาดใหญ่(แอนไออกอน) เป็นตัวกำหนดโครงสร้างหน่วยเซลล์ขึ้นมาก่อน จากนั้นไออกอนขนาดเล็ก(แคตไออกอน) จะไปแทรกตัวอยู่ภายในหรือระหว่างแลดทิชของโครงสร้างหน่วยเซลล์นั้นๆ

การเกิดพันธะของอะตอมในวัสดุเซรามิกมักเป็นพันธะเคมีระหว่างพันธะไอออนิกและพันธะโควาเลนต์ ดีกรีของไอออนิกค่าแรกเตอร์ (Ionic character) จะขึ้นอยู่กับค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตี้ (electronegativity) ระหว่างอะตอมต่างชนิดกันในสารประกอบ สำหรับเปอร์เซ็นต์ไอออนิกค่าแรกเตอร์ (ionic character) ของวัสดุเซรามิกพื้นฐานหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไอออนิกค่าแรกเตอร์} = (1 - e^{-(1/4)(x_A - x_B)^2}) \times 100 \quad \dots(1)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์โควาเลนต์ ค่าแรกเตอร์} = 100 - \% \text{ ไอออนิกค่าแรกเตอร์} \quad \dots(2)$$

เมื่อ  $x_A$  และ  $x_B$  คือค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตี้ของธาตุ A และ B

สารประกอบเซรามิก	พันธะระหว่างอะตอม	ความแตกต่างของอิเล็กโทรเนกาติวิตี้	ไอออนิกค่าแรกเตอร์	โควาเลนต์ค่าแรกเตอร์
MgO	Mg-O	2.3	73	27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al-O	2.0	63	37
SiO <sub>2</sub>	Si-O	1.7	51	49
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Si-N	1.2	30	70
SiC	Si-C	0.7	11	89

ตารางที่ 7 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าแรกเตอร์ของไอออนิกและโควาเลนต์ของเซรามิก [22]

### โครงสร้างผลึกชนิด AX-Type

เซรามิกบางชนิดจะมีจำนวนของแคตไอออนและแอนไອ่อนเท่ากัน ซึ่งจะถูกจัดให้เป็นสารประกอบชนิด AX-Type โดย A คือแคตไอออน และ X คือแอนไອ่อน โครงสร้างผลึกของสารประกอบกลุ่มนี้มีความแตกต่างและเรียกว่าห้องห้องธาตุที่เข้ามาร่วมกันเป็นสารประกอบ 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

และแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของแอนไอโอนที่อยู่ตรงมุมทุกมุมของหน่วยเซลล์รวมทั้งหมด 12 ลูก วัสดุเซรามิกที่มีโครงสร้างพลีกแบบนี้ได้แก่  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnS}$ ,  $\text{LiF}$  และ  $\text{FeO}$

### โครงสร้างพลีกซีเซียมคลอไรด์ (Cesium Chloride Structure)

หน่วยเซลของโครงสร้างพลีกซีเซียมคลอไรด์ ค่าเลขไอออร์ดิเนทคือ 4 ตำแหน่งของแอนไอโอนจะอยู่ที่มุมแต่ละมุมของหน่วยเซล และที่ศูนย์กลางของหน่วยเซลจะเป็นตำแหน่งของแคตไอโอนเพียง 1 ลูก การที่มีแคตไอโอนของซีเซียมอยู่ตรงกลางแอนไอโอนของคลอไรด์จะทำให้มีการจัดตัวแน่นขึ้น สารประกอบที่ได้นี้จะยึดเหนี่ยว กันด้วยพันธะไอ่อนนิก ลักษณะโครงสร้างพลีกแบบนี้ได้แก่  $\text{CsBr}$ ,  $\text{TiCl}$  และ  $\text{TiBr}$

## 6.2 คุณสมบัติของเซรามิก

เซรามิกมีคุณสมบัติเฉพาะตัวหลายอย่างที่โดดเด่น เช่น มีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก และมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำ ด้วยเหตุนี้เซรามิกจึงถูกนำไปใช้งานเป็นวัสดุทนความร้อน ไม่ว่าจะในอุตสาหกรรมหลอมโลหะหรืองานอบชุบด้วยความร้อน สมบัติทางกลที่เซรามิกมีอยู่คือ มีความแข็งและเปราะ ซึ่งทำให้เกิดความแตกกร้าวได้ง่าย ความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำ แต่ความแข็งแรงเมื่อรับแรงอัดนั้นมีสูงมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานแรงดึงแล้ว อาจมีค่าสูงกว่าถึง 5 – 10 เท่าตัว สมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของเซรามิกคือ มีความนำไฟฟ้าที่ต่ำ ดังนั้นเซรามิกหลายชนิดจึงถูกนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้าและตัวเก็บประจุต่างๆ ที่มีขนาดเล็ก

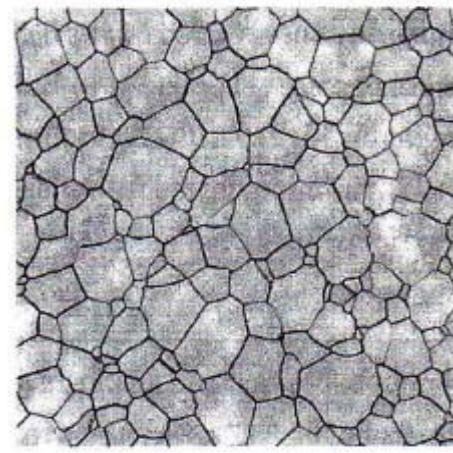
### 6.2.1 คุณสมบัติเชิงกลของเซรามิก

วัสดุเซรามิกโดยทั่วไปจะแข็งและเปราะ มีความต้านทานแรงดึงต่ำ แต่มีความต้านทานแรงอัดที่สูงและมีความต้านทานการแตกหักเนื่องจากมีรอยแตกกร้าวหรือแฟร์กเจอร์ท์ฟเนสส์ (fracture toughness) ที่ต่ำ ดังตารางที่ 8 แสดงสมบัติทางกลของวัสดุเซรามิกทางวิศวกรรม ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงอัดและแฟร์กเจอร์ท์ฟเนสส์

ชนิดเซรามิก	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความต้านทาน แรงดึง (psi)	ความแข็งแรง แตกหัก (psi)	ความต้านทาน แรงอัด (psi)	มอดูลัส ของยัง (psi)	แฟร์เจอร์ ทัฟเนส (psi)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.98	30,000	80,000	400,000	$56 \times 10^6$	5,000
SiC (ซินเทอเรชัน)	3.1	25,000	80,000	560,000	$60 \times 10^6$	4,000
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (รีแอชันบอนด์)	2.5	20,000	35,000	150,000	$30 \times 10^6$	3,000
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (อัลตร้าอน)	3.2	80,000	130,000	500,000	$45 \times 10^6$	5,000
ไซโลน (sialon)	3.24	60,000	140,000	500,000	$45 \times 10^6$	9,000
ZrO <sub>2</sub> (พาร์เชียลสเตติคไลซ์)	5.8	65,000	100,000	270,000	$30 \times 10^6$	10,000
ZrO <sub>2</sub> (ทรานส์ฟอร์มเมชันทัฟเทน)	5.8	50,000	115,000	250,000	$29 \times 10^6$	11,000

ตารางที่ 8 สมบัติทางกลของวัสดุเซรามิกวิศวกรรม [20]

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเซรามิกประกอบไปด้วย การเชื่อมต่อกันระหว่างองค์กรน สิ่งเจือปนในเนื้อเซรามิก และโครงอากาศหรือช่องว่างที่มีอยู่ในเนื้อเซรามิก รูปที่ 31 แสดงให้เห็นลักษณะของเกรนและขอบเกรนเซรามิกที่มีผลอย่างมากในการทำให้เกิด จุดบกพร่องที่บวบเวบผิวของเซรามิกได้ ปกติแล้วเกรนที่มีขนาดเล็กจะให้ความแข็งแรงที่ดีกว่าเกรนขนาด ใหญ่ ซึ่งเกรนขนาดเล็กจะช่วยลดความเค้นบริเวบของเกรนที่เกิดขึ้นขณะมีการขยายตัวหรือหดตัว เนื่องจากแรงกระทำแบบไนทิกทางได้ดี เกรนขนาดเล็กจะได้จากการผลิตที่เตรียมวัตถุดีที่มี ความละเอียดสูง



รูปที่ 31 โครงสร้างกรนของ PLZT ( Lead-lanthanum-zirconium-titanate)  
ที่ใช้เป็นวัสดุเซรามิกตัวรับรู้ (senser ceramic) [20]

ความพรุนตัวหรือช่องว่างในเนื้อเซรามิกก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเซรามิก ซึ่งจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณขนาด การกระจายตัว และความต่อเนื่องของช่องว่างดังกล่าว ความพรุนตัวและช่องว่างจะมีทั้งลักษณะที่ปราภูมิให้เห็นและไม่ปราภูมิให้เห็น ความพรุนปราภูมิ (apparent porosity) หรือรูพรุนที่มีการเข้มต่อกันของโพรงอากาศขนาดเล็กๆ จะหาได้จากสมการที่ (3) คือ

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

ความพรุนปราภูมิ

เมื่อ  $W_w$  คือน้ำหนักเซรามิกเมื่อเอาน้ำออก  
 $W_d$  คือน้ำหนักเซรามิกแห้ง  
 $W_s$  คือน้ำหนักเซรามิกเมื่อแขวนโดยในน้ำ  
 ปริมาตรของความพรุนทั้งหมดหาได้จากการรวมของปริมาตรของทั้งความพรุนปราภูมิและ  
 ความพรุนแบบปิดรวมกัน ซึ่งหาได้จากสมการที่ (4)

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

ความพรุนรวม

เมื่อ  $\rho_T$  คือความหนาแน่นจริงของเซรามิก

$\rho_B$  คือความหนาแน่นรวม (bulk density) หรือน้ำหนักของเซรามิกหารด้วยปริมาตร เมื่อ

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

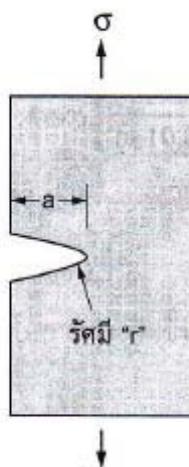
โดยปกติแล้ว ความพรุนจะมีผลต่อสมบัติทางกลและทางเคมีของเซรามิกอย่างมาก ดังนี้เรายังต้องการให้มีความพรุนน้อยที่สุดหากต้องการให้สมบัติทั้งสองประการดีขึ้น อย่างไรก็ตาม หากเราใช้เซรามิกเป็นผนวนไฟฟ้า จำนวนของความพรุนที่มีมากจะช่วยทำให้ความเป็นผนวนดีขึ้น และยังทำให้เซรามิกมีน้ำหนักเบาอีกด้วย สมบัติทั้งสองประการเป็นสิ่งที่ต้องการมากสำหรับโครงสร้างของyan อาทิตย์ของนาชาต มีเช่นว่า อิฐพอรัสซิลิค้า (porous silica brick) ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันความร้อนให้กับโครงสร้าง (thermal protection structure; TPS) ในส่วนที่ต้องโดนความร้อนสูง การเพิ่มความพรุนในเนื้อเซรามิกอาจทำได้โดยผสมสารที่เผาไหม้ได้ง่ายเข้าไปในเนื้อเซรามิกจะเปลี่ยนผงปีลีอย หรือสารระเหยที่เป็นของแข็ง เช่นแคนฟทาลิน หรืออาจจะใช้การเติมฟองอากาศเข้าไปในเนื้อเซรามิกจะเปลี่ยน หรือวิธีการเดิมสารเคมีที่ให้ปฏิกิริยาแล้วเกิดฟองก๊าซขณะผสมเซรามิกก็ได้

### การแตกหักทางกลของเซรามิก

วัสดุเซรามิกไม่ว่าจะมีโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียนหรือไม่ก็ตาม ต่างก็มีความเปราะสูง ทั้งที่อุณหภูมิสูง ปัญหาของการแตกหักของวัสดุเปราะอย่างเซรามิกนี้เริ่มต้นจากการอยแตกร้าวน้ำดเล็กๆ ขนาด รูปร่าง และทิศทางรอยแตกหักนิหรือรอยแตกร้าวน้ำดเล็กๆ จะเป็นตัวจำกัดความสามารถของเซรามิกในการรับความเคี้ยวแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากรอยแตกร้าวน้ำดเล็ก (Griffith flaw) จะเป็นจุดศูนย์รวมของความเคี้ยวที่มีความเข้มสูง รูปที่ 32 แสดงให้เห็นรอยแตกร้าวน้ำดเล็กที่มีความยาว  $a$  และรัศมี  $r$  เมื่อมีความเคี้ยวดึง กระทำที่วัสดุ จะเกิดความเคี้ยวจริงที่ปลายของรอยแตกดังสมการ

... (6)

สำหรับรอยแตกร้าวน้ำดเล็กที่มีรัศมี  $r$  น้อย แต่มีความยาว  $a$  มาก จะทำให้อัตราส่วนของ  $\sigma_{\text{จริง}}/\sigma$  สูง ไปด้วยหรือความเคี้ยวจะมีกำลังขยายมากขึ้นนั่นเอง และเมื่อกำลังขยายของความเคี้ยวมีสูงถึงความเคี้ยว ณ จุดแรก รอยร้าวน้ำดเล็กจะขยายตัวใหญ่ขึ้นและเกิดการแตกหักในที่สุด ถึงแม้ว่าค่าของความเคี้ยวที่กระทำหรือ  $\sigma$  จะมีค่าน้อยก็ตาม



รูปที่ 32 ลักษณะรอยแตกร้าวน้ำดีกที่เกิดกับเซรามิก

ความคื้นที่เกิดขึ้นกับรอยแตกร้าวที่มีความเกี่ยวเนื่องกับความเครียดในสภาวะอีดหยุ่นหรือโมดูลัสของความอีดหยุ่น (Young's modulus) โดยเมื่อร้อยร้าวเกิดการขยายตัวหรืออุบลามเกิดขึ้น พลังงานความเครียดจะลดลง ในขณะนั้นจะเกิดพื้นผิวขึ้นมาใหม่ 2 พื้นผิวที่เกิดจากการขยายตัวของรอยแตกร้าว และทำให้พลังงานที่มีความเกี่ยวข้องกับพื้นผิวเกิดการเพิ่มขึ้น จากการสมดุลพลังงานความเครียดและพลังงานพื้นผิว เราพบว่าความคื้นวิกฤตที่จะทำให้เกิดการขยายตัวของรอยแตกร้าวจะเป็นไปตามสมการกริฟฟิท (Griffith equation) ดังนี้

... (7)

เมื่อ  $a$  คือความยาวของพื้นผิวรอยแตก ( $1/2$  ของความยาวรอยแตกภายใน)

$\gamma$  คือพลังงานพื้นผิว (ต่อหน่วยพื้นที่)

จากสมการที่ (1.5) เราสามารถจัดสมการใหม่และอธิบายความสัมพันธ์ของความคื้นที่มีต่อแรงกระเจ�ร์ของความเข้มของความคื้น ( $K$ ) ได้ดังสมการ

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

สมการแต่ละสมการจะแสดงให้เห็นความเกี่ยวข้องของรอยแตกกับสมบัติทางกลของเซรามิก ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเซรามิก การหาวิธีการผลิตที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวน้อยที่สุดจะช่วยเพิ่มความแรงกับเซรามิกได้

เราสามารถวัดรัศมีของรอยแตกร้าวได้ด้วยกรรมวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทลายสภาพ ดังนั้น สมการ (8) จะช่วยให้เราทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการขยายตัวของรอยแตกร้าวในวัสดุเปราะ แต่ไม่ได้ช่วยในการหาค่าความแข็งแรงที่แท้จริงของวัสดุเซรามิกโดยตรง

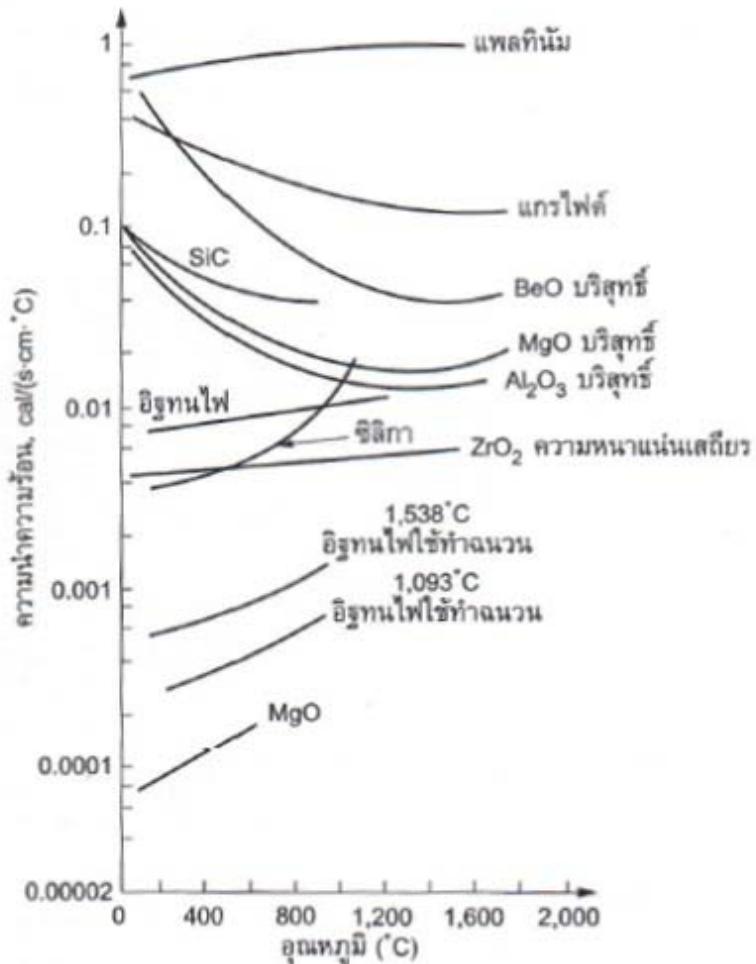
### การวิเคราะห์ความแข็งแรงแตกหักโดยการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution) [20]

วัสดุเปราะอย่างเซรามิกและแก้วจะมีลักษณะการแตกหักจากความเค้นที่แตกต่างจากวัสดุเหนียว วัสดุเหนียวจะแตกหักจากความเค้นที่มีการแยกแจงที่แคบมาก (Gaussian distribution) แต่วัสดุเปราะจะมี การแตกหักจากความเค้นที่มีการแยกแจงกว้าง (Weibull distribution) โดยการแจกแจงแบบไวบูลล์เป็น การวัดความเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงของวัสดุที่มีผลมาจากการกระจายตัวของขนาดของรอยแตกหักขนาดเล็กๆ การแจกแจงแบบไวบูลล์ [20]

วัสดุเหนียวและเปราะที่แตกหักจากสัดส่วนของความเค้นต่างๆ ที่ความเค้นต่ำ หากชิ้นวัสดุมีรอยแตกหักที่ใหญ่พอ ก็อาจจะทำให้เกิดการแตกหักขึ้นได้แม้สัดส่วนของความเค้นจะต่ำก็ตาม โดยทั่วไป แล้ว วัสดุเกิดการหักจากความเค้นที่ปานกลาง ส่วนชิ้นวัสดุที่มีรอยแตกหักขนาดเล็กจะแตกหักเมื่อมี ความดันสูงมากจะทำ

#### 6.2.2 คุณสมบัติทางความร้อนของเซรามิก

โดยปกติแล้วเซรามิกจะมีความนำไฟฟ้าที่ต่ำ เนื่องจากมีพันธะไอออนิกโคลเวเลนท์ที่แข็งแรงและ มีความเป็นจนวนทางความร้อน รูปที่ 33 เปรียบเทียบความนำความร้อนของเซรามิก ชนิดต่างๆ ที่เป็น ฟงก์ชันกับอุณหภูมิ และด้วยสาเหตุที่เซรามิกมีความต้านทานความร้อนสูง จึงถูกนำไปใช้งานเป็นวัสดุ ทนไฟ (refractory) ที่มีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงทั้งสภาพของเหลวและก๊าซ วัสดุ ทนไฟมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมโลหะ เคมี เซรามิก และแก้ว



รูปที่ 33 แผนภูมิการนำความร้อนของวัสดุเซรามิกที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ [18]

### ซิลิโคนคาร์ไบด์ (SiC) [20]

ถูกค้นพบและเตรียมขึ้นจากกระบวนการผลิตซิลิโคนคาร์ไบด์ หรือ การ์ไบรันดัม โดย เตาหลอมไฟฟ้า (Acheson) ตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 19 ในช่วงแรกของการค้นพบซิลิโคนคาร์ไบด์ นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุขัดถูและใช้เป็นวัสดุสำหรับการตัดเนื่องจากมีความแข็ง ซิลิโคนคาร์ไบด์ ยังมีคุณสมบัติเด่นในการนำความร้อน การนำไปใช้ได้กว่าเซรามิกชนิดอื่น ความทนทานต่อการ สึกกร่อนและทนการกัดกร่อนสูง มีความแข็งแรงและคงรูปได้เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง จึงนิยมใช้ ในการผลิตเป็นวัสดุทนไฟและวัสดุให้ความร้อนในเตา (heating element) ตลอดจนเป็นชิ้นส่วน อุปกรณ์ต่างๆ ในเครื่องจักรเครื่องยนต์ต่างๆ ซิลิโคนคาร์ไบด์สามารถขึ้นรูปให้มีเนื้อแน่นและมีรู พรุนได้ การขึ้นรูปให้มีเนื้อแน่น นิยมใช้ขึ้นรูปชิ้นส่วนที่ต้องการความทนทานต่อการเสียดสีสูง

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

### โครงสร้างผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ [17]

ซิลิกอนคาร์ไบด์มีโครงสร้างผลึกอยู่คล้ายรูปแบบ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ ชนิดที่มีโครงสร้างเป็นคิวบิก (cubic) เรียกว่า เบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ ( $\beta\text{-SiC}$ ) และชนิดที่มีโครงสร้าง non-cubic คิวบิก (non-cubic) เรียกว่า แอลfaซิลิกอนคาร์ไบด์ ( $\alpha\text{-SiC}$ ) พากนอนคิวบิก ได้แก่ ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างแบบเสกฉะ โภโนลด (hexagonal) และรอมโบเรห์ดอล (rhombohedral) ได้จากการสังเคราะห์สาร โดยวิธีเผาดักชันทรายแก้วที่อุณหภูมิสูง ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยทั่วไปจะได้จากการกระบวนการผลิตที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์

### คุณสมบัติของสารซิลิกอนคาร์ไบด์

ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นสารประกอบที่มีพันธะโควาเลนท์ที่แข็งแรงมาก ดังนั้น การถลายตัวให้เกิดเป็นแก๊สของซิลิกอนและ แกรไฟต์นั้น ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากกว่า 2,200 องศาเซลเซียสขึ้นไป ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์มากๆ จะไม่มีสีหรือมีสีเขียวอ่อน แต่ถ้ามีชาตุในโครงuren ปะปนอยู่จะให้มีสีเขียว อุดมในยมปะปนจะมีสีฟ้า หรือมีชาตุเจือปนหมายชนิดจะมีสีดำ

### คุณสมบัติของผงซิลิกอนคาร์ไบด์

ชนิด คุณสมบัติ	แอลฟ่าซิลิกอนคาร์ไบด์ $\alpha - \text{SiC}$	เบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ $\beta - \text{SiC}$
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	3.20 – 3.22	3.17 – 3.20
ระบบผลึก (crystalline form)	เชกชา โภนอลและ รอน โนบีดรอล	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 <sup>2</sup> /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 <sup>2</sup> )	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]

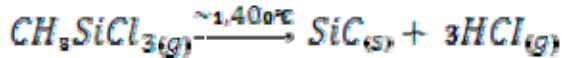
### กระบวนการผลิตสารซิลิกอนคาร์ไบด์

สารซิลิกอนคาร์ไบด์เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างทราย(ซิลิกา) และถ่านโค้กในเตาไฟฟ้า วิธีนี้รู้จักกันดีในชื่อของ Acheson process ปฏิกิริยาเป็นดังสมการ

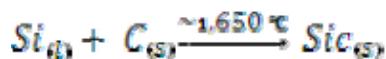


อุณหภูมิของการปฏิกิริยา คือ 2,700 องศาเซลเซียส หลังจาก 2 – 3 วันของการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ซึ่งมีสีเขียวหรือดำ จากนั้นนำมาบดให้ได้ขนาดที่ต้องการ ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน ไม่สามารถจะนำมาเผาชินเทอร์ไฟได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงได้ หมายความว่าใช้งานด้านวัสดุทุนไฟซึ่งไม่ต้องการความหนาแน่นสูงมากนัก

ซิลิกอนคาร์บไบด์สามารถถูกสังเคราะห์ได้จากการสลายตัวของแก๊ส  $\text{CH}_3\text{SiCl}_3$  ในบรรยากาศ าร์กอน วิธีนี้เรียกว่า Chemical Vapor Decomposition (CVD) ซึ่งมีปฏิกิริยาแสดงดังสมการ



สำหรับการสังเคราะห์ผงซิลิกอนคาร์บไบด์ ที่มีขนาดละเอียดมากๆ สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ซิลิกอนเหลว กับ ผงคาร์บอน ผลึกซิลิกอนคาร์บไบด์เกิดที่อุณหภูมิประมาณ  $1,650^\circ\text{C}$  ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงไว้ดังสมการ



#### ลักษณะของซิลิกอนคาร์บไบด์ที่มีการนำมาใช้ประโยชน์

ปัจจุบันได้มีการนำเอาระบบซิลิกอนคาร์บไบด์ไปใช้ในงานต่างๆ มากมาย ได้แก่ อุตสาหกรรมวัสดุทุนไฟ อุตสาหกรรมเซรามิกต่างๆ ใช้ทำหัวสำหรับพ่นไอร้อนที่ใช้ในการขับเคลื่อนจากการตรวจ ทำเบ้าหลอม โลหะ ตัวด้านหน้าไฟฟ้า เป็นส่วนประกอบในเตาเผา เป็นต้น เนื่องจากซิลิกอนคาร์บไบด์ เป็นสารที่ทำการซินเทอร์ริงยาก เพราะมีพันธะโคลาเดนที่แข็งแรง ดังนั้น การจำแนกซิลิกอนคาร์บไบด์จึงจำแนกจากกระบวนการซินเทอร์ริงซึ่งสามารถแบ่งลักษณะของผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์บไบด์ได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- ซิลิกอนคาร์บไบด์ที่มีความหนาแน่นสูง (High – Density Silicon Carbide Materials)
- ซิลิกอนคาร์บไบด์ที่เป็นเส้นใย (Silicon Carbide Fibers)
- ซิลิกอนคาร์บไบด์ชนิดพรุนตัว (Porous Silicon Carbide)

#### ซิลิกอนคาร์บไบด์ที่มีความหนาแน่นสูง

วัสดุซิลิกอนคาร์บไบด์ที่มีความหนาแน่นสูงนิยมใช้กับชิ้นส่วนวิศวกรรม เช่น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ *gas turbines* การใช้งานเป็นวัสดุโครงสร้างหรือการพัฒนาสารซิลิกอนคาร์บไบด์คอมโพสิต เป็นต้น การพัฒนาวัสดุซิลิกอนคาร์บไบด์ที่มีความหนาแน่นสูงทำโดยใช้เทคนิคต่างๆ ได้แก่

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

ซิลิกอนคาร์บไบด์ที่เป็นเส้นใย

ซิลิกอนคาร์ไบด์ไฟเบอร์นิยมใช้เป็นเส้นใยเสริมความแข็งแรงในวัสดุโดยผลิตจากวัสดุคลุ่มเชรานิก เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการแตกหักและความทนต่อแรงกระแทก เส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 – 150 ไมครอน เตรียมโดยวิธี Chemical vapor deposite ของสารซิลิกอน – คาร์ไบด์บนเส้นทั้งส่วนหรือการบอน ซึ่งมีความหนาประมาณ 40 ไมครอน สำหรับเส้นใยที่มีขนาดเล็กมาก คือเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 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 ทำให้มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นน้อย และความสามารถในการนำไปใช้ได้ดี ดังนี้ จึงได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานได้หลายด้าน เช่น ใช้เป็นตัวรองที่อุณหภูมิสูงในโรงงานหล่อโลหะเป็นส่วนประกอบของเครื่องยนต์ในรถยนต์ ใช้เป็นวัสดุที่ไฟในเตาเผาอุณหภูมิสูงหรือเป็นตัวรองแก๊สหรือผู้นร้อน

วิธีการขึ้นรูปซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุน โดยทั่วไปมี 2 วิธีหลักคือ Polymeric sponge เป็นการจุ่มฟองน้ำลงในส่วนผสมเซรามิกที่เป็นของเหลว เมื่อนำการเผาฟองน้ำก็จะถูกตัวออกไปเหลือแต่สารซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับฟองน้ำที่ใช้วิธีนี้ทำให้ได้ ซิลิกอนคาร์ไบด์กับโพลิเมอร์ เมื่อทำการเผา พอลิเมอร์จะถูกตัวออกจากเนื้อสารซิลิกอนคาร์ไบด์ไป ทำให้เหลือเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน วิธีนี้สามารถใช้ผลิตได้ทั้งชนิดที่มีรูพรุนแบบเปิดและแบบปิด

ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุนนอกจากเตรียมได้โดยวิธี Polymeric sponge และ foaming ซึ่งวิธีนี้เป็นการเตรียมเนื้อเซรามิกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ยังสามารถเตรียมให้มีรูพรุนขนาดเล็ก สำหรับการใช้งานของอนุภาคขนาดเล็ก โดยการอัดขึ้นรูปซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่มีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่างๆ ซึ่งมีการศึกษาพบว่า การกระจายขนาดอนุภาคและลักษณะรูปร่างของอนุภาคมีผลต่อความหนาแน่น ลักษณะรูปร่างและขนาดของรูพรุนของชิ้นงาน การอัดขึ้นรูปขนาดอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันหมวดค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจะเปรียบเท่ากับ coordination number และเมื่อใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะให้ชิ้นงานที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เล็กด้วยอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแผ่น (Platelike) หรือเส้น (Fibrous) การจัดเรียงตัวของอนุภาคมีผลต่อความพรุนตัวและขนาดรูพรุน

การนำเซรามิกที่มีรูพรุนไปใช้งานขึ้นอยู่กับชนิดของสารเซรามิก เช่น สารเซรามิกพอกตะลูม이나ซิลิกอนคาร์ไบด์ มัลไอลด์คอเดียร์ สามารถใช้เป็นตัวรองที่อุณหภูมิสูง เป็นส่วนประกอบของเครื่องยนต์ภายในรถยนต์ และพวงที่มีโครงสร้างแบบ Honeycomb สามารถใช้เป็น catalyst carrier

สำหรับกระบวนการทางเคมีในโรงงานต่างๆ เช่น นิรภัยที่มีรูพรุนสามารถรองได้ทั้งผู้ผลิตของหรือแก๊สพิษในโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนกรองโลหะหลอมเหลวในโรงงานหล่อโลหะได้ นอกจากนั้นยังใช้เป็นจำนวนกันความร้อนอิเล็กโทรด โครงสร้างที่มีหน้าหักเบ้าและวัสดุทนไฟสำหรับใช้ในเตาเผา สำหรับด้านเทคโนโลยีชีวภาพมีการนำเซรามิกที่มีรูพรุนไปใช้ เช่น ไดอะตอมไนเม็ด หรือ แมgnีเซียม – ซิลิค้า เป็น ceramic carriers และใช้เป็น bioreactors ในกระบวนการหมัก ซึ่งจะช่วยลดเวลาการเกิดปฏิกิริยาด้วย และทำการแพทย์สามารถใช้เซรามิกที่มีรูพรุนทัดแทนกระดูก ได้แก่ สารไฮดรอกซิโอฟายайдร์วัมกับ partially stabilized zirconia

### 6.2.3 อะลูมินาเซรามิก

คุณสมบัติเฉพาะของอะลูมินาเซรามิก

สมบัติ	หน่วย	85% อะลูมินา	95% อะลูมินา	99% อะลูมินา
ถักยณะปูรณา	-	-	ขาว	-
ความหนาแน่น	Kg m <sup>3</sup>	3400	3700	3900
รูพรุน	% โดยปริมาตร	<0.1	<0.1	<0.1
ขนาดเกรนเฉลี่ย	$\mu\text{m}$	8	8	3
การดูดซึมน้ำ	% โดยหน้าหัก	-	<0.01	-

ตารางที่ 10 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมินาเซรามิก [22]

### คุณสมบัติทางเคมี

อะลูมินามีความต้านทานต่อการสึกกร่อนโดยกรดหรือพวกอัลคาไลด์ที่เท่าเทียมกัน หากมีการเพิ่มสารตัวเดิมพวกที่มีความเป็นกรดลงในส่วนผสมของอะลูมินา ยกตัวอย่าง เช่น ซิลิค้า จะทำให้ความต้านทานต่อการสึกกร่อนโดยกรดเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน ความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนด้วยอัลคาไลน์ของชิ้นงานจะลดลง ตัวอย่างสารเคมีที่ทำให้เกิดปัญหาต่อชิ้นงาน เช่น อัลคาไลด์หลอม สารหลอมเหลวชนิด Alkali bisulfates หรือ พวกกรดฟอสฟิวบริก

### คุณสมบัติทางกล.

สมบัติ	หน่วย	85% อะลูมินา	95% อะลูมินา	99% อะลูมินา
ความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers)	Kg mm <sup>-2</sup>		1530	
ความทนแรงดัดโค้ง ที่ 20 °c (Flexural Strength)	MPa	300	350	350
ความกดแรงกดที่ 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 <sup>-3/2</sup>		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	
ความทนต่อการคีบที่ อุณหภูมิสูง			พอใช้	

ตารางที่ 11 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกลของอะลูมินาเซรามิก [22]

### คุณสมบัติทางความร้อน

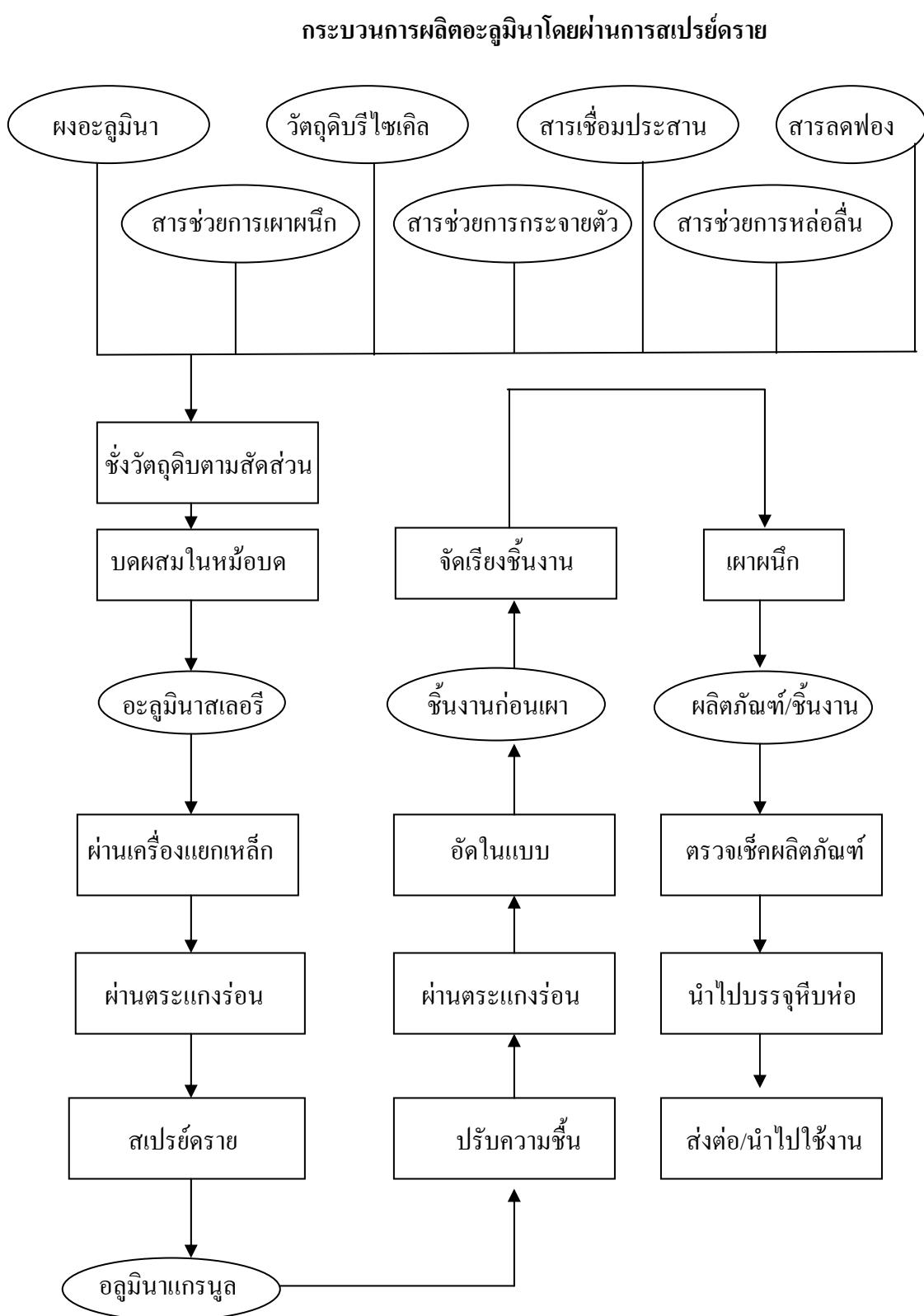
สมบัติ	หน่วย	85% อะลูมินา	95% อะลูมินา	99% อะลูมินา
อุณหภูมิใช้งานอย่าง ปลอดภัย (ไม่รับน้ำหนัก)	°c	1300	1500	1700
สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน (20 – 820 °c) (Thermal Expansion Coefficient)	K <sup>-1</sup>	8.1x 10 <sup>-6</sup>	8.2x 10 <sup>-6</sup>	8.1x 10 <sup>-6</sup>
ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ 50 °c ที่ 200 °c ที่ 400 °c	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	13.8	25	30
ความทนต่อการเปลี่ยน อุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal shock resistance)		10.3	17	19
		8.6	13	14
			พอยซ์	

ตารางที่ 12 ตารางแสดงคุณสมบัติทางความร้อนของอะลูมินาเซรามิก [22]

### คุณสมบัติทางไฟฟ้า

สมบัติ	หน่วย	85% อะลูมินา	95% อะลูมินา	99% อะลูมินา
Volume resistivity ที่ 600 °c	Ω/m	4 x 10 <sup>4</sup>	5 x 10 <sup>7</sup>	4 x 10 <sup>8</sup>
Dielectric strength	V/m		>10 x 10 <sup>6</sup>	
Dielectric constant (1 MHz)		7.1	8.1	8.5
Dielectric loss angle (1 MHz)		1.5 x 10 <sup>4</sup>	5 x 10 <sup>4</sup>	2 x 10 <sup>4</sup>

ตารางที่ 13 ตารางแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอะลูมินาเซรามิก [22]



รูปที่ 34 แผนผังกระบวนการผลิตอะลูมีน่าโดยผ่านการสเปรย์ดราย

## ขั้นตอนหลักที่ต้องมีการควบคุมคุณภาพ

จะพบว่า ในกระบวนการผลิตอะลูминนา โครงสร้างรูปร่างซับซ้อนให้มีสมบัติเฉพาะตามที่กล่าวมาข้างต้นนี้ มีขั้นตอนหลายขั้นตอน และเพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพจำเป็นอย่างยิ่ง ที่ต้องการควบคุมคุณภาพอย่างมีประสิทธิภาพตลอดทั้งกระบวนการผลิต ซึ่งในที่นี้หลักๆ ประกอบไปด้วย

1. การควบคุมตรวจสอบสมบัติของวัตถุคิบ (Material acceptance)
2. การควบคุมขนาด อนุภาคของน้ำอะลูминนาสิบก่อนนำไปผลิตผงอะลูминนาโดยเทคนิคสเปรย์ ดราย (Spray drying)
3. การควบคุมขนาดและน้ำหนักชิ้นงานก่อนเผา
4. การควบคุมขนาด น้ำหนัก ลักษณะภายนอก ตลอดจนสภาพการสุกตัว หรือสภาพการผลึก (Sintering State) ของชิ้นงานหลังการเผา
5. การสุ่มตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ครั้งสุดท้ายก่อนการนำส่งสินค้า ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ควรทำอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง

### การควบคุมตรวจสอบสมบัติของวัตถุคิบ

การควบคุมตรวจสอบสมบัติของวัตถุคิบ (material acceptance) ประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การตรวจสอบสมบัติของวัตถุคิบ ว่าเป็นไปตามคุณภาพที่กำหนดไว้หรือไม่
2. การตรวจสอบปริมาณของวัตถุคิบ ว่าเป็นไปตามที่กำหนดไว้หรือไม่
3. การตรวจสอบลักษณะภายนอก โดยรวมของวัตถุคิบ หรือสิ่งปลอมปนต่างๆ
4. การตรวจสอบขนาดอนุภาคของวัตถุคิบ ให้ถูกต้องตามมาตรฐาน
5. การวัดค่าความชื้นของวัตถุคิบ
6. การทดสอบสมบัติหลังเผาของวัตถุคิบ โดยการเผา (sintering test)

#### 6.1 สภาวะการสุกตัวหลังการเผาของวัตถุคิบ

##### 6.2 การหดตัว (shrinkage)

##### 6.3 ลักษณะทางกายภาพ สี

การควบคุมการผลิต (Production control) และการควบคุมคุณภาพ (Quality control)

กระบวนการ	ตัวแปรคุณภาพ	ตัวแปรการผลิต	เครื่องมือ อุปกรณ์	การควบคุม
1.ตรวจรับวัตถุ	การกระจาย ขนาด อนุภาค ความชื้น		เครื่องวัดการ กระจายขนาด อนุภาคอุปกรณ์ วัดความชื้น	PR
2.ซึ่งนำหนัก	อัตราส่วนของ วัตถุดิบ		เครื่องซึ่ง	QC
3.บดผสมวัสดุ		ระยะเวลาการบด บริมาณลูกบด	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.สเปรย์ดราย	ความชื้น	อุณหภูมิที่ใช้อบ	Spray dryer	PR
8.อบปรับ ความชื้น	ความชื้น	อุณหภูมิที่ใช้อบ	ตู้อบ	PR
9.ร้อนปรับขนาด แกรนูล	ขนาดของ แกรนูล	ตะแกรงร่อน	เครื่องร้อยแบบ สั่น	PR
10.อัดในแบบ		ประสิทธิภาพของ แบบ น้ำมันหล่อลื่น	เครื่องอัด	PR
11.ตรวจสอบ ชิ้นงานก่อนแพ	ขนาดและ น้ำหนักของ ชิ้นงาน	ประมาณพง วัตถุดิบความสูง ของแบบ	เครื่องซึ่ง ทิ่วัดขนาด	QC

ตารางที่ 14 แผนผังแสดงการควบคุมการผลิต และการควบคุมคุณภาพ

กระบวนการ	ตัวแปรคุณภาพ	ตัวแปรการผลิต	เครื่องมือ อุปกรณ์	การควบคุม
12. จัดเรียงเผา		แรงดันลมของ เครื่องจัดเรียง	ตัวรองเผา (Saggar) เครื่อง จัดเรียงเผา	PR
13. พาณีก (Sintering)		อุณหภูมิที่ใช้เผา	อัตราการเผา	PR
14. ตรวจสอบ ชิ้นงานหลังเผา	ขนาดและ น้ำหนักส่วน การสูญเสีย			QC
15. ตรวจลักษณะ ทั่วไป	ความหนาแน่น ลักษณะ กายภาพ			PR
16. สู่มตรวจสอบ คุณภาพ	ขนาดและ ลักษณะทั่วไป			QC
17บ. บรรจุหีบห่อ	จำนวนกล่อง บรรจุ		เครื่องซั่ง ที่วัด ขนาด	PR
18. ส่งมอบ ผลิตภัณฑ์		การเทียบ มาตรฐาน		PR

ตารางที่ 15 แผนผังแสดงการควบคุมการผลิต และการควบคุมคุณภาพ

PR การควบคุมการผลิต

QC การควบคุมคุณภาพ

## 7. ขั้นตอนการเตรียมเซรามิกสำหรับประกอบเป็นเกราะ

### 7.1 ขั้นตอนการเตรียมเซรามิก

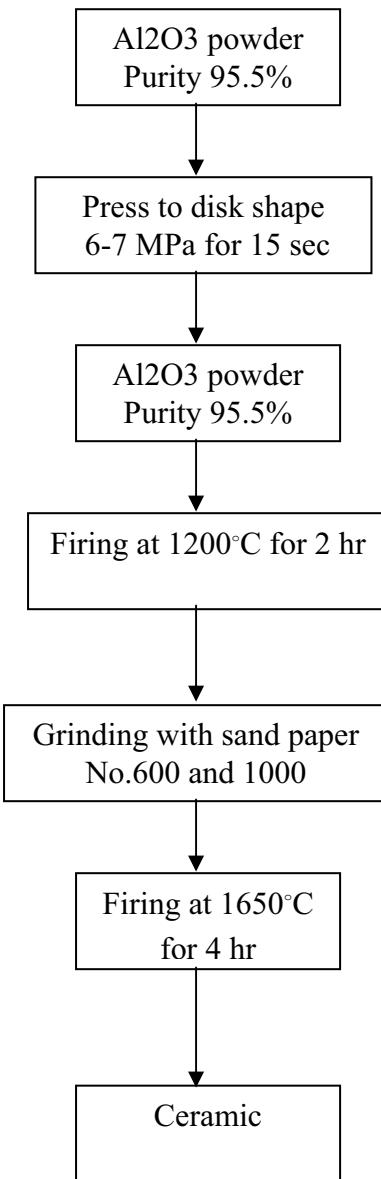
7.1.1 นำผงอลูมินา  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ความบริสุทธิ์ 95.5 % ผสมสารยึดเหนี่ยว PVA(Poly Vinyl Alcohol) และ Ethanol ลงเครื่องกระบวนการที่มี Ball milling บดผสมกันนาน (ดังรูปที่ 37-38) 20 ชม. จะได้ผงอลูมินา  $\text{Al}_2\text{O}_3$  แบบเปียก และมีขนาดเกรณเดลิก

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

7.1.3 นำชิ้นงานเข้าเตาเผาซึ่งการเผาจะทำการเผา 2 รอบ การเผาชิ้นงานรอบที่ 1 เผาชิ้นงานด้วยอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ด้วย heating rate 3°C/min เผาแซ่น 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1000 ตามลำดับ

7.1.4 นำชิ้นงานเข้าเตาเผารอบที่ 2 เผาชิ้นงานด้วยอุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ด้วย heating rate 2°C/min เตาเผาเซรามิกแสดงในรูปที่ 40 เผาแซ่นนาน 4 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกจากเตารอจนเย็นแล้วนำไปประกอบเป็นแผ่นเกราะตามขั้นตอนต่อไป

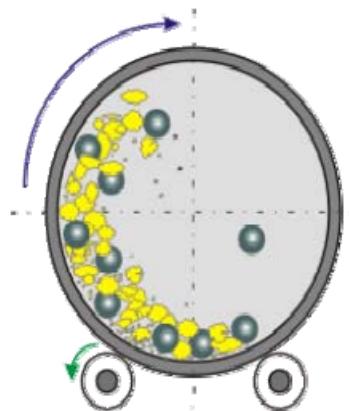
## 7.2 กระบวนการขึ้นรูปเซรามิก



รูปที่ 35 ภาพแผนผังการขึ้นรูปเซรามิก



รูปที่ 36 ภาพ Ball milling เซอร์โคเนียม ( $ZnO_2$ )  
ทรงกระบอก



รูปที่ 37 ภาพจำลอง Ball milling ในหม้อบด



รูปที่ 38 เครื่องบดผสม (หม้อบดทรงกระบอก)



รูปที่ 39 เครื่องอัดแบบด้วย Hydraulic



รูปที่ 40 เตาเผาเซรามิก



รูปที่ 41 ชิ้นงานเซรามิกที่ได้จากการเผา

## 8. การออกแบบแผ่นเกราะและเสื้อเกราะ

### 8.1 ส่วนประกอบของเกราะและเสื้อเกราะประกอบด้วยส่วนหลัก 7 ดังนี้

#### รูปแบบแผ่นเกราะ 5 รูปแบบ ได้แก่

8.1.1 เกราะแข็ง ผลิตจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กหนึ่งชิ้นและเหล็กหนึ่นชิ้น เชือก ซึ่งใช้สำหรับหัวหัวสุดๆไว้คีอ เหล็กกล้าไร้สนิม เรียกว่า “BJS” เหล็กหนึ่งชิ้นเรียกว่า “BJ” เหล็กหนึ่นชิ้นเชือกเรียกว่า “BJH” แนวทางในการผลิตเป็นเกราะโดยการนำแผ่นเหล็กชนิดต่างๆ มาประกอบติดกัน ครั้งละครู่ หรือใช้แอลเดียร์ และเลือกขนาดความหนาของแผ่นเหล็ก เพื่อให้ทดสอบ ให้มีคุณสมบัติสามารถป้องกันอาชญากรรมของอาวุธกระสุนปืนพกได้

8.1.2 เกราะเหล็กประกอบกับเซรามิก โดยเกราะเซรามิก เป็นแผ่นเซรามิกที่เป็นผลงานวิจัย และพัฒนามาแล้วโดยส่วนราชการ สถานศึกษา และห้องปฏิบัติการห้องทดลอง ต่างประเทศ และยังมีคุณสมบัติสามารถป้องกันอาชญากรรมของกระสุนปืนได้

8.1.3 เกราะเหล็กประกอบกับเกราะเส้นใยสังเคราะห์ โดยเส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใย สังเคราะห์ที่มีคุณลักษณะเป็นเกราะอ่อนที่เป็นผลงานวิจัยและพัฒนามาแล้ว แต่ยังมีคุณสมบัติไม่สามารถป้องกันอาชญากรรมของกระสุนปืน และมีคุณลักษณะไม่ตรงหรือไม่เหมาะสม กับความต้องการ ในการใช้งานตามเป้าหมายและ ขอบเขตของการวิจัย

8.1.4 เกราะเหล็กประกอบกับเกราะเซรามิกและเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยการผสมผสาน คุณลักษณะความเป็นเกราะของห้องทดลองมารวมกันให้ได้ คุณสมบัติ คุณลักษณะของเกราะตามขอบเขต ของการวิจัย

8.1.5 เกราะโลหะหรือวัสดุสังเคราะห์อื่นๆ ที่เป็นเกราะแข็ง ซึ่งอาจได้แก่ กระเจก, ยางแข็ง, โพลีคาบอเนต เป็นวัสดุสำเร็จรูปภายในประเทศไทย นำมาผสมผสานคุณลักษณะ เช่นเดียวกับในข้อ 8.1.2 เพื่อให้ได้คุณลักษณะของเกราะตามขอบเขตของการวิจัย

เกราะที่ประกอบแล้วทุกแบบ จะออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น เกราะเหล็กหรือเกราะโลหะที่เป็นเกราะแข็งที่ใช้ทำเสื้อเกราะ จะต้องดัดแปลงให้เหมาะสมกับการสวมใส่กับร่างกาย

## 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 ตัวราชได้ โดยสามารถสวมทางศีรษะ หรือทางด้านข้างได้ ด้านข้างและที่หลังของเสื้อที่ແຕบเกราะยึดโดยใช้ແບผ้าตีน

ตีกแกะ สามารถปรับขนาดของตัวเสื้อให้เหมาะสมกับขนาดลำตัว ผู้สวมใส่ในด้านหน้า และ

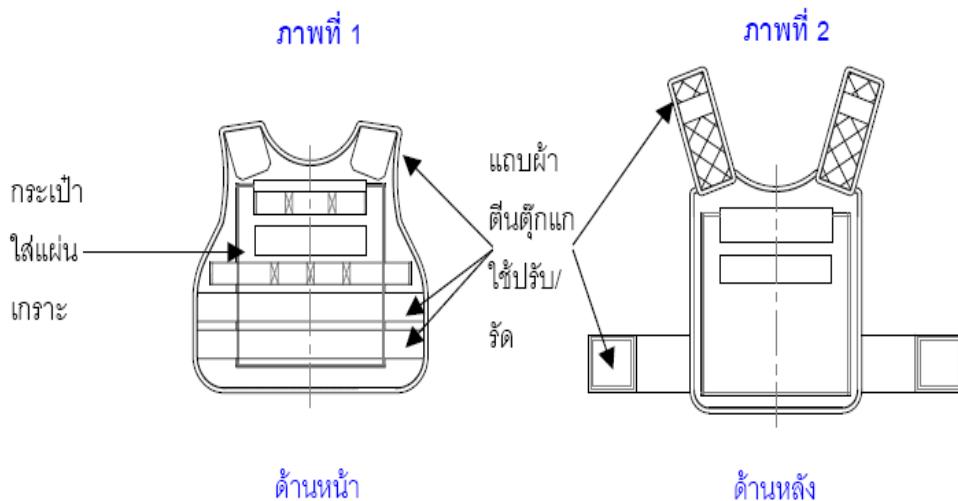
ด้านหลังจะมีช่องระเป้าสำหรับสอดใส่แผ่นเกราะได้อ่ายน้อยครั้งละ 2 ชุด และ สามารถอุดหรือใส่เพิ่มแผ่นเกราะได้ ระหว่างชั้นของระเป้าเกราะจะออกแบบให้สามารถเสริม

แผ่นโฟม หรือแผ่นยาง เพื่อลดแรงปะทะของหัวกระสุนปืน ตามความเหมาะสม

ผ้ากึ่งสังเคราะห์จะต้องมีคุณสมบัติทน แรงซีกขาดได้ดี สามารถรับน้ำหนักของแผ่นเกราะได้และควรมีคุณสมบัติกันน้ำ หรือเคลือบสารกันน้ำ และมีอายุการใช้งานได้นาน

8.2.3 อุปกรณ์ประกอบเสื้อเกราะเพื่อใช้ในการยึดติด หรือใส่อาวุธยุทธิ์/oปกรณ์ จะออกแบบ ให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้งานแต่ละหน่วยงาน และแต่ละภารกิจ โดยใช้ແບผ้าตีนตุ๊กแกประกอบແນบ ผ้าไนล่อน เพื่อให้เกิดความคล่องแคล่วและความสะดวกในการใช้งาน

### 8.3 ภาพร่างแบบชุดเสื้อเกราะสำหรับทำการผลิต



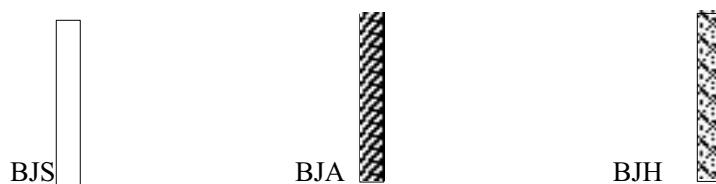
รูปที่ 8-1 ภาพร่างแผ่นเกราะที่ใช้ทำเกราะชนิดต่างๆ และรูปแบบการทดสอบ

การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการประกอบกัน ระหว่างแผ่นเกราะ

การกำหนดสัญลักษณ์ของแผ่นเกราะ ด้วยภาพหน้าตัดของแผ่นเกราะ

### 8.4 การกำหนดสัญลักษณ์แผ่นเกราะ

การกำหนดสัญลักษณ์ของแผ่นเกราะ ด้วยภาพหน้าตัดของแผ่นเกราะ



8.1 เหล็กกล้าไร้สนิม

8.2 เหล็กอลูมิเนียมยัลลอย

8.3 เหล็กหนีบยานชูบแข็ง



8.4 เชรามิก

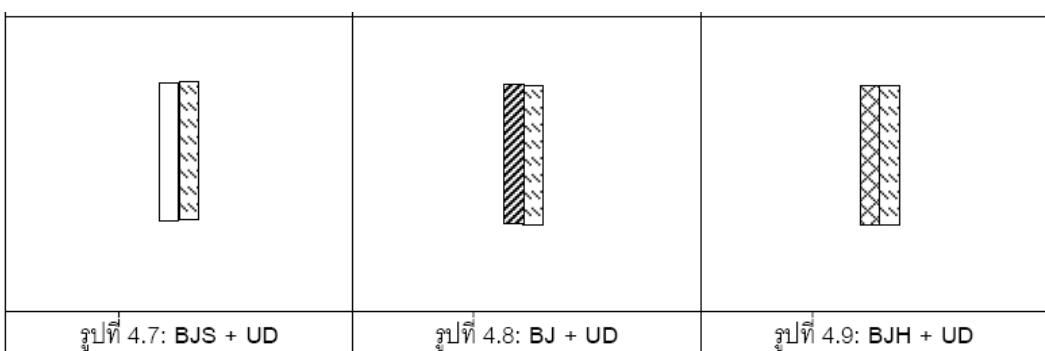
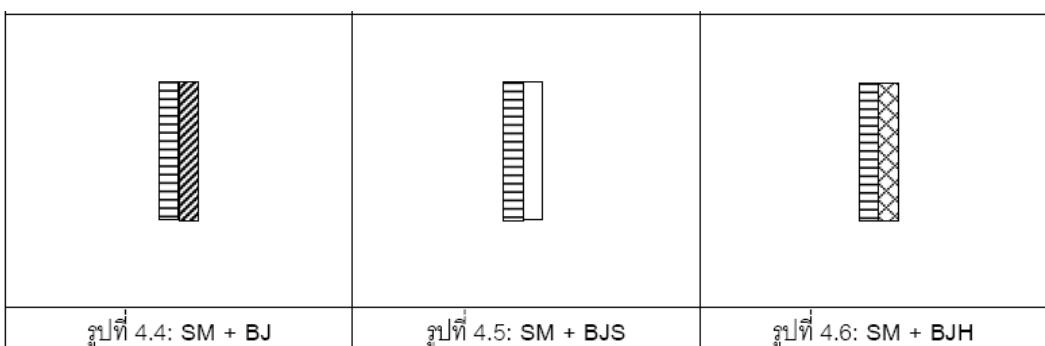
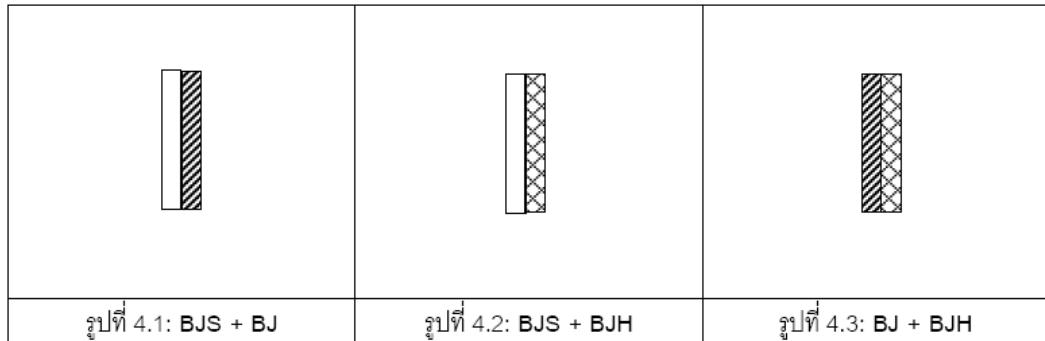
8.5 ไบสังเคราะห์

รูปที่ 8-2 ภาพสัญลักษณ์แผ่นเกราะ

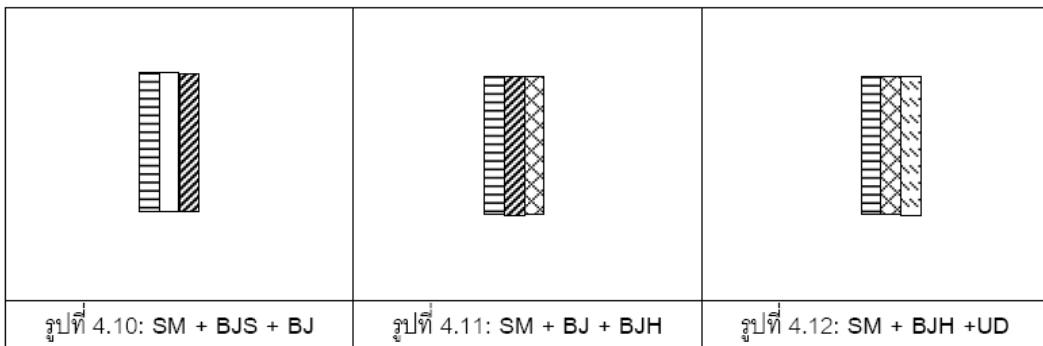
### รูปแบบการจัดเรียงวัสดุเกราะ

(Possible configurations of the armour plate arrangement)

ที่คาดว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกันกระสุนได้ จำนวน 12 รูปแบบ



รูปที่ 8-3 ภาพรูปแบบการจัดเรียงวัสดุเกราะแบบต่างๆ



รูปที่ 8-4 ภาพรูปแบบการจัดเรียงวัสดุเกราะ

Note: - รูปที่ 4.1-3 แสดงการจัดเรียงวัสดุเกราะที่เป็นเหล็กแผ่นต่างชนิดกัน โดยทำการศึกษาผลกระทบของการซับผิวแข็ง/ความลึก และขนาดความหนาที่เหมาะสมของแผ่นเหล็กหนึ่งต่อประสิทธิภาพการเจาะทะลุ

- รูปที่ 4.4-6 แสดงการนำแผ่นเซรามิกมาเสริมด้านหน้า โดยมีแผ่นเหล็กเป็นวัสดุรองรับ (Reinforced backup plate) กรณีที่ต้องจัดวางแผ่นเซรามิกไว้ด้านหน้าเท่านั้น เนื่องจากเซรามิกเป็นวัตถุแข็ง เปราะจึงมีคุณสมบัติทำลายหัวกระสุน

- รูปที่ 4.7-9 แสดงการจัดเรียงแบบระหว่างแผ่นเกราะเหล็กกับแผ่นเกราะที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์(วัสดุเกราะอ่อน) กรณีที่แผ่นเส้นใยสังเคราะห์ต้องซ่อนอยู่ด้านหลังเสมอ โดยแผ่นเหล็กทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุน

- รูปที่ 4.10-12 แสดงการจัดเรียงแผ่นกันกระสุนแบบ 3 แผ่น โดยมีวัสดุแข็งเปราะ เช่น เซรามิก อยู่ด้านหน้าสุด แผ่นกลางเป็นแผ่นเกราะเหล็ก และเกราะชั้นในสุดอาจเป็นวัสดุเกราะอ่อน 似 ลังเคราะห์ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

การจัดเรียงของชั้นวัสดุเสือเกราะทั้ง 12 รูปแบบ ยังไม่คำนึงถึงการเก็บสะสมเกิดกระสุนและแผ่นชั้น กัน แรงอัดของลูกปืนที่ติดกับตัวผู้สวมใส่

## 9. ขั้นตอนการประกอบแผ่นเกราะ

ระดับความสามารถในการกันกระสุน ระดับ 3

เป็นระดับที่สามารถป้องกันกระสุนเป็นเล็กๆ ได้ ตามมาตรฐาน NIJ STANDARD 0101-04

### คุณลักษณะทั่วไป

9.1 น้ำหนักสุทธิเสื้อเกราะ ขนาด L =  $7.3 \pm 0.5$  กก. และ ขนาด XL =  $7.5 \pm 0.5$  กก.

9.2 อายุการใช้งานเฉลี่อเกราะ 6 ปี (หากเซรามิกไม่แตกชำรุดเสียหาย)

9.3 เสื้อเกราะมีลักษณะเป็นเกราะแข็ง ซึ่งเสื้อเกราะ 1 ตัว จะประกอบด้วยแผ่นเกราะแข็งอยู่ที่ตัวเสื้อต้านหน้า 1 ชุด และอยู่ที่ตัวเสื้อต้านหลัง 1 ชุด โดยที่ตัวเสื้อต้านนอกของตัวเสื้อต้านหน้า และต้านหลังจะมีช่องหรือกระเพาสำหรับสอดใส่แผ่นเกราะทั้งนี้ แผ่นเกราะทุกชุดจะห่อหุ้มด้วยผ้าชนิดไม่ดูดซับน้ำ หรือห่อหุ้มด้วยวัสดุสังเคราะห์ และบรรจุในซองผ้าร่วมชนิดกันน้ำจะมีฉลากบอกว่าเป็นบริษัทผู้ผลิต, ชนิด และระดับของแผ่นเกราะ, วัน เดือน ปีที่ผลิต, วันหมดอายุของแผ่นเกราะหรืออื่น ๆ

9.4 เสื้อเกราะมี 2 ขนาด คือ ขนาด L กับ XL (ขนาด XL มีวัสดุผ้าตัวเดียวใหญ่กว่าขนาด L แต่มีแผ่นเกราะขนาดเท่ากันคือ กว้าง 9 นิ้ว ยาว 10 นิ้ว โดยประมาณ) เสื้อเกราะเป็นชนิดไม่มีเข็นเป็นแบบเสื้อกี๊ฟ้ารวมทับต้านนอกของชุดปกติ โดยสามารถหาง่ายได้โดยการดึงดันข้างๆ ให้บริเวณด้านข้างและที่ใกล้ของเสื้อมีแบบเกะยีด ปิด – เปิด แบบผ้าตีนตุ๊กแก สามารถปรับขนาดของตัวเสื้อให้เหมาะสมกับลำตัวผู้สวมใส่ได้ตามต้องการ

9.5 เสื้อเกราะไม่ดูดซับน้ำ แผ่นเกราะทุกชุดมีผ้าต้านหน้าโค้งแบบกับลำตัวผู้สวมใส่

### 10. คุณลักษณะเฉพาะทางวิชาการ

10.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตแผ่นเกราะ แผ่นเกราะประกอบด้วย โลหะ เซรามิก ไอลสังเคราะห์ โดยโลหะแผ่นหน้าคือ เหล็กกล้า (เชื้อหัสวัสดุว่า BJH) ต่อจากเหล็กเป็นไอลสังเคราะห์ ต่อจากไอลสังเคราะห์เป็นเซรามิก ต่อจากเซรามิกเป็นไอลสังเคราะห์อัดแข็ง

10.2 น้ำหนักต่อพื้นที่ของแผ่นเกราะ  $12.57 \text{ กรัม}/\text{ซม}^2$  ( $0.18 \text{ ปอนด์}/\text{นิ้ว}^2$ )

10.3 ความหนารวมของแผ่นเกราะ  $24^{+5}_{-2}$  มม. ซึ่งสนับสนุนจากแผ่นเกราะเหล็ก BJH หนา  $2.0 \pm 0.2$  มม. ( $0.078 \pm 0.007$  นิ้ว) ไอลสังเคราะห์จำนวน 20 ชั้น แต่ละชั้นมีความหนา 0.2 ไมโครน, แผ่นยางหรือโฟมหนา 1.0 มม. ( $0.039$  นิ้ว), เซรามิก ขนาด  $2 \times 2$  นิ้ว หนา  $7.0 \pm 1.0$  มม. ( $0.273 \pm 0.039$  นิ้ว) เรื่องสลับกันแบบลายก่ออิฐจันเต็มแผ่นและไอลสังเคราะห์ 60 ชั้นอัดแข็ง)

10.4 พื้นที่ป้องกันอันตราย พื้นที่ต้านหน้า = ต้านหลัง ขนาด L และ XL =  $67 \pm 1 \text{ ซม}^2$

## 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  $2 \times 2$  นิ้ว หนาไม่น้อยกว่า 6.5 มม.

11.1.3 ไอล์สิงเคราชาร์ PE. POLYETHYLENE ความหนา 0.2 ไมครอน/แผ่น

## 12. การควบคุมคุณภาพผ้าและวัสดุประกอบสำหรับการตัดเย็บตัวเสื้อ

สั่งซื้อผ้ากี่งสั้งเคราะห์ (ชนิด, เบอร์ผ้า, และสี) และวัสดุประกอบสำหรับการตัดเย็บตัวเสื้อตาม SPEC ที่กำหนด

## 13. การผลิตแผ่นเกราะ (ARMOR PANEL)

#### 13.1. การผลิตแผ่นเกราะ 1 ชุด

13.2 จัดเตรียมแผ่นเหล็กกล้า (BJH) ความหนา  $2.0 \pm 0.2$  มม. วัดแบบ (PATTERN) ชิ้นงานลงบนแผ่นเหล็ก นำไปตัดเข้าเครื่องตัดตามแบบที่วาด เมื่อตัดแล้วนำมาปืนขึ้นรูปให้มีพิรุโคง แล้วทำการตกแต่งรอบคム และลบมุน (ดังรูปที่ 1, รูปที่ 2, รูปที่ 3)

13.3 นำแผ่นเหล็ก (BJH) ที่ผ่านขบวนการในข้อ 13.2 แล้วไปปะแนงผิวทั้ง 2 ด้านให้มีความแนงตามที่กำหนด โดยการตรวจความแนงจากเจ้าหน้าที่ควบคุมคุณภาพทุกแผ่น โดยการตรวจความแนงจะวัดค่าความแนงของเหล็กแต่ละแผ่น จำนวน 3 ชุด (ดังรูปที่ 4)



(รูปที่ 1) PATTERN ชิ้นงานแผ่นเหล็ก (BJH)



(รูปที่ 2) เครื่องปั๊มตัดชิ้นงาน



(รูปที่ 3) เครื่องปั๊มขึ้นรูปผิวโค้ง



(รูปที่ 4) การตรวจความแม่นยำ

#### 13.4 จัดเตรียมไส้สังเคราะห์ (PE) ความหนา 0.2 มม. วาดแบบ (PATTERN)

ชิ้นงานบนแผ่นไส้สังเคราะห์ ตัดตามแบบแล้วนำมาหาด้วยการวางเรียงซ้อนกันให้ได้จำนวนความหนาตามต้องการ นำเข้าเครื่องอัดให้แข็งตัว และขึ้นรูปใหม่ผิวโค้งเล็กน้อย  
(ดังรูปที่ 5 และ 6)



(รูปที่ 5) PATTERN ชิ้นงานบนไส้ PE



(รูปที่ 6) แผ่นไส้สังเคราะห์อัดแข็งแล้ว

13.5 นำแผ่นไยสังเคราะห์ (PE) ที่อัดแข็งขึ้นรูปแล้ว มาติดด้านหน้าด้วยแผ่นเซรามิกชนิดพิเศษด้วย กาว แผ่นเซรามิกที่นำมาใช้ติดเป็นแผ่นเกราะมีขนาด (กว้าง × ยาว)  $2 \times 2$  นิ้ว



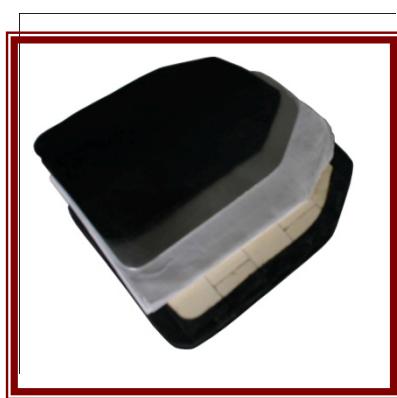
(รูปที่ 7) แผ่นเซรามิกที่นำมาติดบนไย PE อัดแข็ง



(รูปที่ 8) แผ่นเหล็ก BJH ปิดด้านหน้า

13.6 เมื่อนำแผ่นไยสังเคราะห์ที่อัดแข็งขึ้นรูปติดด้านหน้าด้วยแผ่นเซรามิกแล้วใช้แผ่นไย สังเคราะห์ PE อีกแผ่นจำนวน 20 ชั้น ประดิททับด้านหน้าของเซรามิกอีกครั้งหนึ่ง

13.7 นำแผ่นเหล็กกล้า (BJH) ขนาด  $2.0 \pm 0.2$  มม. ที่ปั๊มขึ้นรูป และผ่านกระบวนการรีบูฟแข็ง ที่ผ่านการควบคุมคุณภาพแล้ว นำโฟมยางที่มีความหนา 1.0 มม. มาปิดด้านหลังของแผ่นเหล็กกล้า แล้วนำแผ่นเหล็กกล้าที่ติดโฟมยางมาประดิททับด้านหน้าของแผ่น PE อัดแข็ง และเซรามิกอีกครั้งหนึ่ง (ดังรูปที่ 8)



(รูปที่ 9) การเรียงวัสดุ  
เกราะเป็นชุดด้วยการติดซีดด้วยกาว



(รูปที่ 10) แผ่นเกราะประกอบแล้วเสร็จ  
พร้อมติดสลากกับอกชนิด  
และระดับของแผ่นเกราะ

#### 14. การผลิตตัวเสื้อ (FRONT AND BACK CARRIER PROCESS)

14.1. เตรียมผ้าไนล่อนเบอร์ 210 กันน้ำ สีดำหรือผ้า 600 ดี สีดำชนิดหนา และวัสดุประกอบการตัดเย็บตัวเสื้อ

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



(รูปที่ 11) การวางแผน PATTERN บนผ้า



(รูปที่ 12) การตัดผ้าตามแบบ

14.3. นำชิ้นส่วนผ้าตามข้อ 14.2 และวัสดุประกอบตามข้อ 14.1 มาเย็บเป็นตัวเสื้อ

## 15. ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน

### การทดสอบเกราะกันกระสุน ครั้งที่ 1

การทดสอบเกราะกันกระสุน รอบที่ 1 ทดสอบโดยการยิงด้วยกระสุนจริงกับเกราะกันกระสุนปืนพก และเกราะกันกระสุนปืนเล็กๆที่เป็นอาวุธสงคราม ซึ่งเกราะที่นำมาใช้ทดสอบถูกพัฒนาขึ้นโดย บริษัท พีซีพาร์ท จำกัด

#### วิธีการทดลอง

##### การยิงทดสอบ

การยิงทดสอบแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ ทดสอบเกราะปืนพกและเกราะปืนเล็กๆและมีรูปแบบต่างๆ 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 ทดสอบเกราะปืนเล็กๆ

เกราะปืนเล็กๆทดสอบยิงด้วยกระสุน 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	ชื่อ		
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 ผลการตรวจสอบค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

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
<i>Related Grades</i>							
UNS S30403	304L	0.03	1.00	2.00	0.045	0.03	18.0-20.0
UNS S30409	304H	0.04-0.10	1.00	2.00	0.045	0.03	18.0-20.0

ตารางที่16 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ Stainless Steel grade 304

### ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (% มวล)

Grade	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%
UNS S30409	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%	<71.42		
	<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

ตารางที่18 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

ตารางที่19 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าชุบแข็ง

จากผลการทดลองพบว่าวัสดุมีองค์ประกอบทางเคมีเข้าได้กับ เหล็กกล้าคาร์บอน SK 6 เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของคาร์บอนอยู่ในระหว่าง 0.65-0.75 % อาจเป็นผลที่เกิดจากการสูญเสีย คาร์บอนในขั้นตอนของการชุบแข็งดังนั้นจึงสรุปว่าเป็นโลหะเกรด 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			

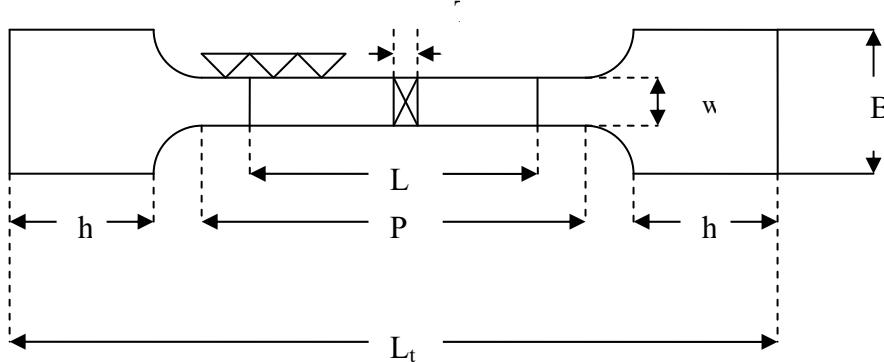
ตารางที่ 20 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุอลูมิเนียม

จากการตรวจสอบพบว่ามีอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบถึง 99.21% โดยมวลน้ำ จึงจัดเป็น  
อลูมิเนียมเกรด 1XXX ซึ่งเป็นกลุ่มของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (ความบริสุทธิ์มากกว่า 99%)  
จากการทดสอบสามารถสรุปว่าวัสดุที่ใช้ในการทดสอบได้ดังนี้

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

### 3 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การดึงทดสอบบัวสุด ที่ทำการทดสอบในครั้งนี้ กระทำตามมาตรฐาน JIS 2201 type 13B



รูปที่ 47 แบบชิ้นทดสอบบัวสุดมาตรฐาน JIS 2201 Type 13 B

Type	Width 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 meterial	20 min

ตารางที่ 21 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน JIS 2201 Type 13 B

Type	w	L	P	h	L <sub>t</sub>	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/sec

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 ผลการดึงทดสอบบัวสุด

จากผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงทดสอบทั้ง 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 ชุดด้วยกัน  
ทดสอบด้วยเครื่อง Mitutoyo MVK-H11

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

AI1ถูกละลายจนเป็นรูกว้าง จึงไม่ได้นำมาทดสอบ

ตารางที่ 24 การจำแนกรูปแบบยิงการทดสอบ

หมายเลขชิ้นงาน	ความหมาย
44-SS	เหล็กกล้าไร้สนิมรับกระสุน .44
44-AI	อลูมิเนียมรับกระสุน .44
357-SS	เหล็กกล้าไร้สนิมรับกระสุน .357
357-AI	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

### การยิงทดสอบเกราะปีองพกด้วยกระสุน .44

ทิศทางการยิง / กระสุนเข้าปะทะ



ยิงด้วยกระสุน .44

เกราะแผ่นหน้า

SS2

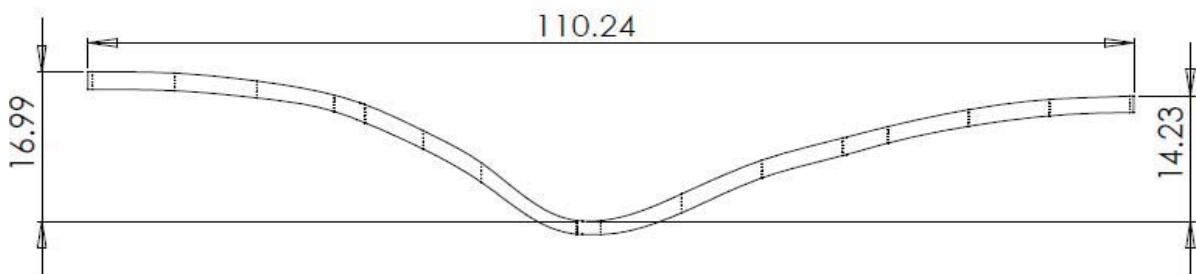


เกราะแผ่นหลัง

Al2

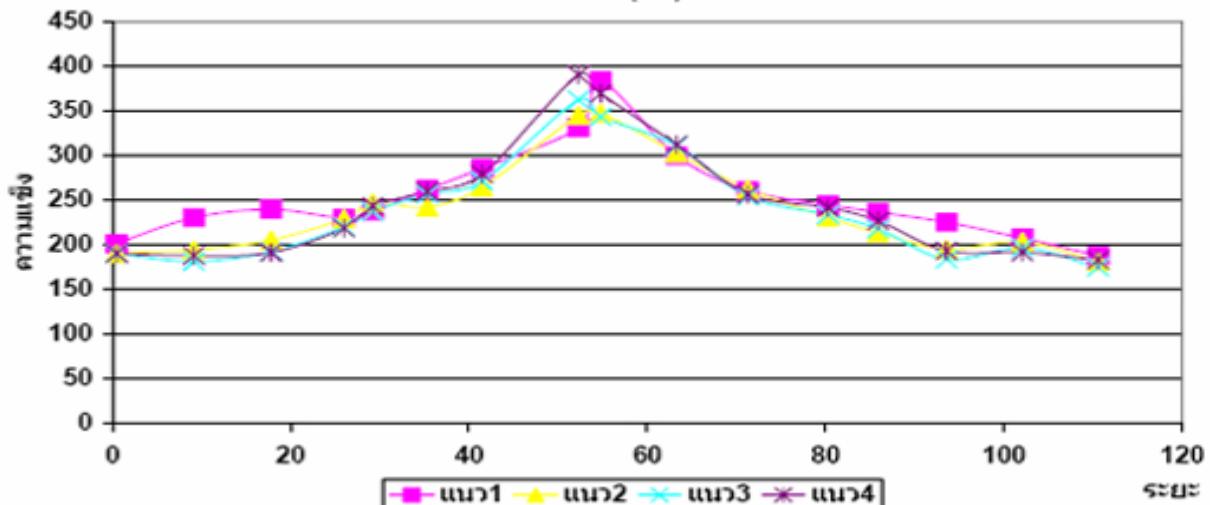


รูปแสดงรูปแบบการยิงทดสอบเกราะปีองพกด้วยกระสุน .44



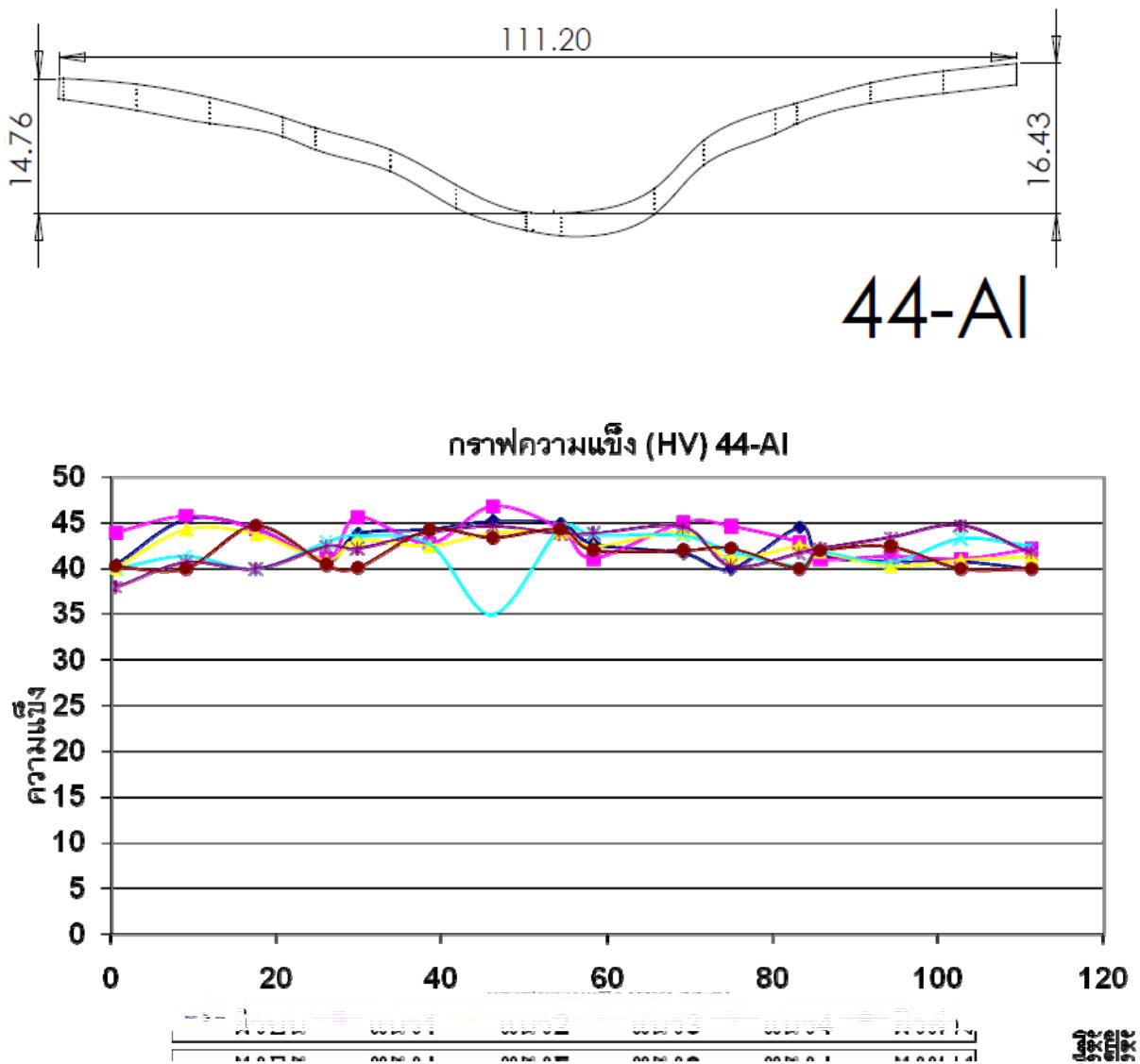
44-SS

กราฟความแข็ง (HV) 44-SS



รูปที่ 48 ค่าความแข็ง ที่เป็นผลลัพธ์จากการยิงด้วย กระสุน .44

ที่ระยะความหนา 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 มม.บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 49 ค่าความแปร ที่เป็นผลกระแทบจากการยิงด้วย กระสุน .44  
ที่ระยะความหนา 0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 มม. ของแผ่นอลูมิเนียม

### การยิงทดสอบเกราะปีองพกด้วยกระสุน .357

ทิศทางการยิง / กระสุนเข้าปะทะ

↓  
ยิงด้วยกระสุน .357

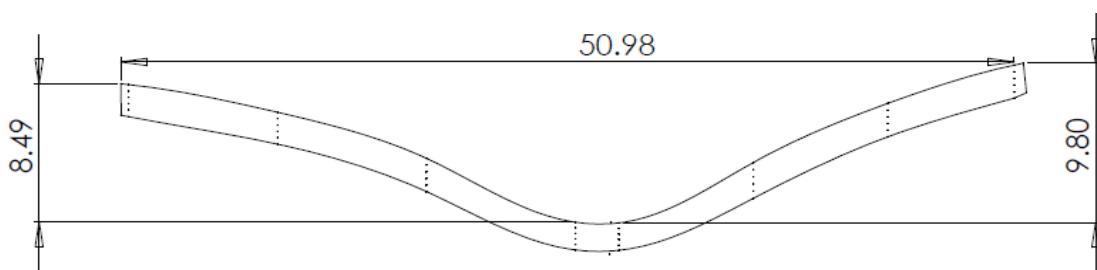
SS2

เกราะแผ่นหน้า

A12

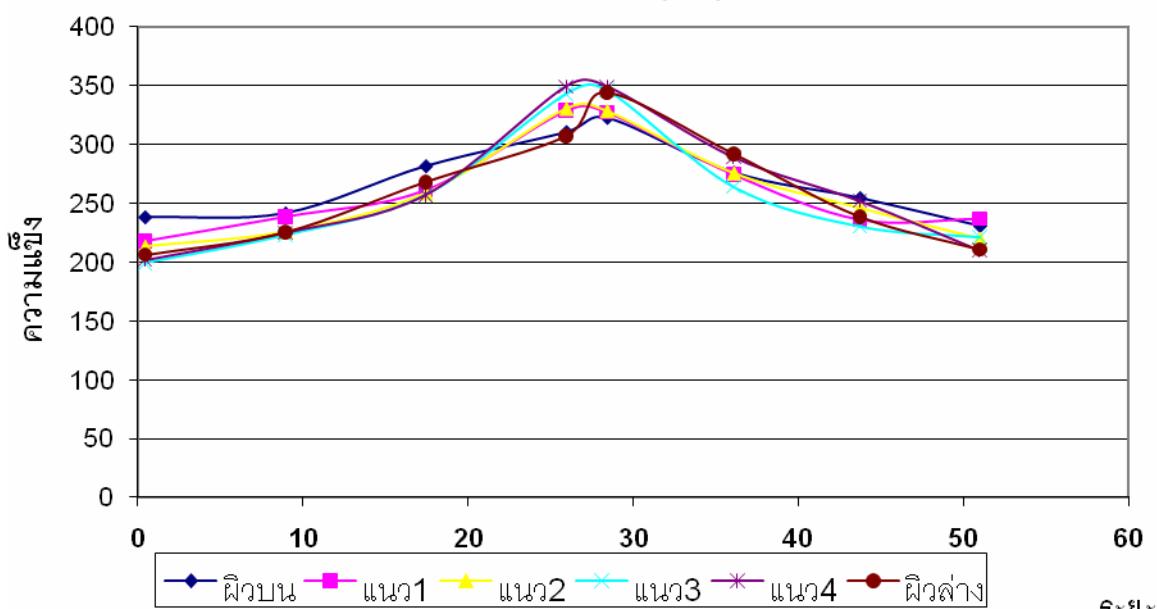
เกราะแผ่นหลัง

รูปแสดงรูปแบบการยิงทดสอบเกราะปีองพกด้วยกระสุน 357



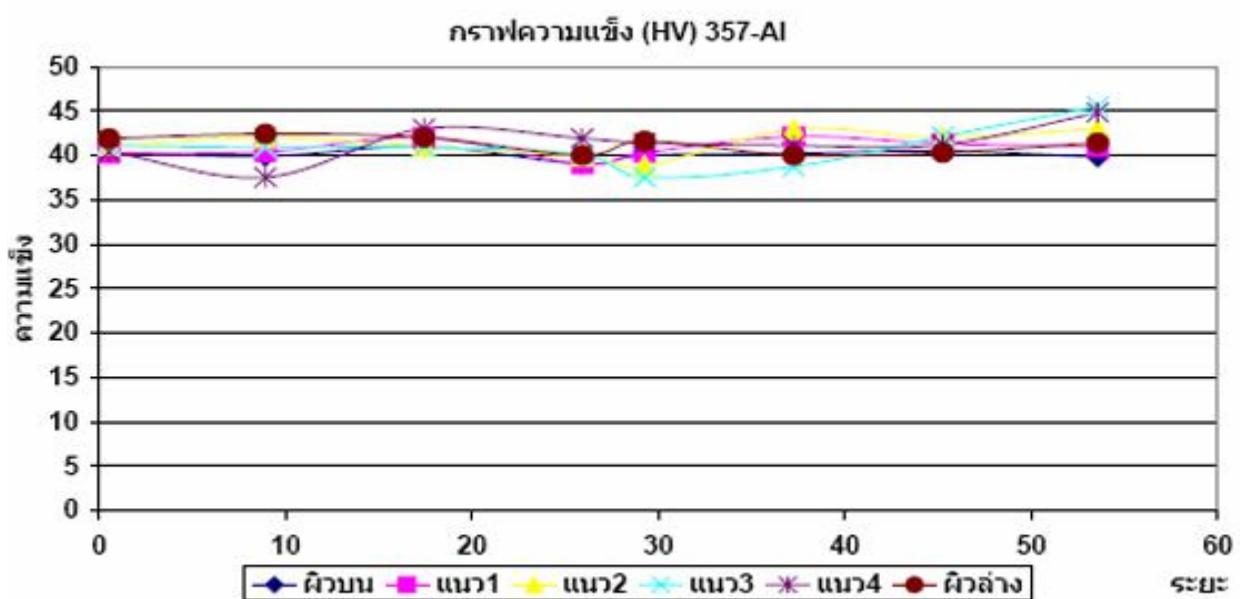
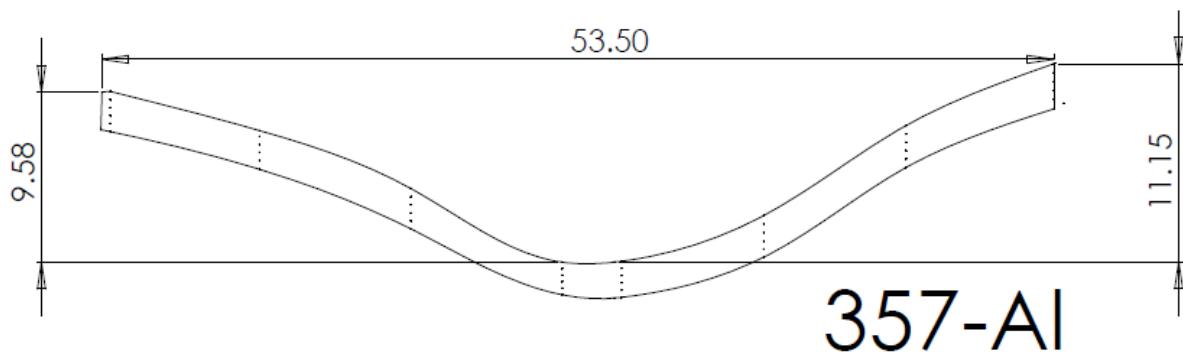
357-SS

กราฟความแข็ง (HV) 357-SS



รูปที่ 50 ค่าความแข็งที่เป็นผลกราบทบจากการยิงด้วย กระสุน .357

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



รูปที่ 51 ค่าความแข็งที่เป็นผลการทดสอบจากการยิงด้วย 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

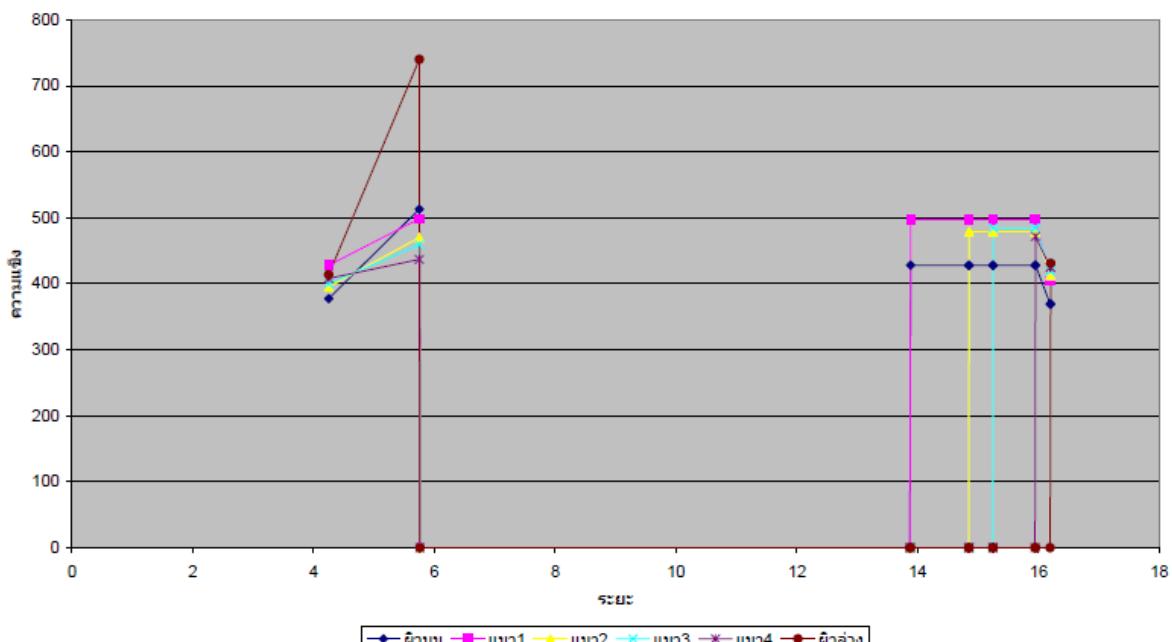
HS 3.7 3-1

เกราะแผ่นหลัง

รูปที่ 52 รูปแบบการยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 1

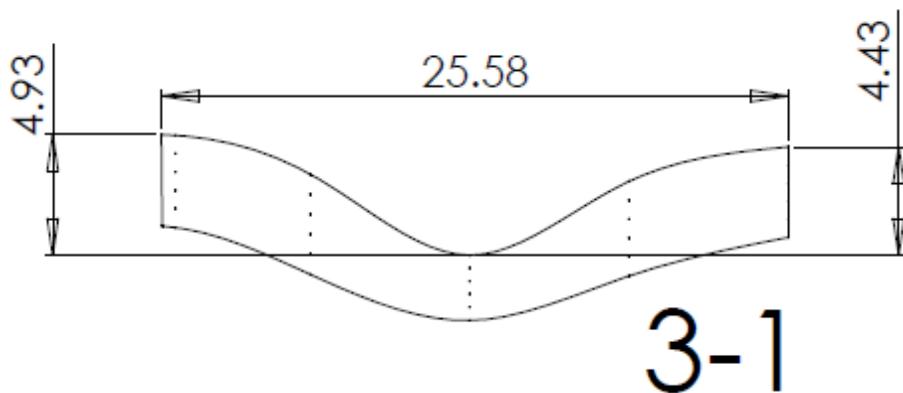


กราฟความแข็ง (HV) 2-1

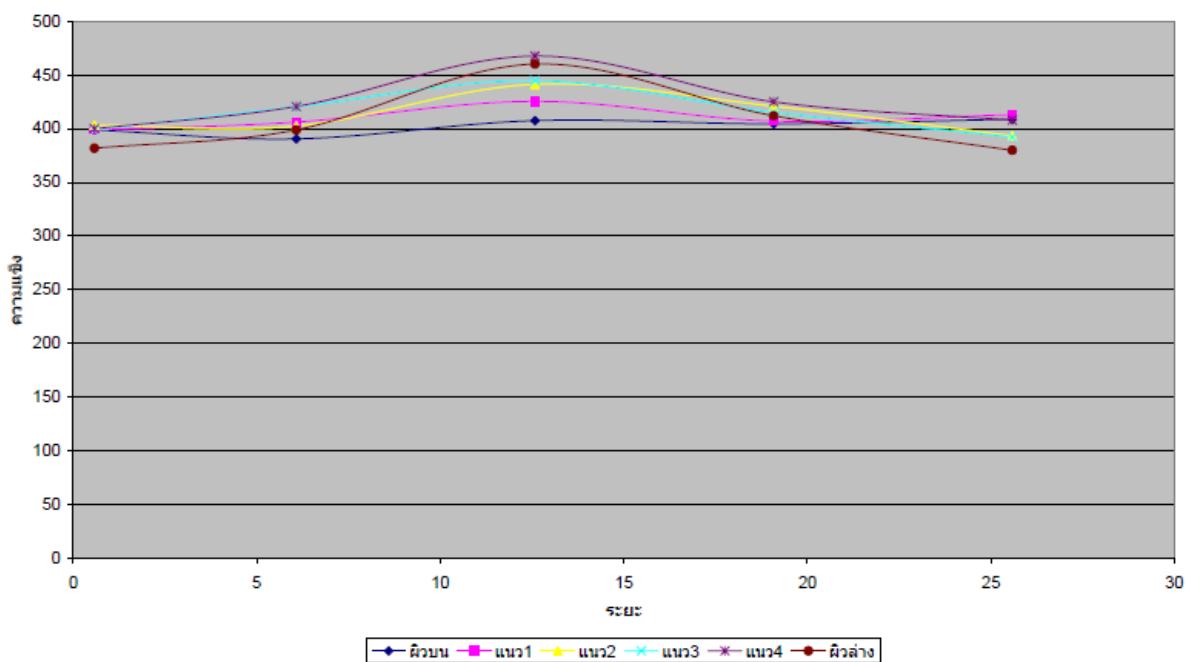


รูปที่ 53 ค่าความแข็งที่เป็นผลกราฟจาก การยิงด้วย กระสุน M16

บนแผ่นเหล็กกล้าชุบแข็ง แผ่นหน้า ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 1



กราฟความแข็ง (HV) 3-1



ภาพที่ 54 ค่าความแข็งที่เป็นผลกระแทบจากการยิงด้วย กระสุน M16  
บนแผ่นเหล็กกล้าชุบแข็ง แผ่นหลัง ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 1

## การยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 2

ทิศทางการยิง / กระสุนเข้าปะทะ

ยิงด้วยกระสุน M16

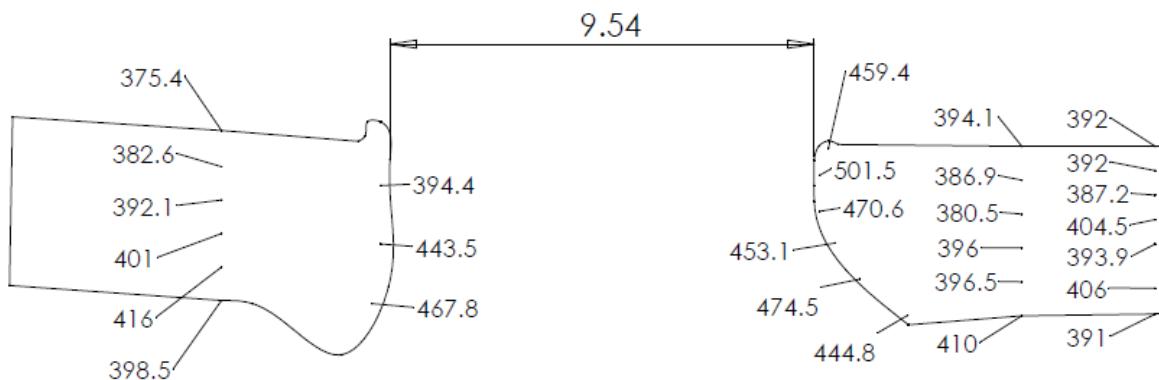
HS 3.7 2-2

เกราะแผ่นหน้า

HS 3.7 3-2

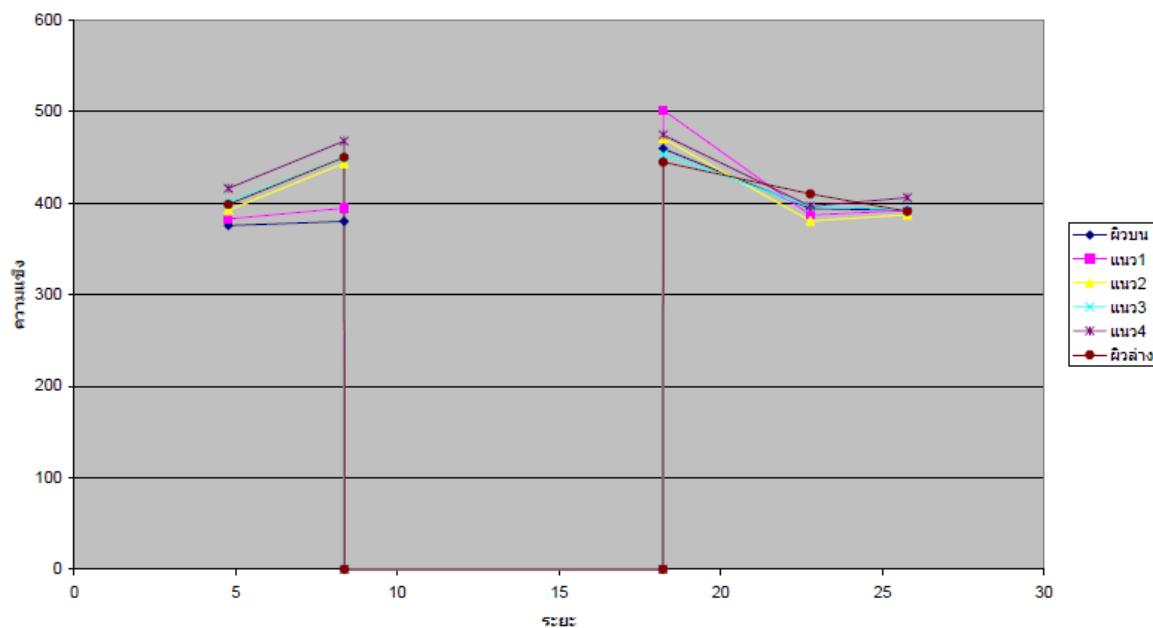
เกราะแผ่นหลัง

รูปที่ 55 รูปแบบการยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 2



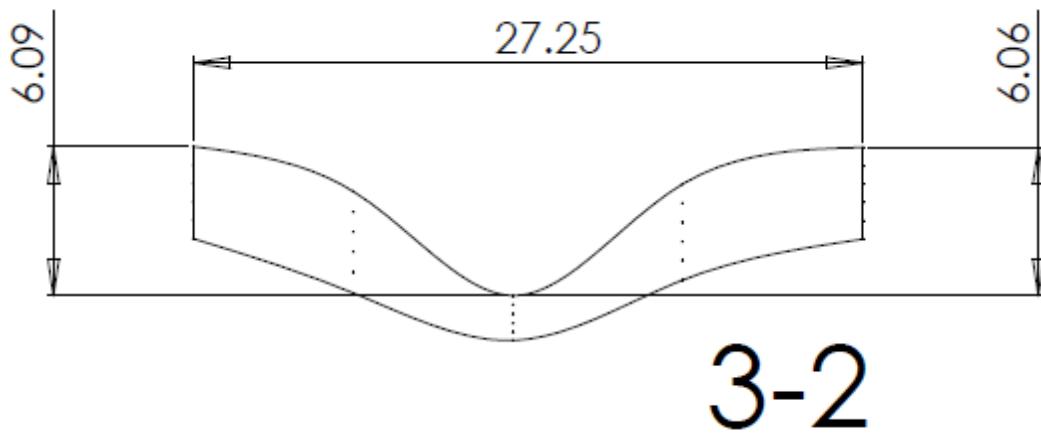
2-2

กราฟความแข็ง (HV) 2-2

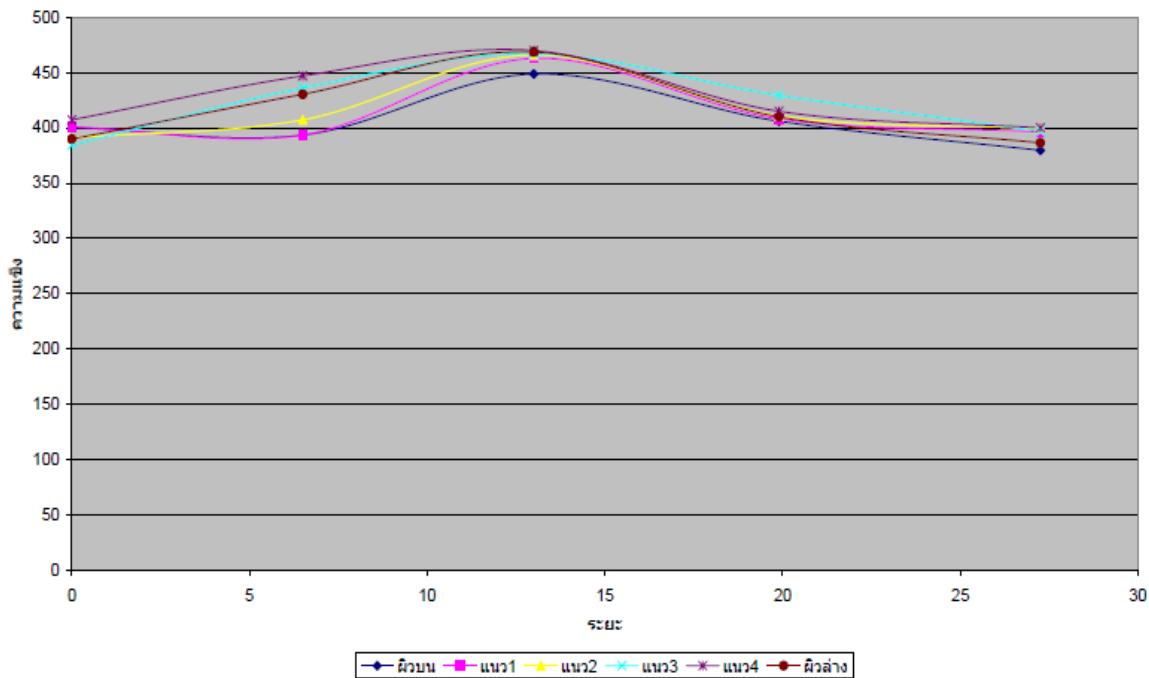


รูปที่ 56 ค่าความแข็งที่เป็นผลการทดสอบจากการยิงด้วย กระสุน M16

บนแผ่นเหล็กกล้าชุบแข็ง แผ่นหน้า ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 2



กราฟความแข็ง (HV) 3-2



รูปที่ 57 ค่าความแข็งที่เป็นผลกระแทบที่จากการยิงด้วย กระสุน M16  
บนแผ่นเหล็กกล้าชุบแข็ง แผ่นหลัง ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 2

### การยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 3

ทิศทางการยิง / กระสุนเข้าปะทะ

ยิงด้วยกระสุน M16

**HS 3.7 2-3**

เกราะแผ่นหน้า

**AI 1**

เกราะแผ่นที่ 2

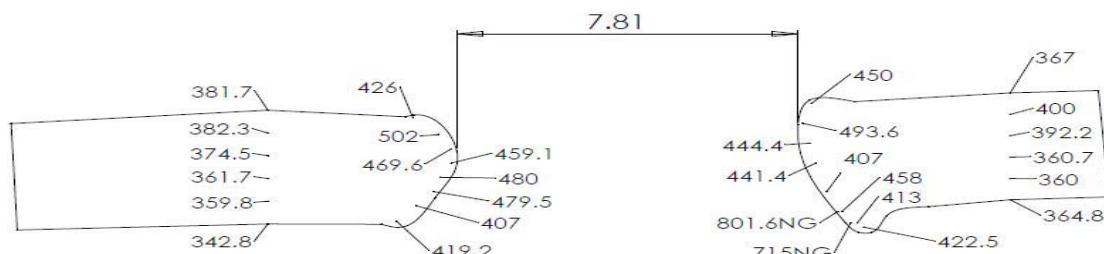
**HS 3.7 3-3**

เกราะแผ่นที่ 3

**AI 2 4-3**

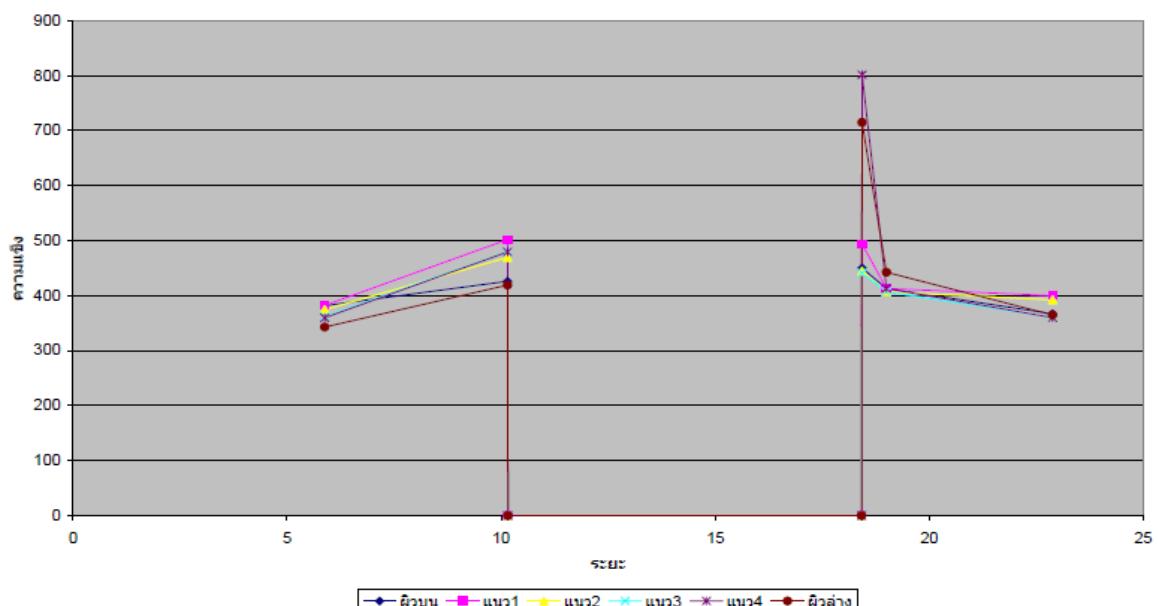
เกราะแผ่นหลัง

รูปที่ 58 รูปแบบการยิงทดสอบเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 3

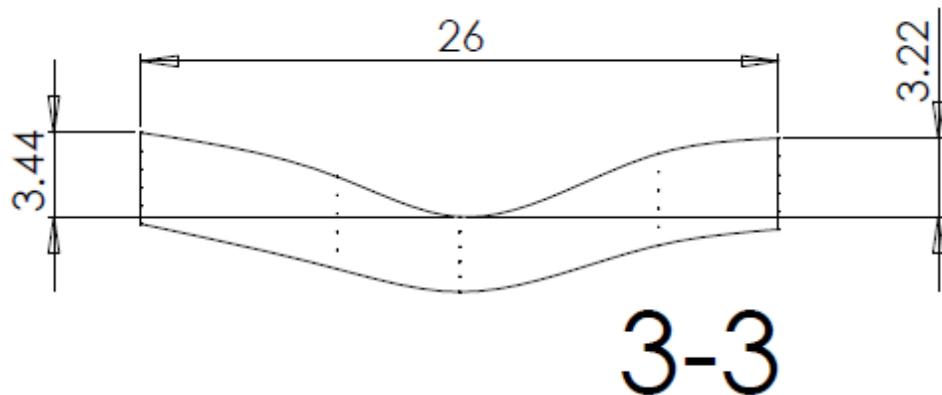


**2-3**

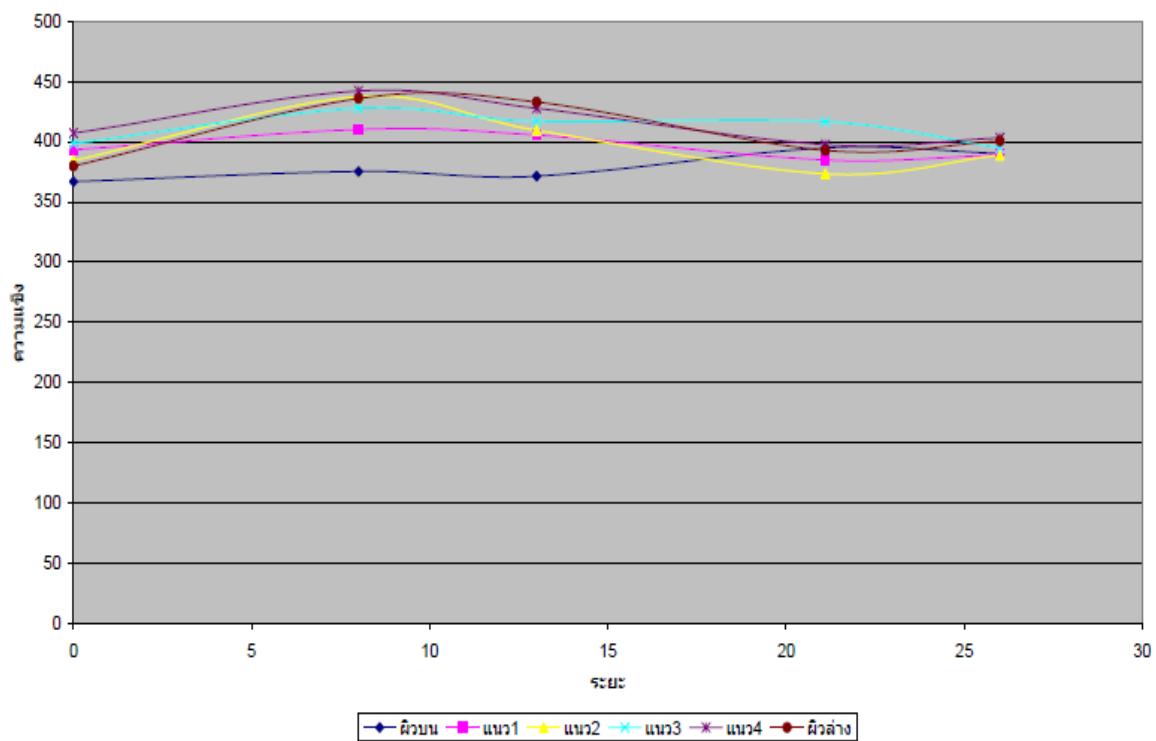
กราฟความแข็ง (HV) 2-3



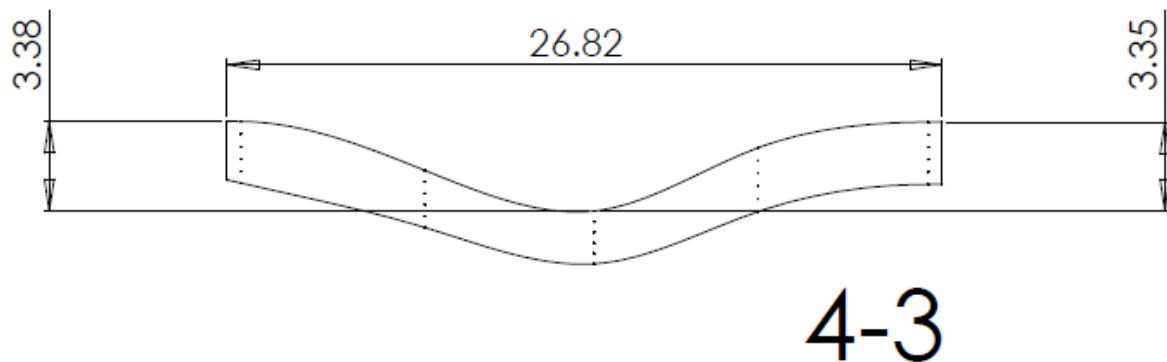
รูปที่ 59 ค่าความแข็งที่เป็นผลกราฟจาก การยิงด้วย กระสุน M16  
บนแผ่นเหล็กกล้าชุบแข็ง แผ่นหน้า ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 3



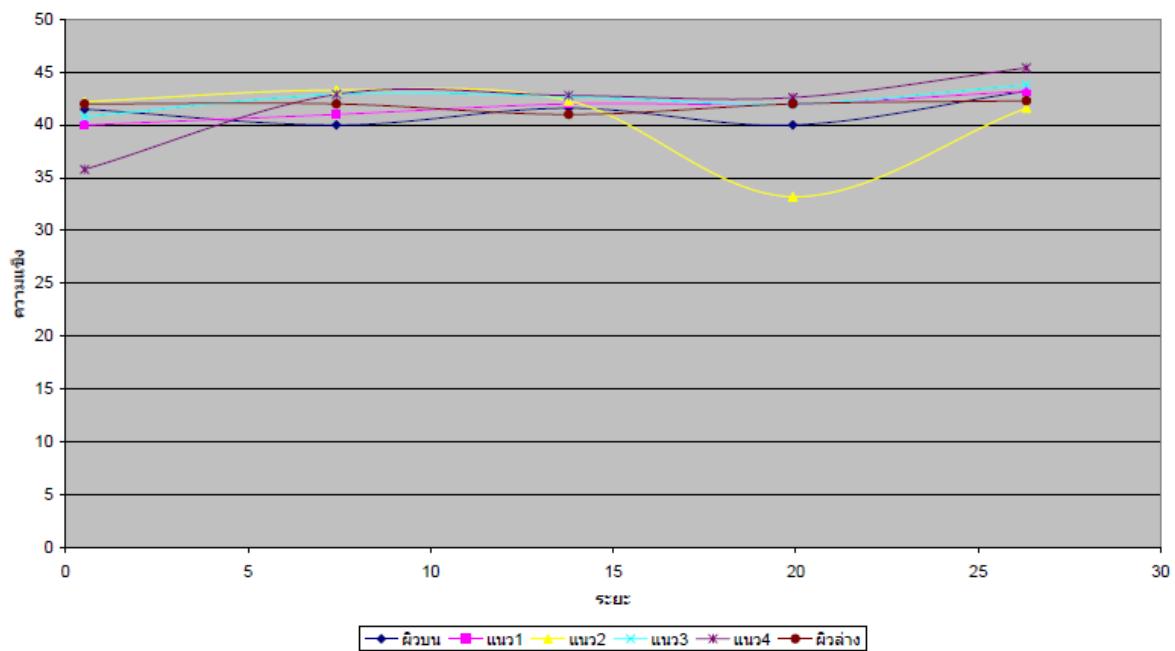
กราฟความแข็ง (HV) 3-3



รูปที่ 60 ค่าความแข็งที่เป็นผลการทดสอบจากการยิงด้วย กระสุน M16  
บนแผ่นเหล็กกล้าชุบแข็ง แผ่นหลัง ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 3



กราฟความแข็ง (HV) 4-3



รูปที่ 61 ค่าความแข็งที่เป็นผลกระแทบจากการยิงด้วย กระสุน M16  
บนแผ่นอลูมิเนียม แผ่นหลังสุด ของเกราะกันอาวุธสงคราม แบบที่ 3

### สรุปผลการทดลองความแข็ง

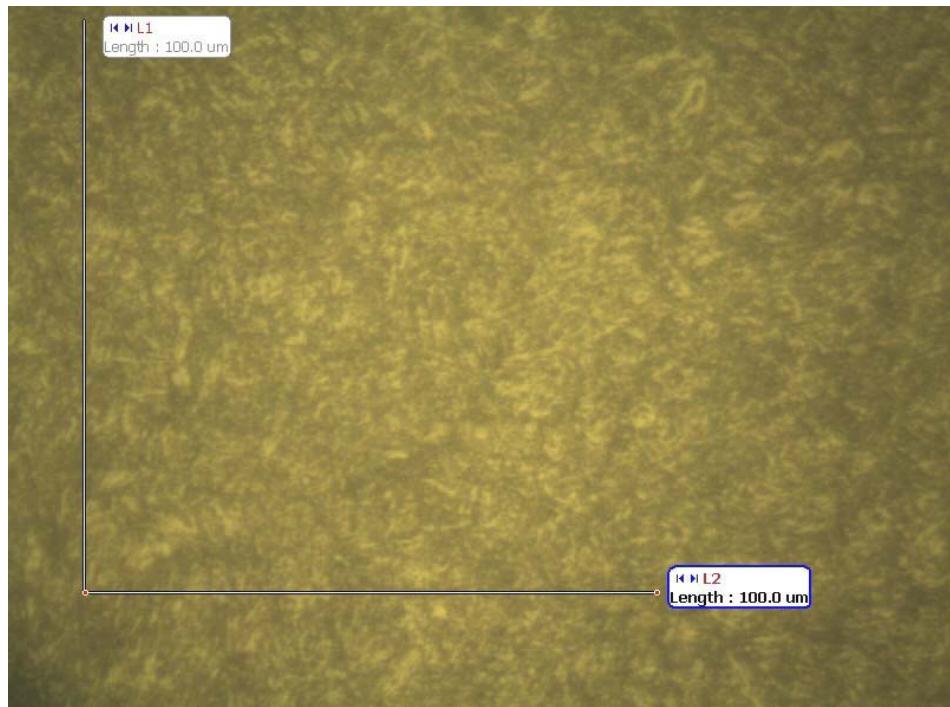
ความแข็งที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ ที่ถูกยิงนั้นเกิดขึ้นจากผลกระทบของ Strain hardening โดยความแข็งที่เกิดขึ้นอยู่กับความเร็วในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ หรือ Strain Rate ดังนั้นสามารถบ่งบอกได้ว่า เมื่อวัสดุนั้นถูกแรงกระทำให้ยืดตัวออกอย่างรวดเร็ว ยิ่งเร็วเท่าไรก็จะยิ่งทำให้มีความแข็งมากขึ้น จึงสามารถเปรียบเทียบได้ว่า กระสุนที่มีผลกระทบกับวัสดุนั้นๆ สามารถทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วยความเร็วที่มากกว่าหรือน้อยกว่ากัน หรือบ่งบอกถึงระดับของความเร็วและพลังงานที่ยังคงเหลือของกระสุน สังเกตที่ชิ้นงาน 3-3 นั้นมีความแข็งน้อยกว่า ซึ่งผกผันกับความหนาแน่นของแผ่นเกราะ ที่มีมากกว่ารูปแบบอื่นๆ แสดงว่า ชิ้นงานนี้ยืดตัวออกช้าลง เมื่อกระสุนมีความหนาแน่นมากขึ้น หรือ สรุปได้ว่า กระสุนมีความเร็วลดลง เมื่อผ่านมาถึงชิ้นเกราะนี้เข้ากับหลักโนเมนตัมได้

#### 4 ผลการตรวจสอบเกรณ (Microstructures)

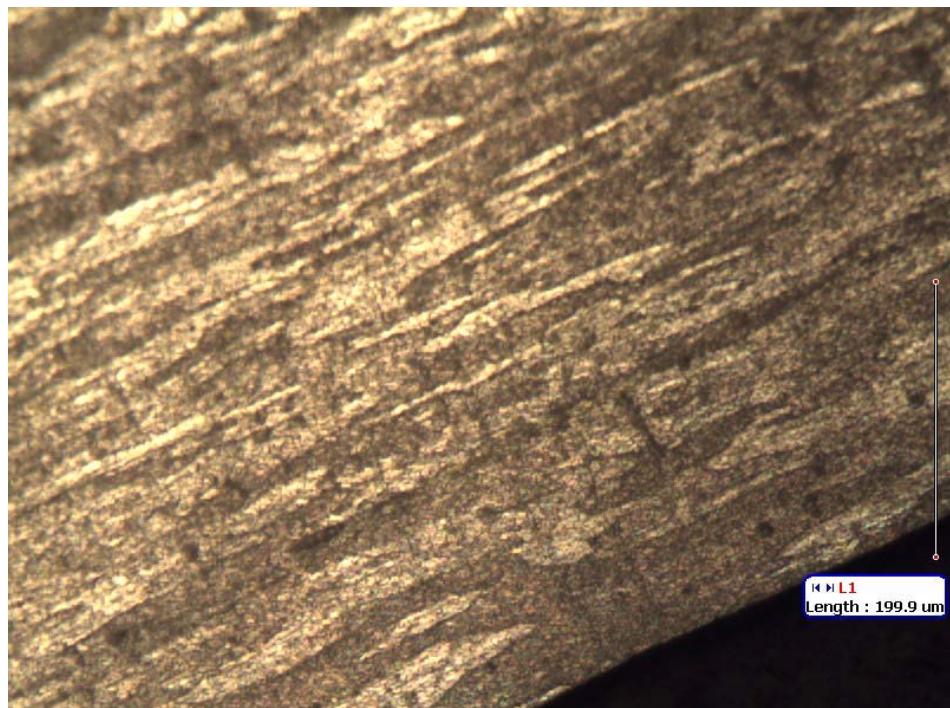
การตรวจสอบ Microstructure ได้ดำเนินงานที่ทำการวัดค่าความแข็งเหลวแล้ว นำมาขัด และ กัดด้วยกรดเพื่อดูโครงสร้างเกรณของวัสดุ ว่ามีความสม่ำเสมอหรือไม่

วัสดุ	ส่วนประกอบของกรด	ระยะเวลาในการกัดกรด
อลูมิเนียม	HF 40%	3 นาที
เหล็กกล้าไร้สนิม	HNO <sub>3</sub> 35%, HCL 40% ในน้ำกลัน	30 วินาที
เหล็กชุบแข็ง	HNO <sub>3</sub> 3% ในเมทิลแอลกอฮอล์	3 วินาที

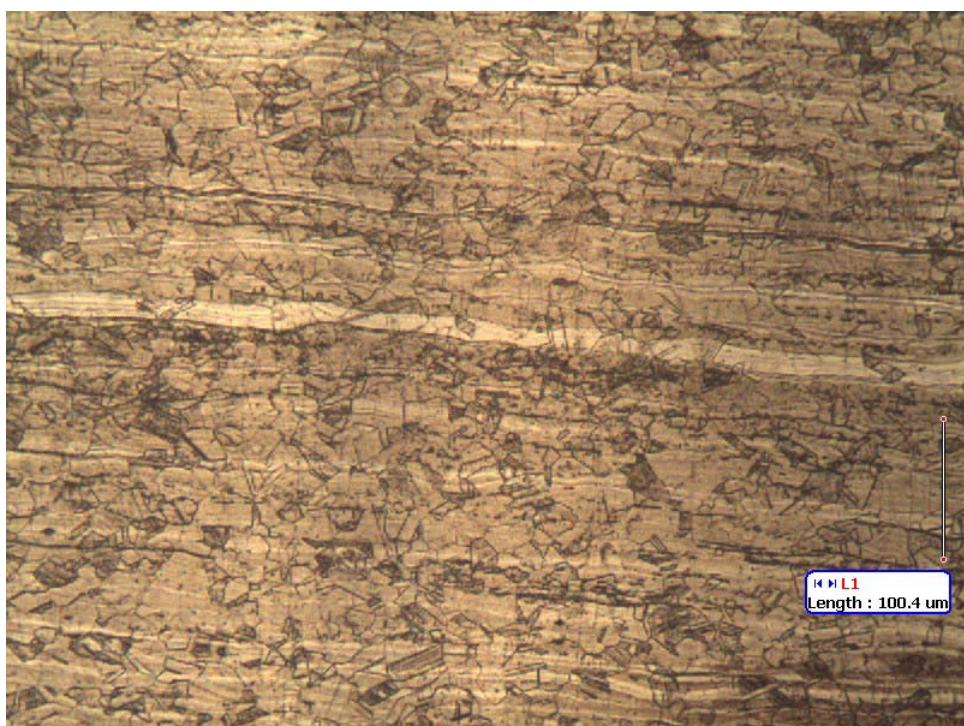
ตารางแสดงการกัดกรด



ภาพที่ 62 Microstructure ของวัสดุเหล็กชุบแข็ง



รูปที่ 63 Microstructure Microstructure ของชิ้นงานอลูมิเนียม



รูปที่ 64 Microstructure ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม

จากการทดลองไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างชัดเจน โดยวัสดุจะมีโครงสร้างเดิม สม่ำเสมอ ไม่มีชั้นผิวแข็งชัดเจน หรือชั้นที่มีเกรณะละเอียดกว่า

## ผลการทดสอบเกี่ยวกับกระสุน ครั้งที่ 2

### การทดลอง

การทดสอบเกี่ยวกับกระสุน ครั้งที่ 2 ทดสอบโดยการยิงด้วยกระสุนจริงกับเกราะกันกระสุนปืนพก ซึ่งเกราะที่นำมาใช้ทดสอบถูกเป็นที่ถูกพัฒนาเพื่อทดลองของฯ ผลกระทบของพร่องมิต่อร์ต่างๆ ต่อสมรรถนะการป้องกันกระสุนของเกราะ

### วิธีการทดลอง

การยิงทดสอบ โดยทำการทดสอบเทียบเท่ากับมาตรฐานของกระทรวงกลาโหมมากที่สุด และมีเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญร่วมปฏิบัติงานทดสอบ

การทดสอบเกราะปืนพก ยิงสอบทดสอบด้วยกระสุนสองขนาดคือ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

โดยทั่วไป กระสุนปืนที่มีข่ายตามห้องตลาดนั้นมีความเร็วตันที่แตกต่างกันเล็กน้อย แม้ว่าจะผลิตจากบริษัทเดียวกันก็ตาม ในการยิงทดสอบจึงจำเป็นต้องทำการวัดความเร็วของกระสุนที่จะนำมาทดสอบด้วย เพื่อให้ได้ค่าความเร็วตันตามมาตรฐาน NIJ.

จากการวัดความเร็วของกระสุน 9 mm.FMJRN วัดความเร็วตันได้ต่ำกว่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงได้ทำการเพิ่มดินปืนให้กับกระสุนจนได้ความเร็วตามมาตรฐาน ทำการทดสอบด้วยกระสุน .44 ที่ได้จากการวัดความเร็วตัน  $451.57$  เมตร/วินาที จึงได้ทำการนำดินปืนออกบางส่วน และนำมายิงจนได้ความเร็วตามมาตรฐาน ในชั้นนี้เราเรียกว่า “การปรับดินปืน”

แบบฟอร์มบันทึกผลการยิงทดสอบ gerade กันกระสุน

โครงการวิจัยและพัฒนา gerade ป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาด และกระสุนปืนเล็กๆ ที่เป็นอาวุธสงคราม

สถานที่ทดสอบ

สนามยิงทดสอบอาวุธ และกระสุนปืน กองพลอาชีวกร และสรรพาธุร  
รายชื่อเจ้าหน้าที่

- |                   |            |
|-------------------|------------|
| 1. พ.อ. ดำรง      | เรืองฤทธิ์ |
| 2. พ.อ. ฉัตรชัย   | ไชติกุล    |
| 3. พ.ต.ท. ไพบูลย์ | สุขเกษม    |
| 4. ด.ต. สมยศ      | ชัยน์โต    |
| 5. ด.ต. วินิจ     | แสงจิว     |
| 6. พ.ต. สุพพิติ   | มีสุข      |
| 7. พ.อ. อ.นพพร    | คุ้มครัวม  |

ผู้บันทึกผลการทดสอบ

คุณ โภวิท ร่มเยศบวร

ผู้เก็บหลักฐานในการทดสอบ

คุณ โภวิท ร่มเยศบวร

ผู้ร่วมสังเกตการณ์

- |                 |             |
|-----------------|-------------|
| 1. พ.อ. ดำรง    | เรืองฤทธิ์  |
| 2. คุณ ประเบช្យ | วงศ์คำสิงห์ |

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

หมายเลขอ 1

รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ SS2+ Al2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไว้สินิม 2 มม. กับ อลูมิเนียม 2 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง SS2+Al2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งร้อยกระสุน

ร้อยกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	436.94	ไม่ทะลุ	
2	.44	ทดสอบ	436±9	434.99	ทะลุ	
3						
4						

## หมายเลขอ 2

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ SS2+HAI2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวร์สันิม 2 มม. กับ

อัลูมิเนียม 2 มม. ทำอินไดซ์

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง SS2+HAI2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รอบทดสอบ	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	436.92	ไม่ทะลุ	
2	.44	ทดสอบ	436±9	428.68	ไม่ทะลุ	
3						
4						

### หมายเลขอ 3

#### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HSS2+Al2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวร์สันิม 2 มม. ทำในไต้หวัน

กับ อลูมิเนียม 2 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HSS2+Al2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	440.36	บริ	
2						
3						
4						

#### หมายเลขอ 4

##### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HSS2+Al1x2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวร์สนิม 2 มม. ทำในไตร์ดิ้ง

กับอลูมิเนียม 2 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HSS2+Al1x2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	437.87	ทະลຸ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 5

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ SS2+Al1x2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวรอนิม 2 มม. กับ อลูมิเนียม 1 มม. 2 แผ่น

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง SS2+Al1x2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รอบทดสอบ	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	$436 \pm 9$	439.96	ไม่ทะลุ	
2	.44	ทดสอบ	$436 \pm 9$	437.49	ทะลุ	
3						
4						

## หมายเลขอ 6

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HSS2+Al1x2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิม 2 มม

ทำในเตาติง กับอุณหภูมิเนียม 1 มม. 2 แผ่น

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HSS2+Al1x2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	438.17	ทะลุ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 7

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HSS2+HAI1x2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวร์สันิม 2 มม. ทำในไต้หวัน

กับ อลูมิเนียม 1 มม. 2 แผ่น ทำอินไดซ์

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HSS2+HAI1x2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	441.75	ทะลุ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 8

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ Al2+Al1x4

รายละเอียดวัสดุ อลูมิเนียม 2 มม. กับอลูมิเนียม 1 มม. 4 แผ่น

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง Al2+Al1x4

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

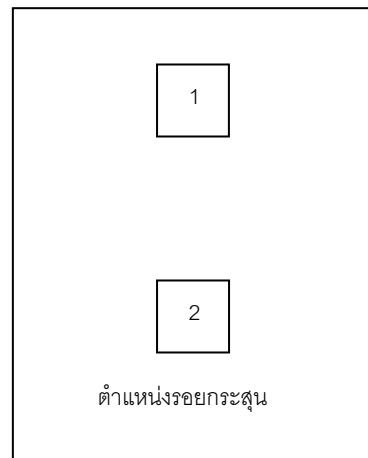
น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที



ร้อยละของกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	437.81	ทະฑุ	
2						
3						
4						

### หมายเลขอ 9

#### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HAI2+Al1x4

รายละเอียดวัสดุ อลูมิเนียม 2 มม. ทำอินไดซ์

กับ อลูมิเนียม 1 มม. 4 แผ่น

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HAI2+Al1x4

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

ร้อยละกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	441.16	ทະฑุ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 10

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HAI1x4+Al2

รายละเอียดวัสดุ อุดมิเนียม 2 มม.

กับอุดมิเนียม 1 มม. 4 แผ่น ทำ成ในไดร์ฟ

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HAI1x4+Al2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ท่อสอบ	436±9	438.90	ทะลุ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 11

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HAI2+HAI1x4

รายละเอียดวัสดุ อลูมิเนียม 2 มม. ทำอินไดซ์

กับ อลูมิเนียม 1 มม. 4 แผ่น ทำอินไดซ์

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HAI2+HAI1x4

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	435.95	ทະลຸ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 12

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HSS1+HSS1

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวสนิม 2 มม. ทำในไตรดิ้ง 2 แผ่น

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HSS1+HSS1

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รอบทดสอบ	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	จอยยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	434.91	ทະฑ	
2						
3						
4						

### หมายเลขอ 13

#### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ SS1+SS1

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวสนิม 1 มม. 2 แผ่น

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง SS1+SS1

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รอบทดสอบ	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	จอยยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	439.90	ทະฑ	
2						
3						
4						

#### หมายเลขอ 14

##### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HSS1+SS1

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิม 1 มม. ทำในไต้หวัน

กับเหล็กกล้าไร้สนิม 1 มม

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HSS1+SS1

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	439.84	ทะลุ	
2						
3						
4						

### หมายเลขอ 15

#### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HSS1+Al2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวร์สันิม 1 มม. ทำในไต้หวัน

กับอลูมิเนียม 2 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HSS1+Al2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	432.95	ทะลุ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 16

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HSS1x2+Al2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวร์สนิม 1 มม. ทำในไตร์ดิ้ง 2 แผ่น

กับอลูมิเนียม 2 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HSS1x2+Al2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	440.47	ทะลุ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 17

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ SS1x2+Al2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวรอนิม 1 มม. 2แผ่น กับอลูมิเนียม 2 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง SS1x2+Al2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รอบทดสอบ	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	438.63	ปริ	
2	.44	ทดสอบ	436±9	437.80	ทະลຸ	
3						
4						

### หมายเลขอ 18

#### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ SS1x2+ Al1x2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวร์สันิม 1 มม. 2 แผ่น

กับอลูมิเนียม 1 มม. 2 แผ่น

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง SS1x2+ Al1x2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

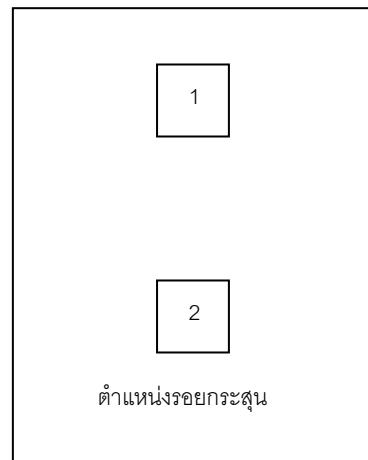
น้ำหนัก 8 กรัม (124 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที



รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	435.29	ไม่ทะลุ	
2	.44	ทดสอบ	436±9	435.07	ทะลุ	
3						
4						

### หมายเลขอ 19

#### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HSS1x2+HAI1x2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวร์สันิม 1 มม. ทำในไตร์ดิ้ง 2 แผ่น

กับ อลูมิเนียม 1 มม. ทำอโนไดซ์ 2 แผ่น

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HSS1x2+HAI1x2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	432.98	ทະลຸ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 20

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ SS2+AI1

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิม 2 มม. กับ อลูมิเนียม 1 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง SS2+AI1

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รอบทดสอบ	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	จอยยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	438.61	ทະฑ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 21

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ HSS2+Al1

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไวร์สันิม 2 มม. ทำในไต้หวัน

กับอลูมิเนียม 1 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง HSS2+Al1

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

รายการกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	434.90	ทะลุ	
2						
3						
4						

## หมายเลขอ 22

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ AI5083-3+AI5083-3

รายละเอียดวัสดุ อัลูมิเนียม 5083 หนา 3 มม. 2 แผ่น

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง AI5083-3+AI5083-3

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm.FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 เกรว)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

1

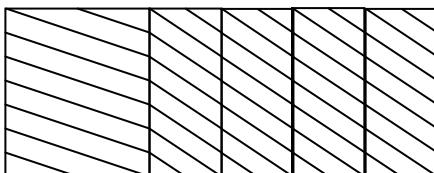
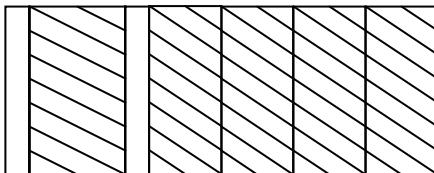
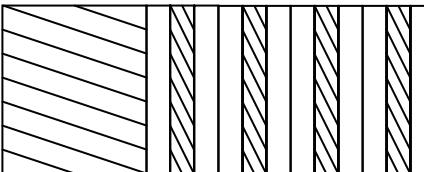
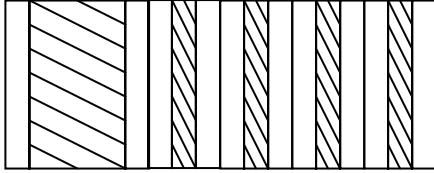
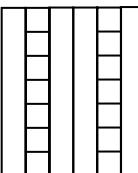
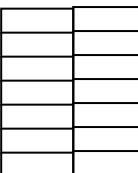
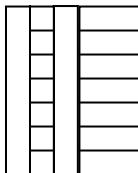
2

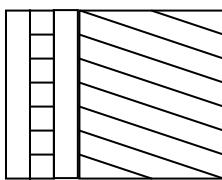
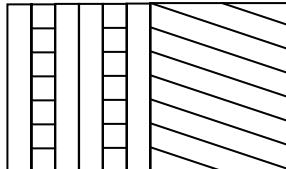
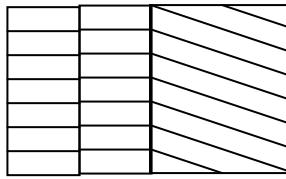
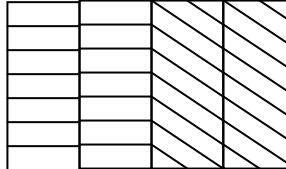
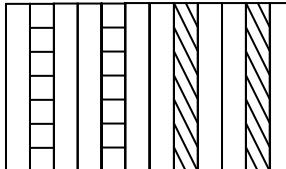
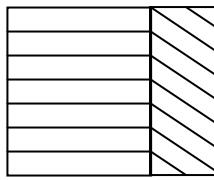
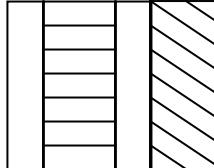
ตำแหน่งของกระสุน

รอบการทดสอบ	ชนิดกระสุน	ชนิดลำกล้อง	ความเร็วกระสุน		ผล	จอยยุบ (mm)
			มาตรฐาน	วัดได้		
1	9 mm.	ทดสอบ	436±9	438.09	ทະฑ	
2						
3						
4						

รูปแบบการประกอบกระสุน

หมายเลข	รูปแบบ ทิศทางกระสุน ➔	รหัสวัสดุ	ผล	
			9mm.	.45
1		SS2+AI2	ไม่ทะลุ	ทะลุ
2		SS2+HAI2	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
3		HSS2+AI2	ปะ	ทะลุ
4		HSS2+AI1x2	ทะลุ	ทะลุ
5		SS2+AI1x2	ไม่ทะลุ	ทะลุ
6		HSS2+AI1x2	ทะลุ	ทะลุ
7		HSS2+HAI1x2	ทะลุ	ทะลุ

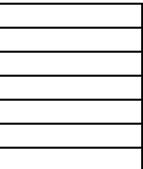
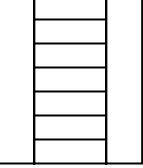
8		AI2+AI1x4	ทะลุ	ทะลุ
9		HAI2+AI1x4	ทะลุ	ทะลุ
10		AI2+HAI1x4	ทะลุ	ทะลุ
11		HAI2+HAI1x4	ทะลุ	ทะลุ
12		HSS1+HSS1	ทะลุ	ทะลุ
13		SS1+SS1	ทะลุ	ทะลุ
14		HSS1+SS1	ทะลุ	ทะลุ

15		HSS1+AI2	ทะลุ	ทะลุ
16		HSS1x2+AI2	ทะลุ	ทะลุ
17		SS1x2+AI2	ปะริ	ทะลุ
18		SS1x2+ AI1x2	ไม่ทะลุ	ทะลุ
19		HSS1x2+HA1x2	ทะลุ	ทะลุ
20		SS2+AI1	ทะลุ	ทะลุ
21		HSS2+AI1	ทะลุ	ทะลุ

22			AI5083-3 +AI5083-3	อะลูมิเนียม 1 มม.	อะลูมิเนียม 1 มม.
----	--	--	-----------------------	-------------------	-------------------

### ตารางแสดงความหมายสัญลักษณ์

	AI1	อะลูมิเนียม 1 มม.
	AI2	อะลูมิเนียม 2 มม.
	HAI2	อะลูมิเนียม 1 มม. ทำ成ในไดร์ฟ
	HAI2	อะลูมิเนียม 2 มม. ทำ成ในไดร์ฟ
	SS1	เหล็กกล้าไร้สนิม 1 มม.
	HSS1	เหล็กกล้าไร้สนิม 1 มม ทำในไดร์ฟ

	SS2	เหล็กกล้าไร้สนิม 2 มม
	HSS2	เหล็กกล้าไร้สนิม 2 มม ทำไนท์เตอร์ดิ้ง
	Al5083-3	อัลูมิเนียม 5083 หนา 3 มม.

## สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นถึงผลของความแข็งที่ผิวสุดแห่งเกราะ และความแข็งแรงของวัสดุ นั้นมีผลต่อรูปแบบความเสียหาย ของแผ่นเกราะจริง ตามหลักทฤษฎีที่กล่าวไว้ข้างต้น

จากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบวัสดุที่มีผิวแข็ง แล้วให้ผลการทดสอบ สอดคล้องกับทฤษฎี และการทดลองของ T. Borvik[5] เมื่อวัสดุบางมีความแข็งมากขึ้นถึงระดับหนึ่งจะมีความสามารถในการต้านทานกระสุนลดลง เนื่องจากเกิดความเสียหายในรูปแบบ Plugging ได้ง่ายขึ้น ดังผลการทดลอง หมายเลข 1-3 ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการทำผิวแข็งให้แผ่นเกราะชั้นแรก แผ่นเกราะจะถูกเจาะได้ง่าย โดยที่กระสุน 9mm. สามารถเจาะทะลุได้

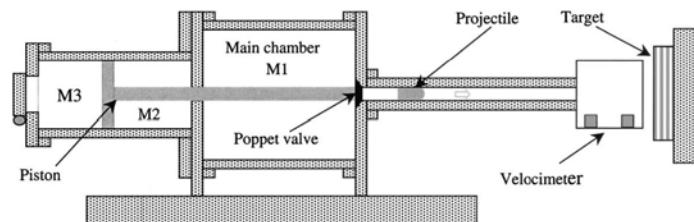
และจากการทดลองแสดงให้เห็นอีกว่าความแข็งแรงของแผ่นเกราะชั้นต่อมาก็ทำหน้าที่รองหลัง นั้นมีผลต่อความสามารถในการต้านทานกระสุน ดังผลการทดลอง หมายเลข 1-3 จะพบว่า หมายเลข 2 ที่ใช้แผ่นรองหลังที่มีความแข็งแรงมากกว่า เนื่องจากมีการทำผิวแข็งนั้น ผลให้ เกราะนั้นสามารถกันกระสุน .44 ได้

จากการทดลองหมายเลข 22 ความแข็งแรงของแผ่นวัสดุชั้นแรกมีผลต่อความสามารถในการต้านทานกระสุน ดังที่ผลการทดลอง ออกมามั่วว่าจะใช้อลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติสูงและมีความหนา รวมกันถึง 6 mm. ก็ไม่สามารถกันกระสุนได้เลย เมื่อเทียบกับเกราะที่ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นแผ่นเกราะชั้นแรก เนื่องจากเกราะชั้นแรกนั้นต้องรับภาระการกระแทกที่สูงมากในเวลาอันสั้น วัสดุที่ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกต่ำ เช่น วัสดุที่ความแข็งสูง ยืดตัวได้น้อย กับวัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำ อย่างอลูมิเนียม จะไม่สามารถรับภาระการกระแทกได้มากพอ

## ผลการทดสอบเกระาะกันกระสุน รอบที่ 3

### การทดลอง

การทดสอบเกระาะกันกระสุน ทดสอบโดยการยิงด้วยกระสุนจริงกับเกระาะกันกระสุนเป็นพก และ เกระาะกันกระสุนปืนเล็กๆที่เป็นอาวุธสงครามด้วยเครื่องยิงทดสอบ gas gun



รูปที่ 65 เครื่องยิงทดสอบ Gas gun

### วิธีการทดลอง

#### การยิงทดสอบ

การยิงทดสอบแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ คือ ทดสอบเกระาะปืนพกและเกระาะปืนเล็กๆ และมีรูปแบบอยู่อย่าง ดังนี้

##### 1 ทดสอบเกระาะปืนพก

เกระาะปืนพกที่ใช้ทดสอบครั้งนี้มีรูปแบบเดียว แต่ยิงทดสอบด้วยกระสุนสอง

ขนาดคือ กระสุนปืนมาตรฐาน 9 มม. FMJRN และ .44 REM MAG ตามการทดสอบมาตรฐาน 3A

1.1 เกระาะปืนพกยิงด้วยกระสุน 9 มม. FMJRN (BJS3 + BJA2-9 มม. FMJRN)

1.2 เกระาะปืนพกยิงด้วยกระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked (BJS3 + BJA2-.44)

## 2 ทดสอบเกราะปืนเล็กๆ

เกราะปืนเล็กๆ ทดสอบบึงด้วยกระสุน M16 อย่างเดียว และมีการจัดรูปแบบเกราะตามรูปแบบโดยการเพิ่มชั้นวัสดุเข้ามาช่วยรับภาระจากกระสุน

2.1 เกราะ 3 ชั้น (SM10 +UD.2x20+BJH2)

### การทดสอบแบบมาตรฐานสำหรับเกราะปืนพกระดับ 3A



รูปที่ 66 สนามยิงทดสอบอาวุธ และกระสุนปืน กองพลาซิการ และสรรพาตุช สนง. สำรวจแห่งชาติ



รูปที่ 67 สนามยิงทดสอบอาวุธ และกระสุนปืน กองพลาซิกการ และสรรพากร สนง. สำรวจแห่งชาติ



รูปที่ 68 อุปกรณ์ใช้ยิงทดสอบ (Nitrogen gas gun)



รูปที่ 69 อุปกรณ์วัดความเร็วกระสุนปืน



รูปที่ 70 เครื่องวัดความเร็วกระสุนปืน



รูปที่ 71 ชุดเกราะปืนพกสำหรับทดสอบ



รูปที่ 72 ชุดเกราะปืนพกหลังทำการทดสอบ



รูปที่ 73 ชุดเกราะปืนพกหลังทำการทดสอบ



รูปที่ 74 ชุดเกราะสำหรับทดสอบกระสุนปืนเล็กยาวอาวุธสงคราม



รูปที่ 75 ชุดเกราะสำหรับทดสอบกระสุนปืนเล็กยาวอาวุธสงคราม



รูปที่ 76 พ.อ. ดำรงค์ เรืองฤทธิ์ บรรยายก่อนทำการทดสอบ



รูปที่ 77 พ.อ. ดำรง เรืองฤทธิ์ สว.กห. ทำเครื่องหมายตำแหน่งเป้าเลเซอร์



รูปที่ 78 รอยกระสุนปืน M 16 ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 79 พ.อ. สมชาย ศุขมนัส

พ.อ. ดำรงค์ เรืองฤทธิ์

คณะกรรมการ สว.กห. ตรวจสอบรอยกระสุนปืน



รูปที่ 80 คณะกรรมการตรวจสอบรอยรอยกระสุนปืน 16 ตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 81 รอยกระสุนปืน M 16 ตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 82 รอยยุบตัวของดินน้ำมันจากกระสุนปืน M 16 ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 83 การวัดรอยยุบตัวของดินน้ำมันจากกระสุนปืน M 16 ที่ตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 84 เกราะหลังการยิงทดสอบ



รูปที่ 85 รอยยุบตัวของดินน้ำมันจากกระสุนปืน M16 ที่ตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 86 ชุดเกราะหลังการยิงทดสอบ



รูปที่ 87 คณะกรรมการ และผู้ร่วมสังเกตการณ์  
โครงการวิจัยและพัฒนาเกราะป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาดและกระสุนปืนเล็กๆที่เป็นอาวุธสงคราม  
ณ สำนักงานยิงทดสอบอาวุธ และกระสุนปืน กองพลาธิการ และสรรพากร สำน. ตำรวจแห่งชาติ



พลเอก อภิชาติ ทิมสุวรรณ หัวหน้าโครงการ



รูปที่ 88 หัวหน้าโครงการร่วม คณะกรรมการ และผู้ร่วมลังเกตการณ์  
โครงการวิจัยและพัฒนาเกราะป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาดและกระสุนปืนเล็กๆที่เป็น  
อาวุธสงคราม

ณ สำนักยิงทดสอบอาวุธ และกระสุนปืน กองพลาธิการ และสรรพากร สนง. ตำรวจนครบาล

### แบบฟอร์มบันทึกผลการยิงทดสอบกระสุนกระสุน

โครงการวิจัยและพัฒนา geradeป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาดและกระสุนปืนเล็กๆที่เป็นอาชญากรรม

#### สถานที่ทดสอบ

สนามยิงทดสอบอาชญากรรมและกระสุนปืน กองพลาธิการ และสารพาราช  
สนง. ตำรวจนครบาล

วันที่ทำการทดสอบ 14 พฤศจิกายน 2551 เวลา 09.30 น.

#### รายชื่อเจ้าหน้าที่

1. พ.อ. สมชาย	ศุขมนัส	ส.ว.กห.
2. พ.อ. ดำรงค์	เรืองฤทธิ์	ส.ว.กห.
3. พ.อ.อ. นพพร	คุ้มคล้าย	ทอ.
4. พ.ต.ท. ไพรชนก	สุขเกยม	พลาธิการตำรวจนครบาล
5. ส.ต.ท. อุดยล	วังห้อม	พลาธิการตำรวจนครบาล
6. ส.ต.ท. พจน์	ศุกร์วัชรินทร์	พลาธิการตำรวจนครบาล
7. คุณณรงค์	จิตเนื่อง	บ. พรีซิพาร์ท จำก.

#### ผู้บันทึกผลการทดสอบ

คุณ มงคล พุ่มแก้ว

#### ผู้เก็บหลักฐานในการทดสอบ

คุณ มงคล พุ่มแก้ว

#### ผู้ร่วมสังเกตการณ์

- พ.อ. สมชาย ศุขมนัส
- พ.อ. ดำรงค์ เรืองฤทธิ์

### ชิ้นงานหมายเลข 1

รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ BJS3 + BJA2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิม 3 มม. กับ

เหล็กหนีบ瓦ลูมิเนียมอัลลอย 2 มม.

ดำเนินการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง BJS3 + BJA2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm. FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรน)

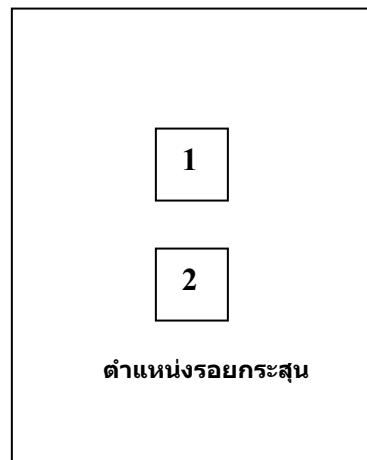
ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน 9 mm. FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรน)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

3. น้ำหนักกระ 2.4 กิโลกรัม



ร้อย กระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดคำ กล่อง	น.น. กระสุน ปืน(mg.)	ความเร็วกระสุน		ผล	ร้อยละ (mm)	$D_{ave}$ (mm)
				มาตรฐาน	วัดได้			
1	9 มม.	ทดสอบ	STD.	436 $\pm$ 9	430	ไม่ทะลุ	12	19.64
2	9 มม.	ทดสอบ	STD.	436 $\pm$ 9	428	ไม่ทะลุ	12.4	23.88

ข้อสังเกต : สำหรับการทดสอบในครั้งนี้ระดับความเร็วของกระสุน 9 มม. จะมีความเร็วใกล้เคียงระดับมาตรฐาน

## ชื่นงานหมายเลข 2

### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ BJS3 + BJA2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิม 3 มม. กับ  
อลูминีียมอัลลอย 2 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง BJS3 + BJA2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน 9 mm. FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรน)

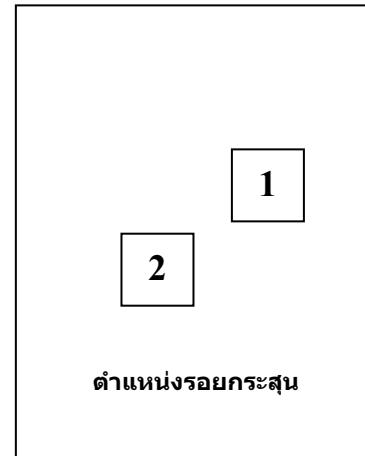
ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน 9 mm. FMJRN

น้ำหนัก 8 กรัม (124 เกรน)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

3. น้ำหนักกระ 2.4 กิโลกรัม



ตำแหน่งร้อยกระสุน

ร้อย กระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดคำ กล่อง	น.น. กระสุน ปืน(mg.)	ความเร็วกระสุน		ผล	ร้อย群 (mm)	$D_{ave}$ (mm)
				มาตรฐาน	วัดได้			
1	9 มม.	ทดสอบ	STD.	436 $\pm$ 9	394	ไม่ทะลุ	12.6	23.59
2	9 มม.	ทดสอบ	STD.	436 $\pm$ 9	396	ไม่ทะลุ	12.2	21.55

ข้อสังเกต : ความเร็วของกระสุน 9 มม. ยังต่ำกว่าระดับมาตรฐานอยู่  $9.17$  เปอร์เซ็นต์

### ชิ้นงานหมายเลข 3

#### รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ BJS3 + BJA2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิม 3 มม. กับ

อลูมิเนียมขั้ลโลย 2 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง BJS3 + BJA2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1

2

ตำแหน่งของกระสุน

1. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

3. น้ำหนักเกราะ 2.4 กิโลกรัม

รอย กระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดลำ กล่อง	น.น. กระสุน ปืน(mg.)	ความเร็วกระสุน		ผล	รอยยุบ (mm)	D <sub>ave</sub> (mm)
				มาตรฐาน	วัดได้			
1	.44	ทดสอบ 4"	STD.	436 ± 9	430	ไม่ทะลุ	20.8	24.20
2	.44	ทดสอบ 4"	STD.	436 ± 9	428	ไม่ทะลุ	19.7	23.65

ข้อสังเกต : ความเร็วของกระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked ทดสอบอยู่ในระดับ

มาตรฐาน

### ขั้นตอนหมายเลข 4

รายละเอียดวัสดุ

รหัสวัสดุ BJS3 + BJA2

รายละเอียดวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิม 3 มม. กับ

อลูมิเนียมอัลลอย 2 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง BJS3 + BJA2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ

1. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 กรัม)

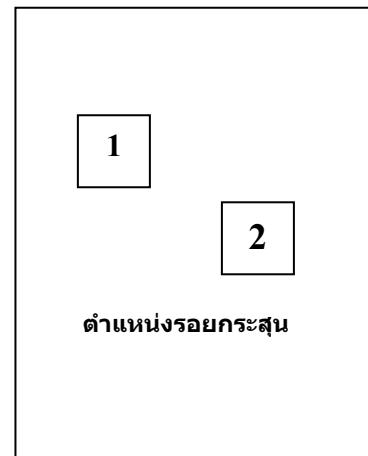
ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

2. กระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 15.55 กรัม (240 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $436 \pm 9$  เมตร/วินาที

3. น้ำหนักเกราะ 2.4 กิโลกรัม



ระยะ กระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดคำ กล่อง	น.น. กระสุน ปืน(mg.)	ความเร็วกระสุน		ผล	ระยะ (mm)	$D_{ave}$ (mm)
				มาตรฐาน	วัดได้			
1	.44	ทดสอบ 4"	STD.	436 $\pm$ 9	428	ไม่ทะลุ	22.6	24.34
2	.44	ทดสอบ 4"	STD.	436 $\pm$ 9	429	ไม่ทะลุ	20.1	24.21

ข้อสังเกต : ความเร็วของกระสุน .44 Magnum Lead SCW Gas Checked ทดสอบอยู่ในระดับมาตรฐาน

### ชิ้นงานหมายเลข 5 ทดสอบเกราะกันกระสุนปืนเล็กๆที่เป็นอาวุธสงคราม

#### รายละเอียดวัสดุ

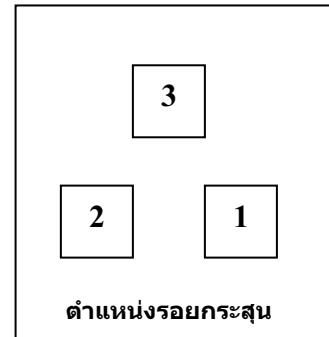
รหัสวัสดุ เกราะ 3 ชิ้น (SM10 +UD.2x20+BJH2)

รายละเอียดวัสดุ วัสดุเซรามิก 10 มม. , วัสดุไบสังเคราะห์หนา .2 มม.

20 ชิ้น และเหล็กกล้าไร้สนิม 3 มม.

ลำดับการเรียงวัสดุจากหน้าไปหลัง SM10 +UD.2x20+BJH2

กระสุนที่ใช้ในการทดสอบ



- กระสุน 7.62 mm. NATO FMJ Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 148 กรัม (240 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $838 \pm 9$  เมตร/วินาที

- กระสุน 7.62 mm. NATO FMJ Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 148 กรัม (240 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $838 \pm 9$  เมตร/วินาที

- กระสุน 7.62 mm. NATO FMJ Lead SCW Gas Checked

น้ำหนัก 148 กรัม (240 กรัม)

ความเร็วกระสุน  $838 \pm 9$  เมตร/วินาที

- น้ำหนักเกราะ 2.4 กิโลกรัม

รอย กระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดคำ กล่อง	น.น. กระสุน ปืน(mg.)	ความเร็วกระสุน		ผล	รอยยุบ (mm)	$D_{ave}$ (mm)
				มาตรฐาน	วัดได้			
1	M16	ทดสอบ 6"	148	838 $\pm$ 9	845	ไม่ทะลุ	22.6	22.32
2	M16	ทดสอบ 6"	148	838 $\pm$ 9	839.57	ไม่ทะลุ	20.1	21.21
3	M16	ทดสอบ 6"	148	838 $\pm$ 9	846.62	ไม่ทะลุ	19.1	21.37

ข้อสังเกต : ความเร็วของกระสุน M16 Lead SCW Gas Checked ทดสอบอยู่ในระดับมาตรฐาน

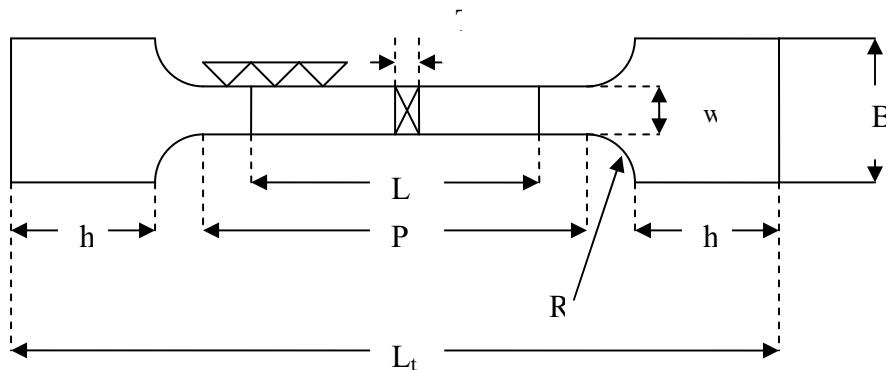
## 16. การทดสอบความแข็ง

### 16.1 ผลการทดสอบความแข็ง Tensile Test

ชิ้นทดสอบชนิดแบบ แบบ E (DIN 50125)

การดึงทดสอบวัสดุ ในการทดสอบครั้งนี้ กระทำตามมาตรฐาน

แบบ E (DIN 50125) ตามเครื่องทดสอบที่กำหนด



รูปที่ 89 แบบชิ้นทดสอบวัสดุมาตรฐาน E (DIN 50125)

Type	Width Width	Gauge length	Parallel length	Radius of fillet (Degree)	Thickness	Width of gripped portion
	w	L	P	R	T	B
E	20	70	90 approx.	35	2	30

ตารางที่ 26 ขนาดชิ้นทดสอบที่จัดทำตามมาตรฐาน E (DIN 50125) หน่วยเป็นมิลลิเมตร

Type	w	L	P	h	L <sub>t</sub>	R	T	B
E	20	70	90	50	220	35	2	20

ตารางที่ 27 ขนาดชิ้นทดสอบที่จัดทำตามมาตรฐาน E (DIN 50125) หน่วยเป็นมิลลิเมตร

### รายละเอียดการดึงทดสอบชิ้นงาน

#### ผลการทดลอง

Specimen	อลูมิเนียมทำoniไดซ์ชิ้นที่ 1		อลูมิเนียมทำoniไดซ์ชิ้นที่ 2	
	แนวตั้ง	แนวนอน	แนวตั้ง	แนวนอน
Yield Stress (MPa)	112.55	112.55	107.51	107.51
Tensile Strength (MPa)	116	116	111	111
Elongation %	3.11	3.11	3.52	3.52

ตารางที่ 28 แสดงผลการดึงทดสอบวัสดุ

### รายละเอียดการดึงทดสอบชิ้นงาน

Operator name: Mr. Watcharin

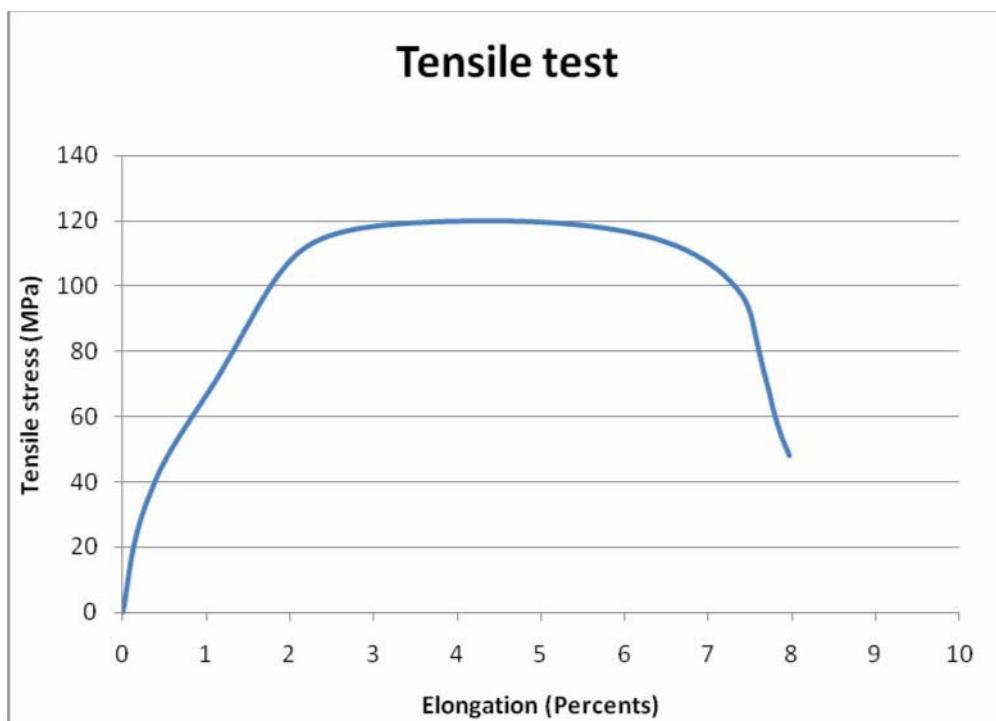
Full Scale Load Range: 6 kN

Crosshead Speed: 30 mm/min

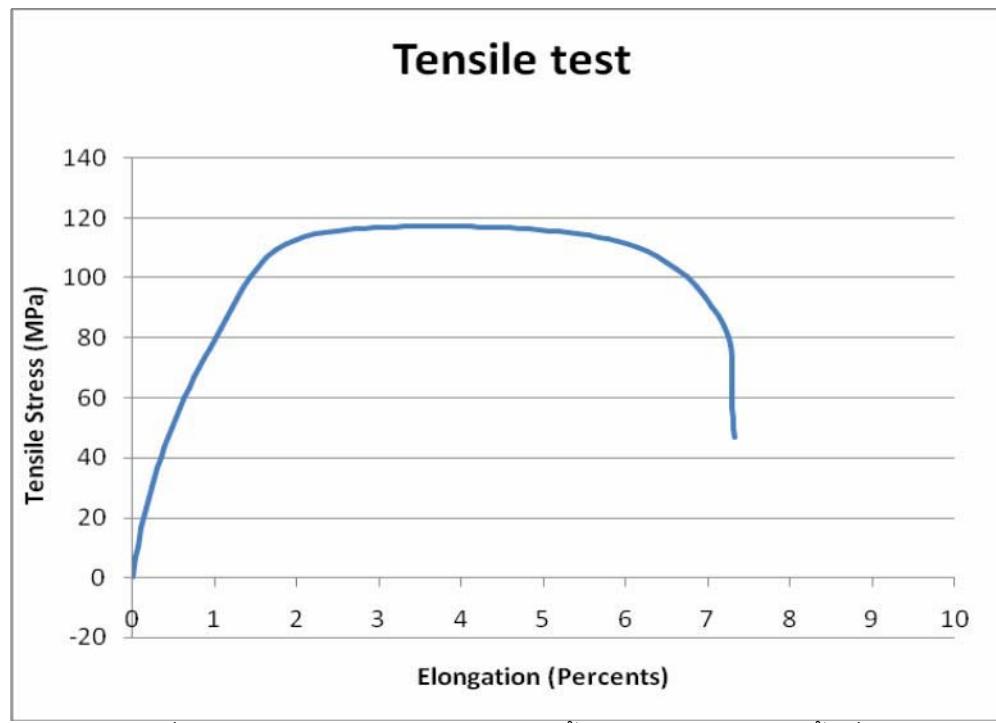
Temperature: 25 °C

จากผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงทดสอบทั้ง 2 แนว ไม่แตกต่างกันมาก

กราฟผลการทดสอบ Tensile test

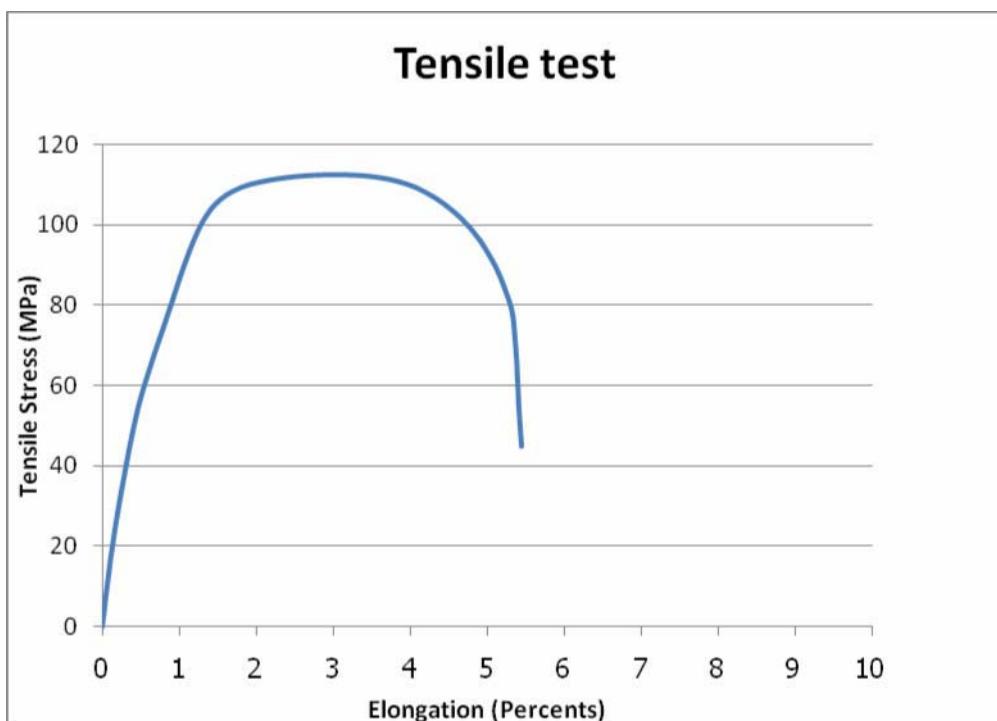


รูปที่ 90 กราฟ Tensile Test สำหรับชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียมชิ้นที่ 1

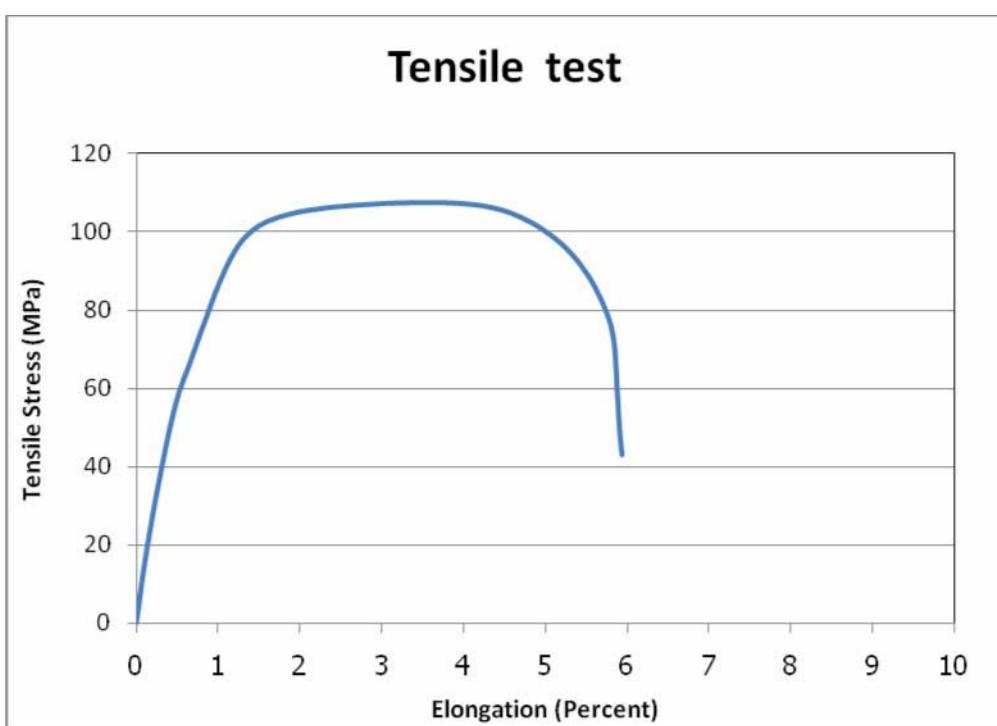


รูปที่ 91 กราฟ Tensile Test สำหรับชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียมชิ้นที่ 2

### กราฟผลการทดสอบ Tensile test



รูปที่ 92 กราฟ Tensile Test สำหรับชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียมทำอนไดซ์ชิ้นงานที่ 1



รูปที่ 93 กราฟ Tensile Test สำหรับชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียมทำอนไดซ์ชิ้นงานที่ 2

## 17. การตรวจสอบความลึกความกว้างของรูกระสุนปืน

### 17.1 วิธีการทดสอบการวัดความลึกและความกว้างของรูกระสุนปืนด้วยเครื่อง

3D OPTICAL SCANNING เป็นการวัดความลึกและความกว้างของรูกระสุนปืนด้วยเครื่อง 3D

#### OPTICAL SCANNING

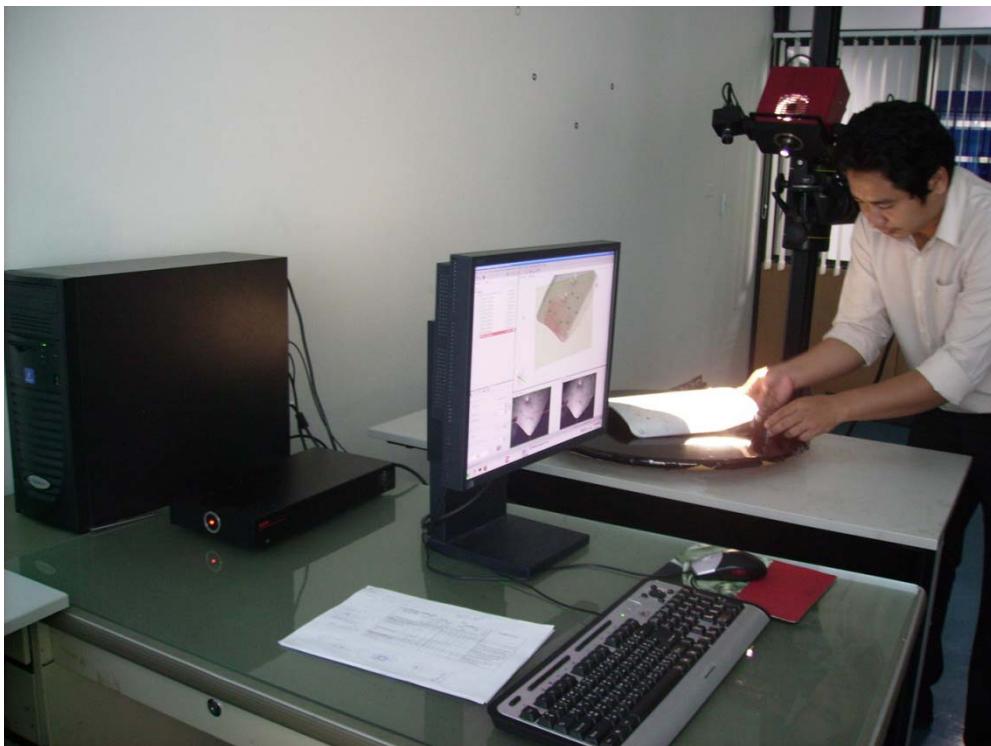
การวัดความลึกและความกว้างของรูกระสุนปืนด้วยเครื่อง 3D OPTICAL SCANNING อาศัยหลักการวัด 3 มิติ จากเครื่อง 3D OPTICAL SCANNING โดยนำชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบจากการสแกนรูปร่างของชิ้นงานในรูปภาพ 3 มิติ ซึ่งจะมีรูปอยลักษณะของรูปที่ถูกกระทำจากกระสุนปืนบนชิ้นงานหรือกระแทกที่ใช้ทำการทดสอบ เพื่อที่จะนำผลการสแกนมาบันทึกการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานในรูป 3 มิติ และตัวโปรแกรมเครื่องยังสามารถวัดค่าร้อยละ รอยบุ๋มของชิ้นงานได้ จากนั้นจึงนำมานับทึกให้อยู่ในรูปไฟล์ jpg หรือ stl เพื่อนำไปประมวลผลหรือนำไปวิเคราะห์รูปแบบงานในด้านวิศวกรรมต่างๆ ได้อีกอย่างเช่นนำไปวิเคราะห์รูปแบบ FINITE ELEMENT

อุปกรณ์เครื่อง 3D OPTICAL SCANNING แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

- ส่วนของตัวกล้อง 3D OPTICAL และอุปกรณ์เสริม
- ส่วนของตัวเครื่องประมวลผลหรือเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล



รูปที่ 94 อุปกรณ์กล้อง 3D OPTICAL SCANNING และอุปกรณ์เสริม



รูปที่ 95 อุปกรณ์เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล

### การสแกน 3 มิติ

การถ่ายภาพและสแกนแบบ 3 มิติเป็นระบบ IT สมัยใหม่ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในงานอย่างแพร่หลายเพื่อที่จะได้นำภาพจากการถ่ายภาพหรือสแกนให้ได้ออกมาในรูป 3 มิติไปใช้ วิเคราะห์ในด้านงานวิศวกรรมต่างๆ การทำงานของกล้องจะถ่าย หรือสแกน ในชิ้นงานแต่ละด้าน ซึ่งถ้า จะต้องให้มีการเน้นที่จุดส่วนใดส่วนหนึ่งที่ต้องการ เช่นความลึก ความกว้างของรู๊กจะทำสัญลักษณ์หรือ เครื่องหมายเน้นไปที่บริเวณนั้น จากนั้นทำการสแกนทั้งสามด้านคือ ด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้าง

### ส่วนของตัวเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล

#### การวิเคราะห์และประมวลผล

การวิเคราะห์และประมวลผลเป็นการรับข้อมูลที่ได้จากตัวกล้องที่สแกนชิ้นงานแล้วส่งผ่าน ข้อมูลในการสแกนรูปแบบ 3 มิติ มาเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ประมวลผล โปรแกรมที่ใช้สแกนจะเป็น โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีมาพร้อมกับกล้อง 3D OPTICAL จากนั้นเครื่องยังสามารถจะนำไปใช้วัดค่าความ ลึก ความกว้าง ของรอยลึกของกระสุน

คอมพิวเตอร์จะประมวลผลและนำมายังเครื่องที่รูปแบบตามที่ต้องการและบันทึกเป็นไฟล์รูปแบบ 3 มิติที่ เป็นนามสกุล stl

### ขั้นตอนการ สแกนด้วยเครื่อง 3D optical scanning



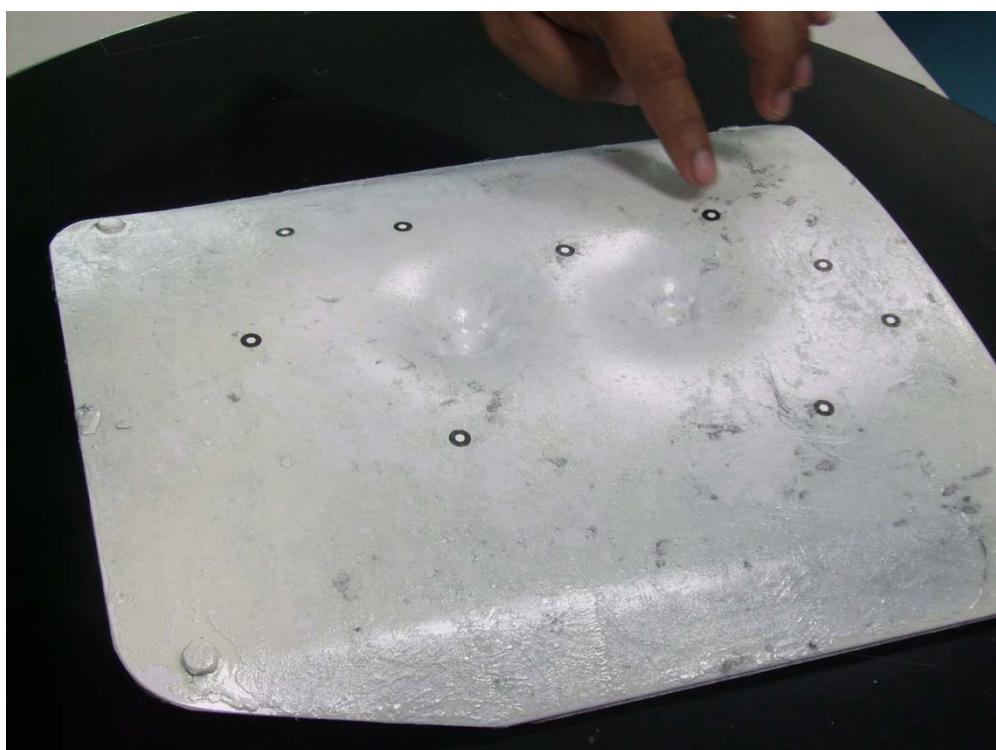
รูปที่ 96 ห้องทดสอบ 3D OPTICAL SCANNING



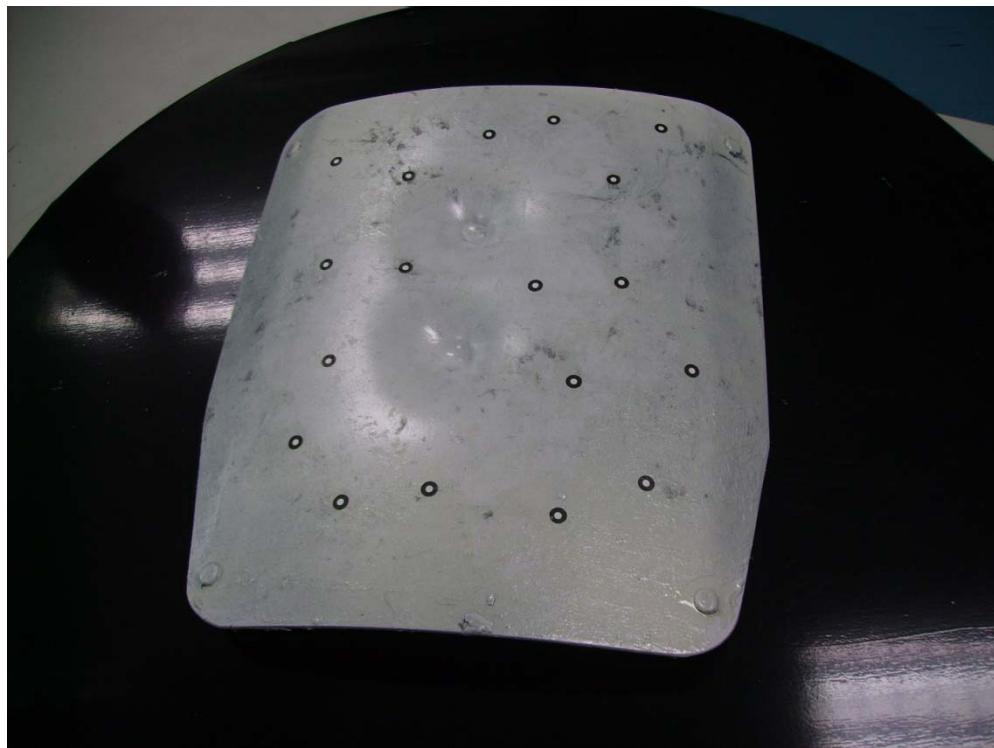
รูปที่ 97 ชุดแผ่นเกราะชิ้นงานสำหรับทำการสแกน



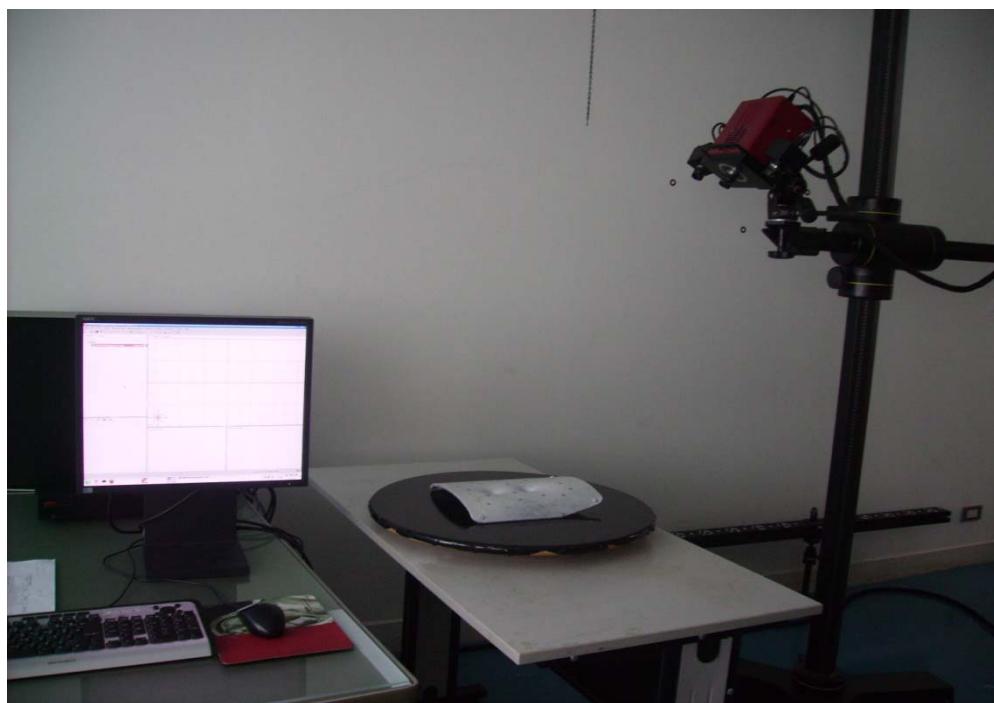
รูปที่ 98 จูปการเตรียมชิ้นงานพ่นสี เพื่อกันแสงสะท้อน



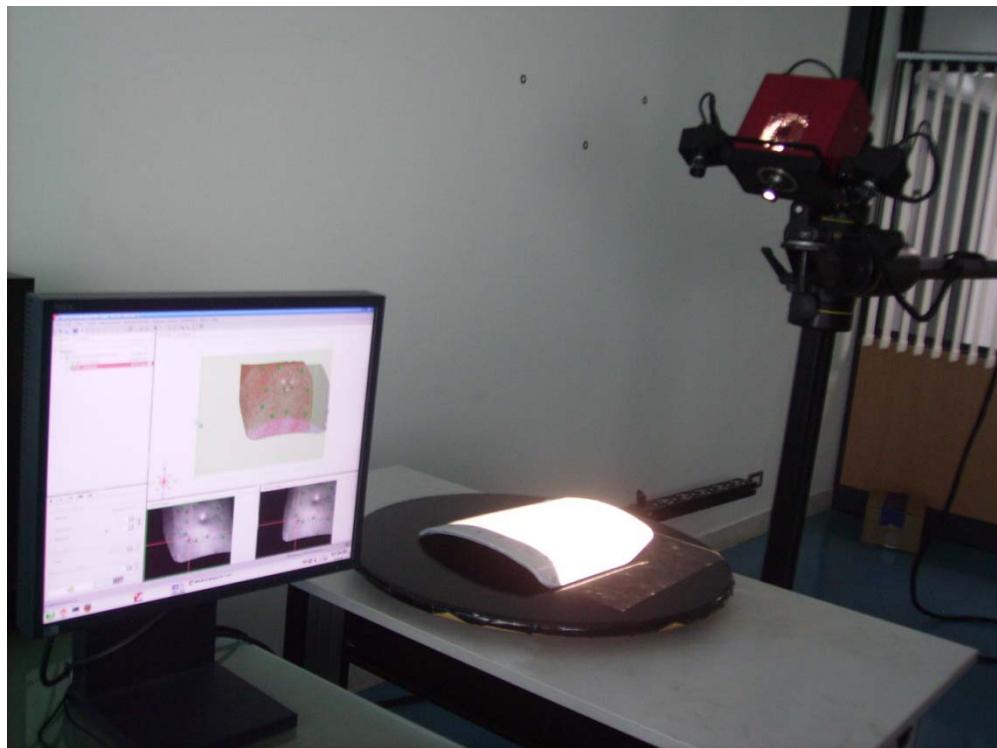
รูปที่ 99 การทำเครื่องหมายรอบบริเวณส่วนที่ต้องการจะดัดด้วยแผ่นคาร์บอน



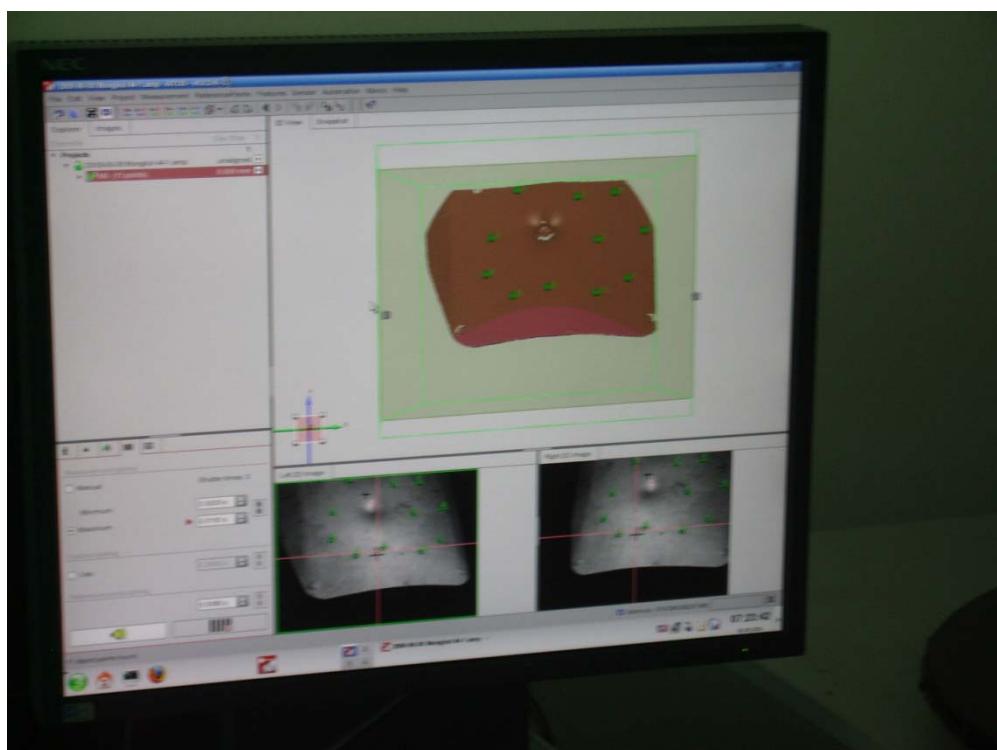
รูปที่ 100 การทำเครื่องหมายรอบบริเวณรอยนูน ความกว้างรู ด้วยแผ่นคาร์บอน



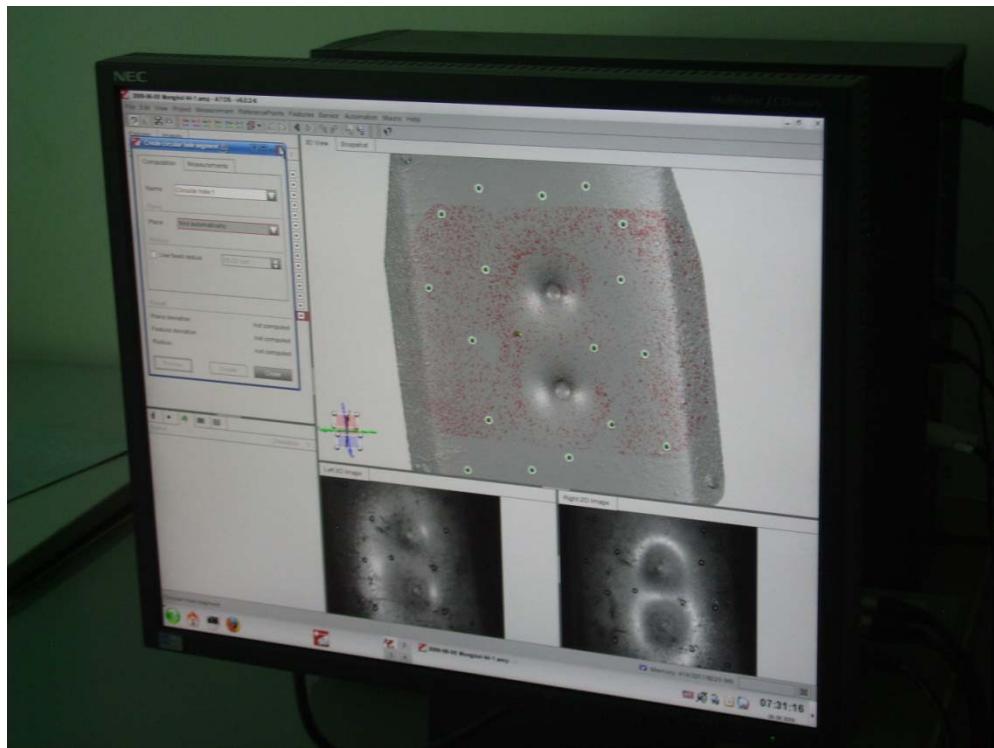
รูปที่ 101 ชุดอุปกรณ์ กล้อง 3D OPTICAL



รูปที่ 102 ภาพการสแกนเกราะ

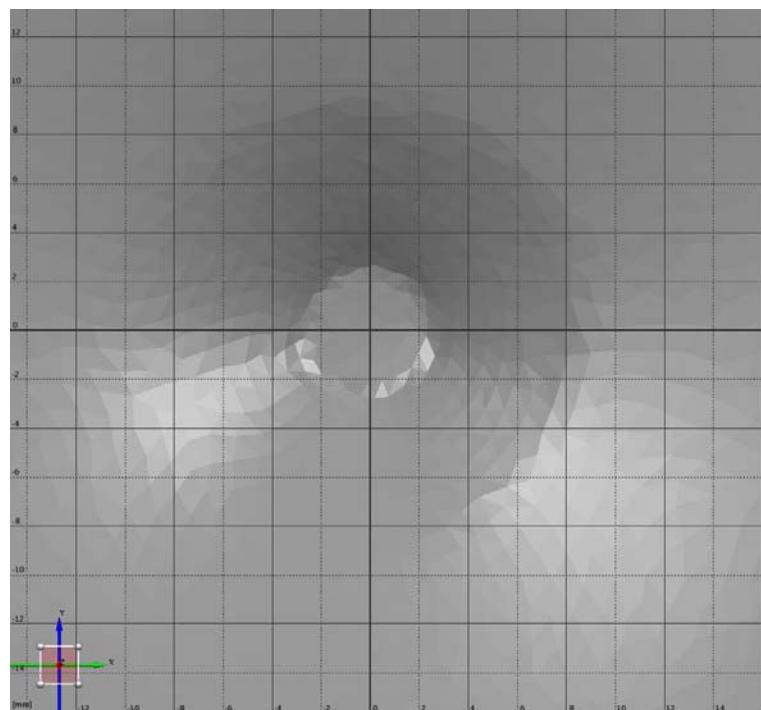


รูปที่ 103 ภาพการสแกนเกราะ

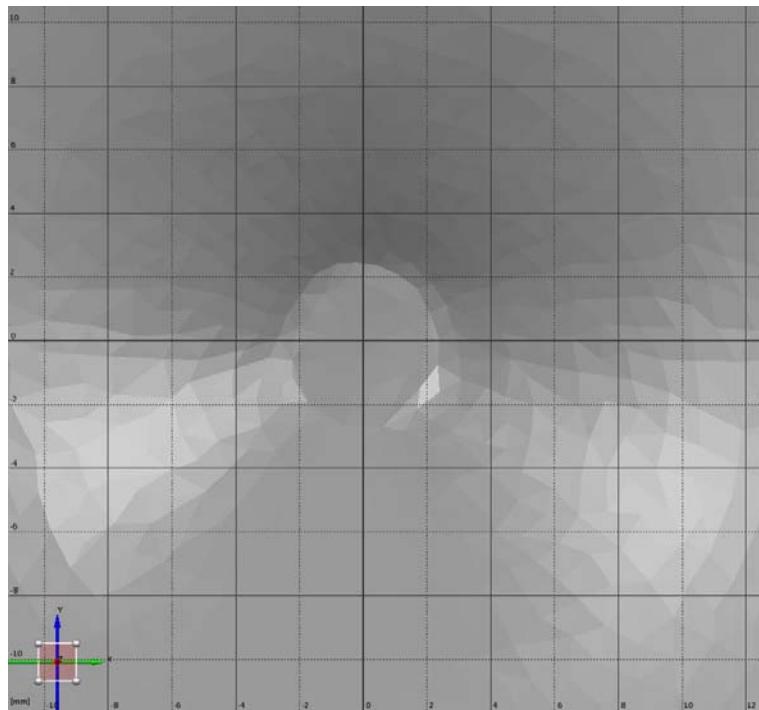


รูปที่ 104 ภาพจากการสแกนเกราะ

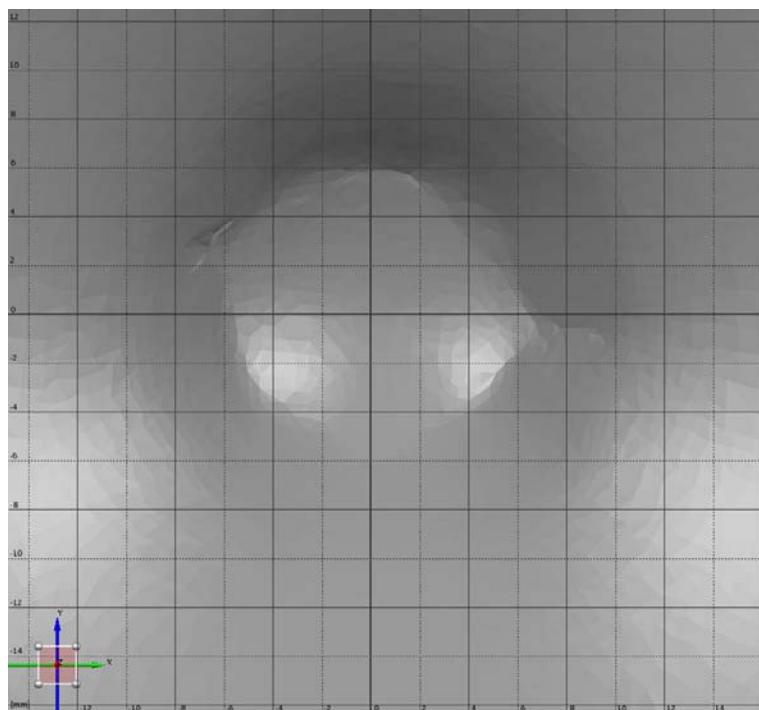
## 17.2 ผลการทดสอบ การวัดความลึก และความกว้างของรูกระสุนปืน



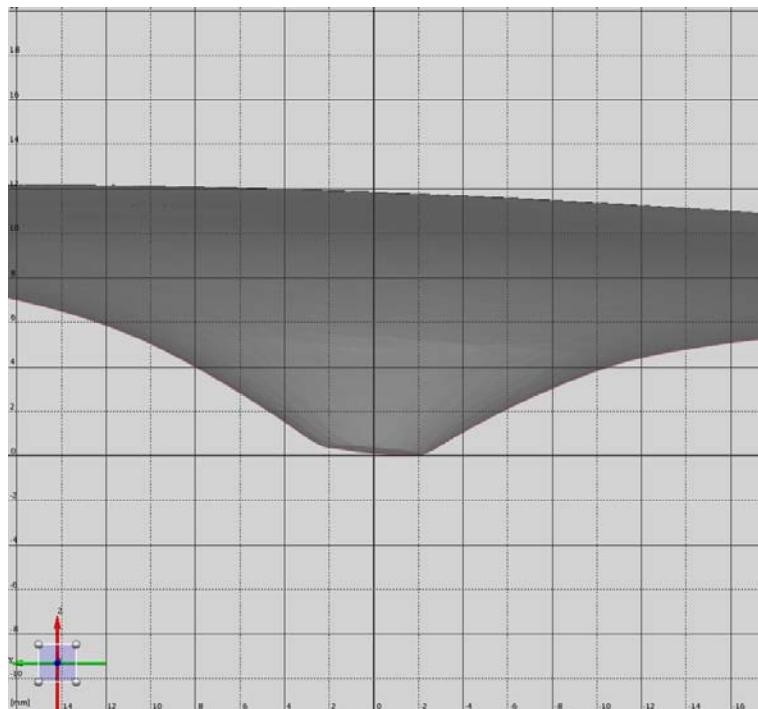
รูปที่ 105 ภาพสแกนโดยความกว้างของรูกระสุนปืน (9 mm.) ชิ้นงานที่ 1



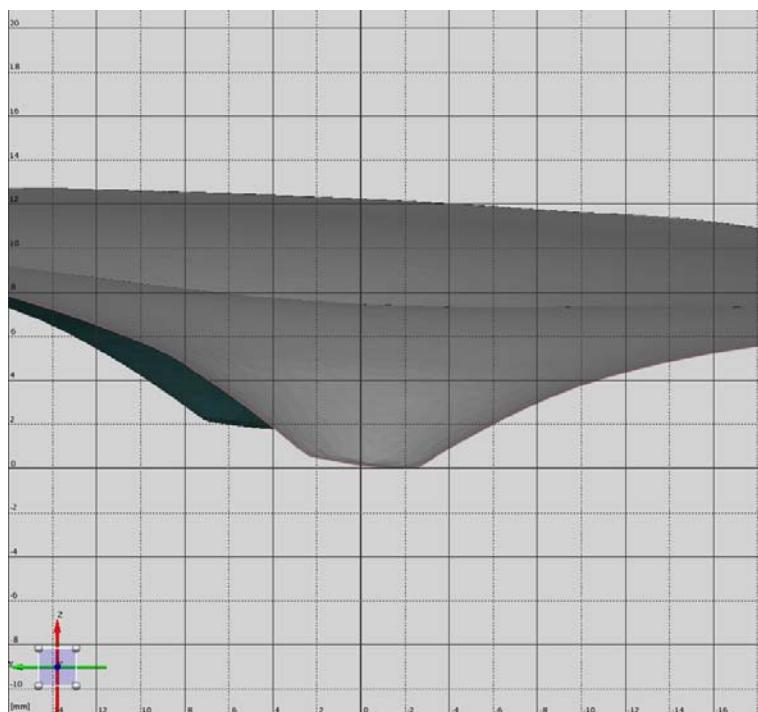
รูปที่ 106 ภาพสแกนโดยความกว้างของรูกกระสุนปืน (9 mm.) ชิ้นงานที่ 2



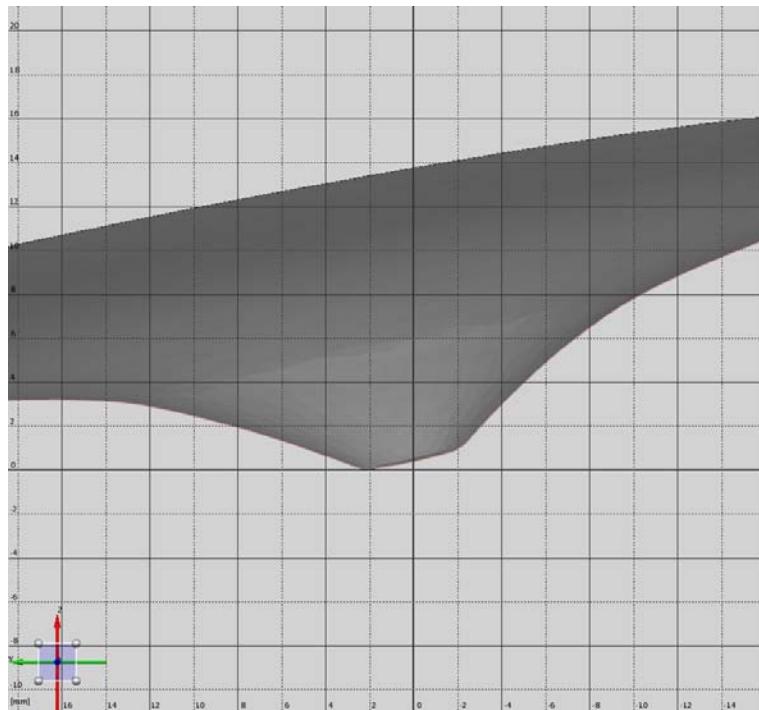
รูปที่ 108 ภาพสแกนโดยความกว้างของรูกกระสุนปืน (.44) ชิ้นงานที่ 1



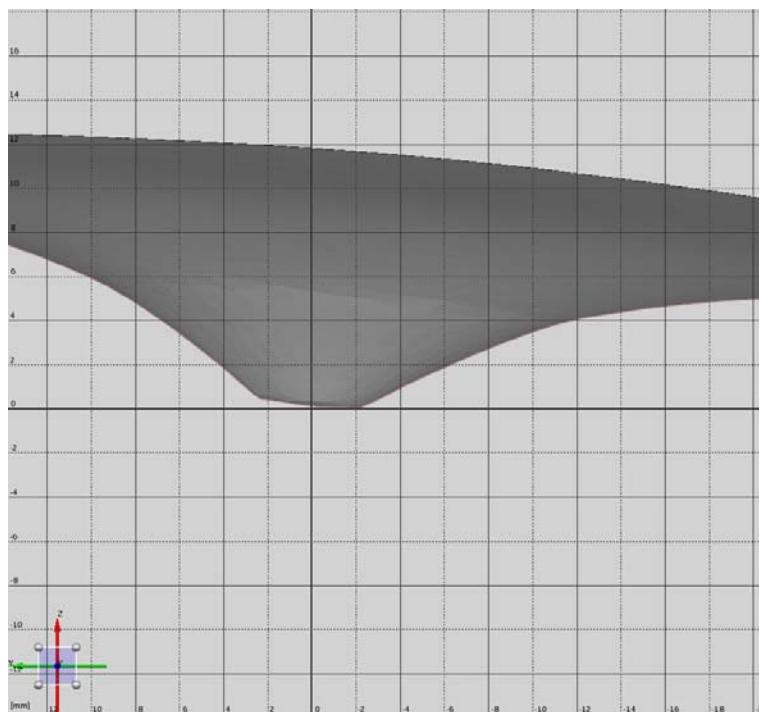
รูปที่ 109 ภาพชิ้นงานหมายเลข 1 ตำแหน่งรูกระสุนที่ 1 ความลึก 12 มม.



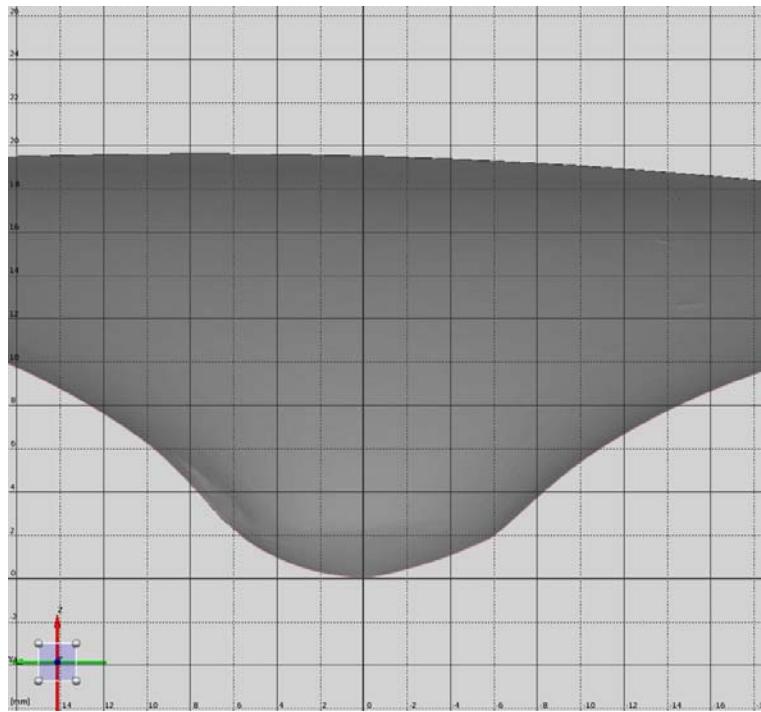
รูปที่ 110 ชิ้นงานหมายเลข 1 ตำแหน่งรูกระสุนที่ 2 ความลึก 12.4 มม.



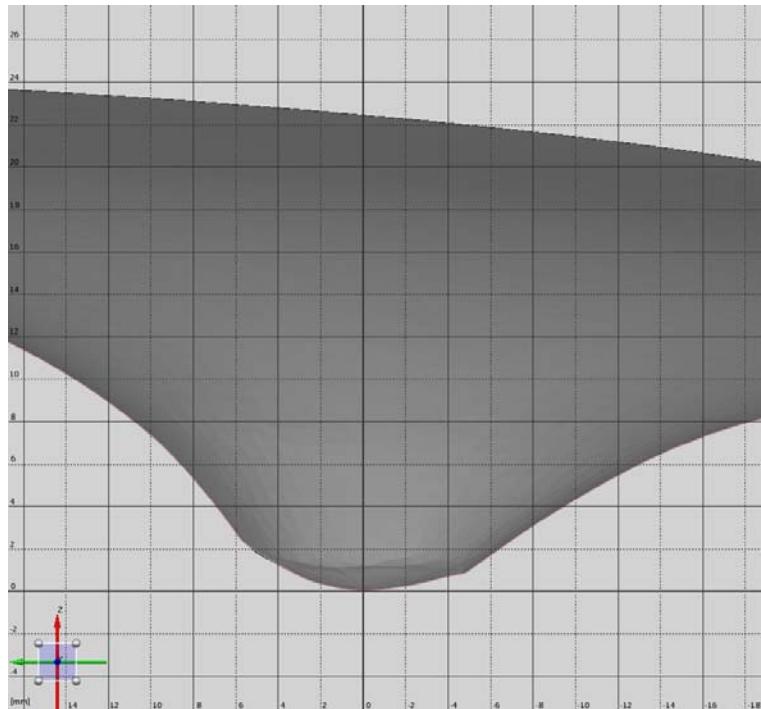
รูปที่ 111 ชิ้นงานหมายเลข 2 ตำแหน่งรูกระสุนที่ 1 ความลึก 12.6 มม.



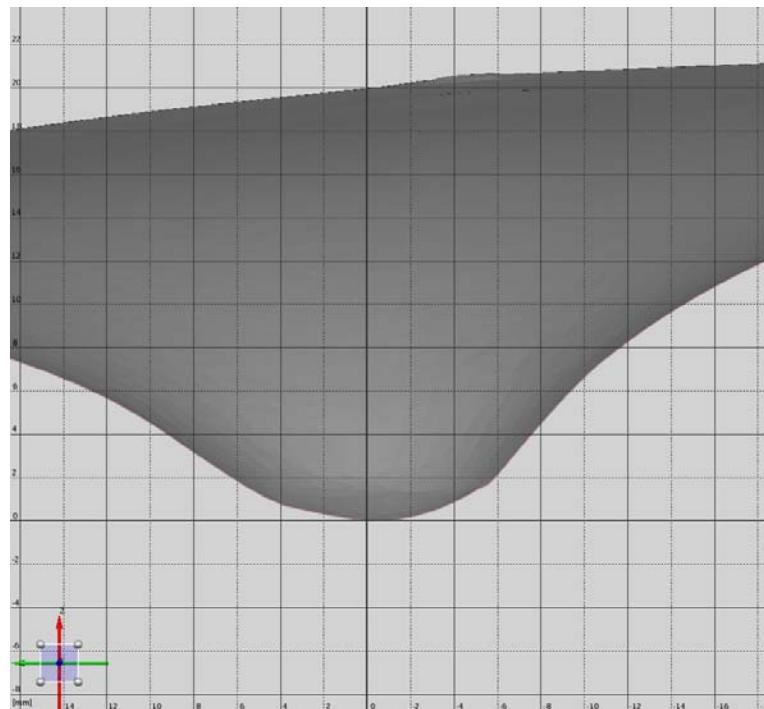
รูปที่ 112 ชิ้นงานหมายเลข 2 ตำแหน่งรูกระสุนที่ 2 ความลึก 12.2 มม.



รูปที่ 113 ชิ้นงานหมายเลข 3 ตำแหน่งรูกระสุนที่ 2 ความลึก 19.7 มม.



รูปที่ 114 ชิ้นงานหมายเลข 4 ตำแหน่งรูกระสุนที่ 1 ความลึก 22.6 มม.

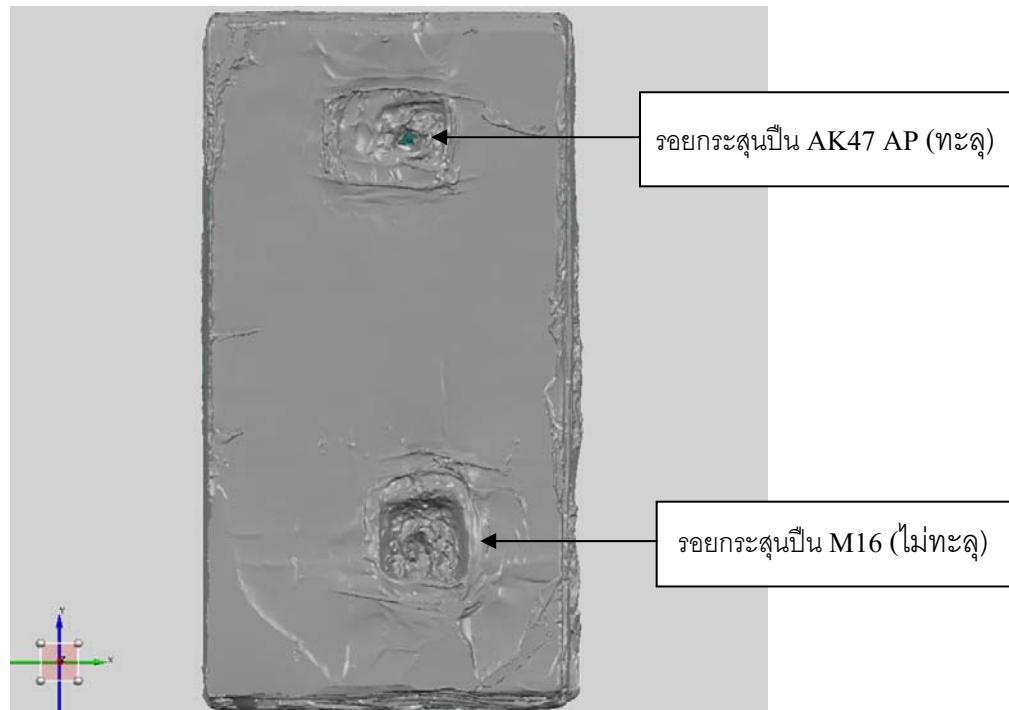


รูปที่ 115 ชิ้นงานหมายเลข 4 ตำแหน่งของกระสุนที่ 2 ความลึก 20.1 มม.

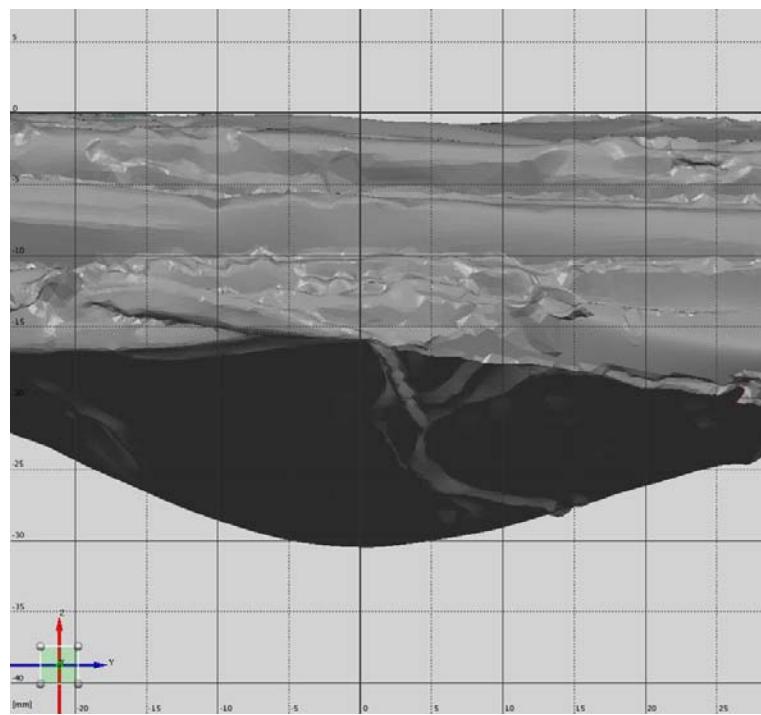
18. ผลการทดสอบด้วยปืนเล็กๆที่ กระสุนปืน M16 และ AK47 AP



รูปที่ 116 ภาพชิ้นงานที่ทดสอบด้วย กระสุนปืน M16 และ AK47 AP



รูปที่ 117 ภาพการสแกนตำแหน่งรอยกระสุน M 16 และ AK47 AP



รูปที่ 118 ภาพการสแกนตำแหน่งความลึกของรอยกระสุน M 16

ตำแหน่งความลึก รูกระสุน 31 มม.

## สรุปผลการทดลอง

จากผลงานวิจัยที่ได้ดำเนินการแล้วเสร็จ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เกราะะป้องกันกระสุนปืนพกที่ได้ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน U.S.NIJ.0101.04 กับกระสุนปืนพกขนาด 9 มม. และ .44 พบว่าเสื้อเกราะที่ทำจากวัสดุแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SS 304) หนา 2 มม. กับแผ่นอลูมิเนียมอัลลอย/ หรืออลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการอ่อนడีซ์ หนา 2 มม. สามารถป้องกันกระสุนได้ดี โดยที่ขนาดรอยยุบตัวของเกราะมีขนาดต่ำกว่า 44 มม. (U.S.NIJ.0101.04 ระดับ 3A)

2. สำหรับเกราะป้องกันกระสุนปืนเล็กๆที่เป็นอาวุธสงคราม เกราะะประกอบไปด้วยแผ่นเชรามิก  $\text{Al}_2\text{O}_3$  หนา 10 มม., วัสดุเส้นใยสังเคราะห์ PE 20 แผ่น หนาแผ่นละ 0.2 มม. และวัสดุรองหลังที่เป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม(SS 304) หนา 2 มม. ซึ่งพบว่าจากการทดสอบ ยิงเบื้องต้นด้วยปืน M16 และ AK 47 AP (กระสุนเจาะเกราะ) พบร่วมกับกระสุนปืน M16 ได้เป็นอย่างดี กล่าวคือกระสุนปืนไม่สามารถทะลุแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SS 304) และรอยบุ๋มต่ำกว่า 44 มม. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกราะดังกล่าวได้ผ่านการทดสอบเบื้องต้นแล้ว

อย่างไรก็ตามทางคณะกรรมการผู้วิจัยจะได้นำเกราะดังกล่าวไปทดสอบตามมาตรฐาน U.S.NIJ.0101.04 ระดับ 3A ต่อไป ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นแนวโน้มที่จะประสบความสำเร็จได้

3. ความลึกของรอยกระสุนปืนพารามิเตอร์ที่บ่งบอกความสามารถในการดูดซับพลังงานของเกราะ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบหาความกว้างและความลึกของรูกระสุนด้วยเครื่อง 3D OPTICAL SCANNING ซึ่งผลที่ได้เป็นภาพ 3 มิติที่สามารถนำมาประมาณวิเคราะห์การดูดซับพลังงานของเกราะ และผลที่ได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปริยบเทียบกับขนาดความลึกที่คำนวนได้จากทางทฤษฎีต่อไป

4. ในส่วนของการออกแบบต้นแบบเสื้อเกราะกันกระสุนทั้ง 2 ประเภทได้ดำเนินการแล้วเสร็จแล้ว และได้จำแนยไปบางส่วนบ้างแล้วโดย บริษัท พรีชิพาร์ท จำกัด เป็นผู้ดำเนินการในส่วนนี้ โดยเฉพาะเกราะที่มีเชรามิกเป็นเกราะแผ่นหน้า ซึ่งจะทำให้มีน้ำหนักลดลงจากเกราะที่เป็นโลหะเดิม ประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีและผลงานวิจัยบางส่วนได้ถูกนำไปใช้งานจริงบ้างแล้ว

อย่างไรก็ตามคณะกรรมการผู้วิจัยจะได้ดำเนินการลดน้ำหนักของเสื้อเกราะลงให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน. กมย.กท.2/2547, คณะกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทธิ์ป้องกันกระสุน
- [2] Ballistic Resistant Protective Materials. NIJ Standard 0101.04: National Institute of Justice, U.S. Department of Justice
- [3] Ballistic Resistance of Personal Body Armor. NIJ Standard 0101.04: National Institute of Justice, U.S. Department of Justice
- [4] Backman ME, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets. Int J Eng Sci 1978;16:1–99.
- [5] T. Borvik, M. Langseth,O.S.Hopperstad, K.A. Malo. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses part I: Experimental study. Int. J. Impact Eng Vol. 27, pp. 19–35, 2002
- [6] J. Zukas, T. Nicholas, L. B. Greszczuk and D. R. Curran. Impact Dynamics. John Wiley & Sons
- [7] I.S. Chocron Benloulo and V. Sanchez-Galvez. A New Analytical Model to Simulate Impact onto Ceramic/Composite Armors. Int. J. Impact Engng Vol. 21, No. 6, pp. 461–471, 1998
- [8] I. Horsfall, D. Buckley. The effect of through-thickness cracks on the ballistic performance of ceramic armour systems. Int. J. Impact Eng Vol. 18, No. 3, pp. 309–318, 1996
- [9] J. Lopez-Puente, A. Arias, R. Zaera, C. Navarro. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. Carlos III University of Madrid Avda.de la Universidad 30, 28911 Legane's, Madrid, Spain. 20 July 2005
- [10] R. Zaera, S. Sa'ncchez-Sa'ez, J.L. Pe'rez-Castellanos, C. Navarro. Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. Composites: Part A 31 (2000) 823–833
- [11] G. Reyes Villanueva, W.J. Cantwell. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures. Composites Science and Technology 64 (2004) 35–54

- [12] S.N. Dikshit, V. V. Kutumbarao. G. Sundararajan. The influence of plate hardness on the ballistic penetration of thick steel plates. Int. J. Impact Eng Vol. 16, No. 2, pp. 293-320, 1995
- [13] S. Yadav, E.A. Repetto, G. Ravichandran, M. Ortiz. A computational study of the influence of thermal softening on ballistic penetration in metals, Int. J. Impact Eng Vol. 25, pp. 787–803. 2001
- [14] Ipson TW, Recht RF. Ballistic perforation by fragments of arbitrary shape, NWC TP 5927, Denver Research Institute, Naval Weapons Center, China Lake, CA, USA, 1977.
- [15] D.P.Goncalves,F.C.L.de Melo, A.N.Klein,H.A.Al-Qureshi. Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour. Laboratorio de Materiais, Dept Eng Mec,UFSC,CP476, Florianopolis, SC 88040-900, Brazil. SP, 2003
- [16] E. Straßburger .Ballistic testing of transparent armour.Ceramics Fraunhofer-Institut fur Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI), Am Klingelberg 1, 79588 Efringen-Kirchen, Germany. June 2008.
- [17] MTEC. 2537, โลหะวิทยาสำหรับบุคคลทั่วไป เอกสารประกอบการสัมมนาเชิงปฏิบัติการ 24 มีนาคม 2537.,
- [18] สมนึก วัฒนาศรีย์กุล 2543 การซูบแข็งเหล็กกล้า เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการ ในงานไทยเมตัลแลกซ์ 2000, จัดโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ร่วมกับ บริษัท รี้ด เทรดเด็กซ์ จำกัด ณ ศูนย์แสดงสินค้านานาชาติ BITEC บางนา, กรุงเทพมหานคร,
- [19] MTEC. 2540. Heat Treatment of Steels เอกสารประกอบการสัมมนา จัดโดยศูนย์ เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 6 กันยายน 2543 ณ ศูนย์ศูนย์แสดงสินค้านานาชาติ BITEC บางนา, กรุงเทพมหานคร,
- [20] ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และสาโรช สุติกิรติพงศ์ 2535. วัสดุในงานวิศวกรรม เอช.เอน.การ พิมพ์มี กรุงเทพมหานคร,
- [21] รศ.มนัส สถิรจินดา, วิศวกรรมการอบซูบเหล็ก, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรม ราชูปถัมภ์. พิมพ์ครั้งที่ 3, กุมภาพันธ์ 2537
- [22] ดร.กุลจิรา สุจิโรณน, ดร.ผกามาศ แซ่ห่ว่อง, ดร.ดวงเดือน อาจองค์ 2545. การผลิตเซรามิกส์ โดยการอัดแบบ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เอกสารเผยแพร่ พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2545

## ภาคผนวก

### ผลการทดสอบเกราะกันกระสุน และรับรองมาตรฐาน

สำนักยิงทดสอบอาวุธ และกระสุนปืน โรงพยาบาลวัตถุระเบิดทหาร

กรมการอุตสาหกรรมทหาร

ศูนย์อุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

( ร.อ.ท. )



รูปที่ พ.1 พ.อ. ดำรงค์ เรืองฤทธิ์

บรรยายก่อนการทดสอบ



รูปที่ พ.2 บรรยายก่อนการทดสอบ



รูปที่ ผ.3 96 สนามทดสอบ



รูปที่ ผ.4 นำชิ้นงานทดสอบพร้อมนำ ด้านละ 3 นาที ก่อนทำการทดสอบ



รูปที่ ผ.5 ทำการตรวจชั่ง น้ำหนักกระสุนดินปืน



รูปที่ ผ.6 ทำเบาะดินน้ำมัน สำหรับวัดรอยลึกกระสุนปืน



รูปที่ ผ.7 ทำการติดตั้งเสื้อเกราะ



รูปที่ ผ.8 เสื้อเกราะหลังทำการทดสอบ



รูปที่ ผ.9 เลือเกราะหลังทำการทดสอบ



รูปที่ ผ.10 เลือเกราะหลังทำการทดสอบ



รูปที่ ผ.11 สรุปผลทำการทดสอบ

**แบบฟอร์มบันทึกผลการยิงทดสอบเกราะกันกระสุน**

โครงการวิจัยและพัฒนาเกราะป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาด และกระสุนปืนเล็กๆ ที่เป็น

อาวุธสงคราม

วันที่ 20 สิงหาคม 2553

สถานที่ทดสอบ

สนามยิงทดสอบอาวุธ และกระสุนปืน โรงงานวัตถุระเบิดทหาร

กรมการอุตสาหกรรมทหาร

ศูนย์อุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

( ร.อ.ท. )

อ. พยุหคีรี

จ. นครสวรรค์

	แบบบันทึกความหนาแน่นวัสดุหุ่น และเครื่องดีดพ่นน้ำ	รหัสเอกสาร <i>FM 5-2051</i>
--	--	--------------------------------

ทดสอบความหนาแน่นวัสดุหุ่น

วันที่ทดสอบ ..... 20 ส.ค.53 .....

กำหนดเกณฑ์ค่าเฉลี่ย 5 ครั้ง ไม่เกิน 19 มม. $\pm 2$ มม.		
รายละเอียดวัสดุหุ่น	ครั้งที่	รอบทุบ (มม.)
(ระบบที่..... (ก่อนการทดสอบ)	1	18.8
	2	17.0
	3	21.6
	4	19.6
	5	17.8
ค่าเฉลี่ย		18.96

กำหนดเกณฑ์ค่าเฉลี่ย 5 ครั้ง ไม่เกิน 19 มม. $\pm 2$ มม.		
รายละเอียดวัสดุหุ่น	ครั้งที่	รอบทุบ (มม.)
(ระบบที่..... (หลังการทดสอบ)	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
ค่าเฉลี่ย		

เจ้าหน้าที่ทดสอบ ๑. จ.ส.อ. <i>ส.</i> ๒. นาย ไชยา วงศ์รุ่งเรือง ๓. นาย ทรงวุฒิ มนูญศรี	ผู้ควบคุมการทดสอบ (ขชร.) น.ท. <i>น.ท.</i> (ตัวแทนร่าง) หน. ประจําแผนกทดสอบทางศึกษาฯ กศม.ฯ <i>๖๐</i> / ๕.๘. / ๕๓
--	--

	แบบบันทึกผลการยิงทดสอบเสือเกราะระดับ 3	รหัสเอกสาร FM 5-2056
--	--	-------------------------

ชื่อชิ้นงาน ..... Sample I ..... วันที่ทดสอบ 20 ส.ค.53

ชนิดกระสุนทดสอบ			นน.ของลูกกระสุน		ความเร็วกระสุน ( $\pm 9.1$ เมตร/วินาที, $\pm 30$ ฟุต/วินาที)		
7.62 mm. NATO FMJ			148 Gr.		847 เมตร/วินาที (2,780 ฟุต/วินาที)		
กำหนดเกณฑ์ร้อยゆบตัว ไม่เกิน 44 มม.			<input checked="" type="checkbox"/> เปี้ยก	<input type="checkbox"/> แห้ง	<input checked="" type="checkbox"/> ด้านหน้า	<input type="checkbox"/> ด้านหลัง	
นัดที่	มุมยิง	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ผลการทดสอบ		ร้อยゆบ (มม.)	นน.หัว กระสุน(กรัม)	หมายเหตุ
ทະ	ไนท์		ทະ	ไนท์			
1	$0^\circ$	843.53		✓	18.8		
2	$0^\circ$	840.95		✓	16.0		
3	$0^\circ$	839.35		✓	13.6		
4	$0^\circ$	837.29		✓	16.3		- ความเร็วต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด
5	$0^\circ$	849.65		✓	16.3		- ความเร็วต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด
6	$0^\circ$	836.59		✓	19.7		- ความเร็วต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด
7	$0^\circ$	849.85		✓	14.9		- กิงเกอร์เกิดที่ 4
8	$0^\circ$	840.00		✓	22.2		- ชิงแม่นซึ่นดัดที่ 6

ชนิดกระสุนทดสอบ			นน.ของลูกกระสุน		ความเร็วกระสุน ( $\pm 9.1$ เมตร/วินาที, $\pm 30$ ฟุต/วินาที)		
7.62 mm. NATO FMJ			148 Gr.		847 เมตร/วินาที (2,780 ฟุต/วินาที)		
กำหนดเกณฑ์ร้อยゆบตัว ไม่เกิน 44 มม.			<input type="checkbox"/> เปี้ยก	<input type="checkbox"/> แห้ง	<input type="checkbox"/> ด้านหน้า	<input type="checkbox"/> ด้านหลัง	
นัดที่	มุมยิง	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ผลการทดสอบ		ร้อยゆบ (มม.)	นน.หัว กระสุน(กรัม)	หมายเหตุ
ทະ	ไนท์		ทະ	ไนท์			
1	$0^\circ$						
2	$0^\circ$						
3	$0^\circ$						
4	$0^\circ$						
5	$0^\circ$						
6	$0^\circ$						

เจ้าหน้าที่ทดสอบ ๑. ๑.๕.๓. ก ๒. นาย ศุภยอด วงศ์วิริยะ ๓. นาย ธรรมรงค์ คงอยู่	ผู้ควบคุมการทดสอบ (ยกเว้น) ๑.๗. ๒. ๓. ๔. (ตำแหน่ง) งาน / ประจำแผนกทดสอบทางขึ้นบันวิธี กคบ.๑ ๒๐/๘๘๘/๙๙๙
---	---



### แบบบันทึกผลการยิงทดสอบเสื้อเกราะระดับ 3

FM 5-2056

ชื่อผู้ที่ลงนาม *Sample 2* วันที่ทบทวน 20 ส.ค.53

เจ้าหน้าที่ทดสอบ	ผู้ควบคุมการทดสอบ
๑. จ.ส.อ. ก	(ชื่อ) น.ท. 
๒. นาย คงผล ไตรเรือน	(ตำแหน่ง) งาน/ประจําแผนกทดสอบทางวิปนวช กศน.ฯ
๓. นาย ธรรมรงค์ ปรุงรักษ์	๒๐ ว.ส.ค. / ๕๗



## แบบบันทึกผลการยิงทดสอบเลื่อยกระระดับ 2

ຮ້າສເອກສານ  
FM 5-2054

### ชื่อขั้นงาน..... *Sample 3*

วันที่ทดสอบ 20 ส.ค.53

<p>เจ้าหน้าที่ทดสอบ</p> <p>๑. ว.ส.อ. ก</p> <p>๒. นาย ภิญญา ไกรวงศ์</p> <p>๓. นาย บรรจง บัวทอง</p>	<p>ผู้ควบคุมการทดสอบ</p> <p>(ยศชั้นอ.) น.ท. </p> <p>(ตัวแทนผู้) หน. / ประธานแผนกทดสอบทางชีวนิชี กศม.๔ ๗๖. ศศ. / ๕๓</p>
---	---

**ผนวก ก.** แบบท้ายประกาศกระทรวงกลาโหมเรื่องรับรองมาตรฐานเสื้อเกราะกันกระสุน

ฉบับที่ .....

**คุณลักษณะของเสื้อเกราะกันกระสุน**

๑. ชื่อผู้ผลิต บริษัท พรีซิพาร์ท จำกัด
๒. รุ่น/แบบ เสื้ออาวุธสงครามเชรามิคมาตรฐาน LEVEL III (CP-002)
๓. ระดับความสามารถในการกันกระสุน ระดับ 3 (ซึ่งเป็นระดับที่สามารถป้องกันกระสุนปืนเล็กๆได้ตามมาตรฐาน NIJ STANDARD 0101.04 ได้)

**๔. คุณลักษณะทั่วไป**

- ๔.๑ น้ำหนักสุทธิเสื้อเกราะ ขนาด L = ๗.๕ – ๗.๕ กก.
- ๔.๒ อายุการใช้งานเสื้อเกราะ ๖ ปี (หากเชรามิคไม่แตกชำรุดเสียหาย)
- ๔.๓ เสื้อตัดเย็บด้วยผ้าชนิด 600 D สีดำ เกราะกันกระสุนเป็นชนิดเกราะแข็ง ซึ่งเสื้อ ๑ ตัว จะประกอบด้วยแผ่นเกราะแข็ง ๒ ชุด ใช้ได้ที่ตัวเสื้อด้านหน้า ๑ ชุด และตัวเสื้อด้านหลัง ๑ ชุด แผ่นเกราะทุกชุดเย็บห่อหุ้มด้วยผ้าร่มสีดำ มีฉลากบอกระดับการป้องกัน วัน เดือน ปี ของวันหมดอายุ หรืออื่น ๆ
- ๔.๔ เสื้อเป็นแบบเสื้อก็อก ใช้สวมครอบทางศีรษะลงมา หรือทางด้านข้างก็ได้ ที่บริเวณหัวไหล่ และบริเวณด้านข้างตัวเสื้อซ้าย – ขวา มีแคนเกะยึดปิด – เปิดแบบผ้าตีนตุ๊กแก สามารถปรับขนาดตัวเสื้อให้กระชับกับลำตัวผู้สวมใส่ได้

**๕. คุณลักษณะเฉพาะทางวิชาการ**

- ๕.๑ แผ่นเกราะแข็งมีผิวด้านหน้าโค้งแบบกับลำตัวผู้สวมใส่ และมีขนาดกว้าง ๑๐ นิ้ว ยาว ๑๒ นิ้ว

- ๕.๒ ความหนารวมของแผ่นเกราะแข็ง ๒๑ มม. โดยประมาณ ซึ่งสนับสนุนจากเชรามิค ขนาด  $2 \times 2$  นิ้ว หนาไม่น้อยกว่า ๖ มม. เรียงสลับกันแบบลายก่ออิฐ ไขสังเคราะห์จำนวนไม่น้อยกว่า ๒๐ ชั้น ด้านหลังสุดเป็นโลหะเบาชนิดไวนิลจำนวน ๒ แผ่น ความหนา  $1.0 \pm 0.4$  มิลลิเมตร

- ๕.๓ พื้นที่ป้องกันอันตราย ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านละประมาณ ๑๑๐ ตารางนิ้ว

๖. กรรมวิธีการผลิตเสื้อเกราะโดยสังเขป และภาพแสดงเสื้อเกราะ ตามอนุผนวก ๑ ที่แนบมา

อนุพนวก ๑ ประกอบพนวก ก. กรรมวิธีการจัดทำเสื้อและแผ่นเกราะกันกระสุนของบริษัท  
พรีซิพาร์ท จำกัด

เสื้ออาวุธสงครามเซรามิกมาตรฐาน (CP-002) โดยสังเขปและภาพแสดงเสื้อเกราะ



ตัวเสื้อด้านหน้า



ตัวเสื้อด้านหลัง

**การควบคุมคุณภาพวัสดุกันกระสุน (BALLISTIC MATERIAL QUALITY CONTROL)**

๑. จัดหาวัสดุกันกระสุนทุกชนิดตามคุณสมบัติ คุณลักษณะเฉพาะ ที่บริษัทกำหนด อาทิเช่น

๑.๑ เซรามิก CERAMIC ขนาด  $2 \times 2$  นิ้ว หนาไม่น้อยกว่า ๖.๐ มิลลิเมตร

๑.๒ ไยสังเคราะห์ UDPE (UNIDIRECTION POLYETHYLENE) เรียงช้อนกันเป็นชั้น และอัดแข็ง ไม่น้อยกว่า ๒๐ ชั้น ความหนาไม่น้อยกว่า ๑๒ มิลลิเมตร

๑.๓ แผ่นโลหะเบา ALUMINUM ความหนา  $0.0 \pm 0.1$  มิลลิเมตร

๑.๔ แผ่นโลหะเบา STAINLESS STEEL ความหนา  $0.0 \pm 0.1$  มิลลิเมตร

๒. แผนกตรวจสอบคุณภาพ จะทำการตรวจรับวัสดุต่าง ๆ ตามที่กำหนด เมื่อผ่านกรรมวิธีการ ตรวจรับวัสดุแล้วจะทำเครื่องหมายประจำรุ่นที่จัดหา (LOT NUMBER) บนวัสดุกันกระสุนทุกชนิด ทุกแผ่นแล้ว นำเก็บเข้าคลัง

**การควบคุมคุณภาพผ้าและวัสดุประกอบสำหรับการตัดเย็บตัวเสื้อ**

๓. สั่งซื้อผ้ากึ่งสังเคราะห์ (ชนิด, เบอร์ผ้า, และสี) และวัสดุประกอบสำหรับการตัดเย็บตัวเสื้อ ตามคุณลักษณะเฉพาะ ที่บริษัทกำหนด

๒. แผนกตรวจสอบคุณภาพ จะทำการตรวจรับผ้าตามคุณสมบัติ (เส้นด้าย, การหอ, คุณภาพของผ้าเคลือบกันน้ำ และสี ฯลฯ) รวมทั้งวัดคุณภาพองค์การตัดเย็บตาม คุณลักษณะเฉพาะ ที่บริษัทกำหนดแล้วส่งเก็บไว้ที่คลังรองนำมาใช้ในการผลิตต่อไป

### การผลิตแผ่นเกราะ (ARMOR PANEL)

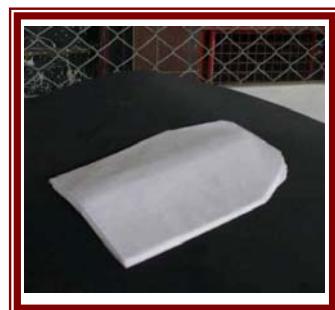
#### ๑. การผลิตแผ่นเกราะ ๑ ชุด

๑.๑ จัดเตรียมแผ่นเซรามิกจากคลังเก็บมาตรวจวัดขนาด

๑.๒ จัดเตรียมไยสังเคราะห์ UDPE หรือ ARAMID FIBER จากคลังเก็บมาตัดขนาดตามแบบแพน (PATTERN) และนำมามาทำกาวยาวเรียงซ้อนกันให้ได้จำนวนความหนาตามต้องการ นำเข้าเครื่องอัดให้แข็งตัวพร้อมขึ้นรูปใหม่มีผ้าโคลง (ดังรูปที่ ๑ และรูปที่ ๒)



(รูปที่ ๑) PATTERN ชิ้นงานบนไย PE



(รูปที่ ๒) แผ่นไยสังเคราะห์อัดแข็งแล้ว

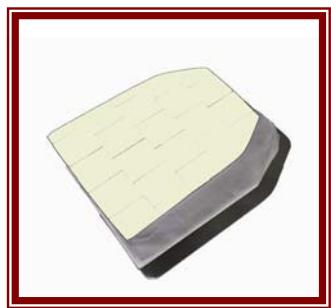
๑.๓ นำแผ่นไยสังเคราะห์ UDPE ที่อัดแข็งขึ้นรูปแล้ว มาติดด้านหน้าด้วยแผ่นเซรามิกชนิดพิเศษด้วยการ แผ่นเซรามิกที่นำมาใช้ติดเป็นแผ่นเกราะมีขนาด (กว้าง × ยาว)  $๒ \times ๒$  นิ้ว หนา  $๗ \pm ๐.๐$  มม. โดยการติดจะติดสลับเป็นลายก่ออิฐ (ดังรูปที่ ๓)



(รูปที่ ๓) แผ่นเซรามิกที่นำมาติดบนไย UDPE อัดแข็ง

๑.๔ เมื่อนำแผ่นไส้สังเคราะห์ที่อัดแข็งขึ้นรูปติดด้านหน้าด้วยแผ่นเซรามิกแล้วใช้แผ่นไส้สังเคราะห์ท่านำยาปิดทับด้านหน้าเซรามิกอีก ๒ ชั้น

๑.๕ นำแผ่นโลหะอลูมิնั่ม ความหนา  $1.0 \pm 0.2$  มม. และแผ่นสแตนเลส สตีล ความหนา  $1.0 \pm 0.2$  มม. ที่ปั๊มโคงขึ้นรูป แล้วทาด้วยน้ำยาการปิดทับด้านหลังไส้สังเคราะห์ (ดังรูปที่ ๔ และรูปที่ ๕)



(รูปที่ ๔) การเรียงวัสดุ



(รูปที่ ๕) แผ่นเกราะประกอบแล้วเสร็จ

๑.๖ ถุ่มตัวอย่างแผ่นเกราะที่ประกอบครบเป็น ๑ ชุด ไปยิงทดสอบด้วยกระสุนปืนเล็กๆน้ำขนาด  $3.6 \text{ mm} \times 50$  มิลลิเมตร เพื่อตรวจการไม่ทะลุผ่าน และตรวจสอบรอยยุบตัวของแผ่นเกราะ และบันทึกผลการยิงทดสอบ วัน/เดือน/ปี ที่ทำการทดสอบ

๑.๗ ตรวจสอบความเรียบร้อยของแผ่นเกราะทุกชุด วัน/เดือน/ปี ที่ผลิตไว้ที่คลังที่ติดอยู่ กับแผ่นเกราะ นำเก็บเข้าคลังเพื่อรอนำไปใช้งาน

### การผลิตตัวเสื้อ (FRONT AND BACK CARRIER PROCESS)

๑. เตรียมผ้าใบล่อนเบอร์ ๒๑๐ กันน้ำ สีดำหรือผ้า ๖๐๐ คิ สีดำนินิคหนา และวัสดุ ประกอบการตัดเย็บตัวเสื้อจากคลังเก็บ

๒. วัดแบบ (PATTERN) (ดังรูปที่ ๖) และตัดผ้าตามแบบ (ดังรูปที่ ๗)



(รูปที่ ๖) การวาด PATTERN บนผ้า

(รูปที่ ๗) การตัดผ้าตามแบบ

๓. ตรวจสอบความเรียบร้อยก่อนนำเก็บเข้าคลังรองนำไปผลิตในขั้นตอนต่อไป (หากพบข้อบกพร่องจะคัดแยกออกไปทำลายทิ้ง)

๔. นำชิ้นส่วนผ้าตามข้อ ๓ และวัสดุประกอบตามข้อ ๑ มาเย็บเป็นตัวเสื้อ เมื่อได้รับการสั่งซื้อ

๕. ตรวจสอบความเรียบร้อยก่อน แล้วนำเข้าคลังเพื่อรอนำไปประกอบรวมกับแผ่นเกราะต่อไป  
การผลิตซองใส่แผ่นเกราะ

๖. เตรียมผ้าไนล่อน เบอร์ ๒๑๐ กันน้ำ สีดำหรือสีอินๆ ชนิดบาง และวัสดุสำหรับการตัดเย็บซอง

ใส่แผ่นเกราะจากคลังเก็บ

๗. วาดแบบ (PATTERN) และตัดผ้าตามแบบ

๘. นำผ้าตามข้อ ๗ และวัสดุประกอบตามข้อ ๑ มาตัดเย็บเป็นซองใส่แผ่นเกราะตามแบบที่กำหนด

๙. ตรวจสอบความเรียบร้อย และนำเก็บเข้าคลังรองนำไปใช้งานต่อไป

## ผนวก ข.

### มาตรฐานเสือกรา

กระสุนปืนแต่ละชนิดมีกระสุนวิ่งด้วยความเร็วมากเท่ากับเสือกราจะถูกยึดจับไว้ด้วยเส้นใยที่แข็งแรงมาก เรียกว่า “เว็บ” (Web) เส้นไนเหล่านี้ จะดุดชับและกระจายพลังงานการกระแทกของกระสุนที่ส่งผ่านมาข้างตัวเลือ เป็นผลให้กระสุนนั้นเกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปไป พลังงานที่เกิดขึ้นนั้นจะถูกดุดชับไว้ด้วยแต่ละชั้นของเส้นใย จนกระทั่งกระสุนนั้นหยุดลงในที่สุด ดังนั้นการห่อเส้นไนให้ยึดหนาแน่นมากเท่าไรก็ จะยิ่งมีความทนทานต่อแรงกระสุนมากขึ้นเท่านั้น” นี่คือลักษณะการทำงานของเสือกรา ในขณะที่กระสุนมากระแทกกับเสือกรา พลังงานจากกระสุนจะถูกดุดชับและแพร่กระจายไปตามชั้นของเส้นไนเรื่อยๆ จนท้ายที่สุด คือร่างกาย การกระแทกร่างกายจะเรียกว่า “บลันท์ ทรומה” (Blunt Trauma) หมายถึง อาการฟกช้ำ ซึ่งอาการดังกล่าวจะต้องอยู่ในระดับที่ไม่ปรากฏอาการออกมาให้เห็น ร่างกายของคนเราจะสามารถทนทานต่ออาการ บลันท์ ทร oma ได้ปริมาณหนึ่ง ซึ่งเราสามารถทดสอบ และคิดค่าออกมาได้เรียกว่า “Back Face Signature” มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ในปัจจุบันมีมาตรฐานการทดสอบเสือกรา อยู่หลายมาตรฐาน ที่นิยมใช้กัน โดยมาตรฐานที่เก่าแก่ที่สุด ได้แก่ มาตรฐานของ NIJ (U.S. National Institute of Justice) เรียกว่า มาตรฐาน U.S.NIJ.0101.03 มาตรฐานนี้ กำหนดค่า Back Face Signature เท่ากับ 44 มิลลิเมตร ในปัจจุบันมีการปรับปรุงเป็น U.S. NIJ.0101.04 นอกจากนี้ยังมีมาตรฐาน U.S. PPAA 1989-05 กำหนดค่า 44 มิลลิเมตร เช่นเดียวกัน แต่จำนวนนัดของกระสุนที่ยิงใส่เสือกรานน้อยกว่า

ดังนั้นเสือกราบางชนิดสามารถผ่านมาตรฐาน PPAA ได้ แต่ไม่ผ่านมาตรฐาน NIJ ถือได้ว่า มาตรฐาน NIJ เป็นมาตรฐานที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด ทั้งในสหรัฐ ออสเตรเลีย เอเชีย ตะวันออกกลางและประเทศในยุโรปบางประเทศ เช่น ฟินแลนด์ และอังกฤษ

## การวิจัย และพัฒนา

### เกราะป้องกันกระสุน เป็นพอกทุกขนาด และ กระสุนปืนเล็กๆที่เป็นอาวุธสงคราม

พ.ต. ทรงพล เอี่ยมบุญฤทธิ์

ดร. ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์

ดร. เนติมา สว่างวรรณ

รศ. สมนึก วัฒนศรียุคล

มงคล พุ่มแก้ว

### ความเป็นมา

บทความในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยร่วม ต่อจากการผลิตเสื้อเกราะกันกระสุนปืนของบริษัท พรีซิพาร์ท จำกัด การผลิตเสื้อเกราะกันกระสุนปืนพอก บางระจัน ได้มีการพัฒนาจากเกราะ โลหะมาเป็น เกราะประกอบแบบผสมพลาสติก (Composite) เป็นเกราะที่มีทั้ง วัสดุเซรามิก, เส้นใยสังเคราะห์, โลหะ ประกอบเข้าด้วยกัน เหตุผลที่เลือกเกราะประเภทนี้ก็คือว่าคุณสมบัติเด่นของทั้ง 3 วัสดุ กล่าวคือ เซรามิกมีหน้าที่ทำลายหัวกระสุนทำให้ลูกกระสุนเสียรูปร่าง ในขณะที่วัสดุเส้นใยสังเคราะห์ ทำหน้าที่เป็น วัสดุที่รับแรงหรือ ส่งถ่ายแรง โดยเฉพาะคุณสมบัติวัสดุเส้นใยสังเคราะห์จะอ่อนนุ่มนิ่ว แต่มีความเหนียว มีการยึด ตัวที่ดี และมีการกระจายแรงได้ดี สำหรับวัสดุโลหะ ซึ่งทำหน้าที่ รับแรงปะทะขั้นสุดท้าย โดยลูกกระสุนนั้น จะมีพลังงานจนน้ำของกระสุนส่วนที่เหลือมาทำให้โลหะยึด และเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จนน้ำวัสดุที่ได้จากการ วิจัยคือ เซรามิก[3] เส้นใยสังเคราะห์[4] และ โลหะ[5]

กล่าวได้ว่าวัสดุที่ใช้มีอยู่ด้วยกันมี 3 ประเภท สำหรับเป็นเกราะป้องกันกระสุนปืนซึ่งได้แก่ วัสดุกลุ่ม เซรามิก กลุ่มเส้นใยสังเคราะห์ และกลุ่มโลหะ ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยแพร่หลายหรือรู้จักกันพอสมควร โดย ในที่นี้ เพื่อที่จะให้ได้เสื้อเกราะที่มีราคาที่เหมาะสม ไม่แพงเกินไป จึงเลือกใช้วัสดุเซรามิกประเภทอลูминิ化 อีกทั้งวัสดุนี้เป็นวัสดุที่ใช้ในการเป็นฐานไฟฟ้าได้อย่างดี อีกทั้งมีความแข็งที่มากกว่าหัวกระสุนและ สามารถทำลายหัวกระสุนได้

โดยจากตารางที่ 1 วัสดุเกราะเซรามิก อลูминิ化 ที่จะนำมาทำเกราะจะพบว่า อลูминิ化 มีคุณสมบัติเด่นในความ หมายรวมที่จะนำมาเป็นเกราะและ ในแรงกระแทกที่ไม่ได้ซับซ้อน ซึ่งในวัสดุอื่นๆ เช่น Silicon Carbide (SiC), Silicon nitride ( $Si_3N_4$ ), และ Zirconium oxide ( $ZrO_2$ ) จะมีกรรมวิธีการผลิตที่ซับซ้อนอีก ทั้งมีราคาสูงมาก จึงมีความหมายรวมที่จะนำเอาวัสดุ อลูминิ化 มาใช้กันอย่างแพร่หลาย

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (psi)	Flexural Strength (psi)	Compressive Strength (psi)	Young's Modulus (psi)	Fracture Toughness (psi)
$Al_2O_3$	3.98	30,000	80,000	400,000	$56 \times 10^6$	5,000
SiC (sintered)	3.1	80,000	80,000	560,000	$60 \times 10^6$	4,000
$Si_3N_4$ (reaction)	2.5	25,000	35,000	150,000	$30 \times 10^6$	3,000

bonded)						
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (hot pressed)	3.2	80,000	130,000	500,000	$45 \times 10^6$	5,000
Sialon	3.24	60,000	140,000	500,000	$45 \times 10^6$	9,000
ZrO <sub>2</sub>	5.8	65,000	100,000	270,000	$30 \times 10^6$	10,000
ZrO <sub>2</sub>	5.8	50,000	115,000	250,000	$29 \times 10^6$	11,000

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุเซรามิก[6]

ส่วนเส้นใยหรือวัสดุสังเคราะห์ที่ใช้มีหลายแบบ เช่น Spectra, Poly Cabonate, Polyethylene, Kevlar, Zylon, Aramid, LCP, PBO AS, S Glass, HPPE, UHMWPE เป็นต้น แต่สำหรับงานวิจัยนี้มีความสนใจที่ HPPE เพราะมีความหนึယ (ดูตารางที่ 2) ซึ่งเป็นวัสดุอ่อนที่สามารถส่งถ่ายแรงได้ดีจึงเลือกนำมาใช้

ในส่วนโลหะจะทำหน้าที่รับแรงส่วนสุดท้าย โดยส่วนมากจะเลือกเอาวัสดุ 2 ชนิด คือ Stainless กับ Aluminium เป็นโลหะที่จะนำมาใช้ ซึ่งวัสดุ 2 ชนิดนี้เป็นวัสดุพื้นฐานของเกราะป้องกันกระสุนปืนพก

Fiber	Strength (GPa)	Modulus (GPa)	Elongation (%)
Aramid	2.8-3.2	60-115	1.5-4.5
HPPE	2.8-4.0	90-140	2.9-3.8
LCP	2.8	65	3.3
PBO AS	5.5	280	2.5
S Glass	4.65	87	5.4

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบคุณสมบัติเส้นใย [4]

โดยสรุปแล้วเราพบว่า ระบุขั้นตอนของการจัดรูปร่างแผ่นประกอบของเกราะที่ถูกต้อง สามารถป้องกันกระสุนได้ตามมาตรฐาน National Institute of Justice (NIJ) [2] และมีราคาที่เหมาะสมสำหรับ พาร์ทิชั่นที่สามารถทำซื้อหรือนำไปใช้ได้ ดังนั้นในส่วนของผลการทดลอง ได้ดำเนินการทดสอบแผ่นเกราะป้องกันกระสุนปืนพกและเกราะป้องกันกระสุนปืนเล็กๆ ที่เป็นอาวุธ sangkram ดังนี้



รูปที่ 1 ชุดเกราะสำหรับทดสอบกระสุนปืนพกและเกราะป้องกันกระสุนปืนเล็กๆ ที่เป็นอาวุธ sangkram



รูปที่ 2 ชุดเครื่องทดสอบการหลังการทดสอบ

รอยกระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดคำ กล้อง	น.น. กระสุน ปืน(mg.)	ความเร็วกระสุน		ผล	รอยยุบ (mm)	$D_{ave}$ (mm)
				มาตรฐาน	วัดได้			
1	.44	ทดสอบ 4"	STD.	436 ± 9	428	ไม่ทะลุ	22.6	24.34
2	.44	ทดสอบ 4"	STD.	436 ± 9	429	ไม่ทะลุ	20.1	24.21
3	.44	ทดสอบ 4"	STD.	436 + 9	430	ไม่ทะลุ	20.8	24.20
4	.44	ทดสอบ 4"	STD.	436 + 9	428	ไม่ทะลุ	19.7	23.65

ตารางที่ 3 ตารางทดสอบกระสุนปืนพก

รอย กระสุน	ชนิดกระสุน	ชนิดคำ กล้อง	น.น. กระสุน ปืน(mg.)	ความเร็วกระสุน		ผล	รอยยุบ (mm)	$D_{ave}$ (mm)
				มาตรฐาน	วัดได้			
1	M16	ทดสอบ 6"	148	838 ± 9	845	ไม่ทะลุ	22.6	22.32
2	M16	ทดสอบ 6"	148	838 ± 9	839.57	ไม่ทะลุ	20.1	21.21
3	M16	ทดสอบ 6"	148	838 ± 9	846.62	ไม่ทะลุ	19.1	21.37

#### ตารางที่ 4 ตารางทดสอบกระสุนปืนเล็กๆ ที่เป็นอาวุธสงคราม

ขั้นตอนการทดสอบการยิง ตามมาตรฐานกระห่วงกลาโหม [1]



รูปที่ 3 เครื่องยิงทดสอบ Gas gun



รูปที่ 4 อุปกรณ์ชั่ง ตัวกระสุนคินปืน



รูปที่ 5 เครื่องวัดความเร็วกระสุนปืน

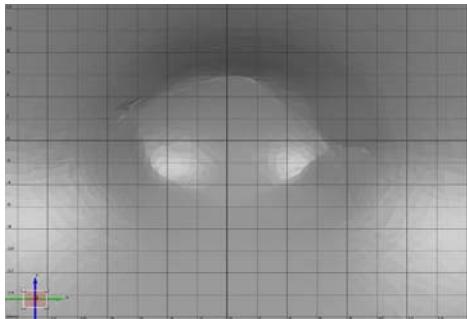


รูปที่ 6 สนามทดสอบอาวุธ และกระสุนปืน กองพลาธิการ และสรรพากร สนง. ตำรวจนครบาล

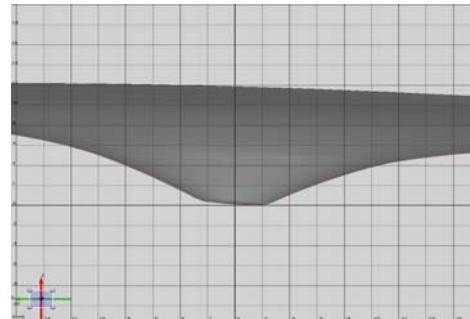


รูปที่ 7 การตรวจสอบความถึกความกว้างของรูกระสุนปืน M 16

### การตรวจสอบความถึกความกว้างของรูกระสุนปืน



รูปที่ 8 รอยยุบตัวของดินน้ำมันจากกระสุนปืน M 16



รูปที่ 9 การทดสอบความกว้างและความถึกของรูกระสุนด้วยเครื่อง 3D OPTICAL SCANNING

ผลการทดลอง นำหนักเกราะที่ได้มีน้ำหนัก 7 กิโลกรัม มีความหนาตามที่ต้องการ ซึ่งนำหนักที่ได้ต่างจากเกราะในแบบแรกซึ่งมีน้ำหนัก 11.5 กิโลกรัม จะเห็นได้ว่าน้ำหนักได้ลดลงมา 39.13 % สามารถป้องกันกระสุนปืนพกและกระสุนปืนเล็กยาวที่เป็นอาวุธ sangkram ได้ โดยที่เสื่อเกราะมีราคาตัวละ 22,000 บาท ซึ่งสามารถจัดหาให้กับกำลังพลได้ ตอนนี้ได้จำหน่ายให้กับกองทัพแล้ว 200 ตัว และ ได้มีการบริจาคให้กองทัพดังนี้

กองทัพภาคที่ 1 จำนวน 25 ตัว

กองทัพภาคที่ 2 จำนวน 25 ตัว

กอ.ร.น.ภ.ก. 4 ส่วนหน้า จำนวน 30 ตัว

งานวิจัยนี้ที่ถูกต้องจะต้องมีหลายฝ่ายร่วมมือกันคือ ภาครัฐสหกรรม หน่วยงานวิจัยของทหาร หน่วยงานวิจัยของสถาบันอุดมศึกษาของรัฐ ซึ่งมาร่วมในการศึกษา ในงานวิจัยนี้

โครงการนี้ถือว่าเป็นผลสำเร็จประการหนึ่งที่สามารถได้เสื่อเกราะที่นำหนักลดลงอย่างมากจากเดิมที่เป็นเกราะโลหะล้วนๆ และสามารถได้ราคาที่เหมาะสม จัดจำหน่ายให้กับกำลังพลได้ เป็นเสื่อเกราะที่ผลิตโดยคนไทย

อย่างไรก็ตามยังต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไป เพื่อให้ได้เสื่อเกราะที่มีน้ำหนักลดลงที่สุดและมีประสิทธิภาพ คุณภาพสูงสุด โดยที่ราคาไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้น จึงเป็นเครื่องยืนยันได้ว่าโครงการนี้ ประสบผลสำเร็จในระดับหนึ่งแต่ยังไม่ถูกตามยังต้องมีการพัฒนาต่อไปอีก ให้เสื่อเกราะมีน้ำหนักเบาลงเท่าที่จะเป็นไปได้ และราคาที่เหมาะสม กว่าเสื่อเกราะของอเมริกา และอิสราเอลที่ผลิตจาก Kevlar ซึ่งกรรมวิธีการผลิตสามารถทำได้ไม่ซับซ้อนแต่ตัวสุดอุปกรณ์ต้องมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศ และมีราคาแพง แต่เป็นแบบเกราะอ่อนชี้ ไม่เหมาะสมสำหรับเป็นเกราะป้องกันกระสุนปืนเล็กยาวที่เป็นอาวุธ sangkram

### เอกสารอ้างอิง

- [1] มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน. กมย.กห.2/2547, คณะกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทธป้องกันกระแทกกล้าโหน
- [2] Ballistic Resistant Protective Materials. NIJ Standard 0101.04: National Institute of Justice, U.S. Department of Justice

- [3] I. Horsfall, D. Buckley. 1995. The effect of through-thickness cracks on the ballistic performance of ceramic armour systems. Cranfield University. 303-318 .
- [4] Jacobs, M.J.N. and Van Dingenen, J.L.J (2001), *J. Mater. Sci.*, 36. 3137.
- [5] S.N. Dikshit, V. V. Kutumbarao. G. Sundararajan. 1995. The influence of plate hardness on the ballistic penetration of thick steel plates. *Int. J. Impact Eng* Vol. 16, No. 2, pp. 293-320 .
- [6] John B.Wachtman, W. Roger Cannon, M. John Matthewson. 2009. *Mechanical Properties of Ceramics*, John Wiley & Sons. Denvers. 472 pages.
- [7] I.S. Chocron Benloulo and V. Sanchez-Galvez. 1996. A New Analytical Model to Simulate Impact onto Ceramic/Composite Armors. *Int. J. Impact Engng* Vol. 21, No. 6, pp. 461Ð471, 1998  
*Int. J. Impact Eng* Vol. 18, No. 3, pp. 309-318.
- [8] G. Reyes Villanueva, W.J. Cantwell. 2004. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures. *Composites Science and Technology* 64 (2004) 35–54
- [9] J. Lopez-Puente, A. Arias, R. Zaera, C. Navarro. 2005. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. Carlos III University of Madrid Avda.de la Universidad 30, 28911 Legane's, Madrid, Spain. 20 July 2005
- [10] R. Zaera, S. Sa'ncchez-Sa'ez, J.L. Pe'rez-Castellanos, C. Navarro. 2005. Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. *Composites: Part A* 31 (2000) 823–833

### ภาคผนวก ข.ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์หลังเสร็จโครงการ

กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	ผลสำเร็จ (%)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ (กรณีที่ไม่ถึง100%)
1. ศึกษาทฤษฎี เตรียมข้อมูล เกี่ยวกับโลหะและวัสดุ ที่จะ พัฒนามาเป็นเกราะและศึกษา ทฤษฎีและข้อมูลสำหรับการ ทำลายเป้าหมาย (เกราะ) ของ หัวกระสุนขนาดต่างๆ ที่ใช้ยิง จากรากฐานชนิดต่างๆ	1. ได้ทฤษฎีสำหรับวัสดุ และ ข้อมูลเทคนิค เกี่ยวกับโลหะและวัสดุ ที่ จะพัฒนามาเป็นเกราะ เพื่อใช้ในโครงการ	100%	1. ได้ทฤษฎีพัฒนา จน แล้วใช้เทคโนโลยีทางโลหะได้ วัสดุ 1. เหล็กกล้าไร้สนิม 2. อลูมิเนียมอัลลอย 3. วัสดุเซรามิก	
2. ศึกษาผลงานวิจัยที่ได้ ดำเนินการแล้วโดยคณะวิจัย งาน บ.พรีชิพาร์ท จำกัด และ พัฒนาเต็มเกราะประภากต่างๆ	2. ได้ข้อมูลเทคนิค เกี่ยวกับโลหะและวัสดุ จากทางบ.พรีชิพาร์ท จำกัด สำหรับนำมาใช้ เป็นเกราะกันกระสุนปืน พก	100%	2. ได้โลหะและวัสดุ นำมาใช้เป็นเกราะ กันกระสุนปืนพก 1. เหล็กกล้าไร้สนิม 2. อลูมิเนียมอัลลอย	
3 สรุปข้อมูลที่ศึกษาค้นพบจาก เอกสารที่มีอยู่ พารามิเตอร์ของ วัสดุเกราะที่ควรให้ความสนใจ และทำการศึกษาในขั้นต่อไป รวมถึงเสนอทิศทางการดำเนิน งานวิจัยและการใช้วัสดุใหม่	3. ได้ผลสรุปพารามิเตอร์ ของวัสดุเกราะ และได้ ดำเนินงานวิจัยใช้วัสดุ ใหม่	100%	3. ได้ผลสรุป พารามิเตอร์ของวัสดุ เกราะคือ 1. เหล็กกล้าไร้สนิม 2. อลูมิเนียมอัลลอย 3. วัสดุเซรามิก 4. วัสดุเส้นใย สังเคราะห์	
4. ออกแบบและทดสอบเกราะ โลหะโดยทดสอบที่สนามยิง ทดสอบด้วยการยิงด้วยกระสุน จริง	4. ได้เกราะต้นแบบเพื่อ นำไปใช้ทดสอบที่สนาม ยิงทดสอบด้วยกระสุน จริง	100%	4. ออกแบบทดสอบ ด้วยกระสุนจริงโดย ใช้วัสดุเซรามิกแผ่น หน้าวัสดุเส้นใย สังเคราะห์ชั้นที่สอง อลูมิเนียมอัลลอยเป็น แผ่นรองหลังผลการ ทดสอบสามารถกัน กระสุนปืน M16 ได้	

5. ออกแบบผลิตต้นแบบ ทดสอบผลิตภัณฑ์เสื้อเกราะ ต้นแบบด้วยการยิงด้วยกระสุนจริงในสนามทดสอบมาตรฐาน	5. ได้เกราะผลิตภัณฑ์ ต้นแบบเพื่อนำไปใช้ ทดสอบที่สนามยิง ทดสอบด้วยกระสุนจริง	100%	5.ทดสอบด้วยการยิง <sup>*</sup> ด้วยกระสุนจริงใน สนามทดสอบ มาตรฐาน ผลการ ทดสอบสามารถผ่าน มาตรฐาน (NIJ)	
6. พัฒนาและแก้ไขต้นแบบเสื้อ เกราะหลังจากนั้นจึงผลิต ต้นแบบเกราะแจกจ่ายให้ หน่วยงานทหาร/ตรวจทดสอบ ใช้งานสนามจริง เพื่อ ประเมินผลและพัฒนาแก้ไข ต้นแบบเกราะต่อไป	6. ได้แก้ไขรายต่อวัสดุ เชรามิค และได้ผลิต เกราะแจกจ่ายให้ หน่วยงานทหาร/ตรวจ ทดสอบใช้งานสนาม จริง	100%	6. ได้ผลิตภัณฑ์เสื้อ เกราะแจกจ่ายให้ หน่วยงานทหาร ตรวจทดสอบใช้ใน งานสนามจริง	
7. สรุปผลงานวิจัย/เสนอ แนวทางการวิจัยต่อรวมถึง ปัญหา/อุปสรรคที่เกิดขึ้น ระหว่างวิจัย และนำเสนอรายงาน ฉบับสมบูรณ์	7. ได้ผลงานวิจัยที่ สามารถนำไปต่อยอด โดยใช้วัสดุผสมกับวัสดุ เชรามิคซึ่งทำให้สามารถ ลดน้ำหนักลงได้อีก	100%	7. จัดทำรายงาน ฉบับสมบูรณ์ เพื่อนำ ข้อมูลองค์ความรู้มา มาพัฒนาต่อยอดให้ เสื้อเกราะมีน้ำหนัก ลดลง และมี ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น	

## ภาคผนวก ค. กิจกรรมที่วางแผน เทียบกับกิจกรรมที่ผ่านมา

กิจกรรมการดำเนินงาน												
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
1. ศึกษาทดลอง เตรียมข้อมูลเบื้องต้น ให้เหมาะสมและสร้างสรรค์ ที่จะพัฒนามาก ปัจจุบันกราดและศึกษาทรัพยากรและข้อมูลสำหรับการทำลายเป้าหมาย (เก็บ) ของหัวกรรษ์สูงขนาดต่างๆ ที่อยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงใต้ทาง												
2. ศึกษาผลในวิจัยที่ได้ดำเนินการเรื่องสาขาวิชาคอมพิวเตอร์ใน ๑. พื้นที่ ภาระ จัดตั้ง และพัฒนาเสื้อภาระภูมิประเทศต่างๆ												
3. สำรวจและศึกษาค้นพบทรัพยากรที่มีอยู่ พาณิชย์เกษตรกรรม ภาคตะวันออกเฉียงใต้ ให้ความสนใจและทำกำไรศึกษาในชั้นต่อไป รวมถึงสนับสนุนการดำเนินงานบริษัทและห้องเรียนต่อไป												
4. เปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุที่เป็นพืชไม้เครื่องหลักฯ โดยทำกราฟทดลองเพื่อทดสอบคุณภาพทางไฟฟ้าคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ทางการทดสอบทางไฟฟ้า เช่น ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ฯลฯ												
5. ออกแบบผลิตภัณฑ์สินค้าที่มีภาระต่ำและสามารถสูงต่ำลงได้ตาม ทดสอบที่สูงและต่ำ เช่น ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ฯลฯ ของกราฟกระแสสูง												
6. ทดสอบผลิตภัณฑ์สินค้าที่มีภาระต่ำและต่ำลงได้ตามกราฟกระแสต่ำ ภาระสูงต่ำ ในการดำเนินการ												
7. สรุปผลงานนิจลัย/ส่วนหม้อน้ำทางการวิจัยต่อครุภัณฑ์ที่ใช้/ คุ้มครองที่เกิดขึ้นระหว่างวิจัย และนำเสนอสังคมทางโซเชียล สมมูล												

หมายเหตุ → - - - → เครื่องทำ汗腺ที่ร้อนขึ้น

↔ เครื่องประมวลผลการณ์ต้ม

## ภาคผนวก ง. ผลที่ได้รับตลอดโครงการ

จากผลการวิจัยโครงการนี้ คณะผู้วิจัยได้ประযุณ์จากการวิจัย และในด้านอื่นๆ ดังนี้

### เสื้อเกราะกันกระสุนปืนพก

มีด้านแบบ เกราะและเสื้อเกราะที่มีคุณภาพ มีประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาด ตามความต้องการของกองทัพและสำนักงานตำรวจนครบาล ราคาถูก มีความเป็นไปได้ด้านงบประมาณในการจัดซื้อ ทำให้มีการขยายผลไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์สามารถผลิตสนับสนุนให้กองทัพ สำนักงานตำรวจนครบาล ที่จะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน และลดการสูญเสียจากการปฏิบัติงานในพื้นที่เสี่ยงภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแก้ปัญหาการก่อความไม่สงบในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ และสนับสนุนภารกิจความมั่นคงในพื้นที่ชายแดนได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการออกแบบสร้างเสื้อเกราะกันกระสุนปืนพก มีขีดความสามารถป้องกันกระสุนปืนพกในระดับ Level IIIA ได้ และได้นำไปผลิตจำนวนมากโดย บริษัท พรีซิพาร์ท จำกัด โดยใช้วัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศ ทำให้ได้ราคาถูก อีกทั้งได้รับการรับรองมาตรฐานจากกระทรวงกลาโหม

ในสถานการณ์ปัจจุบันเจ้าหน้าที่ ที่ปฏิบัติการในพื้นที่เสี่ยงภัยใน 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ได้ซื้อและนำไปใช้สำหรับป้องกันตนของส่วนหนึ่ง

### เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนเล็กยานที่เป็นอาวุธสงคราม

ได้เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนเล็กยานที่เป็นอาวุธสงคราม Level III น้ำหนักรวมของเกราะแผ่นหนึ่งหน้า, แผ่นหลัง และแผ่นป้องกันด้านข้างลำตัวคือ 7 กิโลกรัม ซึ่งมีน้ำหนักลดลงจากเสื้อเกราะเหล็กเดิมที่หนัก 11.5 กิโลกรัม พ布ว่า น้ำหนักลดลง 39.13 เปอร์เซนต์ ราคาจำหน่ายของเสื้อเกราะตัวละ 22,000 บาท ซึ่งมีราคาถูกกว่าเสื้อเกราะที่นำเข้าจากต่างประเทศที่ความสามารถในการต้านทานกระสุนระดับเดียวกัน ในเบื้องต้นกองทัพบกได้ทำการสั่งซื้อเพื่อนำไปใช้งานแล้วจำนวน 200 ตัว และทาง สกอ. ได้บรรจุค่าให้แก่กองทัพบกดังนี้

กองทัพบกภาคที่ 1

จำนวน 25 ตัว

กองทัพบกภาคที่ 2

จำนวน 25 ตัว

กอ.รmn.ภาค 4 ส่วนหน้า จำนวน 25 ตัว

ผลงานวิจัยนี้เกิดขึ้นมาจากการร่วมมืออันดีของทั้ง 3 ฝ่าย โดยเป็นการนำความรู้เชิงวิชาการของภาคการศึกษามาประยุกต์ช่วยในการศึกษากลไกการทำลายกระสุนของเสื้อเกราะและหาเครื่องมือมาช่วยในการศึกษาทดลองผลิตชิ้นงานต่างๆ ในขณะที่ภาคเอกชนทำหน้าที่ทดลองยิงทดสอบหรือเสาะหาวัสดุใหม่ๆ นำมาผลิตเสื้อเกราะให้สมรรถนะดีขึ้น ในส่วนของฝ่ายทหารเองได้ทราบองค์ความรู้ในการผลิตเสื้อเกราะ ในฐานะผู้ใช้งานภาคสนาม ผู้กำหนดมาตรฐานและดำเนินการยิงทดสอบทำลายเสื้อเกราะ ซึ่งความร่วมมือแบบไดรฟาร์คิน เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้โครงการนี้ประสบความสำเร็จ ทั้งในแง่การประยุกต์องค์ความรู้จากภาควิจัยมาใช้ในการผลิตเสื้อเกราะจำหน่ายให้แก่หน่วยงานราชการตัวรวมและหน่วยงานภาครัฐนำไปใช้เป็นเครื่องป้องกันการบาดเจ็บหรือสูญเสียชีวิตของบุคลากร ขณะปราบปรามและป้องกันประเทศชาติ อันถือเป็นเป้าหมายสูงสุดของคณะกรรมการนักวิจัย

## บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) “การวิจัยและพัฒนาเกราะป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาดและกระสุนปืนเล็กยาวที่เป็นอาชญากรรม”

(ภาษาอังกฤษ) “The Research and Development of Ballistic Body Armour”

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัดและที่อยู่

ชื่อ- สกุล พลเอก อภิชาติ ทิมสุวรรณ

หน่วยงาน สำนักงานวิจัยและพัฒนาการกลาโหม (สวพ.กห.)

ที่อยู่ 47/433 หมู่ 3 เมืองทองธานี ถนนแจ้งวัฒนะ ต.บ้านใหม่ อ.ปากเกร็ด นนทบุรี 11120

โทรศัพท์/โทรสาร 02 980-5891

E-mail address ird.sut.ac.th

งบประมาณทั้งโครงการ 4,072,750 บาท (สี่ล้านเจ็ดหมื่นสองพันเจ็ดร้อยห้าสิบบาท)

ระยะเวลาดำเนินการ 18 เดือน

### ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา

การปฏิบัติการภารกิจด้านความมั่นคงของเจ้าหน้าที่ทหาร ตำรวจ และพลเรือนในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าจะพัฒนาการฝึกศึกษาคิด มีการปรับการจัดหน่วย เปเปลี่ยนรูปแบบการปฏิบัติทางยุทธวิธี เพื่อให้เหมาะสมกับสถานการณ์ ที่เกิดขึ้น ปัญหาความจำากัดด้านงบประมาณของกองทัพและหน่วยงานต่างๆ ทำให้ยังไม่ได้รับการจัดหากาญจน์ยุทธิ์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การปฏิบัติงานในการปราบปรามยาเสพติด การปฏิบัติงานในการป้องกันและปราบปรามการก่อความไม่สงบในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ และการป้องกันชายแดน รูปแบบการปฏิบัติของฝ่ายตรงข้ามส่วนใหญ่เป็นการปฏิบัติลักษณะ กองโจร และการรบนอกแนว ซึ่งทำให้มาตรฐานการป้องกัน และการตอบโต้ด้วยความรวดเร็วมีความสำคัญที่ต้องนำมาใช้ แต่จากสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ทำให้เกิดการสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้ปฏิบัติงานทั้งทหาร ตำรวจ พลเรือน และประชาชนทั่วไป เป็นจำนวนมากจากการลอบยิงและลอบวางระเบิดจากผู้ก่อความไม่สงบ การลดความสูญเสีย นอกจากจะใช้มาตรการต่างๆ ดังกล่าวให้ผู้ปฏิบัติงานได้ปฏิบัติให้เป็นผลแล้ว การใช้ยุทธิ์โดยรวมและอุปกรณ์พิเศษ ที่ใช้สำหรับการป้องกันร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน ตลอดจนยานพาหนะ ยุทธิ์โดยรวม เพื่อป้องกันอันตรายจากกระสุนปืนชนิดต่างๆ และวัตถุระเบิดของฝ่ายตรงข้าม ซึ่งได้แก่ เสื้อเกราะและเกราะสำหรับติดตั้งกับยานพาหนะประเภทต่างๆ ยังมีปัญหามากเนื่องจากปัจจุบันสถานภาพของเสื้อเกราะที่กองทัพและตำรวจมีใช้งานอยู่ ส่วนใหญ่หรือทั้งหมด มีอายุการใช้งานนานมากกว่า 20 ถึง 30 ปี หมวดสภาพการใช้งานไม่สามารถป้องกันกระสุนปืนเล็กยาวที่เป็นอาชญากรรม ที่ฝ่ายตรงข้ามใช้อุปกรณ์ในปัจจุบันได้ นอกจากนั้นต้องใช้งบประมาณจำนวนมากในการจัดซื้อจาก

ต่างประเทศที่มีราคาสูง ซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่จะจัดซื้อได้เพียงพอตามความต้องการ การใช้งานของกองทัพและตำรวจส่วนใหญ่ที่จัดมาใหม่เป็น

เตือนภัยสังคมที่มีอาชญากรรมซ่อนอยู่ในสังคม เช่น การค้ามนุษย์ การลักทรัพย์ การฆ่าตัด首 ฯลฯ

ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กองทัพและตำรวจนอกจากหน้าที่ของรัฐผู้ที่ปฏิบัติงานในการกิจที่เสี่ยงต่อการถูกยิงด้วยอาวุธต่างๆ และวัตถุระเบิด ได้มีสื่อกระแสและกระแสที่มีคุณลักษณะและประสิทธิภาพในการป้องกันอำนวยการสังหารของกระสุนปืนทุกประเภท ที่คนร้ายหรือผู้ก่อความไม่สงบและขวนควรคำยาเสพติดใช้ โดยพิจารณาถึงความเป็นไปได้ ตามแนวทางประเดินทางท่าโดยใช้อุดสาหกรรมผลเรือนภายในประเทศ สนับสนุนการพัฒนาทางท่า เพื่อให้กองทัพและรัฐสามารถใช้ทรัพยากรถภายในประเทศกดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ เป็นการส่งเสริมการพัฒนาทางท่า

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยและพัฒนากระป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาด และกระสุนปืนเล็กๆ ที่เป็นอาวุธสงครามนี้ เพื่อให้ได้เกราะ 2 ประเภท คือ เกราะที่มีคุณสมบัติที่สามารถป้องกันอำนวยสังหารของกระสุนปืนพกทุกขนาดที่มีใช้ในประเทศไทย และเกราะที่มีคุณสมบัติป้องกันอำนวยสังหารของปืนเล็กๆ ที่เป็นอาวุธสงคราม โดยใช้การผสมผสานเทคโนโลยีการทำเกราะเหล็ก การทำเกราะโดยใช้สังเคราะห์และเกราะวัสดุอื่นที่เป็นเทคโนโลยี ทั้งในและต่างประเทศมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานการป้องกันอันตราย จากการถูกยิงด้วยอาวุธปืน สำหรับบุคคลและติดตั้งกับยานพาหนะ ยุทธปกรณ์ ตลอดจนสิ่งอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องใช้ต่างๆ

ระเบียบวิธีวิจัย (โดยย่อ)

เกราะที่ทำการวิจัย มีเป้าหมายหลักเพื่อให้ได้เกราะ 2 ประเภท ตามประสิทธิภาพในการป้องกันอำนาจการสั่งหารของหัวกระสนปืน ที่ต้องการ คือ

1. เกราะป้องกันกระสุนปืนพกที่สามารถป้องกันอิมพาลสั่งหารของกระสุนปืนพกทุกขนาดที่ใช้ขึ้นจากปืนพกแล้ว ที่มีใช้ในประเทศไทย โดยให้มีคุณลักษณะและสมรรถนะเทียบเท่ามาตรฐานยุทธ์ปืนกระสุนเดียวกัน กระหวงกล้าโภมคือสามารถกันกระสุนได้ในระดับปืนพก 3A

2. เกราะป้องกันกระสุนปืนเล็กยาวที่สามารถป้องกันอิฐนาจสั่งหารของกระสุนปืนเล็กยาวทุกขนาดที่ใช้ยิงจากอาวุธปืนเล็กยาวที่เป็นอาวุธสงครามที่มีใช้ในประเทศไทย โดยให้มีคุณลักษณะและสมรรถนะเทียบเท่ามาตรฐานยุทธ์ป้องกันกระสุนปืนเล็กยาว คือต้องมีคุณภาพดังนี้

3. เป้าหมายหลักของผู้วิจัยในการวิจัยวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกระเบื้อง แผ่นเหล็กกล้าประเภทต่างๆ เสริมด้วยแผ่นกระเบื้องอื่นๆ ซึ่งเป็นการขยายผลจากการทดสอบการทำเลือกกระเบื้องป้องกันกระสุนของ บริษัท พรีซิพาร์ท จำกัด ที่ได้รับมาตรฐานจากกระทรวงกลาโหมแล้ว เมื่อวันที่ 12 มกราคม พุทธศักราช 2549 ซึ่งประกอบด้วย แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แผ่นเหล็กหนียะ และแผ่นเหล็กหนียะชุบแข็ง เพื่อให้สามารถพิสูจน์ทราบตามขั้นตอนเทคนิค มีเหตุผล ที่จะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพหรือสมรรถนะให้กับแผ่นเหล็กทั้ง 3 ประเภทในการป้องกันภัยจากการหักห้ามของหัวกระสุน โดยไม่ต้องเพิ่มความหนาของแผ่นเหล็ก (ที่จะทำให้น้ำหนักมากเกินไป ขึ้นรูปหรือเจาะรูเพื่อยึดตั้งได้ลำบาก และทำให้ร้าวสูงมากเกินไปที่จะขยายผลไปสู่การลงทุนผลิตในเชิงพาณิชย์) และเป้าหมายในการวิจัยและพัฒนา กระเบื้องคือ การให้ได้

เกราะแบบผสม โดยใช้แผ่นเกราะเซรามิก แผ่นเกราะไยสังเคราะห์ และแผ่นเกราะวัสดุอื่นๆ และหรือทั้ง 4 ประเภท นำมาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อเสริมประสิทธิภาพของเกราะเหล็กในการป้องกันอำนวยการสังหารของหัวกระสุนให้ได้ ตามที่ต้องการใช้งานของเกราะในแต่ละประเภท (ป้องกันกระสุนปืนพก ป้องกันกระสุนอาวุธสงคราม) โดยการเลือกใช้ ขนาดและ ประเภทของแผ่นเซรามิก แผ่นเกราะเส้นไยสังเคราะห์ แผ่นเกราะวัสดุอื่นๆ ชนิดต่างๆ ที่เป็นผลงานวิจัยและ หรือที่มีผลิตจำหน่ายอยู่แล้วภายในประเทศ นำมาร่วมทำการวิจัย ภายใต้เงื่อนไขที่เอื้อประโยชน์ต่อ กัน และไม่ละเมิด ลิขสิทธิ์ซึ่งกันและกัน

4. น้ำหนักของชุดเสื้อเกราะที่ประกอบแผ่นเกราะแล้วเสร็จ จะต้องมีน้ำหนักไม่เกินกว่าที่กำหนดดังนี้

- ชุดเสื้อเกราะป้องกันปืนพก มีน้ำหนักรวมไม่เกิน 5 กิโลกรัม / ตัว
- ชุดเสื้อเกราะป้องกันอาวุธสงคราม มีน้ำหนักไม่เกิน 11 กิโลกรัม / ตัว

5. คุณลักษณะของแผ่นเกราะที่ต้องการในเรื่องประสิทธิภาพในการป้องกันอำนวยการสังหารและอำนวยการทะลุ ทะลวงของหัวกระสุนชนิดต่างๆ คือเมื่อประกอบเป็นชุดแผ่นเกราะแล้วต้องมีประสิทธิภาพในการ ก) ทำลายหัวกระสุน ข) ขยี้หัวกระสุน, และ ค) เก็บหัวกระสุน

6. วัตถุคุณที่ใช้ผลิตชุดเสื้อเกราะ และเกราะเป็นวัตถุคุณที่หาง่าย และส่วนใหญ่เป็นเทคโนโลยีที่ผลิตได้ในประเทศไทย มี ราคาถูกเมื่อเทียบกับที่จัดหาจากต่างประเทศ

#### สิ่งที่คาดว่าจะได้

1. เป็นการพัฒนาขุยท์ໂຮປຽณ์ขึ้น ใช้เอง ตอบสนองนโยบายของรัฐบาลและแผนปฏิบัติราชการของกระทรวงกลาโหม ซึ่งกำหนดให้มีการส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีทางทหาร โดยสนับสนุนให้มีการศึกษา ค้นคว้าวิจัย โดยใช้ศักยภาพ ของชาติในด้านต่างๆ สนับสนุนการป้องกันประเทศไทย โดยเน้นการใช้อุตสาหกรรม พลเรือนภัยในประเทศไทยสนับสนุนการ พัฒนาองค์กรทางทหาร เพื่อให้กองทัพและรัฐสามารถใช้ทรัพยากรภัยในประเทศไทยแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ เป็น การส่งเสริมการพัฒนาองค์กรทางทหารและส่งเสริมกิจการอุตสาหกรรมพลเรือนภัยในประเทศไทย

2. มีคันแบบ เกราะและเสื้อเกราะที่มีคุณภาพ มีประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาด และป้องกันกระสุน ปืนเล็กๆที่เป็นอาวุธสงคราม ตามความต้องการของกองทัพและสำนักงานตำรวจนแห่งชาติ มีราคาถูก มีความเป็นไปได้ ด้านงบประมาณในการจัดซื้อ ทำให้มีการขยายผลไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์สามารถผลิตสนับสนุนให้กองทัพ สำนักงานตำรวจนแห่งชาตินำร่องงานของรัฐ ที่จะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน และลดการสูญเสียจากการ ปฏิบัติงานในพื้นที่สีงัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแก้ปัญหาการก่อความไม่สงบในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ การ ปราบปรามผู้มีอิทธิพล ขบวนการค้ายาเสพติดและสนับสนุนภารกิจความมั่นคงในพื้นที่ชายแดน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ได้ผลสรุปทางวิชาการในการผลิตแผ่นเกราะที่เป็นเทคโนโลยีทางราชการเป็นแนวทางในการพัฒนาสู่กระบวนการ ผลิตในเชิงพาณิชย์, และส่งเสริมอุตสาหกรรมภัยในประเทศไทย

#### ความสอดคล้องกับเป้าประสงค์และยุทธศาสตร์ของฝ่าย 5 มีความสอดคล้องดังนี้

เป็นผลสำเร็จของความร่วมมือในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางราชการที่เป็นรูปธรรมระหว่างกองทัพ สำนักงานตำรวจนแห่งชาติ หน่วยงานของรัฐ สถาบันการศึกษาและภาคเอกชน

มีการถ่ายทอดวิธีการทำวิจัยที่เป็นระบบจากคณาจารย์ที่มีประสบการณ์จากการวิจัยอุตสาหกรรมในต่างประเทศ ทั้งนี้ยัง ช่วยสร้างและพัฒนาทีม R&D ของ บริษัท พรีซิพาร์ท จำกัด นำไปพัฒนาทำเสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืน ตอนนี้ได้ จำหน่ายให้กับกองทัพแล้ว 200 ตัว และได้มีการบริจาคให้กับกองทัพดังนี้

กองทัพภาคที่ 1 จำนวน 25 ตัว

กองทัพภาคที่ 2 จำนวน 25 ตัว

กอ.ร.ม.น.ภาค 4 ส่วนหนึ่ง จำนวน 30 ตัว

โดยขณะเดียวกันก็เป็นการส่งเสริม/สร้างสรรค์และพัฒนาความรู้ใหม่แก่ตัวสถาบันการศึกษา, คณาจารย์, และนักศึกษา ช่วยวิจัย อันเป็นการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ป้อนแก่ภาคอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กของประเทศไทย