

การพัฒนาเครื่องทวิแรงถอย สำหรับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ที่ประจำการในกองทัพบกไทย

ปริญญานิพนธ์  
ของ  
ชัยวัฒน์ กริชนัยรวิวงศ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
พฤษภาคม 2553

การพัฒนาเครื่องทวิแรงถอย สำหรับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ที่ประจำการในกองทัพบกไทย

ปริญญานิพนธ์  
ของ  
ชัยวัฒน์ กริชนัยรวิวงศ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2553

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การพัฒนาเครื่องทวิแรงถอย สำหรับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ที่ประจำการในกองทัพบกไทย

บทคัดย่อ

ของ

ชัยวัฒน์ กริชนัยรวิวงศ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2553

ชัยวัฒน์ ภิรมย์วิวัฒน์. (2553). *การพัฒนาเครื่องทวิแรงถอย สำหรับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1*

ที่ประจำการในกองทัพบกไทย.ปริญญาโท. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล.

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการคำนวณแรงดันที่เกิดจากการยิงปืนเล็กยาว แบบ M16 และ M16A1 ด้วยกระสุนซ้อมรบ แบบ M200 เมื่อกระทำต่อเครื่องทวิแรงถอยซึ่งติดตั้งบริเวณปลายของปลอกดัดแสง ของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 โดยออกแบบเครื่องทวิแรงถอยจากเครื่องทวิแรงถอยที่มีอยู่ในกองทัพบกไทยในโปรแกรม Solid Works แล้วนำแบบที่ได้ มาคำนวณโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับค่าแรงดันที่จะกระทำต่อเครื่องทวิแรงถอยนั้น ใช้จากข้อมูลของกองทัพบกเกี่ยวกับแรงดันที่เกิดขึ้นของการยิงปืนเล็กยาว แบบ M16 และ M16A1 ด้วยกระสุนซ้อมรบ แบบ M200 ซึ่งมีค่าแรงดันที่เกิด ประมาณ 52,000 psi

ผลการวิจัยพบว่า เครื่องทวิแรงถอยที่ออกแบบนั้น สามารถทนต่อแรงดันที่เกิดขึ้นจากการยิงปืนเล็กยาว แบบ M16 และ M16A1 ด้วยกระสุนซ้อมรบ แบบ M200 ได้ โดยนำแบบที่ได้นั้น มาทำเป็นเครื่องต้นแบบที่ได้จากการทดลองออกแบบในโปรแกรม Solid Works ซึ่งมีผลทำให้ปลอกของกระสุนซ้อมรบแบบ M200 ที่ยิงไปแล้วนั้นเกิดการคัดตัวออกมา ซึ่งจะทำให้วงจรการทำงานของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ครบสมบูรณ์

ผลการวิจัยนี้ สามารถใช้ในการออกแบบเครื่องต้นแบบของเครื่องทวิแรงถอยที่ใช้กับการยิงปืนเล็กยาว แบบ M16 และ M16A1 ด้วยกระสุนซ้อมรบ แบบ M200 ได้สมจริงและมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในอนาคตนั้น สามารถนำไปผลิตเครื่องทวิแรงถอยเพื่อแจกจ่ายให้กับหน่วยต่างๆ ภายในกองทัพบกไทยได้ และนำไปพัฒนาเครื่องทวิแรงถอยที่ใช้กับปืนเล็กยาว M16A2 และ M16A4 ซึ่งมีแผนที่จะนำมาประจำการในกองทัพบกไทยต่อไป

คำสำคัญ (Keywords) : เครื่องทวิแรงถอย ปลอกดัดแสง กระสุนซ้อมรบ

DEVELOPMENT OF THE BLANK FIRING ATTACHMENT FOR RIFLE M16 AND M16A1  
SERVICE IN THE ROYAL THAI ARMY

AN ABSTRACT  
BY  
CHAIWAT KRATSANAIRAWIWONG

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering  
at Srinakharinwirot University

May 2010

Chaiwat Kratsanairawiwong. (2010). *Developing of the Blank Firing Attachment for Rifle M16 and M16A1 Service the Royal Thai Army*. Master Thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Dr. Jutarat Kurujareon, Asst. Prof. Dr. Pichai Asadamongkon

This research was an application of Finite Element Method to calculate pressure created by firing rifle type M16 and M16A1 with blank cartridge M200. The pressure will be measured by blank firing attachment which was installed at the tip/end of the Flash hider. The blank firing attachment was developed from the present blank firing attachment, which was using by The Royal Thai Army, redesigned using Solid Works program. The model created was recalculated using Finite Element Method. The pressure data used was from the Royal Thai Army firing data of rifle type M16 and M16A1 with blank cartridge M200 which was 52,000 psi.

From the research, the designed blank firing attachment was able to withstand the pressure created by firing of rifle type M16 and M16A1 with an M200 blank cartridge. The model was again redesigned using Solid Works program to be able to eject the cartridge automatically which make rifle type M16 and M16A1 working in a complete cycle.

The result of this research was success with the rifle type M16 and M16A1 with an M200 blank cartridge. In the future, it could be produced and distributed to the others department, and developed for rifle type M16A2 and M16A4 which were planned to be used in The Royal Thai Army

Keywords : Blank firing attachment / Flash hider / blank cartridge

## ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ ประธานกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ กรุณาเป็นอย่างยิ่งในการที่ให้คำปรึกษา แนะนำทุกๆ ด้าน ชี้แนะแนวทางจนปริญญานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ และขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย อภัยมงคล กรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ กรุณาให้คำปรึกษา รวมทั้งช่วยเหลือไขปัญหาต่างๆ โดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณาจารย์จากกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่ได้สอนวิชาการ ในหลายวิชา รวมทั้งฝึกความอดทน ตลอดจนให้คำแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ พันเอกรองศาสตราจารย์ ดร.อโนทัย สุขแสงพนมรุ่ง ประธานกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ในครั้งที่กรุณาแนะนำเพิ่มเติม ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และพันตรีหญิง สุวิมล เสนียังส์ ณ อยุธยา ที่ให้คำแนะนำในการทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณกรมสรรพาวุธทหารบกที่ให้การสนับสนุนข้อมูลของเครื่องทวิแรงถอยที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ และให้ความช่วยเหลือในการผลิตเครื่องต้นแบบเครื่องทวิแรงถอยในการวิจัย

ขอขอบคุณ นายจิรวุฒิ ศรีहरา และเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ

ท้ายสุดที่ขาดไม่ได้เลยผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมสั่งสอนและสนับสนุน รวมทั้งครอบครัวผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและคอยช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

ร้อยเอกชัยวัฒน์ ภิรมย์นัยวิวงศ์

ปริญญานิพนธ์  
เรื่อง

การพัฒนาเครื่องทวิแรงถอย สำหรับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ที่ประจำการในกองทัพบกไทย

ของ  
ชัยวัฒน์ กริชนัยรวิวงศ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวិชากรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่ ..... เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2553

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

..... ประธาน  
(พันเอก รองศาสตราจารย์ ดร.อโนทัย สุขแสงพนมรุ่ง)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

# สารบัญ

| บทที่                                                                       | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 บทนำ .....                                                                | 1    |
| ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....                                             | 1    |
| วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....                                           | 2    |
| ขอบเขตของโครงการวิจัย .....                                                 | 2    |
| วิธีการดำเนินการวิจัย .....                                                 | 2    |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย .....                                     | 3    |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                       | 4    |
| ทฤษฎีและหลักการทำงานของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 .....                       | 4    |
| คุณลักษณะของปืนเล็กยาว M16 และ M16 A1 .....                                 | 4    |
| ข้อมูลทางเทคนิคของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 .....                            | 5    |
| หลักการทำงาน .....                                                          | 5    |
| ทฤษฎีของการอนุรักษ์พลังงานและหลักการทางทฤษฎีของผู้ผลิตต้นแบบ .....          | 8    |
| กฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับปริมาตรควบคุม กฎของนิวตัน .....                   | 8    |
| ทฤษฎีความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) .....                         | 9    |
| คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ .....                                               | 9    |
| ความเค้น (Stress) .....                                                     | 9    |
| ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation) .....                   | 10   |
| ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship) ..... | 11   |
| ทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์ .....                                               | 20   |
| บทปริทัศน์วรรณกรรม .....                                                    | 32   |
| 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย .....                                     | 34   |
| อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย .....                                  | 34   |
| วิธีดำเนินการวิจัย .....                                                    | 37   |
| การออกแบบ .....                                                             | 37   |
| การออกแบบรูปแบบอื่นๆ .....                                                  | 38   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่                                                                    | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>3 (ต่อ)</b>                                                           |      |
| เลือกแบบที่เหมาะสม .....                                                 | 38   |
| สร้างเครื่องทวิแรงถอยดันแบบ.....                                         | 38   |
| ทดสอบการทำงานจริงของเครื่องทวิแรงถอยกับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 .....    | 39   |
| <b>4 ผลการทดสอบ</b> .....                                                | 42   |
| คำนวณจากไฟไนต์เอลิเมนต์ .....                                            | 42   |
| สร้างรูปตามแบบจริงโดยโปรแกรม Solid Works Simulation เพื่อจำลองแบบขึ้นมา  | 42   |
| นำแบบที่ได้จาก Solid Works Simulation มาใส่ค่าตัวแปรของวัสดุที่ใช้ทำและ  |      |
| แรงกระทำที่มีต่อต้นแบบ เพื่อจะได้ทราบขนาดของต้นแบบที่สามารถรับแรง        |      |
| กระทำได้ .....                                                           | 43   |
| ได้ขนาดและคุณสมบัติของวัสดุจากการคำนวณโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ .....           | 47   |
| ทำแบบตามการคำนวณโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ .....                                 | 49   |
| สร้างต้นแบบตามแบบ (Drawing) .....                                        | 50   |
| ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อสร้างเครื่องทวิแรงถอย .....                 | 51   |
| การทดสอบและผลการทดสอบ .....                                              | 52   |
| ออกแบบเครื่องทวิแรงถอยตามของจริง .....                                   | 52   |
| ออกแบบเครื่องทวิแรงถอยรูปแบบทรงกระบอก (Non-Fillet) .....                 | 54   |
| ออกแบบเครื่องทวิแรงถอยรูปแบบทรงกระบอก (Fillet) .....                     | 55   |
| ออกแบบเครื่องทวิแรงถอยรูปแบบทรงกระบอกเพื่อหาแรงกระทำแบบซ้ำๆ (Fatigue) .. | 59   |
| ผลการทดสอบ .....                                                         | 60   |
| <b>5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....                               | 61   |
| การทดสอบเครื่องทวิแรงถอยกับปืน M16 และ M16A1 .....                       | 61   |
| สรุปผลการวิจัย.....                                                      | 62   |
| ข้อเสนอแนะ .....                                                         | 62   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่                    | หน้า |
|--------------------------|------|
| บรรณานุกรม .....         | 63   |
| ภาคผนวก .....            | 65   |
| ภาคผนวก ก .....          | 66   |
| ภาคผนวก ข .....          | 76   |
| ภาคผนวก ค .....          | 85   |
| ภาคผนวก ง .....          | 95   |
| ภาคผนวก จ .....          | 105  |
| ภาคผนวก ฉ .....          | 114  |
| ประวัติย่อผู้วิจัย ..... | 119  |

## บัญชีตาราง

| ตาราง                                                                     | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 ตัวอย่างค่าคงที่ และ ของวัสดุชนิดต่าง ๆ .....                           | 15   |
| 2 ส่วนประกอบที่ได้จากคำนวณเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบของ Housing .....        | 47   |
| 3 ส่วนประกอบที่ได้จากคำนวณเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบของPilot .....           | 47   |
| 4 ส่วนประกอบจากการคำนวณ เพื่อกำหนดขนาดสร้างเครื่องต้นแบบของ Housing ..... | 48   |
| 5 ส่วนประกอบที่ได้จากคำนวณ เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบของ Pilot .....         | 48   |
| 6 ผลที่ได้จากการทดสอบ เมื่อสร้างเครื่องต้นแบบเสร็จแล้ว .....              | 60   |

## บัญชีภาพประกอบ

| ภาพประกอบ                                                                                                          | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 แสดงปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 .....                                                                               | 4    |
| 2 แสดงชุดส่งโครงนำลูกเลื่อน .....                                                                                  | 5    |
| 3 แสดงรายละเอียดของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 คั่นควบคุม ปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 .....                              | 6    |
| 4 แสดงกระสุนซ้อมรบแบบ M200 .....                                                                                   | 8    |
| 5 แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ .....                                                                             | 10   |
| 6 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) การทดสอบแรงดึง (Tension Test) ..... | 12   |
| 7 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก .....                                                              | 13   |
| 8 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก .....                                         | 14   |
| 9 เส้นโค้งความคืบ .....                                                                                            | 16   |
| 10 Creep Curve ที่ Condition ต่างกัน .....                                                                         | 17   |
| 11 คุณสมบัติความแข็งแรงของวัสดุเปราะ .....                                                                         | 18   |
| 12 คุณสมบัติความแข็งแรงของวัสดุเหนียว .....                                                                        | 18   |
| 13 รูปทรงเรขาคณิตที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ .....                                                    | 21   |
| 14 การประมาณรูปเหมือนของโดมครึ่งทรงกลมโดยวิธีอันดับของ Conical frustum .....                                       | 28   |
| 15 ปลอกหุ้มความถอยของปืนเล็กยาว M16 ปืนกล M60 .....                                                                | 32   |
| 16 แสดงปืนเล็กยาว M16 A1 .....                                                                                     | 35   |
| 17 การประกอบเครื่องทวิแรงถอยจากของจริง .....                                                                       | 35   |
| 18 การประกอบเครื่องทวิแรงถอยเข้ากับปืน .....                                                                       | 35   |
| 19 ภาพตัดขวางเครื่องทวิแรงถอยจากของจริง .....                                                                      | 36   |
| 20 สร้างรูปภาพเสมือนโดยใช้ Solid Works Simulation .....                                                            | 37   |
| 21 สร้างรูปภาพเสมือนโดยใช้ Solid Works Simulation .....                                                            | 38   |
| 22 วิเคราะห์ความเค้นโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ .....                                                                       | 39   |
| 23 สร้างแบบจำลองที่เหมือนจริง .....                                                                                | 40   |
| 24 สร้างแบบจำลองของรูปทรงกระบอก .....                                                                              | 40   |
| 25 วิเคราะห์ความเค้นโดยเพิ่ม Fillet .....                                                                          | 41   |

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ                                                                  | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------|------|
| 26 วิเคราะห์ความเค้นที่รับแรงกระทำซ้ำๆ .....                               | 41   |
| 27 สร้างต้นแบบโดยโปรแกรม Solid Works Simulation เพื่อจำลองแบบขึ้นมา .....  | 42   |
| 28 Housing and Pilot - Factor of Safety .....                              | 43   |
| 29 Housing and Pilot – Stress .....                                        | 44   |
| 30 Housing and Pilot – Displacement .....                                  | 45   |
| 31 Housing and Pilot – Strain .....                                        | 46   |
| 32 ภาพแบบที่สร้างขึ้นมาเพื่อทำเครื่องต้นแบบ .....                          | 49   |
| 33 สร้างเครื่องต้นแบบ .....                                                | 50   |
| 34 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ความสามารถในการเครื่องต้นแบบ .....              | 51   |
| 35 เครื่องทวิแรงถอยตามของจริง .....                                        | 52   |
| 36 เครื่องทวิแรงถอยตามของจริง .....                                        | 52   |
| 37 เครื่องทวิแรงถอยตามของจริงเพื่อหาความเค้น .....                         | 53   |
| 38 เครื่องทวิแรงถอยตามของจริงเพื่อใช้ Safety –Factor .....                 | 53   |
| 39 เครื่องทวิแรงถอยตามของจริงเพื่อใช้ Safety –Factor .....                 | 54   |
| 40 เครื่องทวิแรงถอยรูปทรงกระบอก .....                                      | 54   |
| 41 เครื่องทวิแรงถอยรูปทรงกระบอกโดยลบส่วนที่เป็นมุมฉาก .....                | 55   |
| 42 การวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Stress) .....                | 56   |
| 43 การวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Displacement) .....          | 57   |
| 44 การวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Strain) .....                | 58   |
| 45 การวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ของแรงกระทำซ้ำ (Fatigue) ..... | 59   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากสถานการณ์เศรษฐกิจในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่า ในแต่ละปีงบประมาณที่ทางรัฐบาลจัดสรรให้สำหรับหน่วยงานต่างๆ นั้น จัดตามลำดับความสำคัญและเร่งด่วนของปัญหา หน้าที่หลักของกองทัพบก คือ การป้องกันประเทศและรักษาอธิปไตยของประเทศ ตลอดจนการฝึกเพื่อเตรียมพร้อมรบกับทุกสถานการณ์ แต่งบประมาณที่ทางกองทัพบกได้รับมาสำหรับการฝึก อุปกรณ์การฝึก และการพัฒนาอุปกรณ์เครื่องช่วยฝึก นั้น น้อยมาก จึงทำให้มีเครื่องช่วยฝึกมีไม่เพียงพอ แต่ถ้าหากมีเครื่องช่วยฝึกที่เพียงพอแล้ว ก็จะทำให้การฝึกมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และสามารถช่วยประหยัดเวลา ค่าใช้จ่ายในการฝึก ทำให้กำลังพลมีความพร้อมและความมั่นใจในการปฏิบัติหน้าที่ต่างๆ ที่ได้รับมอบหมาย

อาวุธปืนถือว่าเป็นที่สำคัญในการปฏิบัติหน้าที่ของทหารในยามสงคราม แต่ในปัจจุบันสงครามนั้น อาจเกิดขึ้นได้ โดยที่ไม่ทราบล่วงหน้า ดังนั้นในการฝึกการใช้อาวุธปืนแต่ละครั้ง โดยเฉพาะปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 จะมีการใช้กระสุนจริงและกระสุนซ้อมรบ เพื่อให้กำลังพลมีความชำนาญต่อการใช้อาวุธ เครื่องทวิแรงถอยก็เป็นเครื่องช่วยฝึกอีกอันหนึ่งที่ช่วยให้การฝึกด้วยกระสุนซ้อมรบให้มีประสิทธิภาพและสมจริง การดีดออกของปลอกกระสุนหรือการคัดปลอกกระสุนของกระสุนซ้อมรบจะเกิดขึ้นได้ก็เมื่อมีปริมาณแรงดันภายในลำกล้องที่เพียงพอ เช่นเดียวกับการใช้กระสุนจริงเนื่องจากการที่หัวกระสุนวิ่งผ่านไป ในลำกล้องปืนจะมีแรงดันภายในลำกล้องเพียงพอที่จะดันให้ปลอกกระสุนนัดที่ยิงไปแล้วนั้น คัดตัวออกมาจากลำกล้อง แล้วทำให้เกิดการบรรจุของกระสุนในนัดต่อไปตามวงจรการทำงานปกติของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 สำหรับเครื่องทวิแรงถอยที่ทางกองทัพบกไทยมีอยู่ใช้ในการฝึกนั้นอาจจะมีปริมาณที่ไม่เพียงพอ หรืออาจเกรงว่าจะเกิดการชำรุดเมื่อนำมาฝึก จึงมิได้มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย หรืออาจไม่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้การฝึกการยิงปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 อาจจะไม่เกิดความสมจริง สาเหตุอีกประการหนึ่งที่ไม่มีการนำเครื่องทวิแรงถอยมาใช้ในการฝึกคือราคาที่สูง จัดหายาก และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงทำให้การฝึกของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ไม่สมจริงและมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

นอกจากนี้แล้ว ในการฝึกจำลองยุทธ จะใช้ลำแสงเลเซอร์ในการกำหนดผลของการยิงปืนในแต่ละนัดของกระสุนซ้อมรบ การทำงานของเลเซอร์ก็ต้องใช้การยิงปืนกระบอกนั้นด้วยกระสุนซ้อมรบ แต่ถ้าหากไม่มีเครื่องทวิแรงถอย ก็จะต้องทำให้ปืนกระบอกนั้น ทำงานไม่ครบตามวงจรการทำงานปกติ ต้องมีการดึงดันรังลูกเลื่อนของปืน เพื่อให้เกิดการคัดออกของปลอกกระสุนนัดที่ยิงไปแล้วก็เกิดการบรรจุกระสุนนัดใหม่เข้าสู่รังเพลิง และพร้อมที่จะทำการยิงกระสุนในนัดต่อไป

ดังนั้นการพัฒนาเครื่องทวิแรงถอยให้สามารถใช้ได้จริงกับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 และสามารถผลิตใช้ได้เองภายในประเทศจึงมีความสำคัญและความจำเป็น เพื่อการฝึกสมจริง และมีประสิทธิภาพเหมาะสมกับงบประมาณที่ทางรัฐบาลจัดสรรให้กับทางกองทัพในส่วนเครื่องช่วยฝึก ซึ่งในอนาคตนั้นสามารถนำหลักการมาพัฒนาเครื่องทวิแรงถอยสำหรับปืนเล็กยาวรุ่นอื่นๆได้ เช่น ปืนเล็กยาว M16A2 และ M16A4 ที่มีแผนจะนำเข้ามาประจำการในกองทัพต่อไป

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนา เครื่องทวิแรงถอยที่มีใช้กับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ในกองทัพบกไทย
2. เพื่อออกแบบและผลิตเครื่องต้นแบบของเครื่องทวิแรงถอย ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้จริง และประหยัด งบประมาณในการจัดซื้อ
3. เป็นแม่แบบเพื่อพัฒนาสำหรับปืนเล็กยาว M16A2 และ M16A4 ต่อไป

### ขอบเขตของโครงการวิจัย

เป็นการพัฒนาเครื่องทวิแรงถอย ที่มีอยู่มาเป็นแบบใหม่ โดยที่คำนวณจากแรงดันภายในลำกล้อง เพื่อออกแบบเครื่องทวิแรงถอย แบบใหม่มาใช้กับ ปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 เท่านั้น

1. ใช้ทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการคำนวณแรงดันที่กระทำต่อเครื่องทวิแรงถอย ซึ่งติดตั้งที่ปลอกกลดแสง บริเวณปลายของลำกล้องปืนเล็กยาว M16 และ M16A1
2. ศึกษาเครื่องทวิแรงถอยที่มีอยู่ในกองทัพบกไทยในปัจจุบัน
3. ออกแบบเครื่องทวิแรงถอยที่สามารถใช้ได้กับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1
4. ผลิตเครื่องต้นแบบของเครื่องทวิแรงถอยที่สามารถใช้ได้ผลจริงกับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1
5. เป็นการยิงปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ด้วยกระสุนซ้อมรบ แบบ M 200 เท่านั้น

### วิธีการดำเนินการวิจัย

เพื่อเป็นการศึกษาระบบการทำงานอย่างต่อเนื่องและรวบรวมความรู้เป็นขั้นตอน จึงแบ่งขั้นตอนการทำงานเป็น 6 ระยะ คือ รวบรวมข้อมูล ศึกษารายละเอียด ออกแบบ ทดสอบและพัฒนา ผลิตเครื่องต้นแบบของเครื่องทวิแรงถอย สรุปผลและจัดทำรูปเล่มรายงาน

1. การรวบรวมข้อมูล หาข้อมูลเกี่ยวกับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 โดยเฉพาะการทำงานเมื่อใช้งานกับกระสุนซ้อมรบแบบ M200 รวมทั้งหาข้อมูลเครื่องทวิแรงถอย ที่ประจำการในกองทัพบกไทย และเครื่องทวิแรงถอยแบบต่างๆ จากสิทธิบัตรและงานวิจัยต่างๆ และรวบรวมพื้นฐานทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2. การศึกษารายละเอียด ศึกษาในรายละเอียดของเนื้อหาการทำงานของ ปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 โดยเฉพาะการทำงานเมื่อใช้งานกับกระสุนซ้อมรบแบบ M200 ศึกษาทฤษฎีด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาเรื่องแรงดันภายในท่อรูปทรงกระบอก และศึกษาข้อมูลเครื่องทวิแรงถอย ที่ประจำการในกองทัพบกไทย และเครื่องทวิแรงถอยแบบต่างๆ จากสิทธิบัตรและงานวิจัยต่างๆ และรวบรวมพื้นฐานทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. การออกแบบเครื่องต้นแบบ จากการใช้ทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์ คำนวณค่าต่างๆ และนำค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณมาออกแบบเครื่องทวิแรงถอยขั้นต้น
4. การทดสอบและพัฒนา ทดสอบการทำงานของเครื่องทวิแรงถอย และพัฒนาให้ได้เครื่องทวิแรงถอยที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานทั้งด้านคุณภาพ และงบประมาณ
5. จัดทำเครื่องต้นแบบ นำค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ การทดสอบและพัฒนาฉบับที่จัดทำต้นแบบของเครื่องทวิแรงถอย
6. สรุปผลและจัดทำรูปเล่ม วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ รวมทั้งสรุปผลการทำงานของเครื่องทวิแรงถอย ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ และจัดทำรูปเล่ม

### **ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย**

1. ได้รับต้นแบบของเครื่องทวิแรงถอยที่ใช้กับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1
2. เป็นประโยชน์ต่อหน่วยต่างๆ ของกองทัพบก ที่มีอุปกรณ์เครื่องช่วยฝึก เพื่อช่วยให้การฝึกเหมือนจริงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น
3. ได้ต้นแบบของเครื่องทวิแรงถอย ที่สามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาเพื่อใช้กับปืนเล็กยาว M16A2 และ M16A4 ต่อไป
4. ประหยัดงบประมาณของกองทัพบก และลดภาระด้านงบประมาณของประเทศ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ทฤษฎี คือ

1. ทฤษฎีและหลักการทำงานของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1
2. ทฤษฎีของการอนุรักษ์พลังงานและหลักการทางทฤษฎีของผู้ผลิตต้นแบบ
3. ทฤษฎีความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain)
4. ทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์

#### ทฤษฎีและหลักการทำงานของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1

คุณลักษณะของปืนเล็กยาว M16 และ M16 A1

1. ปืนเล็กยาว M16 และ M16 A1 เป็นปืนที่มีน้ำหนักเบา ระบายความร้อนด้วยอากาศ ทำงานด้วยแรงดันก๊าซ ป้อนกระสุนด้วยซองกระสุน ยิงได้ทั้งระดับสะโพก และประทับไหล่ยิง โดยสามารถเลือกยิงได้ทั้ง อัตโนมัต และกึ่งอัตโนมัต เป็นอาวุธประจำกายใช้ในการโจมตีและตั้งรับต่อเป้าหมายในสนามรบ
2. ข้อแตกต่างระหว่างแบบ M16 และ M16A1 คือ M16 ไม่มีชุดส่งลูกเลื่อนไปข้างหน้า จะมีเฉพาะแบบ M16A1 ซึ่งทั้งสองแบบสามารถติดตั้งศูนย์แบบ LOW LIGHT LEVEL SIGHT ASSEMBLY (ศูนย์เรืองแสง)



ภาพประกอบ 1 แสดงปืนเล็กยาว M16 และ M16A1



ภาพประกอบ 2 แสดงชุดส่งโครงนำลูกเลื่อน

### ข้อมูลทางเทคนิคของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1

#### น้ำหนัก

แบบ M16 ไม่มีซองกระสุนและสายสะพาย 6.35 ปอนด์

แบบ M16A1 ไม่มีซองกระสุนและสายสะพาย 6.55 ปอนด์

#### ความยาว

พร้อมปลดกลดแสง 39 นิ้ว

พร้อมติดตั้งดาบปลายปืน 44.25 นิ้ว

#### อัตราเร็วในการยิงสูงสุด

กึ่งอัตโนมัติ 45/65 นัด/นาที

อัตโนมัติ 150/200 นัด/นาที

ระยะยิงหวังผลไกลสุด 460 เมตร

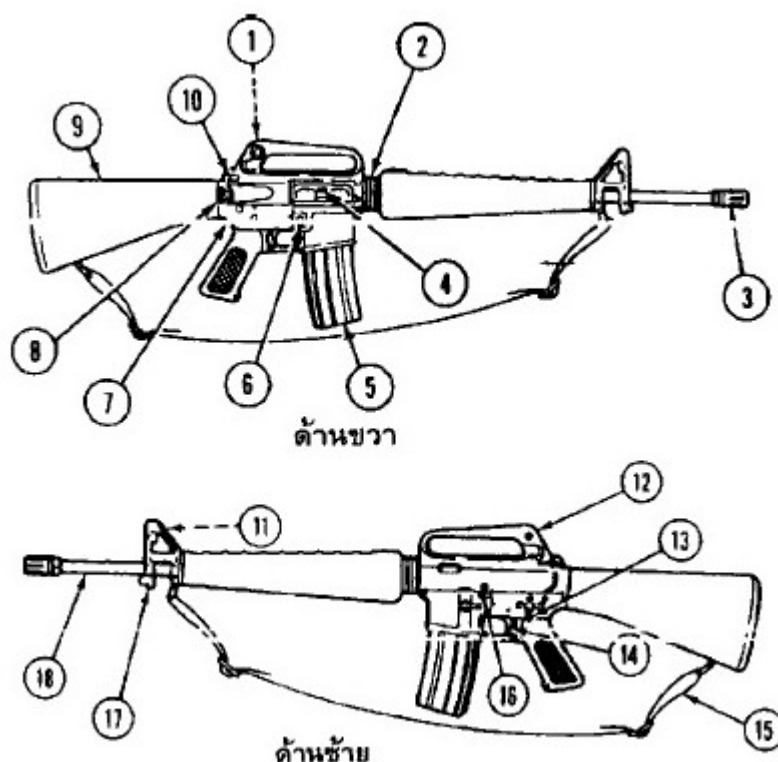
#### หลักการทำงาน

- ดึงคันรั้งลูกเลื่อนมาด้านหลังพานท้ายปืนจนสุด (ค้างไว้) กดปุ่มแวนคันรั้งลูกเลื่อน เพื่อ ค้างลูกเลื่อนไว้ แล้วดันคันรั้งลูกเลื่อนกลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิมและปล่อยปุ่มแวนคันรั้งลูกเลื่อน
- ปรับคันบังคับการยิงให้อยู่ในตำแหน่งห้ามไก (SAFE)
- ใส่ซองกระสุนที่บรรจุกระสุนที่ต้องการจะยิงเข้าช่องใส่ซองกระสุน แล้วกดปุ่มปล่อยคันรั้งลูกเลื่อนบรรจุกระสุนเข้าสู่รังเพลิง
- หันกระบอกปืนไปยังทิศทางเป้าหมาย เลื่อนคันบังคับการยิงจากตำแหน่งห้ามไก (SAFE) ไปยัง ตำแหน่ง SEMI หรือ AUTO ยกปืนขึ้นประทับไหล่

- เล็งเป้าหมายให้ศูนย์หน้าและศูนย์หลังตรงเป้าหมายแล้วเหนี่ยวไก
- การเหนี่ยวไกทำให้เข็มแทงชนวนเป็นอิสระวิ่งไปกระทบชนวนท้ายปลอกกระสุน ชนวนท้ายปลอกไปจุดดินส่กระสุนเกิดการเผาไหม้
- ก๊าซจากการเผาไหม้ดันให้หัวกระสุนวิ่งไปตามลำกล้อง ซึ่งมีเกลียวอยู่ภายใน
- เกลียวในลำกล้องทำให้หัวกระสุนหมุนและมีเสถียรภาพในขณะที่เคลื่อนที่สู่เป้าหมาย
- เมื่อกระสุนเคลื่อนที่เกือบพ้นปลายปากลำกล้อง ก๊าซจากการเผาไหม้ดินส่กระสุนจะผ่านช่องก๊าซจากลำกล้องเข้าไปยังท่อนำก๊าซ ซึ่งอยู่เหนือลำกล้อง และเคลื่อนที่เข้าไปยังชุดโครงนำลูกเลื่อน ทำให้ลูกเลื่อนพลิกและปลดกลอน ดึงปลอกกระสุนนัดที่ยิงไปแล้วให้ถอยออกมา แล้วสลัดทิ้งเมื่อผ่านช่องคัดปลอกกระสุน จากนั้นลูกเลื่อนก็จะเคลื่อนไปข้างหน้าแล้วก็บรรจุกระสุนนัดใหม่เข้าสู่รางเพลิง เพื่อพร้อมที่จะยิงกระสุนในนัดต่อไป

หมายเหตุ ชองกระสุนสามารถใส่ได้ในขณะลูกเลื่อนเปิดหรือปิด

รายละเอียดและการใช้คันควบคุมและเครื่องขับเคลื่อน



ภาพประกอบ 3 แสดงรายละเอียดของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 คันควบคุม ปืนเล็กยาว M16 และ M16A1

- ศูนย์หลัง (1) ใช้สำหรับปรับเส้นเล็งและใช้ยิงในระยะ 0 – 460 เมตร
- แหวนยึดประกับรองมือ (2) ยึดประกับรองมือให้อยู่กับที่
- ปลอกกลดแสง (3) ลดแสงที่ปากลำกล้องขณะทำการยิง
- ฝาปิดช่องคัดปลอก (4) ป้องกันฝุ่นละอองไม่ให้เข้าไปในโครงปืนส่วนบน ปิดช่องนี้ตลอดเวลา

เมื่อไม่ได้ใช้อาวุธ

- ช่องกระสุน (5) บรรจุ 30 นัด
- ปุ่มปลดช่องกระสุน (6) ปลดช่องกระสุนออกจากปืนเมื่อกด
- โครงปืนส่วนล่างและชุดโครงต่อท้ายลำกล้อง (7) ช่วยควบคุมปืนขณะทำการยิง และเป็น

ที่เก็บชุดทำความสะอาดปืน

- ส่องโครงนำลูกเลื่อน (เฉพาะ M16A1) (8) เพื่อให้แน่ใจว่า ลูกเลื่อนเลื่อนไปข้างหน้าสุด

และขัดกลอน

- พานท้าย (9) ทำให้ปืนมีความมั่นคงในการเล็งและยิง
- คันรั้งลูกเลื่อน (10) ขึ้นนกเมื่อจะทำการยิงหรือเอากระสุนออก
- ศูนย์หน้า (11) ปรับได้สำหรับมุมสูง-ต่ำ
- หุ้วปืน (12) ใช้เคลื่อนย้ายปืน
- คันเลือกตำแหน่งการยิง (13) ทำให้ปืนพร้อมยิงแบบกึ่งอัตโนมัติหรืออัตโนมัติ หรือทำ

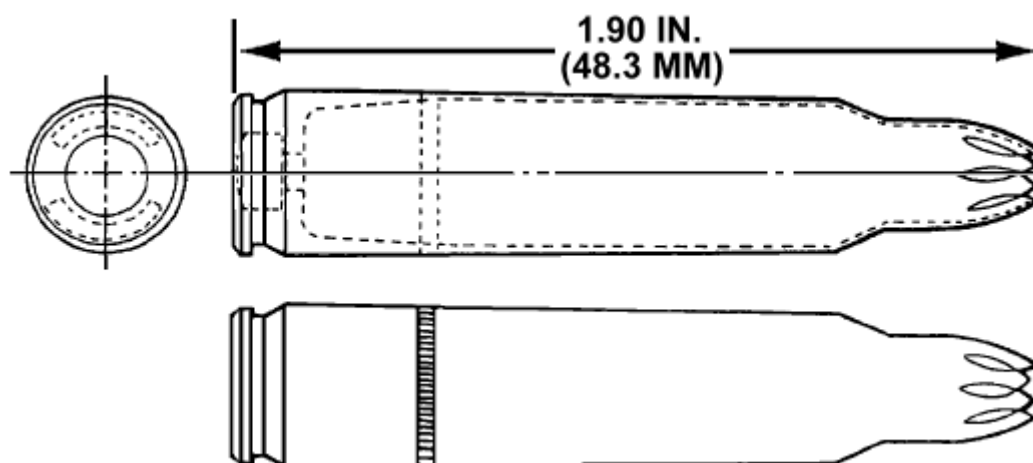
การห้ามไกปืนไว้

- ไกปืน (14) ควบคุมการยิงปืน
- สายสะพาย (15) ใช้สะพายปืนกับหัวไหล่
- เหล็กหยุดหน้าลูกเลื่อนหรือปุ่มแขวนคันรั้งลูกเลื่อน (16) หยุดลูกเลื่อนไว้ด้านหลังเมื่อกระสุนหมดซอง เมื่อกดจะทำให้ ชุดโครงนำลูกเลื่อนเคลื่อนที่ไปข้างหน้า
- เตื่อยึดดาบปลายปืน (17) ยึดดาบปลายปืนให้อยู่กับที่
- ชุดโครงปืนส่วนบนและชุดลำกล้อง (18) นำหัวกระสุนไปตามทิศทางที่ยิง

#### **ข้อมูลกระสุนซ้อมรบ M200 Cartridge, 5.56mm, Blank, M200**

กระสุนซ้อมรบแบบ M200 สามารถใช้ได้กับปืนกลเบาแบบ M249 และปืนเล็กยาวที่มีขนาดลำกล้อง 5.56 มิลลิเมตร (ปืนเล็กยาว M16/A1/A2/A3/A4 and M4-series weapons) โดยจะต้องใช้เครื่องทวิแรงถอยประกอบเข้ากับปลายของลำกล้องปืนบริเวณปลอกกลดแสง เพื่อให้การยิงกระสุนซ้อมรบครบตามวงจรการทำงานของปืน

วัตถุประสงค์ของการใช้กระสุนซ้อมรบ คือ เพื่อให้การจำลองการยิงในการฝึกสมจริง และในบางโอกาสใช้กับการยิงสุด เพื่อใช้ในงานราชพิธี และพิธีต่างๆ โดยกระสุนซ้อมรบแบบ M200 จะมีหัวกระสุนเหมาะสำหรับการฝึกเท่านั้น ไม่เหมาะที่จะใช้ในสนามรบ



ภาพประกอบ 4 แสดงกระสุนซ้อมรบแบบ M200

Type Classification: STD - AMCTC 5942. Type Classification Date: Prior to 1977. Unit cost: \$0.09 (Fiscal Year 2005).

## ทฤษฎีของการอนุรักษ์พลังงานและหลักการทางทฤษฎีของผู้ผลิตต้นแบบ

### กฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับปริมาตรควบคุม กฎของนิวตัน

อัตราสุทธิของพลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม – อัตราสุทธิของพลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุม = อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิพลังงานภายในปริมาตร

### วิธีการหาค่าความดันลดในระบบท่อลมอัด

การหาค่าความดันลดในระบบท่อลมอัดก็เพื่อที่จะได้ประมาณว่าความดันสุดท้ายที่จุดใช้งานจะเพียงพอหรือไม่ หรือในทางกลับกันหากทราบว่า ความดันคงที่ จุดใช้งานสุดท้ายเป็นเท่าไรจะทราบว่า ความดันของเครื่องอัดลมควรจะเป็นเท่าไร

ความดันลมขึ้นกับขนาดท่อ ความยาวท่อ ความเร็วของผิวท่อ ความเร็วของลมในท่อ การออกแบบให้ค่าความดันลดพอเหมาะยังจะทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอัดลมอย่างไม่เหมาะสมด้วย

$$\text{สูตรหาค่าความดันลด} \quad \Delta P = \frac{\sigma v^{1.85} \cdot L}{d^5 P_1} \quad (1)$$

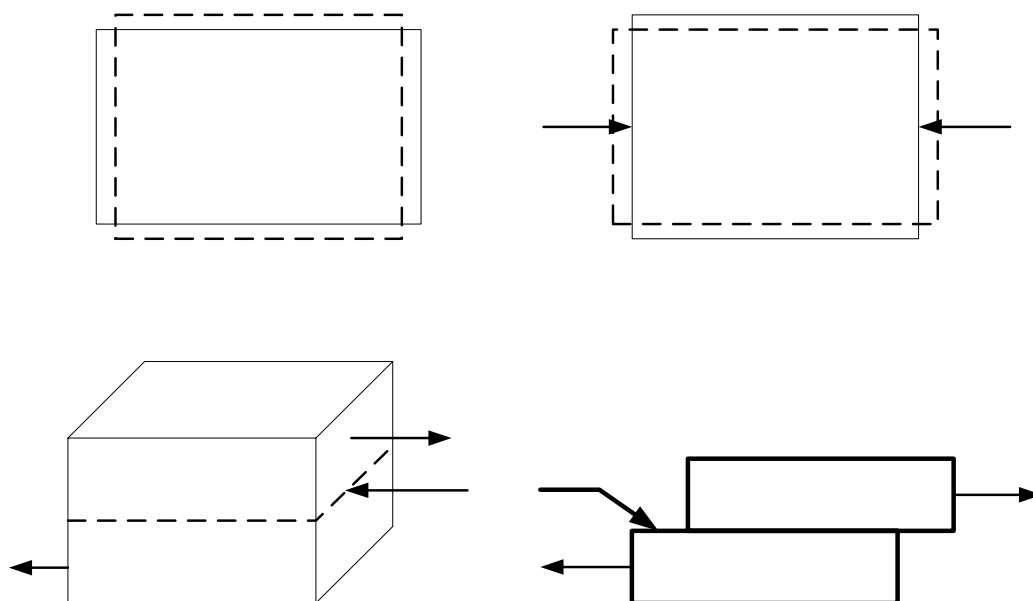
|            |     |                                       |
|------------|-----|---------------------------------------|
| $\Delta P$ | แทน | ความดันลด                             |
| $\sigma$   | แทน | ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน        |
| $V$        | แทน | อัตราการไหลของลม, ลูกบาศก์เมตร/วินาที |
| $L$        | แทน | ความยาวของท่อ, เมตร                   |
| $d$        | แทน | เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, มิลลิเมตร    |
| $P_1$      | แทน | ความดันที่เครื่องอัดลม, bar           |

### ทฤษฎีความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain)

1. คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) ฯลฯ เป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้นๆ สามารถที่จะรับหรือทนทานแรง หรือพลังงานเชิงกลภายนอกที่มากกระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อเราจะเลือกใช้วัสดุใดๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือ คุณสมบัติเชิงกลของมัน การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักร อุปกรณ์นั้นๆ เป็นสำคัญ

2. ความเค้น (Stress) ตามความเป็นจริงความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอก มีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากกระทำ

2.1 ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังแสดงใน ภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ

2.2 ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังภาพประกอบ 5 ข้อ b

2.3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) ใช้สัญลักษณ์  $\tau$  เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังภาพประกอบ 5 ข้อ c มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อมๆ กัน

### 3. ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

3.1 การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

a) แรง

3.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินขีดจำกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าขีดจำกัดการคืนรูปแล้ว วัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร หรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation)

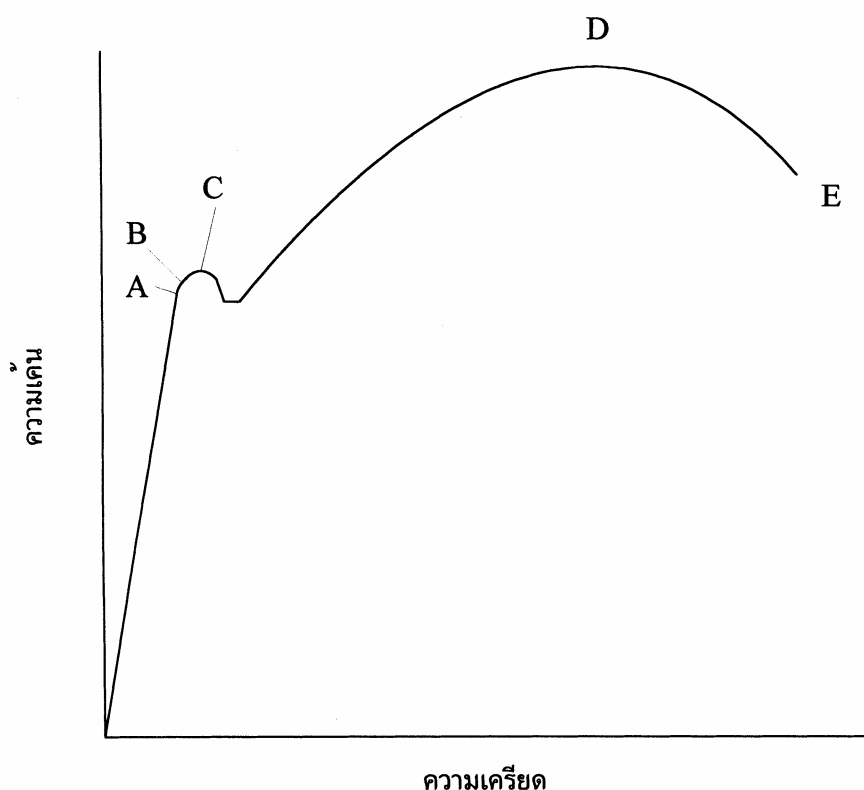
นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลิเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่า ความเครียดกึ่งยืดหยุ่น จะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

1. **แบบเส้นตรง** ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไป ต่อความยาวเดิม

2. **แบบเฉือน** เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ

#### 4. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

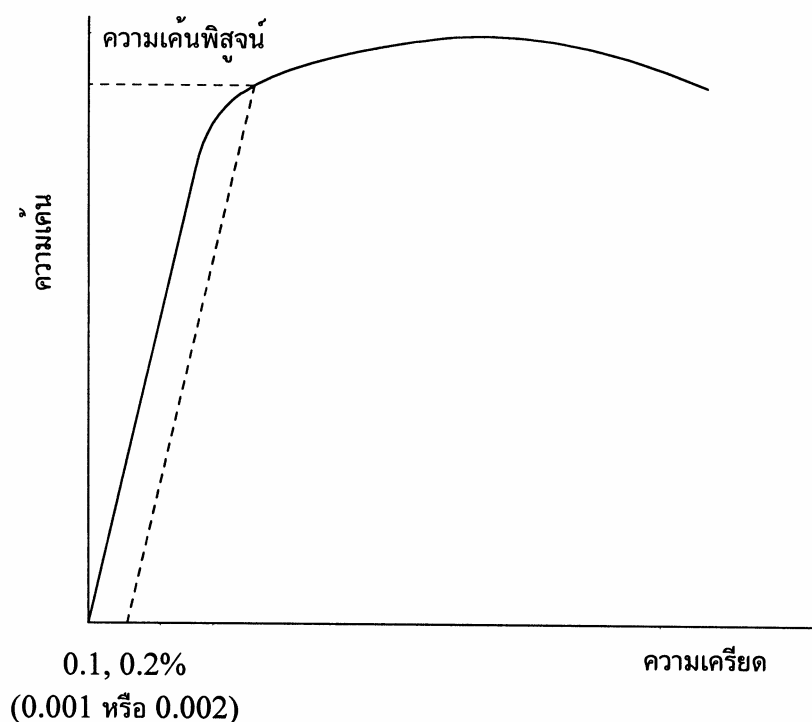
ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ภาพประกอบ 6 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้อธิบายความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



ภาพประกอบ 6 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

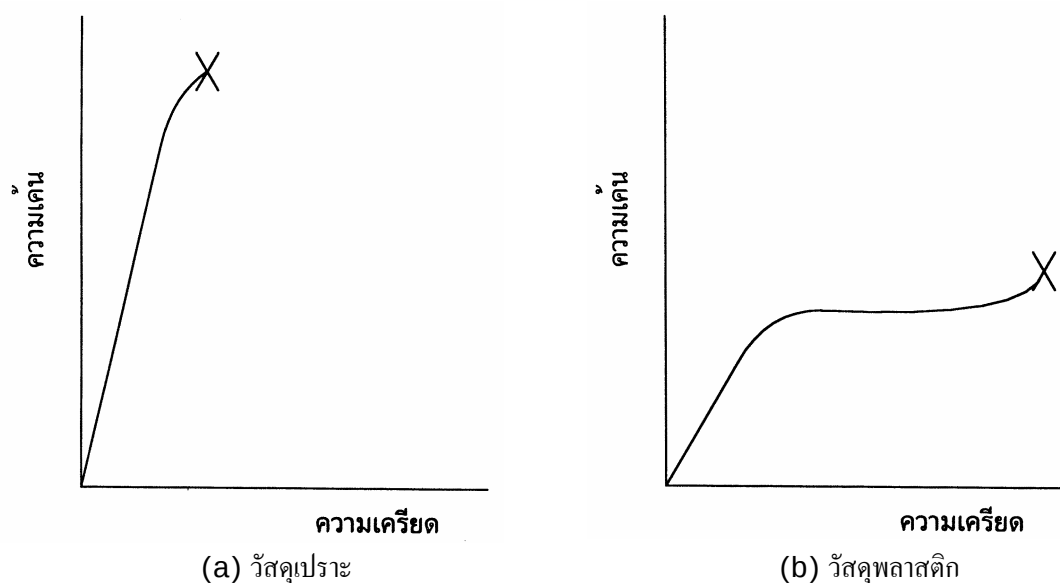
วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้ง ดังภาพประกอบ 6 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุต่างๆ มาตรฐานต่างๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials) BS (British Standards) JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วยจากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออก จนถึงจุดๆ หนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่า ความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่า พิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือ เมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้ จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ว วัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้ เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่า จุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้ มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูป กับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่คงใช้ประโยชน์ได้ โดยไม่เกิดการเสียหาย วัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 – 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังภาพประกอบ 7 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้ จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกได้มากๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้นอกจากนี้ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยคำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เองที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ หรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้ จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่ยังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้น ค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังภาพประกอบ 8 ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่างๆ ได้อีกดังนี้ คือ

**1. ความเหนียว (Ductility)** ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า  $% E_L$  มากกว่า เพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือ ถ้าวัสดุมีความเหนียวดี ( $% E_L$  สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

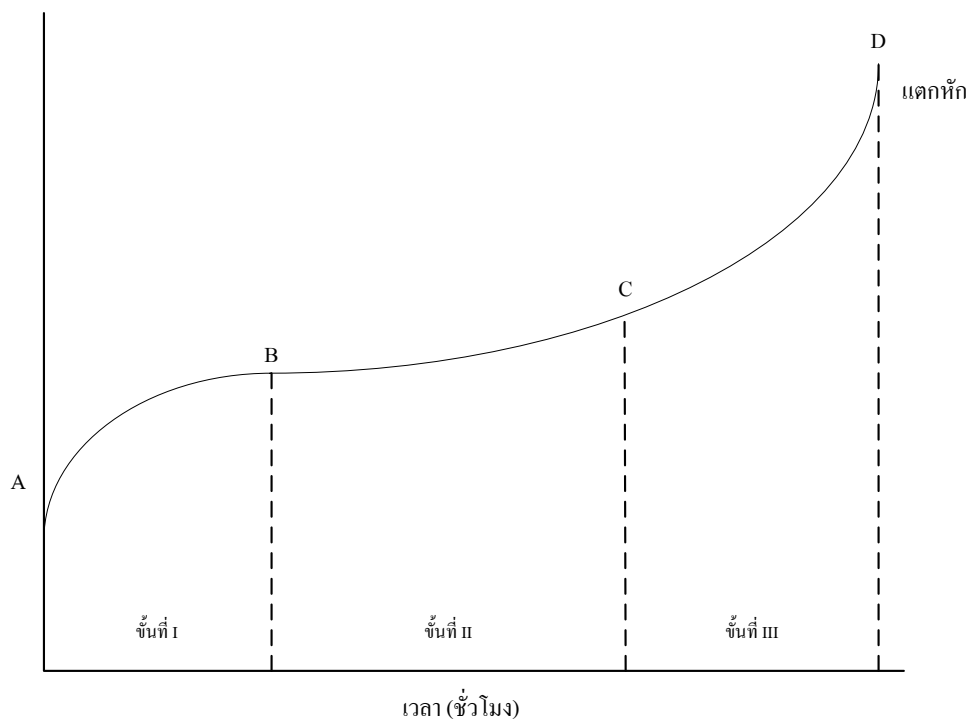
**2. Modulus of Elasticity or Stiffness** ภายใต้อิทธิพลของแรงที่กระทำ ซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm<sup>2</sup> หรือ GPa ถ้าแรงที่กระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G) ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิลาสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่างๆ ดัง ตาราง 1 จะแสดงตัวอย่างค่า E และ G ของวัสดุ ต่างๆ ไว้

ตาราง 1 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

| วัสดุ                               | Modulus of elasticity 10 <sup>6</sup> psi | Shear Modulus 10 <sup>6</sup> psi |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|
| Aluminum alloy                      | 10.5                                      | 4.0                               |
| Copper                              | 16.0                                      | 6.0                               |
| Steel (plain carbon and low alloys) | 29.0                                      | 11.0                              |
| Stainless Steel (18.8)              | 28.0                                      | 9.5                               |
| Titanium                            | 17.0                                      | 6.5                               |
| Tungsten                            | 58.0                                      | 22.8                              |

**3. ความคืบ (Creep)** วัสดุส่วนใหญ่เมื่ออยู่ภายใต้แรงที่มากกว่าค่าที่ก่อให้เกิดหยุ่น หากทิ้งไว้นานๆ แล้ว ก็อาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร หรือแบบพลาสติกได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ด้วยปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า ความคืบ ปริมาณของความคืบที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของ

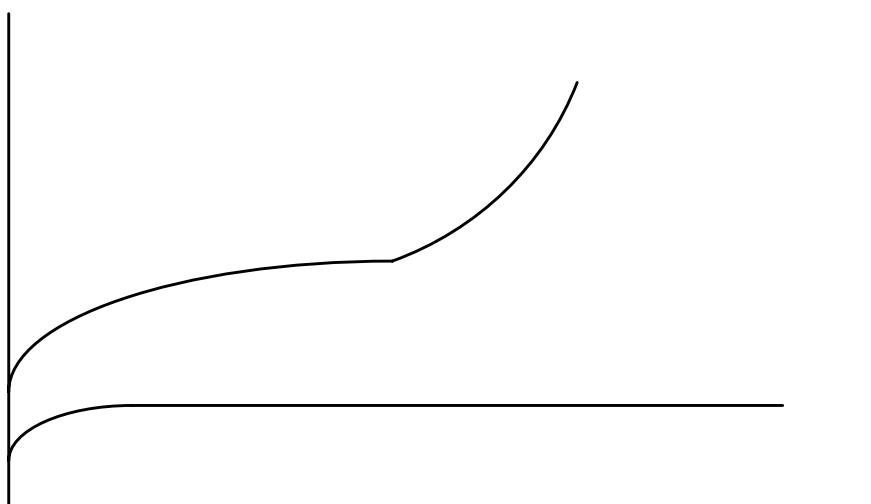
วัสดุ ปริมาณของความเค้น อุณหภูมิและเวลา หากเราให้สภาวะที่เหมาะสมและมีเวลาเพียงพอ ความคืบ จะเกิดขึ้นได้จนครบ 3 ขั้นตอน ดังที่แสดงใน ภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 เส้นโค้งความคืบ

เมื่อเราใช้แรงกระทำที่จะเกิดความเครียด (OA) ขึ้นทันที ซึ่งค่าความเครียด OA นี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และสภาวะที่ให้ (ปริมาณของแรงกระทำ ความเค้นและอุณหภูมิ) และจะมี ความสัมพันธ์กับค่า Modulus of elasticity (E) ของวัสดุนั้น หลังจากนั้นวัสดุก็จะเริ่มเกิดความคืบในขั้นที่ 1 ซึ่งอัตราการเกิดความเครียดจะค่อยๆ ลดลง (AB) ในขั้นที่ 2 (BC) อัตราการเกิดความเครียดจะคงที่ และเป็นอัตราการเกิดความเครียดต่ำสุด ในขณะที่วัสดุเกิด Creep ขึ้น อัตราการเกิดความเครียดนี้ เรียกว่า Minimum Creep Rate จากนั้นเมื่อถึงขั้นที่ 3 (CD) อัตราการเกิดความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จน วัสดุขาดหรือแตกออกจากกัน ที่จุด D การเกิดความคืบไม่จำเป็นจะต้องครบทั้ง 3 ขั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะ และเวลาที่ใช้ ดัง ภาพประกอบ 10

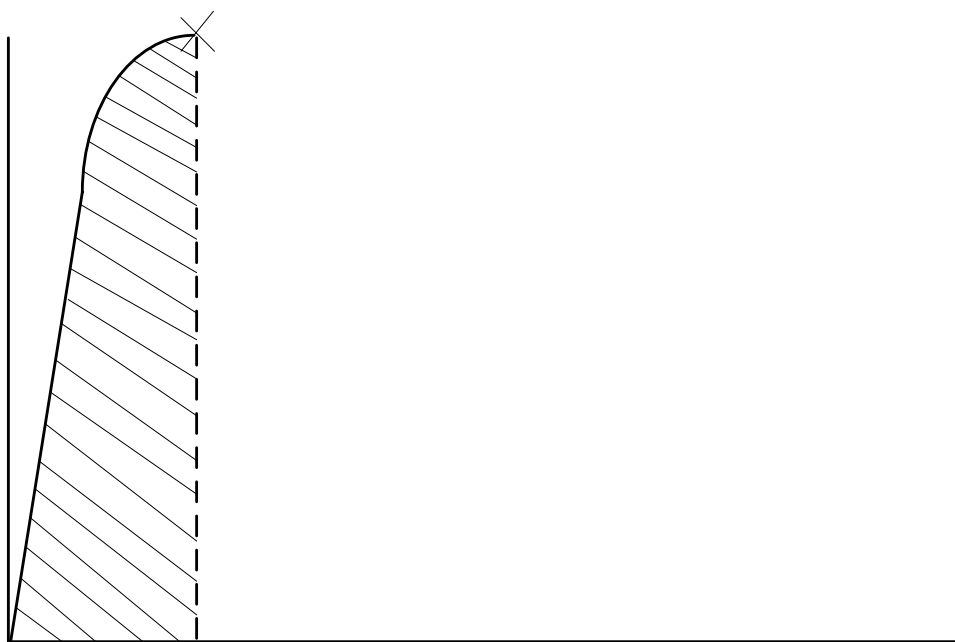
ความเค้น



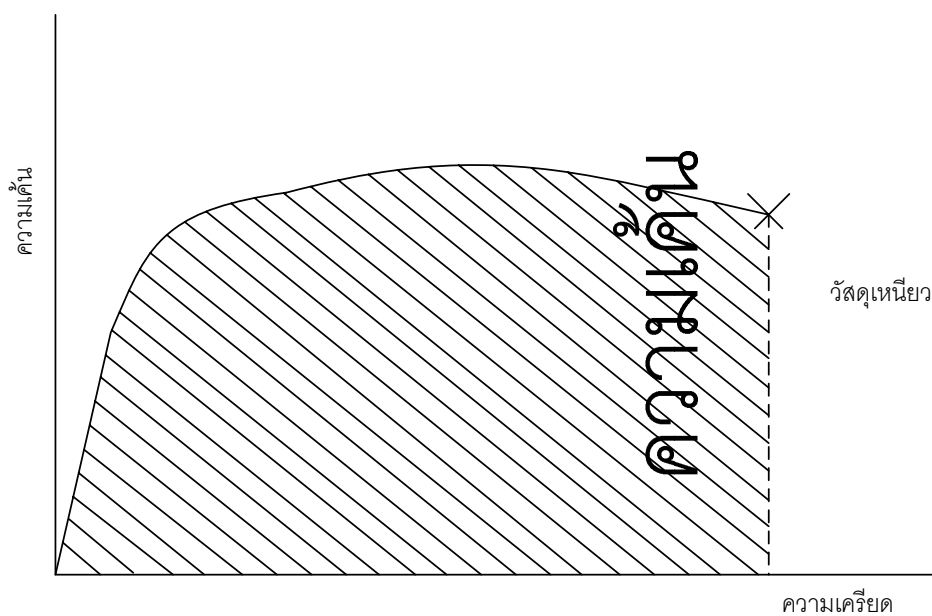
ภาพประกอบ 10 Creep Curve ที่ Condition ต่างกัน

เส้นบน ถ้าเราให้แรงกระทำที่ทำให้เกิดความเค้นให้อุณหภูมิสูงพอจะเกิดความคืบจนครบ 3 ชั้น แต่เส้นล่างนั้น ความเค้นหรืออุณหภูมิต่ำจะมีแค่ 2 ชั้น นั่นคือจะไม่เกิดการแตกหักขึ้นในกรณีของพวกโพลีเมอร์ อาจเกิดความคืบขึ้นได้ แม้ที่อุณหภูมิห้อง แต่โลหะส่วนใหญ่ และพวกเซรามิกจะไม่เกิดความคืบที่อุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าที่อุณหภูมิสูงก็อาจเกิดได้ ดังนั้น การใช้พวกโลหะ หรือเซรามิกที่อุณหภูมิสูงจะต้องนำคุณสมบัติในการเกิดความคืบมาพิจารณาด้วย

**4. ความแกร่ง (Toughness)** ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก เรียกว่า ความแกร่ง (Toughness) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเหนียวของมัน โดยกำหนดว่า Modulus of Toughness เท่ากับพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of Toughness นี้ จะแสดงถึงงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้จนทำให้เกิดการแตกหักด้วย ข้อกำหนดนี้ จะแสดงให้เห็นถึงข้อแตกต่างระหว่างวัสดุเหนียวที่มีความแกร่งสูงและวัสดุเปราะที่มีความแกร่งต่ำด้วย ดัง ภาพประกอบ 11 และ ภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 11 คุณสมบัติความแข็งแรงของวัสดุเปราะ



ภาพประกอบ 12 คุณสมบัติความแข็งแรงของวัสดุเหนียว

**5. ความล้า (Fatigue)** เมื่อวัสดุถูกแรง ซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) มากจะทำกลับไปกลับมาซ้ำๆ กันก็อาจจะเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดความล้า หรือ Fatigue ขึ้น ความล้าที่เกิดในวัสดุนี้ เป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่างๆ เพราะตลอดอายุงานของเครื่องจักร เช่น เครื่องยนต์ สวิตช์รีเลย์ ฯลฯ จะต้องเกิดความเค้นสลับไปสลับมาเป็นล้านๆ ครั้ง ทำให้เกิดการล้าขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆ ของมันได้ ขบวนการเกิดความล้าที่แท้จริงยังไม่เป็นที่เข้าใจกันนัก แต่จากการศึกษาพบว่า ความล้าจะเกิดเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีความเค้นรวมศูนย์ (Stress Concentration) ในบริเวณนั้น และในระยะที่สอง เมื่อมีความเค้นเข้าไปซ้ำมารอยแตกนี้ ก็จะโตขึ้นเรื่อยๆ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด วัสดุก็จะแตกหักจากกัน ถ้าเรากำหนดจำนวนรอบของความเค้นที่ทำซ้ำไปซ้ำมาแล้ว (โดยปกติจะใช้ที่ค่า  $10^6$  รอบ) ค่าความเค้นที่จะทำให้วัสดุแตกหักได้ที่จำนวนรอบของความเค้นรอบนั้นๆ เรียกว่า Fatigue Strength สำหรับโลหะโดยเฉพาะพวกเหล็ก จะมีค่าความเค้นอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าใช้ความเค้นต่ำกว่านี้แล้ว ไม่ว่าจำนวนรอบของแรงกระทำจะเป็นเท่าใด วัสดุจะไม่แตกออก ค่าความเค้นนี้เรียกว่า Endurance Limit

**6. ความแข็ง (Hardness)** ความแข็งเป็นความต้านทานการเจาะทะลุ (Penetration) หรือการเสียดสี (Abrasion) ของวัสดุ ความแข็งของวัสดุเกี่ยวพันกับการจับตัวของอะตอม และโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกันกับความแข็งแรง ดังนั้น ความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้น นั่นคือ พวกโลหะและเซรามิกจะแข็งกว่าพวกโพลีเมอร์ การทดสอบความแข็ง มีอยู่หลายวิธี แต่ที่ใช้กันมากที่สุดมี 3 วิธี คือ

6.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) วิธีการ คือ ใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 กก. สำหรับวัสดุแข็ง และ 500 กก. สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) นำค่าที่ได้ไปคำนวณ จะได้ค่าความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell Hardness Number) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกดไม่มากนัก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม

6.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบแบบนี้คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้ และชนิดหรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบร็อคเวลที่จะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่า วัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อย คือ 10 กก. จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60 – 100 กก. ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้ อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบร็อคเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่างๆ ได้มากกว่า สามารถ

วัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

6.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้ คล้ายกับบริเนลในแง่ที่ว่า ค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปปิระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5 – 120 กก. ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ

## ทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์

ทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาแรงมากที่สุดที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ต้นแบบเสียหายจากการใช้งานจริง

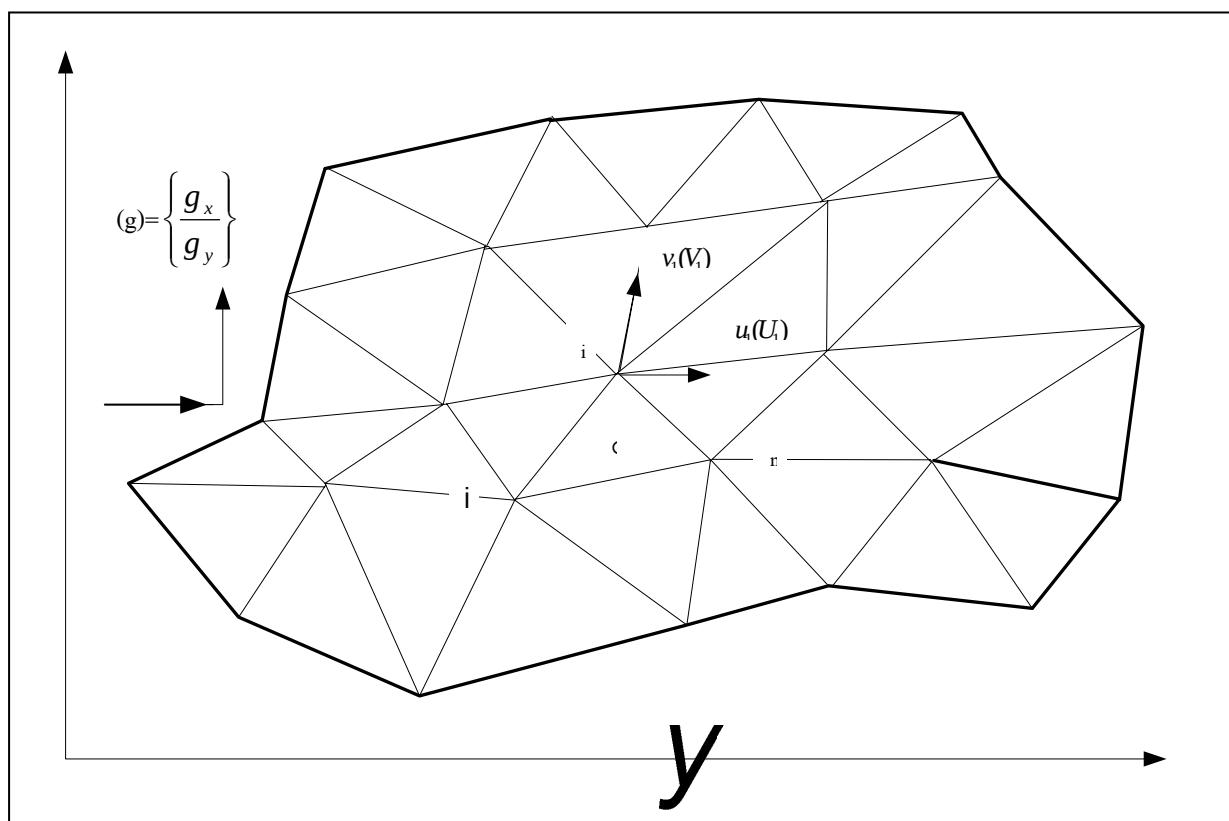
สำหรับท่อมาตรฐานและสำหรับระบบลมที่อัดที่มีความดันและอุณหภูมิตามปกติ ค่า  $\sigma$  จะมีค่าประมาณ  $1.6 \times 10^8$  การใช้หลักการนี้ในวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสรุปขั้นตอนในการแก้ปัญหาอย่างใดอย่างหนึ่งได้ 6 ขั้นตอน คือ

1. การแบ่งแยกส่วนที่ต่อเนื่องกัน (Discrimination of the continuum) คือการแบ่งแยกชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ตลอดทั้งชิ้นงาน ในกรณี 2 มิติเอลิเมนต์อาจจะเป็นสามเหลี่ยม กลุ่มของสามเหลี่ยมหรือรูปสี่เหลี่ยม ภาพประกอบ 13 แสดงรูปทรงเรขาคณิตที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ
2. การเลือกรูปแบบของการกระจัด (Selection of the displacement models)
3. การหาเอลิเมนต์แมทริกซ์ความแข็งเกร็ง (Element stiffness matrix) โดยใช้หลักการแปรผัน (Variational principle)

$$[k]\{x\} = \{F'\} \quad (2)$$

4. สมการพีชคณิตที่ประกอบเข้าด้วยกันสำหรับส่วนแยกที่ต่อเนื่องกันทั้งหมด

$$[k]\{U\} = \{R\} \quad (3)$$



ภาพประกอบ 13 รูปทรงเรขาคณิตที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ

5. วิธีการแก้ไขสำหรับการกระจัดที่ไม่รู้ค่า (Solution for unknown displacements)
6. การคำนวณของเอลิเมนต์ความเค้นและความเครียดที่ตรงกันกับการคำนวณการกระจัดที่จุดต่อ

ตัวอย่างเช่น ช่วงยืดหยุ่นที่ไม่ซับซ้อน (Simple elastic) ความเค้นในระนาบ (Plane stress) ความเครียดในระนาบ (Plane strain) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

1. แบ่งชิ้นงานเป็นเอลิเมนต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 13 เอลิเมนต์ e กำหนดจุด i, j, m ซึ่งเส้นขอบเขตเป็นเส้นตรง
2. กำหนดการกระจัดที่จุดใดจุดหนึ่งภายในเอลิเมนต์ เป็นเวกเตอร์ในแนวคอลัมน์ (Column Vector)

$$\{f\} = [N]\{\delta\}^e = [N_i N_j N_m \dots] \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_m \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ในกรณีของความเค้นในระนาบ (Plane Stress) ซึ่งแทนการเคลื่อนย้ายในแนวตั้ง และแนวนอนของจุดภายในเอลิเมนต์

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

การกระจัด (Displacements) ที่จุด i

$$\{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ฟังก์ชัน  $N_p, N_j, N_m$  เป็นการกระจัดของจุดที่เหมาะสม ใส่แทรกในสมการ (4)

ในกรณี  $N_i(x_i, y_i) = I$  (Identity matrix) และ  $N_i(x_m, y_m) = 0$  ซึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันเชิงเส้นที่เหมาะสมของ  $x$  และ  $y$

3. เปลี่ยนการกระจัดภายในเอลิเมนต์เข้าไปในความเครียดโดยใช้ความสัมพันธ์ทั่วไป เขียนในการใช้ระบบสัญลักษณ์ของแมทริกซ์ (Matrix notation)

$$\varepsilon = \{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^e \quad (7)$$

สำหรับความเครียดในระนาบ (Plane strain,  $\{\varepsilon\}$ ) คือ เวกเตอร์ความเครียด

$$\varepsilon = \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$[B]$  คือแมทริกซ์จำนวนเชิงทศ (Set of number) ซึ่งสัมพันธ์ต่อความเครียดกับการกระจัด เช่น  $b_i = y_j - y_m$  สำหรับกรณีของสามเหลี่ยมเท่านั้น และตัวคูณ  $\frac{1}{2}\Delta$  แทนตำแหน่งส่วนปลายของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{b_i u_i + b_j u_j + b_m u_m}{2\Delta} \quad (9)$$

$u$  = การกระจัด และพื้นที่ของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมคือ

$$\Delta = x_i y_m + x_m y_j + x_j y_i - (x_m y_i + x_i y_m + x_i y_j) \quad (10)$$

[B] คือเมทริกซ์ที่หาได้สมการ (7) เมื่อฟังก์ชัน  $N_p, N_r, N_m$  ได้กำหนดมาให้

4. เปลี่ยนความเครียดไปเป็นความเค้นเฉพาะแห่ง (Local stress) โดยใช้

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (11)$$

หรือในการใช้ระบบสัญลักษณ์ของความสมบูรณ์ (Equivalent notation)

$$\sigma = D\varepsilon \quad (12)$$

กรณีความเครียดในระนาบช่วงยืดหยุ่นเมื่อ  $\tau_{xz}, \tau_{yz}$  และ  $\varepsilon_{zz} = 0, G = E / 2(1 - \nu)$

สามารถเขียนสมการได้

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{xx} + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \varepsilon_{yy} + 0 \quad (13)$$

$$(14)$$

$$\tau_{xy} = 0 + 0 + \frac{E}{2(1-\nu)} \varepsilon_{xy} \quad (15)$$

เขียนในการใช้ระบบสัญลักษณ์ของเมทริกซ์ (Matrix notation) จากรูปสมการ (2) ที่มีกำหนด  $\{\}, [D]$ , และ  $\{\}$  จะได้

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{E\nu}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{E\nu}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1-\nu)} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

[D] คือ ค่าคงที่ของวัสดุที่เหมาะสมที่บรรจุในเมทริกซ์การยืดหยุ่น (Elasticity matrix) นั่นก็คือ ค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น (E) และอัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ ) แทนใน [D]

$$D = [D] = \frac{E}{1-\nu^2} = \begin{Bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

วัสดุเป็นไอโซทรอปิกช่วงยืดหยุ่น สมการที่สำคัญสำหรับความเครียดในระนาบ คือ

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\nu\sigma_y}{E} + \frac{\nu\sigma_z}{E} \quad (18)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\nu\sigma_z}{E} \quad (19)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} + \frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\nu\sigma_y}{E} \quad (20)$$

แก้สมการ (29) แล้วนำค่า  $\sigma_z$  แทนในสมการ (18) และ (19) ทำให้สมการ  $\varepsilon_{xy} - \tau_{xy}$  เพิ่มเข้ามา สมการความเครียดในระนาบรูปแมทริกซ์ คือ

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1-\nu^2}{E} \begin{Bmatrix} 1 & \frac{-\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{-\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{1-\nu} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (21)$$

ในทางกลับกันจะได้

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

แต่ความเครียดสัมพันธ์กับการกระจัดจากสมการ (7) ดังนั้นความเค้นสามารถสัมพันธ์กับการกระจัดตามสมการแมทริกซ์

$$\{\sigma\} = [B][D]\{\delta\}^e \quad (23)$$

5. กำหนดแรงของเอลิเมนต์จากการกระจัด สมมุติฐานว่า แรงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับการกระจัดก่อนการเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ให้แรงตรงส่วนปลายของเอลิเมนต์ e ในภาพประกอบ 13 U<sub>i</sub> คือ การกระจัดเชิงเส้น ความสัมพันธ์ของแรงและการกระจัด คือ

$$\{f'\} = [C]\{u_i\} \quad (24)$$

สมมุติฐานว่าแรงทั้งหมดกระทำที่จุดของเมช (Mesh) ในเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ค่าคงที่จะอยู่ในเทอมทั่วไป คือ

$$2\{f'\} = t[A]\{\sigma\} \quad (25)$$

[A] คือแมทริกซ์ที่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของตำแหน่งจุด i, j และ m ดังภาพประกอบ 13 ซึ่งก็คือ การสลับตำแหน่ง (Transpose) แมทริกซ์ B ในสมการ(32) ไม่นับรวมตัวคูณ  $\frac{1}{2}\Delta$  ซึ่งเป็นการปรับตำแหน่งของจุดต่อ  $\Delta$  คือพื้นที่เอลิเมนต์ในเทอมของค่า  $x_i, x_j, x_m, y_i, y_j$ , และ  $y_m$

$$\{f'\} = [B]^T [D] [B] t \Delta \{\delta\} \quad (26)$$

หรือ

$$\{f'\} = [k] \{\delta\} \quad (27)$$

$[k]$  คือ แมทริกซ์ความแข็งแรงของเอลิเมนต์

6. พิจารณาแรงภายนอกที่กระทำในระบบทั้งหมด ความสัมพันธ์ของแรงกับการกระจัดสำหรับทั้งระบบ คือ

$$\{F'\} = [K] \{\delta\} \quad (28)$$

เมื่อ  $F$  แทนแรงภายนอกที่กระทำบนจุดแต่ละจุดของเมชสามเหลี่ยมทั้งหมด  $[\delta]$  แทนการกระจัดแต่ละจุดจะได้

$$[K] = [k]_N = [B]_N^T [D]_N [B]_N t \Delta \quad (29)$$

$[k]_N$  คือ องค์ประกอบของแมทริกซ์ความแข็งแรงแต่ละค่าซึ่งประกอบเป็นแมทริกซ์ความแข็งแรงรวม (Global stiffness matrix,  $[K]$ ) ด้วยกำลัง  $T$  คือ Transpose ถ้ารู้ค่าของแรงสามารถคำนวณได้จาก

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \{F'\} \quad (30)$$

แต่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นวัสดุจะเป็นพลาสติก (Plasticity) ดังนั้นการรวมแมทริกซ์ช่วงอีลาสติก-พลาสติก (Elasticity-Plasticity) คือ

$$D_{e,p}^* = D - D \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\}^T \cdot D \cdot \left[ A + \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\}^T D \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\} \right]^{-1} \quad (31)$$

$D_{e,p}^*$  คือการวิเคราะห์ทำนองเดียวกันกับแมทริกซ์  $D$  ช่วงอีลาสติกในสมการ (17)

การแปลงเป็นสูตรไฟไนต์เอลิเมนต์ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

สูตรการแปรผัน (Variational formulation) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ก่อนช่วงพลาสติก ความแข็งแรง (Rigid-Plastic) ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เป็นการวิเคราะห์ที่ยังไม่เพียงพอ เพราะว่าการเปลี่ยนรูปไม่ได้มีแบบเดียวเหมือนกับการเปลี่ยนรูปในทางสถิตศาสตร์ (Static) ของของแข็งช่วงพลาสติกความแข็งแรง (Rigid-Plastic solid) ภายใต้อิทธิพลของเงื่อนไขขอบ ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูป

โลหะแผ่นออกจากระบบ (Out-of-plane) เกี่ยวข้องกับขนาดรูปทรงเรขาคณิตระหว่างการเปลี่ยนรูป ถ้าฟังก์ชันทั้งหมดที่เท่ากับผลรวมของตัวสนับสนุนแต่ละเอลิเมนต์  $\phi$  เท่ากับ

$$\pi \cong \phi = \sum_{m=1}^M \phi^{(m)} u^{(m)} \quad (32)$$

เมื่อ  $u^{(m)}$  คือ เวกเตอร์การกระจัดที่เพิ่มเข้ามา (Incremental displacement vector) จุดที่สัมพันธ์กับเอลิเมนต์ที่  $m$

โดยสมมุติให้ความเค้นและงานเสมือนหลักสมมูล (Principle of virtual work) แกนหลักของความเครียดจริงอยู่ในทิศทางเดียวกันกับแผ่นเอลิเมนต์ องค์ประกอบหลักของอัตราความเครียดยังคงไว้ที่อัตราส่วนคงที่ระหว่างช่วงเวลาการเพิ่มที่เล็กละน้อย ฟังก์ชัน  $\phi$  สามารถหาได้โดยรูปแบบรอบแกนสมมาตรของแผ่นบางตามแนวแรง

$$\Phi = \int_V \bar{\sigma} (d\bar{E}) dA + \frac{1}{2} \int H' (d\bar{E}) dA - \int (T + dT) du_j dA \quad (33)$$

$$\text{เมื่อ } d\bar{E} = \sqrt{\frac{2}{3} \Sigma (dE_p)^2}$$

$dE_p$  = องค์ประกอบลอการิทึมความเครียดพลาสติก (Logarithmic plastic strain component)

$\bar{\sigma}$  = ความเค้น (Effective stress)

$t$  = ความหนา (Local sheet thickness)

$dA$  = พื้นที่เพิ่มขึ้นของเอลิเมนต์

$dV = tdA$

$H' = d\sigma / d\epsilon$  = ความชันของเส้นโค้งความเค้นความเครียด

$T$  = แรง (Traction Force)

$du_j$  = การกระจัดที่เพิ่มขึ้นของเอลิเมนต์

ในสมการ (33) เทอมแรกการเปลี่ยนรูปเนื่องจากขนาดพลังงานความเครียด (Strain energy) เทอมที่สองแทนพลังงานความเครียดที่เกี่ยวข้องกับการทำให้แข็งด้วยความเครียด เทอมที่สามแทนงานที่มาจากความเค้นภายนอก (External traction, stresses)

ถ้าทิศทางตามแนวเส้นรอบวง (Circumferential direction) และทิศทางตามแนวเส้นรอบแกนใดๆ (Meridian direction) เป็นทิศทางหลัก แรงเสียดทานระหว่างพื้นรูปโดม (Dome) กับคายในการขึ้นรูปมีน้อยมาก ทิศทางแนวความหนาเป็นทิศทางที่สาม ความเครียดลอการิทึมที่เพิ่มขึ้นอาจจะวัดความเครียดได้จาก

$$dE = \begin{Bmatrix} dE_r \\ dE_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} dE_r \\ dE_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \ln s / s_0 \\ \ln r / r_0 \end{Bmatrix} \quad (34)$$

ถ้าการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้น  $S_0$  คือ ความยาวเอลิเมนต์ที่ไม่เปลี่ยนรูป  $S$  คือความยาวที่มีการยืดตัว  $r_0$  คือ รัศมีก่อนการเปลี่ยนรูป  $r$  คือรัศมีที่มีการเปลี่ยนรูป ตัวห้อย  $r$  และ  $\theta$  แทนทิศทางตามแนวเส้นรอบแกนใดๆ (Meridian direction) และทิศทางตามแนวเส้นรอบวง (Circumferential direction) ตามลำดับ ตามความจริงโลหะแผ่นมีสมบัติของทิศทางที่สมมุติฐานเป็นแอนไอโซทรอปีในแนวตั้งฉาก (Normal anisotropy) ความเค้นและความเครียดที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับเกณฑ์ของฮิลล์ (Hill) จะได้

$$\frac{dE_r}{(1+R)\sigma_\theta - R\sigma_r} = \frac{dE_\theta}{(1+R)\sigma_\theta - R\sigma_r} = \frac{d\bar{E}_\theta}{(1+R)\sigma} \quad (35)$$

เมื่อ  $R$  คือตัวแปรของไอโซทรอปีในแนวระนาบ ซึ่งเป็นอัตราส่วนลอการิทึมของความเครียดแนวความกว้างต่อลอการิทึมของความเครียดแนวความหนาในทิศทางการดึงตามแนวแกน  $\bar{\sigma}$  คือ ความเค้น (Effective stress)  $d\bar{E}$  คือ ความเครียด (Effective strain) หาได้จาก

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_\theta^2 - \frac{2R}{1+R}\sigma_r\sigma_\theta + \sigma_r^2} \quad (36)$$

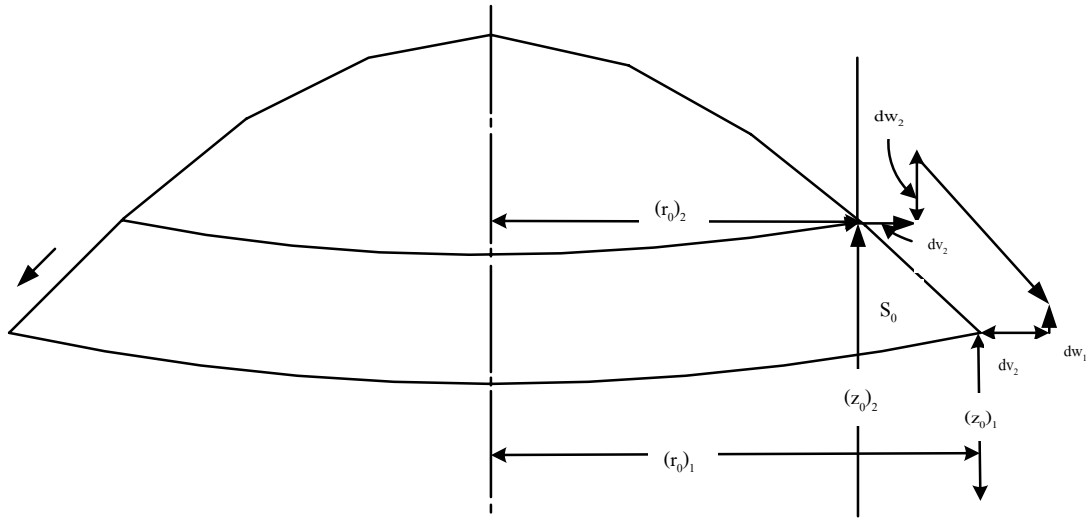
$$d\bar{E} = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sqrt{dE_r^2 + \frac{2R}{1+R}dE_\theta dE_r + dE_\theta^2} \quad (37)$$

ความเครียด (Effective strain,  $d\bar{E}$ ) สามารถเขียนในรูปของแมทริกซ์ คือ

$$d\bar{E} = \sqrt{\frac{2}{3} [dE^T D dE]}^{1/2} \quad (38)$$

เมื่อ  $dE = (dE_r, dE_\theta)^T$

$$D = \frac{3(1+R)}{2(1+2R)} \begin{bmatrix} 1+R & R \\ R & 1+R \end{bmatrix}$$



ภาพประกอบ 14 การประมาณรูปเหมือนของโดมครึ่งทรงกลมโดยวิธีอันดับของ Conical frustum

การประมาณรูปทรงเรขาคณิตโดยวิธีอันดับรูปกรวยเฉพาะปลาย ดังแสดงใน ภาพประกอบ 14 ใช้ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function) หรือฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function) สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ หรือ จุดต่อใดๆ ที่มีการกระจัดที่เพิ่มขึ้น การกระจัดที่เพิ่มขึ้นในเอลิเมนต์เขียนได้จาก

$$u = \begin{Bmatrix} dv \\ dw \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+t'}{2} & 0 & \frac{1+t'}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1+t'}{2} & 0 & \frac{1+t'}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dv_1 \\ dw_1 \\ dv_2 \\ dw_2 \end{Bmatrix} \quad (r' = 1) \quad (39)$$

$$u = Nu^{(m)} \quad (40)$$

เมื่อ  $t'$  คือ จุดตำแหน่งที่เปลี่ยนจากค่า -1 ที่จุด 2 ไปเป็น +1 ที่จุด 1 (ดูภาพประกอบที่ 9)  $dv_i$  และ  $dw_i$  คือ การกระจัดที่เพิ่มขึ้นของจุด  $i$  ในแนวรัศมีและแนวแกนตามลำดับ เนื่องจากการกระจัดเพิ่มขึ้นทั้งหมด ความยาวเอลิเมนต์  $S_0$  คือ

$$S_0 = \sqrt{\{(r_0)_1 - (r_0)_2\}^2 + \{(z_0)_2 - (z_0)_1\}^2} \quad (r' = 1) \quad (41)$$

ความยาวใหม่ที่ยึดตัว  $s$  คือ

$$s = \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (42)$$

เมื่อ  $(r_0)_i$  และ  $(z_0)_i$  คือ ตำแหน่งแนวรัศมีและแนวตั้งของจุด  $i$  ที่รูปร่างภายนอกไม่มีการเปลี่ยนรูป  $(r)_i$  และ  $(z)_i$  คือรูปร่างภายนอกที่มีการเปลี่ยนรูปแต่เอลิเมนต์เป็นเส้นตรงและจุด  $t'$  ในตำแหน่งจุดที่แสดงมีรัศมีรวม  $r_0$  กำหนดโดย

$$r_0 = \left(\frac{1+t}{2}\right)(r_0)_1 + \left(\frac{1-t}{2}\right)(r_0)_2 \quad (43)$$

ตำแหน่งใหม่อนุภาคที่เหมือนกันของค่า  $r$  กำหนดให้โดย

$$r = r_0 + \left(\frac{1+t}{2}\right)dv_1 + \left(\frac{1-t}{2}\right)dv_2 \quad (44)$$

ใช้สมการ (41 – 44) ทั้งหมดแทนเข้าไปในขอบเขตการเพิ่มพลังงานความเครียด สามารถหา  $dE$  ได้จาก

$$dE = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \ln \frac{\{(r_0)_1 - (r_0)_2 + dv_1 - dv_2\}^2 + \{(z_0)_1 - (z_0)_2 + dw_2 - dw_1\}^2}{s_0^2} \\ \frac{1}{2} \ln \frac{r_0 + [(1+t')]dv_1 + [(1+t')/2][(1+t')/2]dv_2}{r_0} \end{array} \right\} \quad (45)$$

การประมาณการเพิ่มความเครียดโดยวิธี Lagrangian ไม่สลับซับซ้อน โดยลอการิทึมความเครียดระหว่างการเพิ่มทีละเล็กทีละน้อย ที่ได้จากสมการ (34) เมื่อ  $s_0$ ,  $s$ ,  $r_0$  และ  $r$  แทนในสมการ (41 – 44) ทั้งหมด

$\phi^{(m)}$  ในสมการ (32) สามารถแทนในเทอมค่าของจุดต่อ จะได้

$$\phi^{(m)} = \int \bar{\sigma} \left( \sqrt{\frac{2}{3}} \right) t [dE^T DdE]^{1/2} dA + \frac{1}{2} \int H' \left( \frac{2}{3} t \right) [dE^T DdE] dA - \int \bar{T}^T Nu^{(m)} dA \quad (46)$$

ส่วนมุมของเอลิเมนต์ที่ประกอบรวมอยู่ด้วย เมื่อ  $dA = r dt'$ ,  $t$  คือ ความหนา วิธีแก้สมการเป็นการกระทำจาก  $t' = -1$  ถึง  $t' = +1$  เมื่อ

$$T = \begin{Bmatrix} T_1 + dT_1 \\ T_2 + dT_2 \\ T_3 + dT_3 \\ T_4 + dT_4 \end{Bmatrix} \quad (47)$$

การทำให้มีค่าน้อยลงของฟังก์ชันดังกล่าวสามารถหาได้โดยใช้ Partial derivative ของ  $\partial\phi^{(m)} / \partial u^{(m)}$  ให้รูปสมการที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน คือ

$$\frac{\partial\phi^{(m)}}{\partial u^{(m)}} = \int \bar{\sigma}\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right) [dE^T DdE]^{-1/2} \frac{\partial(dE)}{\partial u^{(m)}} DdEdA \quad (48)$$

$$+ \int H'\left(\frac{2}{3}t\right) [DdEdA] \frac{\partial(dE)^{(T)}}{\partial u^{(m)}} - \int N^T \bar{T} dA$$

$\partial(dE) / \partial u^{(m)}$  สามารถประเมินโดยใช้สมการที่ 34 จะได้

$$\frac{\partial(dE)}{\partial u^{(m)}} = Q = \left[ \frac{\partial(dE)_i}{\partial u_j^{(m)}} \right] = \begin{bmatrix} \frac{r_1 + r_2}{s^2} & \frac{1+t}{2r} \\ -\frac{(z_2 + z_1)}{s^2} & 0 \\ -\frac{(r_1 + r_2)}{s^2} & \frac{1-t}{2r} \\ \frac{z_2 + z_1}{s^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

สมการที่ 48 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial\phi^{(m)}}{\partial u^{(m)}} = \int \left(\frac{2}{3}t\right) \bar{\sigma}\left[\frac{2}{3}\right] dE^T DdE]^{-1/2} Q DdEdA \quad (50)$$

$$+ \int \left(\frac{2}{3}t\right) H Q DdEdA - \int N^T \bar{T} dA = 0$$

ประกอบเอลิเมนต์ทั้งหมดในรูปแบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในเวลาเดียวกันสามารถหาได้จาก

$$\frac{\partial\Phi}{\partial u} = \sum \frac{\partial\phi^{(m)}}{\partial u^{(m)}} = 0 \quad (51)$$

สมการ (51) สามารถแก้ปัญหโดยวิธี Newton-Raphson โดยกำหนดค่าเริ่มต้น  $\bar{u}$  สำหรับค่าจริง  $u_0$  และไม่ต้องทำในเทอมอันดับสอง (Second Order) และอันดับที่สูงขึ้นไป (Higher order) ของ  $\Delta u = u_0 - \bar{u}$  ในการขยายของ Taylor หาสมการความแข็งแกร่งเชิงเส้น (Linear stiffness equation) ของ

$$P\Delta u = H - f \quad (52)$$

เมื่อ  $P$  คือแรงที่กระทำบนพื้นที่ครึ่งทรงกลม (Hemispherical punch)

$$P = \Sigma p^{(m)}, H = \Sigma H^{(m)}, f = \Sigma f^{(m)} \quad (53)$$

อธิบายตามสมการที่มาก่อนสามารถแสดงได้ดังนี้คือ

$$\frac{\partial^2 \phi^{(m)}}{\partial u_i^{(m)} \partial u_\psi^{(u)}} = p^{(m)} = \frac{2}{3} \int \frac{1}{dE} \left\{ (\bar{\sigma} + Hd\bar{E}) \left( K - \frac{2bb^T}{3d\bar{E}} \right) + \frac{2}{3} \frac{Hbb^T}{d\bar{E}} \right\} t dA \quad (54)$$

เมื่อ

$$b = QDdE, \quad K = QdQ^T \quad (55)$$

$$Q = \frac{\partial(dE)}{\partial u^{(m)}} \quad (56)$$

สามารถแสดงได้นั้นคือ

$$\frac{\partial \phi^{(m)}}{\partial u_i^{(m)}} = H^{(m)} - f^{(m)} \quad (57)$$

เมื่อ

$$H^{(m)} = \frac{2}{3} \frac{1}{dE} (\partial + Hd\bar{E}) b t dA \quad (58)$$

$$f^{(m)} = \int N^T \bar{T} dA \quad (59)$$

การประเมินด้วยการอินทิกรัลโดยใช้สูตรหาพื้นที่ของเกาส์ (Gaussian quadrature formulas) และการเบนเข้าหากัน (Convergence) เป็นการตรวจสอบโดย Fractional norm

รวมสมการสำหรับเอลิเมนต์ ดังนั้น สมการที่หาได้สำหรับใช้แก้ปัญหาชั่วคราวก่อนดังเช่น สมการ(60)

$$P^{(*)} \Delta u = f - H^* \quad (60)$$

เมื่อเริ่มต้นคำนวณการคาดคะเนปริมาณจะใช้เป็นค่าเริ่มต้น

กระบวนการการขึ้นรูปโลหะมีความแตกต่างกัน 3 วิธี รอยโป่งไฮโดรสแตติกของแผ่นที่ใช้การยึดด้วยพื้นที่ครึ่งทรงกลมและการตีปรอว์ด้วยพื้นที่ครึ่งทรงกลม มีการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้อธิบายมาแล้วนั้น ให้ผลสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง สรุปว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วง Rigid-Plastic สามารถใช้ในการแก้ปัญหาการขึ้นรูปโลหะแผ่นอย่างมีประสิทธิภาพและมีความเที่ยงตรงพอสมควร

## บทปริทัศน์วรรณกรรม

เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่ไม่มีแพร่หลายในประเทศไทย และเป็นการวิจัยที่ใช้ในการกิจทางการทหาร ดังนั้นการหาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงมีไม่มากนัก ที่นำมากล่าวในหัวข้อนี้ เป็นข้อมูลบางส่วนที่เกี่ยวข้องหรือมีส่วนคล้ายคลึงทั้งส่วนภายในและต่างประเทศ กับการใช้งาน การทดสอบและผลการทดลองใช้เครื่องทวิแรงถอย หรือเป็นข้อคิดเห็นของผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับเครื่องทวิแรงถอยแบบต่างๆ และความคิดเห็นของผู้ที่ทำงานหรือเคยใช้งานเครื่องทวิแรงถอยแบบต่างๆ ซึ่งพอที่จะกล่าวได้โดยสังเขป ดังนี้

หน่วยฝึกนักศึกษาวิชาทหาร จังหวัดทหารบกสระแก้ว<sup>(1)</sup> ได้พัฒนาเครื่องช่วยฝึก จัดทำเครื่องทวิแรงถอยของปืนเล็กยาว M16 ปืนกล M60 เพื่อใช้ในการฝึกทางยุทธวิธีทำให้ฝึกได้เหมือนจริง



ภาพประกอบ 15 ปืนกลทวิความถอยของปืนเล็กยาว M16 ปืนกล M60

เอ็ดเวิร์ด เจ (Edward M. J.) กล่าวว่า ปืนพกอัตโนมัติมีการปรับปรุงที่จะใช้กับกระสุนซ้อมรบ รวมไปถึงการมีประกายไฟจากปากลำกล้อง ซึ่งประกายไฟที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดระหว่างหัวเวลาที่ลำกล้องเคลื่อนที่ไปข้างหลังแล้วเกิดการบรรจุกระสุนนัดต่อไป และกลับมาที่ตำแหน่งเดิม เพื่อพร้อมที่จะทำการยิงในนัดต่อไป ซึ่งการที่จะทำให้เกิดประกายไฟและการบรรจุกระสุนในนัดต่อไปของปืนพกนั้น ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องทวิแรงถอย เนื่องจากการทำงานของปืนพกแตกต่างจากการทำงานของปืนเล็กยาว M16 และ M16A1

คลิน แม็คคี (Clint McKee) กล่าวว่า เครื่องทวิแรงถอย ที่ครอบคลุมขนาดของลำกล้องเกือบทั้งหมดนั้น เป็นเครื่องทวิแรงถอยที่ดีชนิดหนึ่ง โดยควรที่จะมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.195 – 0.2 นิ้ว สำหรับลูกกระสุนซ้อมรบแบบใหม่ที่มีแจกจ่ายในกองทัพ และขอแนะนำว่าสำหรับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 0.175 นิ้ว ถ้าหากใช้กับปืนเล็กยาว ที่บรรจุในนัดที่สอง แต่ไม่บรรจุในนัดที่สาม จนถึงนัดที่แปด แต่ควรใช้กับกระสุนซ้อมรบแบบใหม่ที่มีแจกจ่ายในกองทัพ แต่ที่สำคัญก็คือ การปรับท่อนี้ว่า อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องหรือไม่

เบลงค์ ไฟริง แอตแทชเม้นท์ (Blank-firing-attachment) กล่าวว่า เครื่องทวิแรงถอยเป็นโลหะขนาดเล็กที่นำไปประกอบไว้ที่ปลายของลำกล้อง เพื่อเป็นการลดอันตรายจากการใช้กระสุนซ้อมรบ เป็นสิ่งจำเป็นในการยิงแบบอัตโนมัติ โดยที่เพิ่มแรงดันภายในลำกล้องให้เพียงพอต่อวงจรรอบของการทำงาน และยังเป็นส่วนในการป้องกันอันตรายจากการกระจายของเศษดินปืนที่ออกมาจากปลายลำกล้องที่เป็นสาเหตุของการบาดเจ็บ ในกองทัพบกอังกฤษ จะประกอบเข้ากับปลายของลำกล้องก่อนที่จะทำการบรรจุด้วยกระสุนซ้อมรบ ทาด้วยสีที่เห็นได้ชัดเจน เพื่อเป็นการตรวจสอบให้แน่ใจก่อนการใช้กระสุนซ้อมรบ และไม่ใช่กับการยิงด้วยกระสุนจริง เครื่องทวิแรงถอยนี้เริ่มมีใช้ในช่วงปลายของสงครามโลกครั้งที่สอง สามารถใช้ได้กับอาวุธหลายแบบ เช่น ปืนเล็กยาว M16 ปืน M4 Carbine และ ปืน SA – 80

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับการออกแบบและการคำนวณค่าแรงดันของเครื่องทวิแรงถอยสามารถรับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ ค่าแรงดัน 52,000 psi ต้องมีค่าที่ไม่ทำความเสียหายกับอุปกรณ์ต้นแบบโดยการคำนวณเทียบกับค่า Design กับได้จากการคำนวณโดย ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้การทำงานวิจัย ดังนี้

1. ปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ตาม ภาพประกอบ 16
2. เครื่องทวิแรงถอยจากต้นแบบและเครื่องทวิแรงถอยจากการสร้างตาม ภาพประกอบ 17
3. โปรแกรม Solid Works Simulation
4. โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

### อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

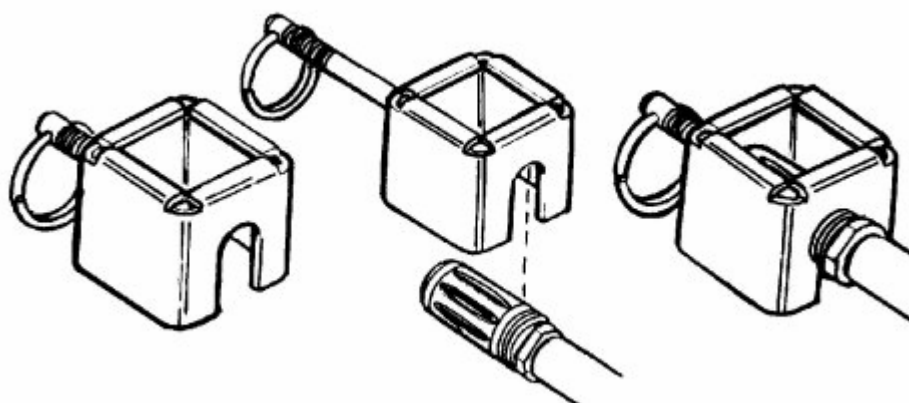
- |                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. ปืนเล็กยาว M16 และ M16A1                                  | 1 กระบอก  |
| 2. กระสุนซ้อมรบแบบ M200                                      | 200 นัด   |
| 3. เครื่องทวิแรงถอยที่ใช้ในกองทัพบกไทย จาก กรมสรรพาวุธทหารบก | 1 ชิ้น    |
| 4. อุปกรณ์ที่ใช้ผลิตแม่แบบ                                   |           |
| 4.1 โลหะแผ่น ขนาด $10 \times 10$ นิ้วหนา $1/8$ นิ้ว          | 1 แผ่น    |
| 4.2 โลหะตันทรงกระบอกขนาด $1 \frac{1}{8}$ นิ้ว ยาว 3 นิ้ว     | 1 แท่ง    |
| 5. เครื่องวัดแรงดันภายในลำกล้อง จาก กรมสรรพาวุธทหารบก        | 1 เครื่อง |
| 6. โปรแกรมในการออกแบบ (Solid Works Simulation)               | 1 โปรแกรม |
| 7. โปรแกรมการคำนวณ (ไฟไนต์เอลิเมนต์)                         | 1 โปรแกรม |
| 8. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมอุปกรณ์                            | 1 เครื่อง |
| 9. แบบบันทึกแรงดันภายในลำกล้อง จาก กรมสรรพาวุธทหารบก         | 1 เครื่อง |



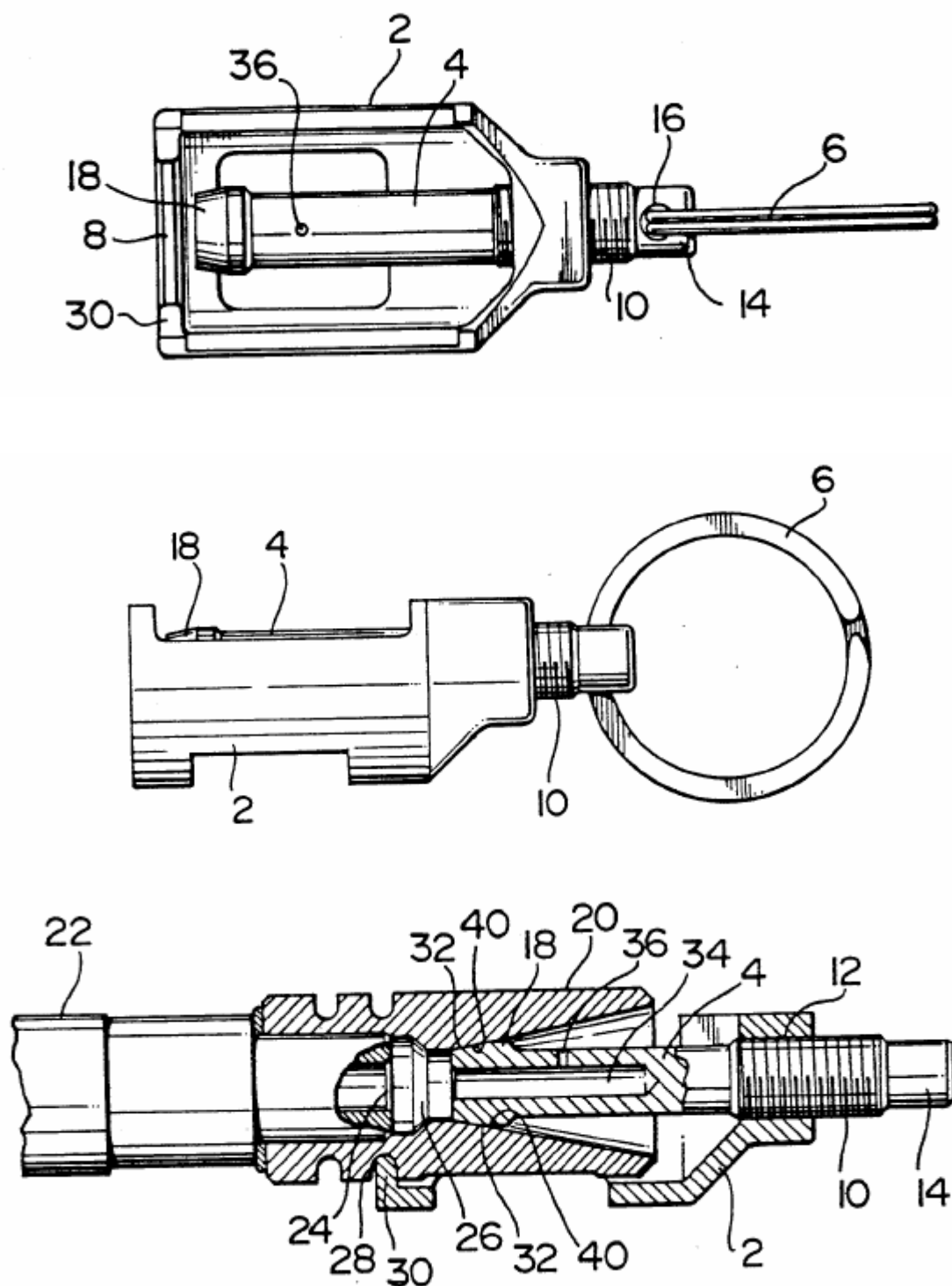
ภาพประกอบ 16 แสดงปืนเล็กยาว M16 A1



ภาพประกอบ 17 การประกอบเครื่องมือแรงด้อยจากของจริง



ภาพประกอบ 18 การประกอบเครื่องมือแรงด้อยเข้ากับปืน



ภาพประกอบ 19 ภาพตัดขวางเครื่องทวิแรงถอยจากของจริง

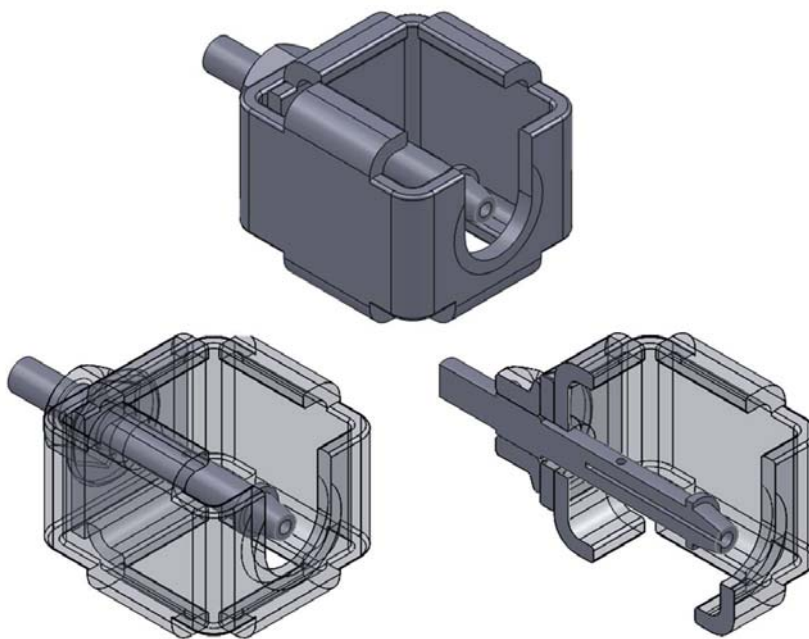
## วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัย แบ่งเป็น 5 ส่วนดังนี้

### 1. การออกแบบ

1.1 ออกแบบเครื่องทวิแรงถอยตามแบบของจริงที่มีใช้ในกองทัพกไทย

1.2 สร้างรูปภาพเสมือนโดยใช้โปรแกรม Solid Works Simulation (ตามภาพประกอบ 20) เพื่อวิเคราะห์ปัญหารูปร่างชิ้นงานที่มีความซับซ้อนในหนึ่ง สอง และสามมิติ ภายใต้ภาระโหลดที่แตกต่าง แล้วการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามทฤษฎีของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และใส่ค่าตัวแปรจากค่าจริง จากค่าที่วัดได้จากการยิง และค่าจากผู้ผลิตกระสุน

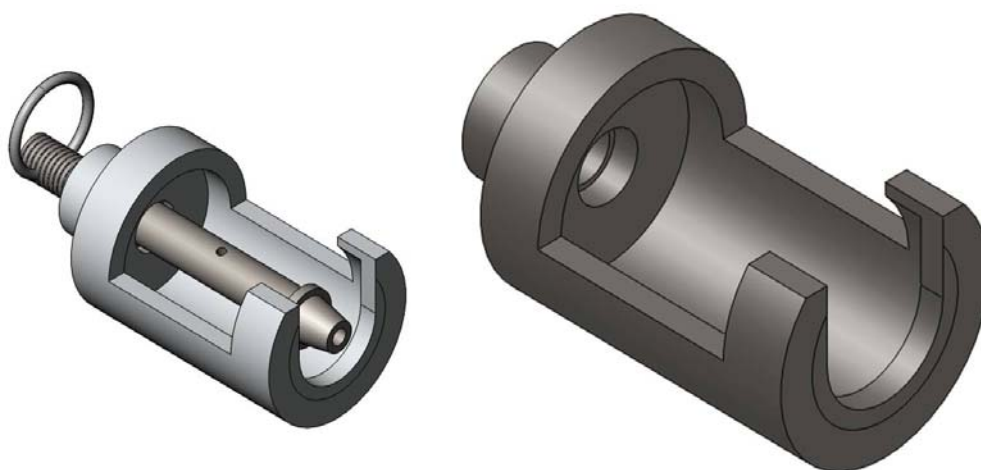


ภาพประกอบ 20 สร้างรูปภาพเสมือนโดยใช้ Solid Works Simulation

### 1.3 เปรียบเทียบกับค่าแรงดันจริงจากผู้ผลิตกระสุนจริง

## 2. การออกแบบรูปแบบอื่นๆ

### 2.1 การออกแบบเครื่องทวิแรงถอยรูปแบบอื่นๆ



ภาพประกอบ 21 สร้างรูปภาพเสมือนโดยใช้ Solid Works Simulation

2.2 สร้างรูปภาพเสมือนโดยใช้ Solid Works Simulation (ตามภาพประกอบ 21) เพื่อวิเคราะห์ปัญหารูปร่างชิ้นงานที่มีความซับซ้อนในหนึ่ง สอง และสามมิติ ภายใต้ภาระโหลดที่แตกต่าง แล้วการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามทฤษฎีของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และใช้ค่าตัวแปรจากค่าจริง จาก ค่าที่วัดได้จากการยิง และค่าจากผู้ผลิตกระสุน เพื่อหาขนาดต่างๆ ของต้นแบบ

### 2.3 เปรียบเทียบกับค่าแรงดันจริงจากผู้ผลิตกระสุนจริง

## 3. เลือกแบบที่เหมาะสมและสามารถรับแรงดันได้

### 3.1 ทดสอบความเค้นและความเครียดของชิ้นงาน

### 3.2 ทดสอบตามแบบ (Non Fillet) โดยไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.3 ทดสอบตามแบบโดยไฟไนต์เอลิเมนต์

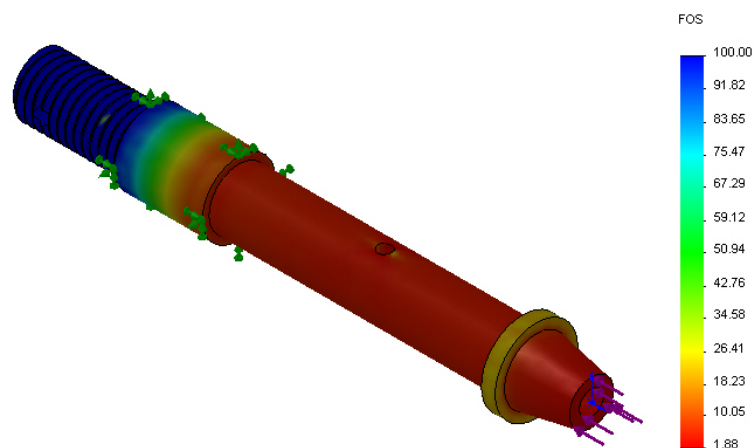
### 3.4 ทดสอบตามแบบโดยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาความล้า (Fatigue)

## 4. สร้างเครื่องทวิแรงถอยต้นแบบ

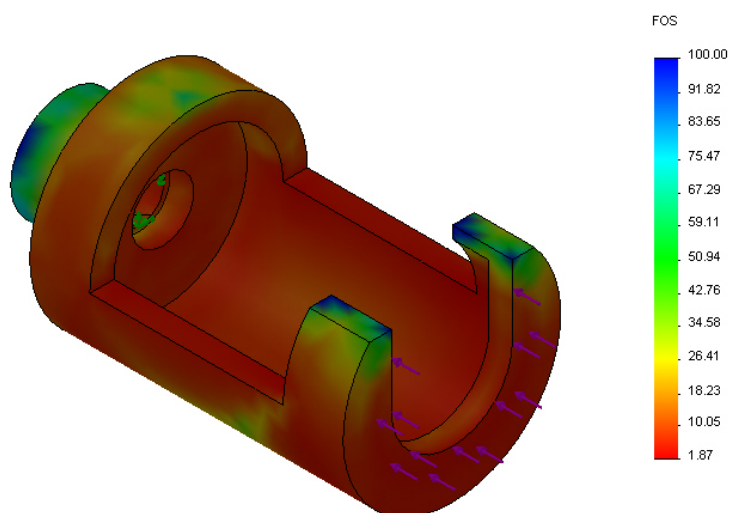
## 5. ทดสอบการทำงานจริงของเครื่องทวิแรงถอยกับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1

### 5.1 วิเคราะห์หาค่าความเค้นและความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์

Model name: ammunition-rev2  
Study name: Study 1  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 1.9

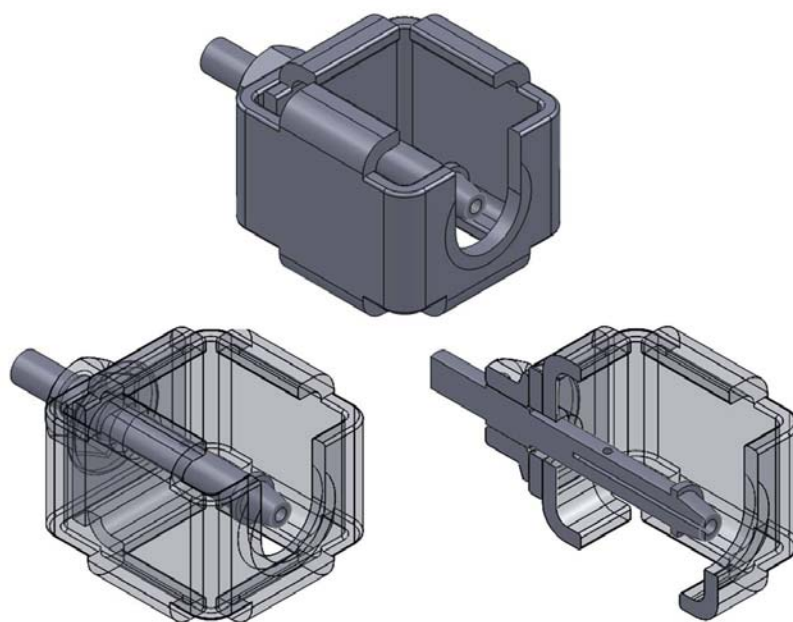


iv  
Study name: Study 1  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 1.9



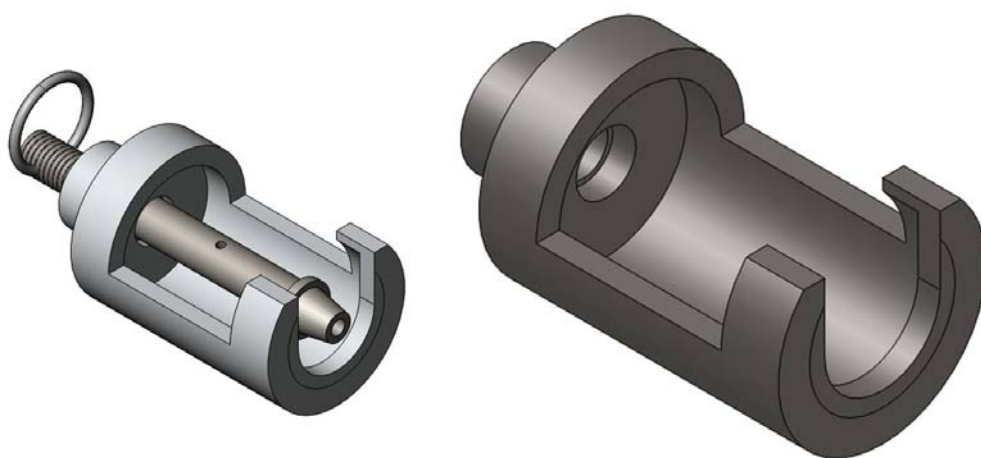
ภาพประกอบ 22 วิเคราะห์ความเค้นโดยไฟไนต์เอลิเมนต์

## 5.2 แบบจำลองที่เหมือนของจริง



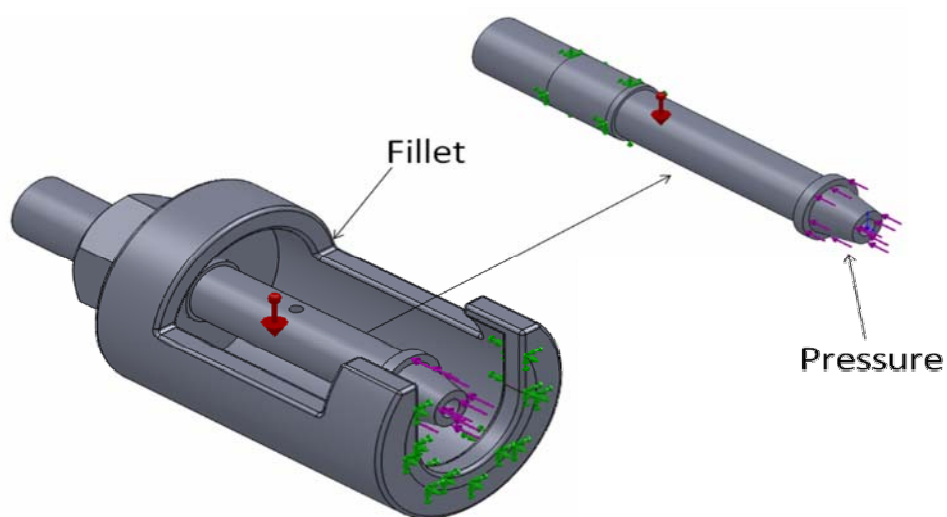
ภาพประกอบ 23 สร้างแบบจำลองที่เหมือนจริง

## 5.3 แบบจำลองแบบทรงกระบอก



ภาพประกอบ 24 สร้างแบบจำลองของรูปทรงกระบอก

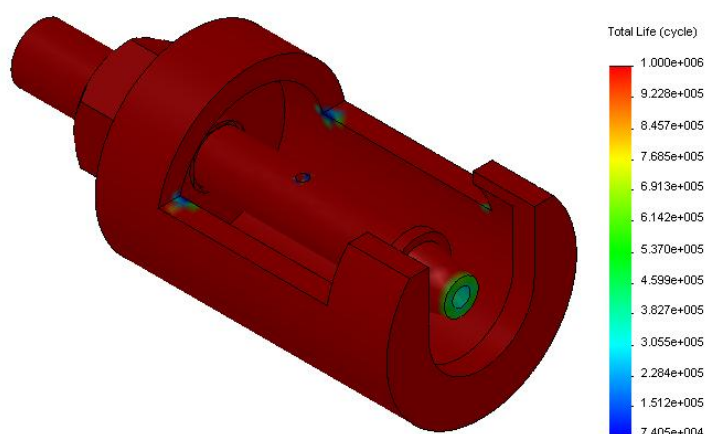
#### 5.4 แบบจำลองแบบมีส่วนโค้ง (Non Fillet)



ภาพประกอบ 25 วิเคราะห์ความเค้นโดยเพิ่ม Fillet

#### 5.5 แบบจำลองที่รับแรงกระทำซ้ำๆ (Fatigue)

Model name: housing\_2-Fatigue  
Study name: Fatigue  
Plot type: Fatigue Results2



Educational Version. For Instructional Use Only

ภาพประกอบ 26 วิเคราะห์ความเค้นที่รับแรงกระทำซ้ำๆ

## บทที่ 4

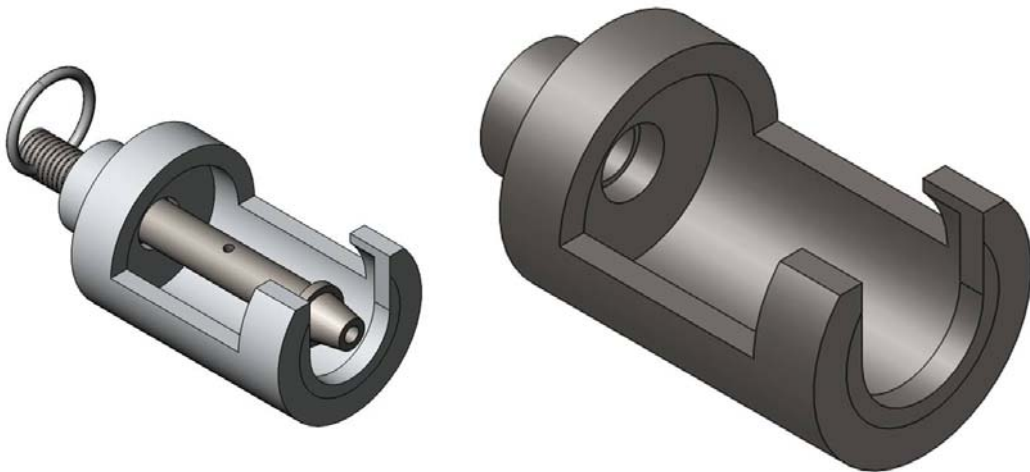
### ผลการทดสอบ

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการสร้างเครื่องทวิแรงถอยโดยการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ จากการใช้โปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อผลิตเครื่องต้นแบบของเครื่องทวิแรงถอยขึ้นมาแล้ว จึงทำการทดสอบเข้ากับปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ด้วยการยิงจากลูกกระสุนซ้อมรบแบบ M200

จากการทำการวิจัยได้นำข้อมูลที่มีมาคำนวณ เพื่อหาขนาดที่สามารถรับแรงดันได้ ดังนี้

#### คำนวณจากไฟไนต์เอลิเมนต์

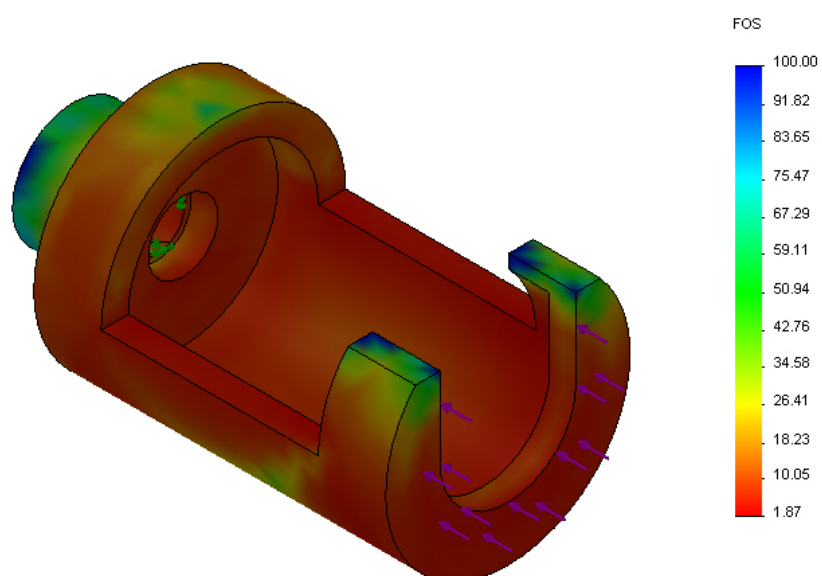
1. สร้างรูปตามแบบจริงโดยโปรแกรม Solid Works Simulation เพื่อจำลองแบบขึ้นมา



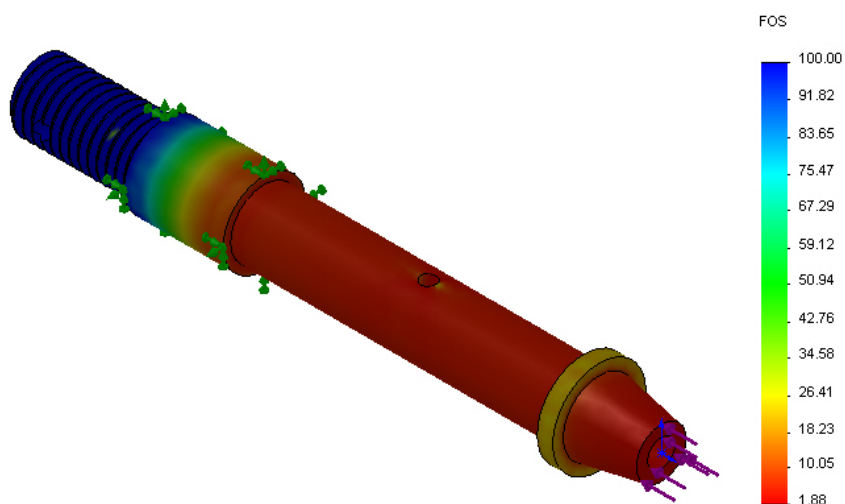
ภาพประกอบ 27 สร้างต้นแบบโดยโปรแกรม Solid Works Simulation เพื่อจำลองแบบขึ้นมา

2. นำแบบที่ได้จาก Solid Works Simulation มาใส่ค่าตัวแปรของวัสดุที่ใช้ทำและแรงกระทำที่มีต่อต้นแบบ เพื่อจะได้ทราบขนาดของต้นแบบที่สามารถรับแรงกระทำได้

Model name: housing-rev1  
Study name: Study 1  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 1.9

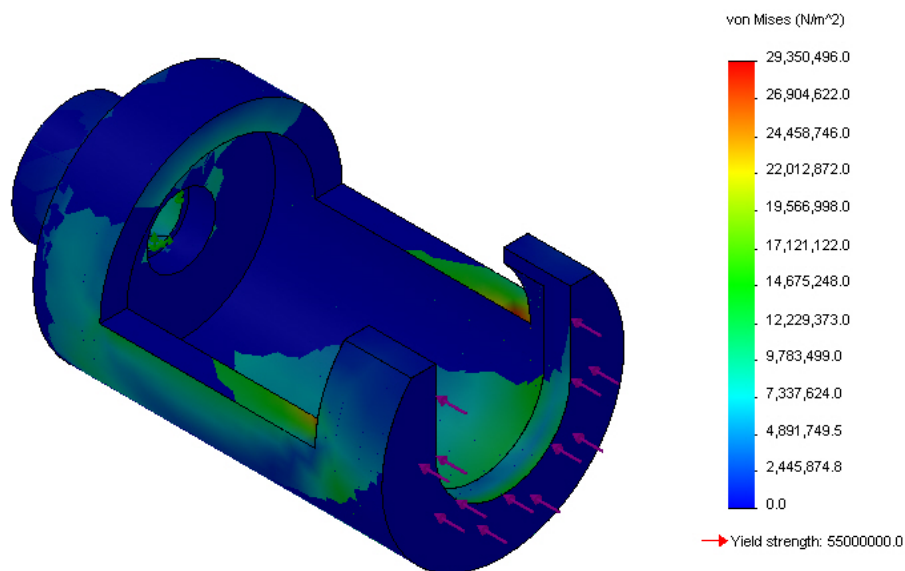


Model name: ammunition-rev2  
Study name: Study 1  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 1.9

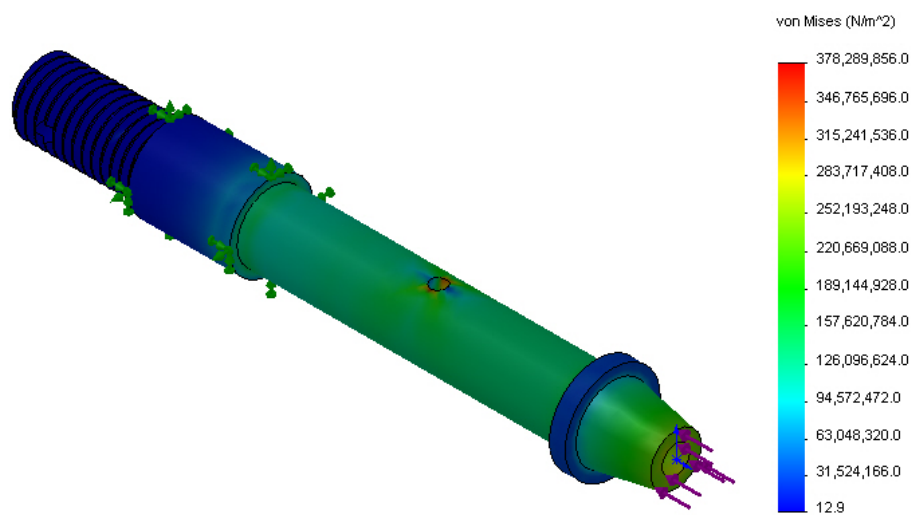


ภาพประกอบ 28 Housing and Pilot - Factor of Safety

Model name: housing-rev1  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Static nodal stress Stress1  
 Deformation scale: 1

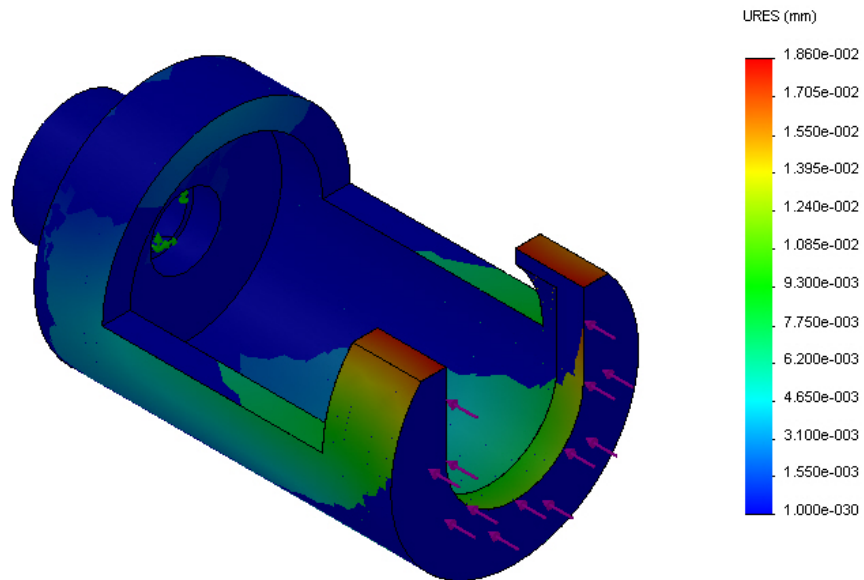


Model name: ammunition-rev2  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Static nodal stress Stress1  
 Deformation scale: 1

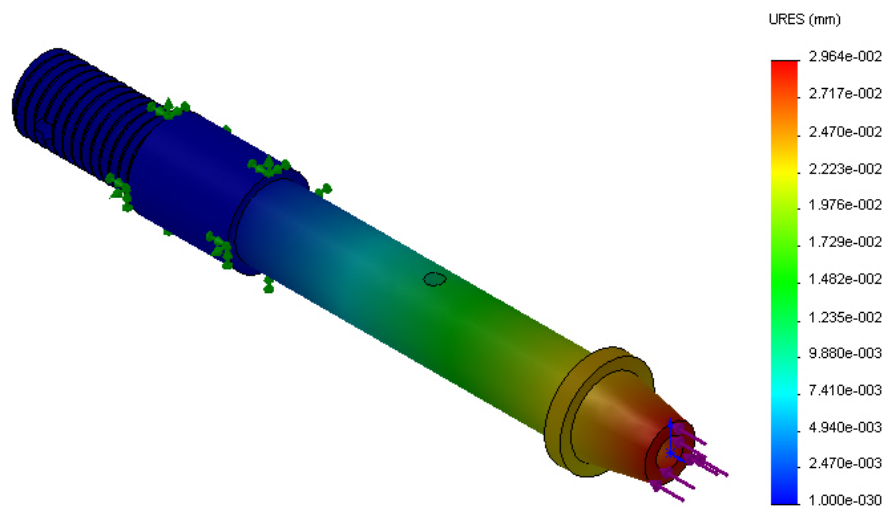


ภาพประกอบ 29 Housing and Pilot - Stress

Model name: housing-rev1  
Study name: Study 1  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1

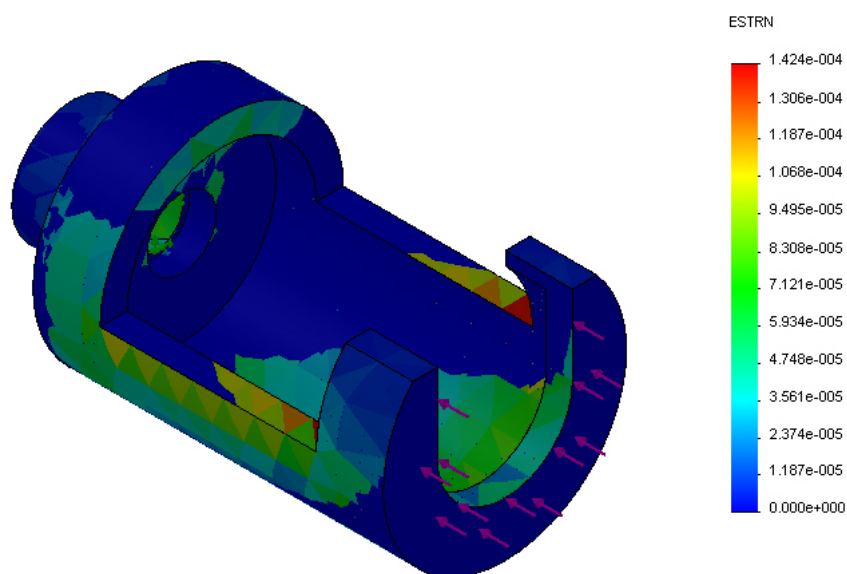


Model name: ammunition-rev2  
Study name: Study 1  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1

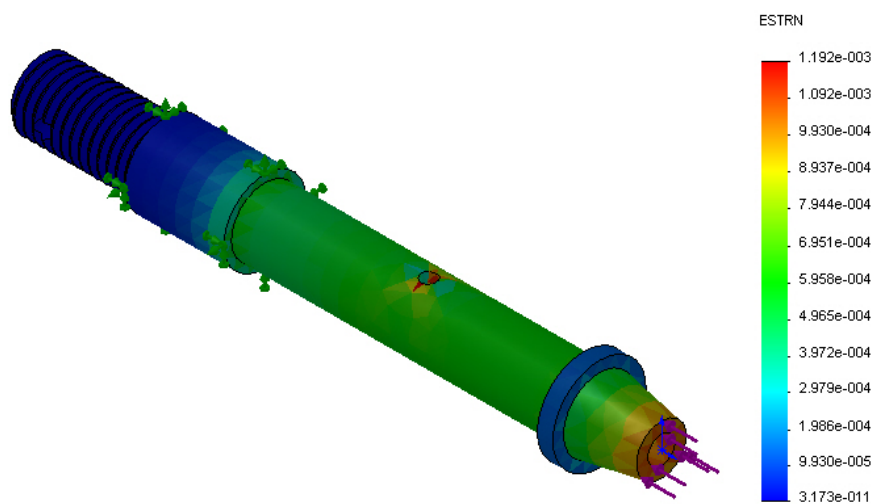


ภาพประกอบ 30 Housing and Pilot - Displacement

Model name: housing-rev1  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Static strain Strain1  
 Deformation scale: 1



Model name: ammunition-rev2  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Static strain Strain1  
 Deformation scale: 1



ภาพประกอบ 31 Housing and Pilot – Strain

### 3. ได้ขนาดและคุณสมบัติของวัสดุจากการคำนวณโดยไฟไนต์เอลิเมนต์

ตาราง 2 ส่วนประกอบที่ได้จากคำนวณเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบของ Housing

| Name          | Type                         | Min                              | Location                                       | Max                                           | Location                                      |
|---------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Stress1       | VON: von Mises Stress        | 0 N/m <sup>2</sup><br>Node: 2806 | (-41.148 mm,<br>4.1125 mm,<br>5.03636e-016 mm) | 2.93505e+007<br>N/m <sup>2</sup><br>Node: 737 | (-9.69492 mm,<br>0.0034353 mm,<br>11.1166 mm) |
| Displacement1 | URES: Resultant Displacement | 0 mm<br>Node: 46                 | (-50.8 mm,<br>3.429 mm,<br>0 mm)               | 0.0186001 mm<br>Node: 315                     | (-0.016224 mm,<br>9.34883 mm,<br>-7.93817 mm) |
| Strain1       | ESTRN: Equivalent Strain     | 0<br>Element: 1341               | (-31.5891 mm,<br>-12.1425 mm,<br>-1.2541 mm)   | 0.000142426<br>Element: 925                   | (-9.15658 mm,<br>-0.923036 mm,<br>12.5941 mm) |

ตาราง 3 ส่วนประกอบที่ได้จากคำนวณเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบของPilot

| Name          | Type                         | Min                                    | Location                                        | Max                                           | Location                                         |
|---------------|------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Stress1       | VON: von Mises Stress        | 12.859 N/m <sup>2</sup><br>Node: 10459 | (-2.48051 in,<br>-0.121582 in,<br>0.0586759 in) | 3.7829e+008<br>N/m <sup>2</sup><br>Node: 6810 | (-0.937957 in,<br>0.131439 in,<br>0.0310245 in)  |
| Displacement1 | URES: Resultant Displacement | 0 mm<br>Node: 610                      | (-1.6 in,<br>0.0825 in,<br>0.142894 in)         | 0.0296394 mm<br>Node: 6091                    | (-0.00115534 in,<br>0.0515532 in,<br>-0.0187 in) |
| Strain1       | ESTRN: Equivalent Strain     | 3.17276e-011<br>Element: 4732          | (-2.49209 in,<br>-0.123873 in,<br>0.031494 in)  | 0.00119161<br>Element: 5775                   | (-0.937958 in,<br>0.117387 in,<br>0.0398811 in)  |

## Material Properties

### วัสดุของ Housing

ตาราง 4 ส่วนประกอบจากการคำนวณ เพื่อกำหนดขนาดสร้างเครื่องต้นแบบของ Housing

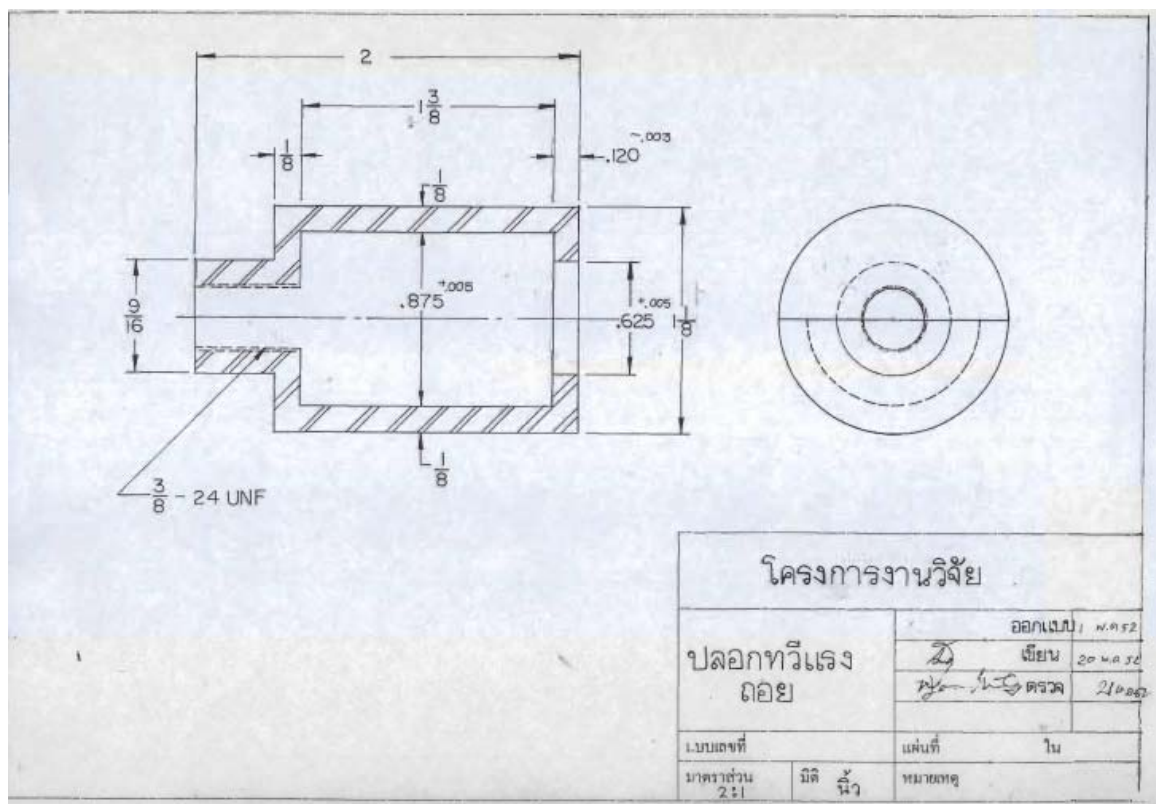
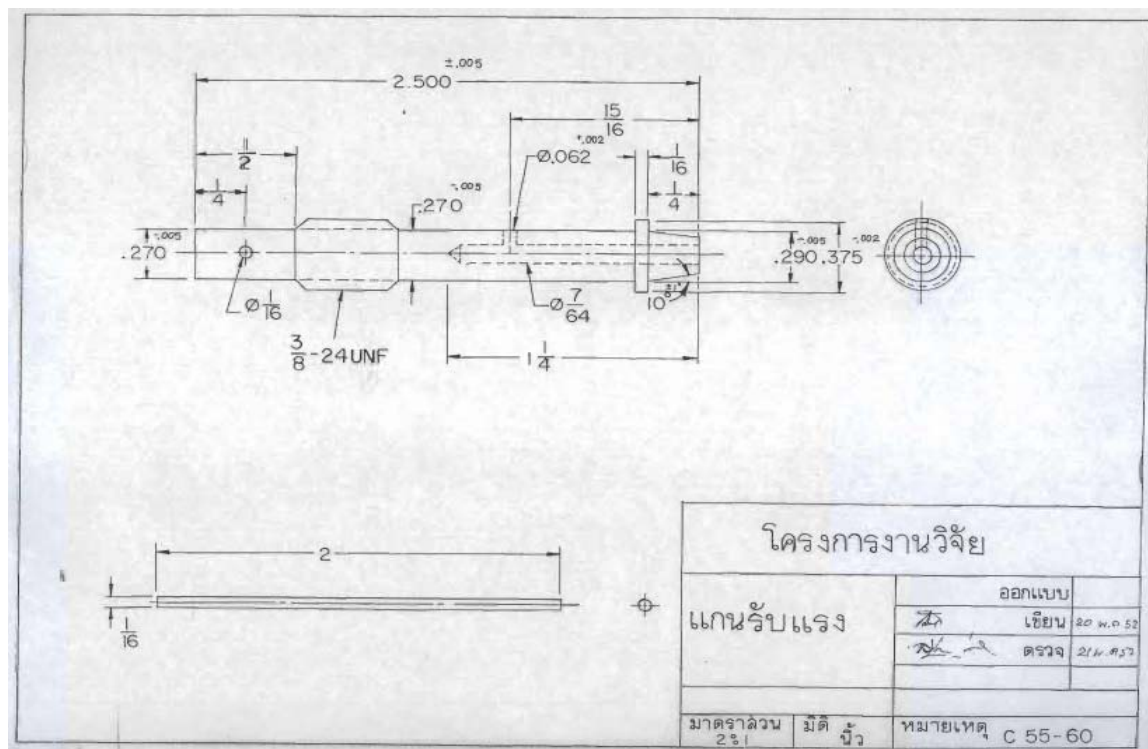
| No. | Body Name                                       | Material     | Mass          | Volume                      |
|-----|-------------------------------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|
| 1   | SolidBody 1(<ammuntion#2> -<br><Boss-Extrude3>) | ASTM A331-90 | 0.00954953 kg | 9.36228e-006 m <sup>3</sup> |
| 2   | SolidBody 2(Boss-Extrude2)                      | ASTM A331-90 | 0.00954953 kg | 9.36228e-006 m <sup>3</sup> |
| 3   | SolidBody 3(Split Line2)                        | ASTM A331-90 | 0.00954953 kg | 9.36228e-006 m <sup>3</sup> |

### วัสดุของ Pilot

ตาราง 5 ส่วนประกอบที่ได้จากคำนวณ เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบของ Pilot

| No. | Body Name                 | Material                        | Mass         | Volume                     |
|-----|---------------------------|---------------------------------|--------------|----------------------------|
| 1   | SolidBody 1(Cut-Extrude2) | [SW]AISI 4340 Steel, normalized | 0.0180377 kg | 2.2978e-006 m <sup>3</sup> |

#### 4. ทำแบบตามการคำนวณโดยไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพประกอบ 32 ภาพแบบที่สร้างขึ้นมาเพื่อทำเครื่องต้นแบบ

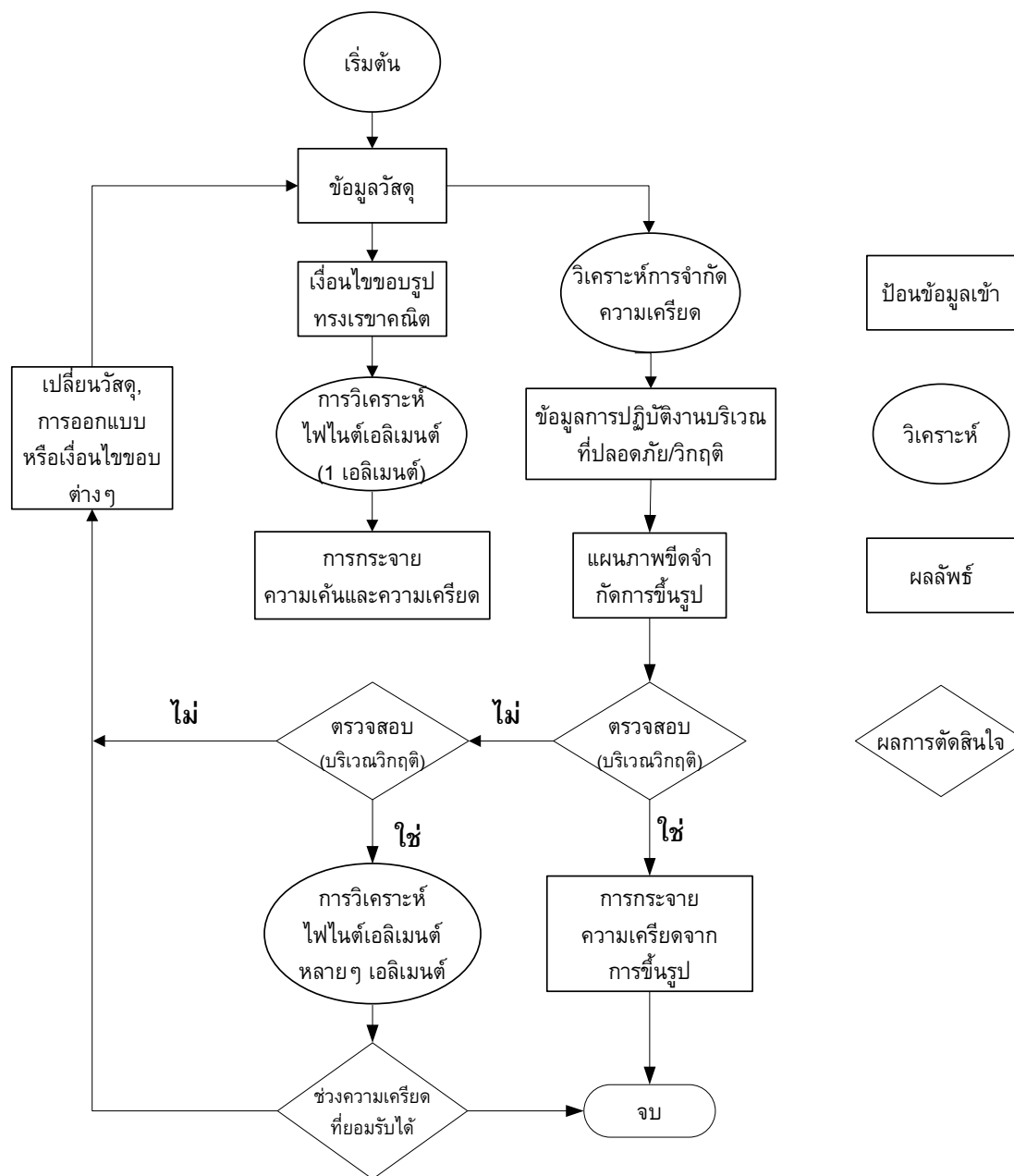
5. สร้างต้นแบบตามแบบ (Drawing)



ภาพประกอบ 33 สร้างเครื่องต้นแบบ

## ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อสร้างเครื่องทิวแรงถอย

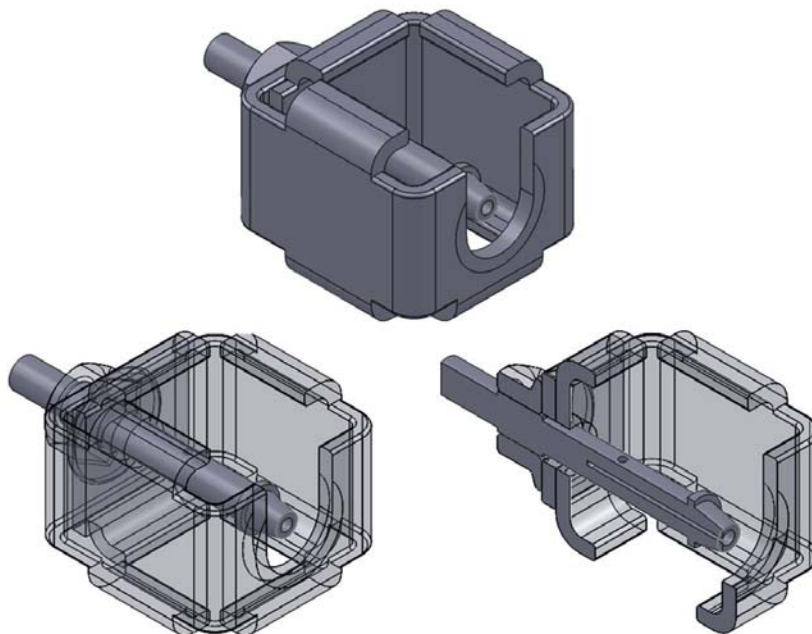
แนวทางการทำงานเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบ ดังนี้



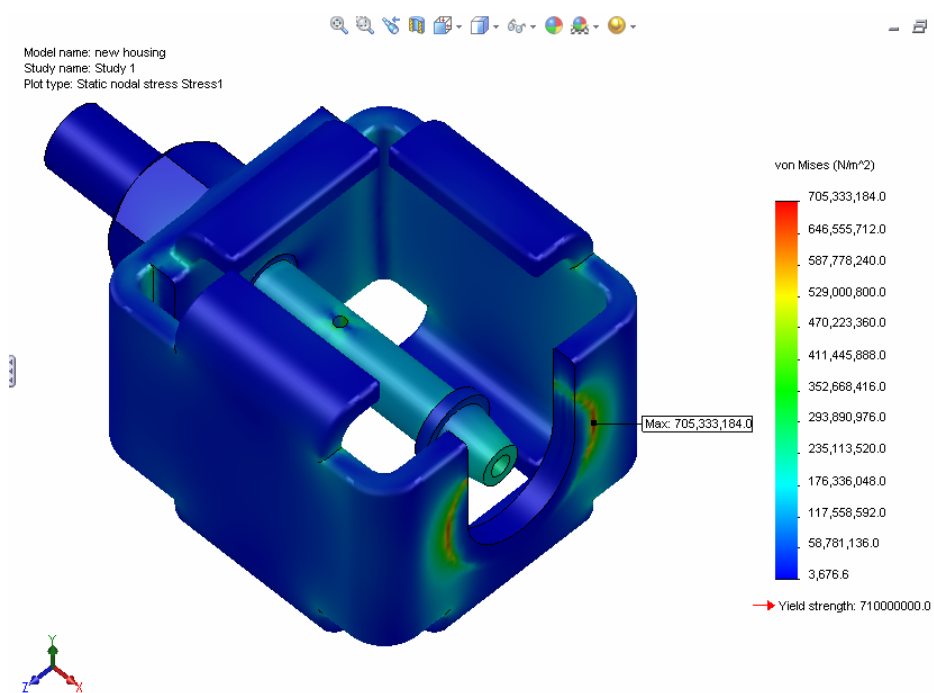
ภาพประกอบ 34 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ความสามารถในการเครื่องต้นแบบ

## การทดสอบและผลการทดสอบ

### 1. ออกแบบเครื่องทวิแรงถอยตามของจริง

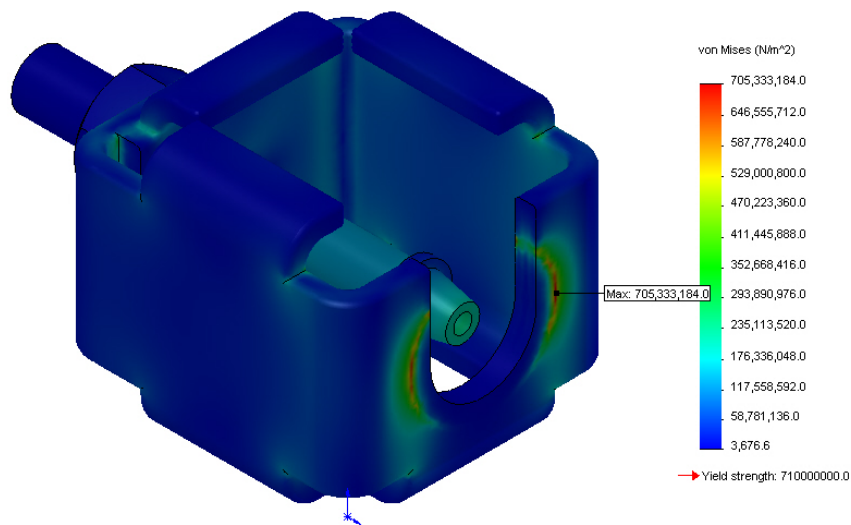


ภาพประกอบ 35 เครื่องทวิแรงถอยตามของจริง



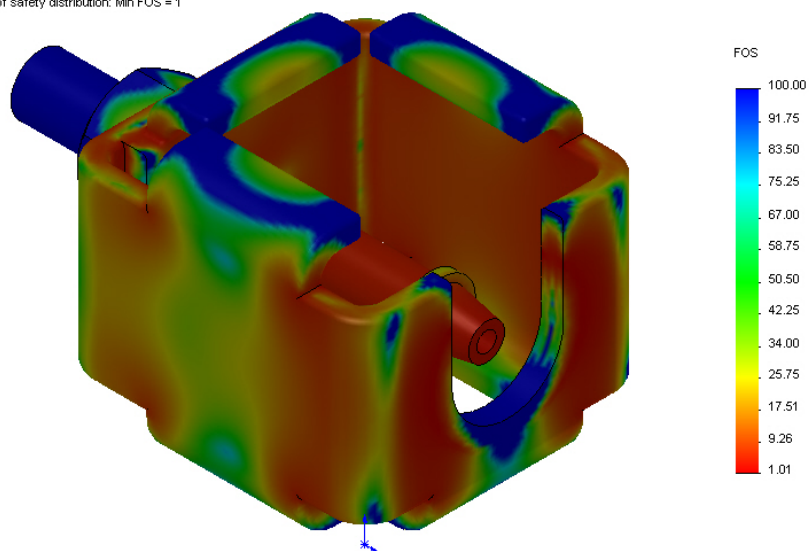
ภาพประกอบ 36 เครื่องทวิแรงถอยตามของจริง

Model name: new housing  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Static nodal stress Stress1  
 Deformation scale: 1

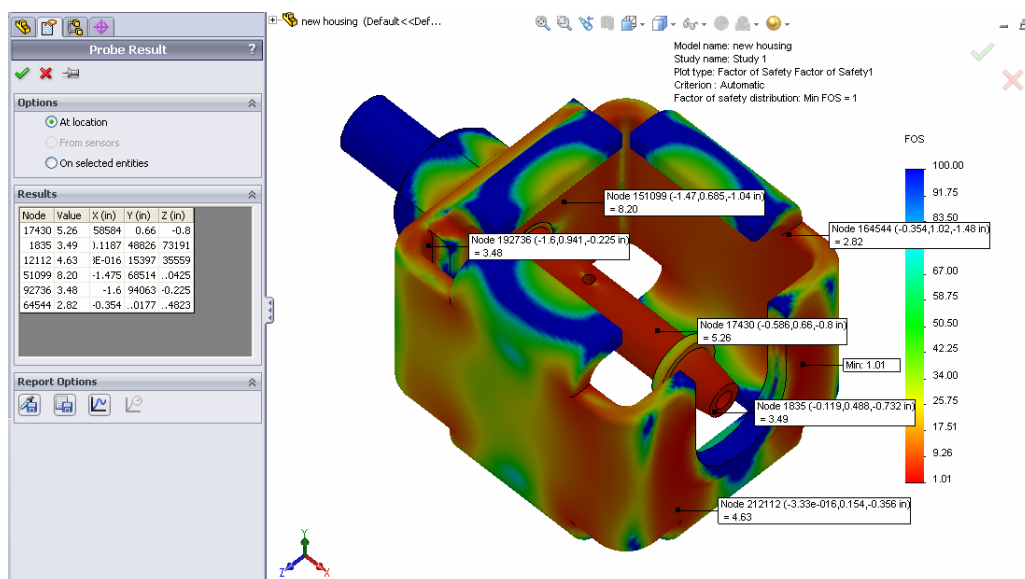


ภาพประกอบ 37 เครื่องทวิแรงถอยตามของจริงเพื่อหาความเค้น

Model name: new housing  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion : Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 1

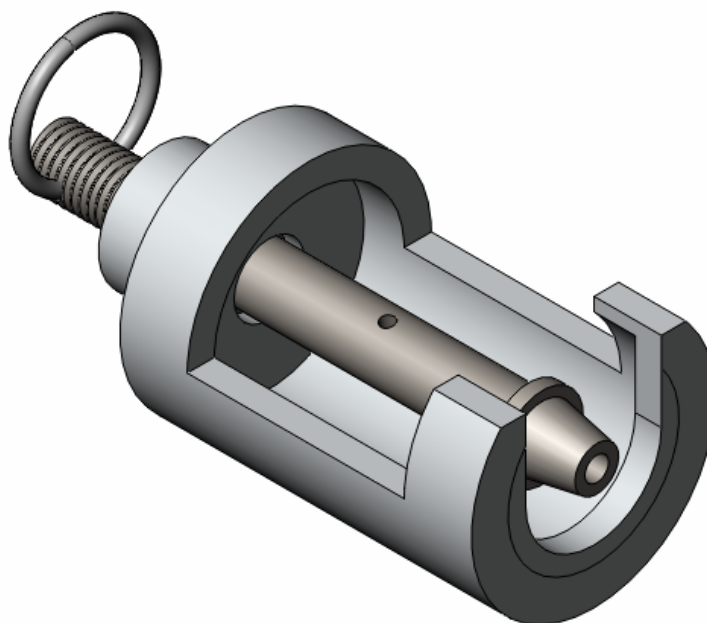


ภาพประกอบ 38 เครื่องทวิแรงถอยตามของจริงเพื่อใช้ Safety –Factor



ภาพประกอบ 39 เครื่องทวิแรงถอยตามของจริงเพื่อใช้ Safety –Factor

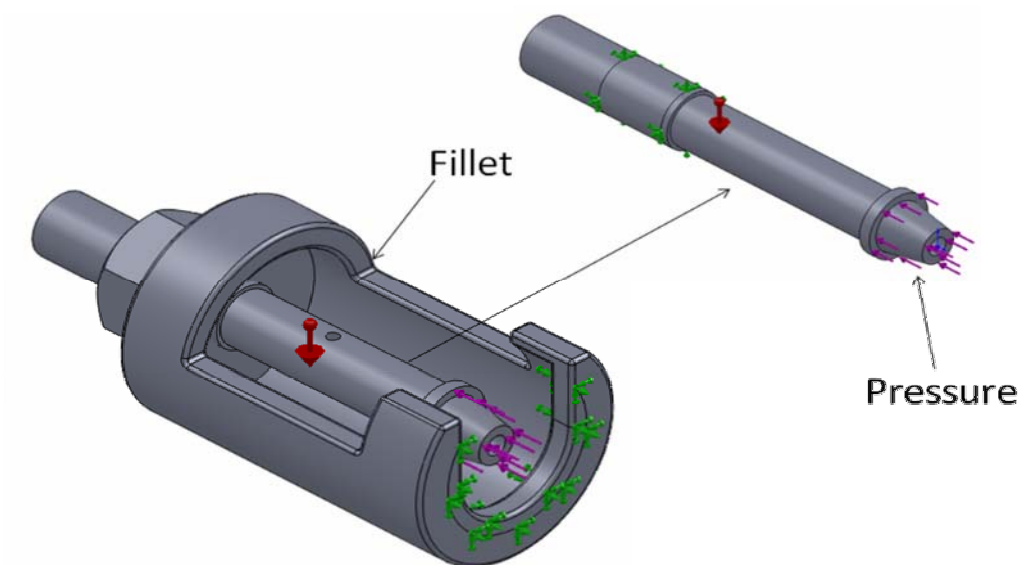
## 2. ออกแบบเครื่องทวิแรงถอยรูปแบบทรงกระบอก (Non-Fillet)



ภาพประกอบ 40 เครื่องทวิแรงถอยรูปทรงกระบอก

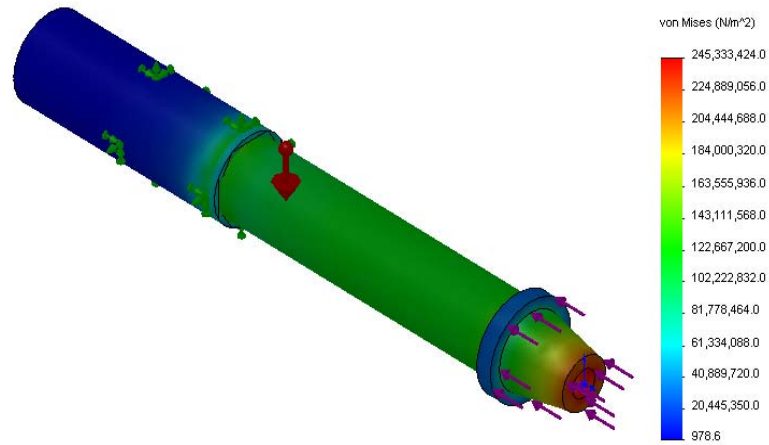
### 3. ออกแบบเครื่องทวิแรงถอยรูปแบบทรงกระบอก (Fillet)

เพื่อออกแบบที่สามารถรับแรงได้ดีขึ้นและจุดด้อยของเครื่องต้นแบบต่อไปสำหรับการลดจุดอ่อนของเครื่องทวิแรงถอยอย่างหนึ่งคือ การลดส่วนที่เป็นมุมฉากและเพิ่ม Fillet โดยจะทำให้แรงที่กระทำกระจายไปยังจุดอื่นๆ

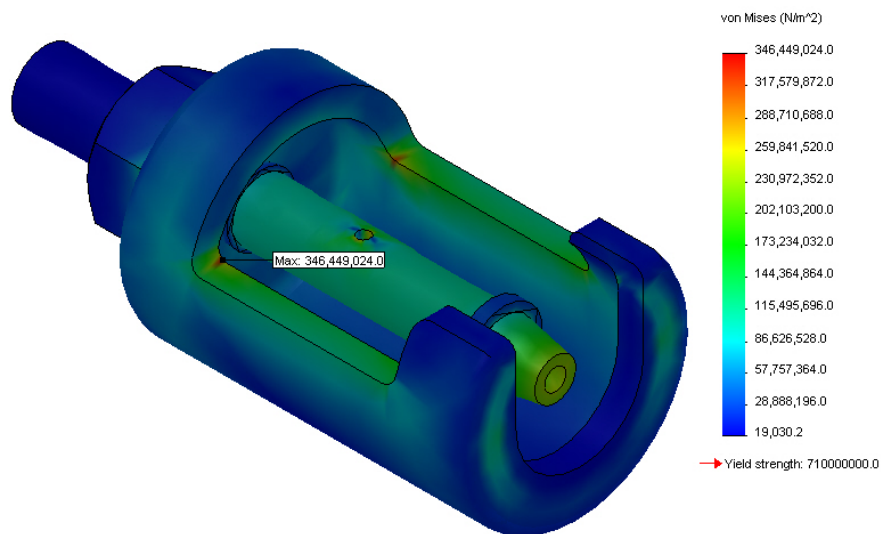


ภาพประกอบ 41 เครื่องทวิแรงถอยรูปทรงกระบอกโดยลบส่วนที่เป็นมุมฉาก

Model name: arm  
Study name: Study 1  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 1

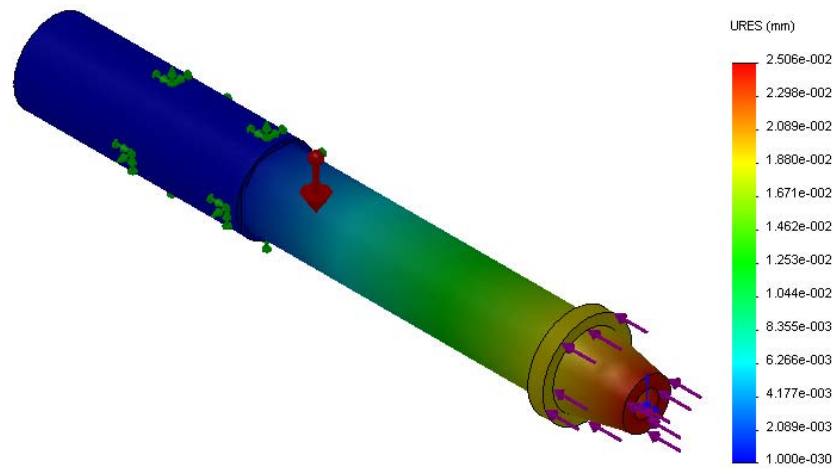


Model name: housing#2  
Study name: Study 2  
Plot type: Static nodal stress Stress1

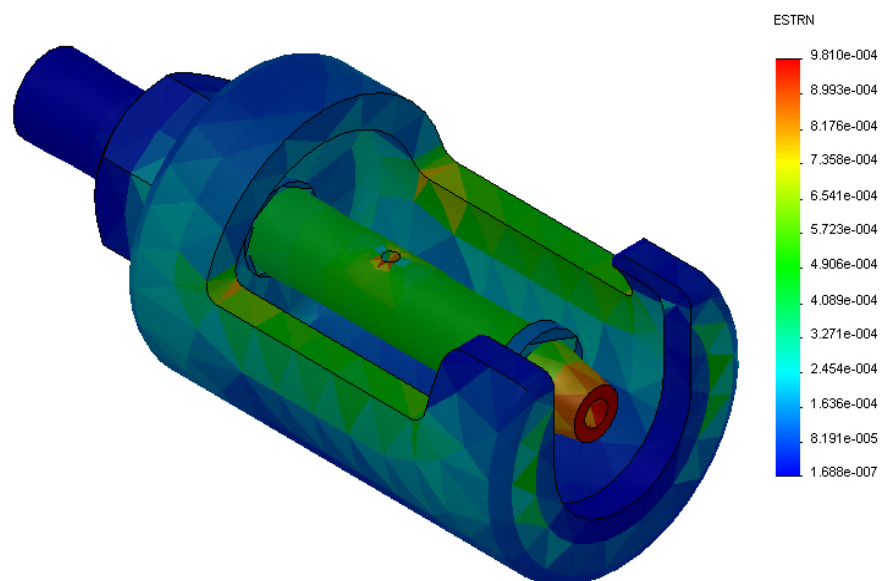


ภาพประกอบ 42 การวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Stress)

Model name: arm  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Static displacement Displacement1  
 Deformation scale: 1

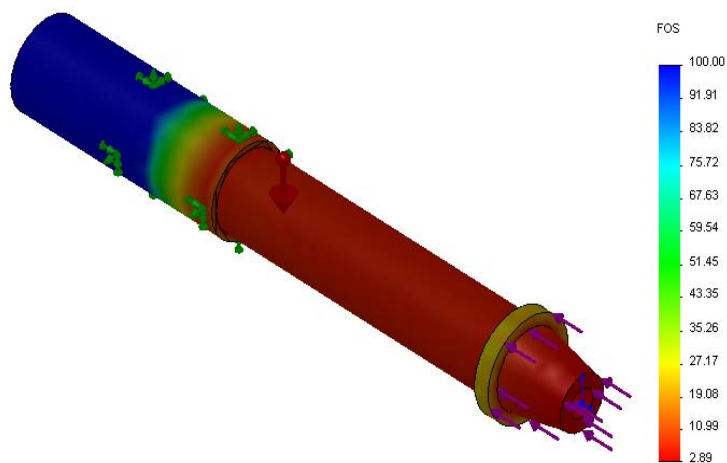


Model name: housing#2  
 Study name: Study 2  
 Plot type: Static strain Strain1  
 Deformation scale: 1

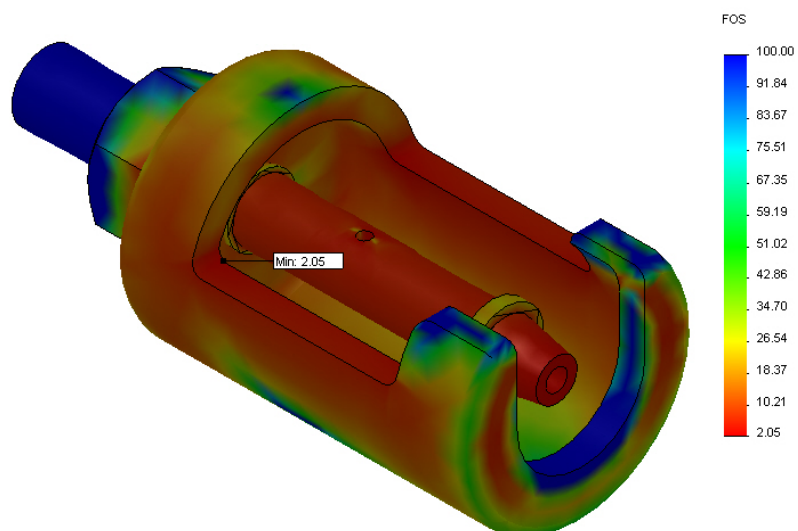


ภาพประกอบ 43 การวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Displacement)

Model name: arm  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion : Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 2.9

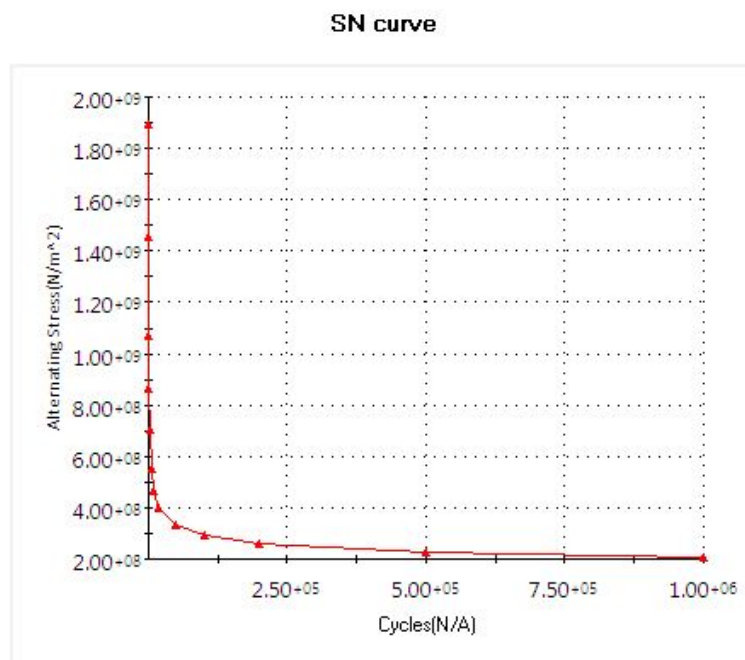


Model name: housing#2  
 Study name: Study 2  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion : Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 2



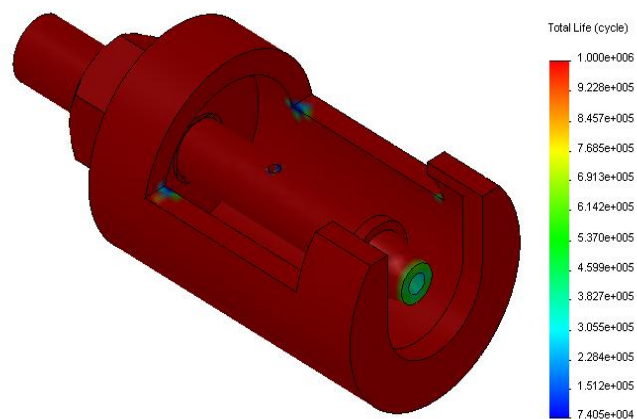
ภาพประกอบ 44 การวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Strain)

#### 4. ออกแบบเครื่องทวิแรงถอยรูปแบบทรงกระบอกเพื่อหาแรงกระทำแบบซ้ำๆ (Fatigue)



0, 0

Model name: housing\_2-Fatigue  
Study name: Fatigue  
Plot type: Fatigue Results2



Educational Version. For Instructional Use Only

#### ภาพประกอบ 45 การวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ของแรงกระทำซ้ำๆ (Fatigue)

## ผลการทดสอบ

เมื่อสร้างเครื่องต้นแบบเสร็จแล้วได้ทำการทดสอบมีผลการทดสอบ ตาราง 5

ตาราง 6 ผลที่ได้จากการทดสอบ เมื่อสร้างเครื่องต้นแบบเสร็จแล้ว

| รูปแบบ                                                  | ขนาด (m <sup>3</sup> ) | Stress (N/m <sup>2</sup> ) | Displacement (mm) | Strain (N/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| ตามแบบจริง                                              | 2.74669e-006           | 7.05333e+008               | 0.0913999         | 0.00256506                 |
| ทรงกระบอก(Assembly)                                     | 9.36228e-006           | 5.62718e+008               | 0.220664          | 0.00241773                 |
| แบบ (Housing)                                           | 9.36228e-006           | 2.93505e+007               | 0.0186001         | 0.000142426                |
| แบบ (Pilot)                                             | 9.36228e-006           | 3.7829e+008                | 0.0296394         | 0.00119161                 |
| ทรงกระบอก(Non-Fillet)                                   | 9.36228e-006           | 3.46449e+008               | 0.0978014         | 0.000981047                |
| แบบ (Housing)                                           | 9.36228e-006           | 3.92526e+008               | 0.0881459         | 0.00115997                 |
| แบบ (Pilot)                                             | 9.36228e-006           | 2.45333e+008               | 0.0250644         | 0.000988076                |
| ทรงกระบอกแรงกระทำ<br>ที่ 10 <sup>6</sup> ครั้ง(Fatigue) | 9.36228e-006           | 2.05e+008                  |                   |                            |

จากตาราง 6 ผลที่ได้จากการทดสอบกับปืน M16 จริง คือ 1) สามารถทนต่อแรงอัดที่เกิดจากการยิงได้ 2) สามารถใช้ปืนเล็กยาว M16 และ M16A1 ได้ 3) สามารถคัดปลอกกระสุนออกจากถังเพลิงได้ทั้งแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงผลการศึกษาของเครื่องทวิแรงถอยจากคำนวณโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วทำการสร้างเครื่องต้นแบบโดยใช้แรงดันต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริงและเปรียบเทียบในด้านราคากับการจัดซื้อจากต่างประเทศ

#### การทดสอบเครื่องทวิแรงถอยกับปืน M16 และ M16A1

ข้อมูลจำเพาะของเครื่องทวิแรงถอย

##### ชื่ออุปกรณ์

##### เครื่องทวิแรงถอย

SPECIFICATION :

MIL-C-9963

WEAPON :

Rifle, 5.56mm, M16; M16A1

BALLISTIC PERFORMANCE : VELOCITY :

3250  $\pm$  40 ft/sec at 15 feet, Std Dev

40 ft/sec max.

PRESSURE :

52,000 psi max. avg.;

PORT PRESSURE :

15,000 psi  $\pm$  2,000 psi

ACCURACY :

2.00" mean radius max. avg. at 200 yards

CARTRIDGE :

D10523632 – 182 -14 grs

CASE :

C10524200-94 – 5 grs

Cup :

Copper alloy (70/30) No. 260, Annealed,

Spec MIL-C-50

BULLET :

C10524197 – 56 – 2 grs

Bullet Jacket : 17.5 – 1 grs Cup :

Copper alloy (90/10) No. 220, Spec MIL-

C-21768, Annealed

Slug :

38.5 – 1 grs, lead-antimony, Spec MIL-

L-13283, Grade 1

## สรุปผลการวิจัย

1. จากการทดสอบสามารถใช้กับปืน M16 และ M16A1 สามารถสรุปได้ ดังนี้
  - 1.1 สามารถทนต่อแรงอัดที่เกิดจากการยิงได้
  - 1.2 สามารถใช้ปืน M16 และ M16A1 ได้
  - 1.3 สามารถคัดปลอกกระสุนออกจากถังเพลิงได้ทั้งแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ
2. จากการสร้างเครื่องต้นแบบได้เปรียบเทียบกับด้านราคาได้ ดังนี้
  - 2.1 ราคาจากการสร้างเครื่องต้นแบบแบ่งออกเป็น ดังนี้
    - 2.1.1 ค่าวัสดุ 4,200 บาท
    - 2.1.2 ค่าแรงจูนรูป 3,500 บาท
    - 2.1.3 รวมเป็นเงินที่ใช้สร้างเครื่องต้นแบบ 7,700 บาท
    - 2.1.4 ราคาเครื่องที่ใช้ในกองทัพบก 33,000 บาท

## ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้กองทัพมีใช้อย่างทั่วถึงโดยการสร้างครั้งละมากขึ้น จะทำให้เครื่องทวิแรงถอยมีราคาต้นทุนที่ถูกลงไปอีกมาก และที่สำคัญกองทัพจะมีเครื่องทวิแรงถอยใช้งานโดยไม่ขาดแคลน

บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

- บรรจบ อรชร. (2539). กลศาสตร์ของแข็ง *Mechanics of Solids*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2547). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชาญ ถนัดงาน. (2547). เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- ดิลก ศรีประไพ. (2542). การวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- สมชาย สิงโต. (2544). วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น. นครนายก: ส่วนการศึกษาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

รายละเอียดการวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเครื่องทวิแรงถอยเหมือนของจริง



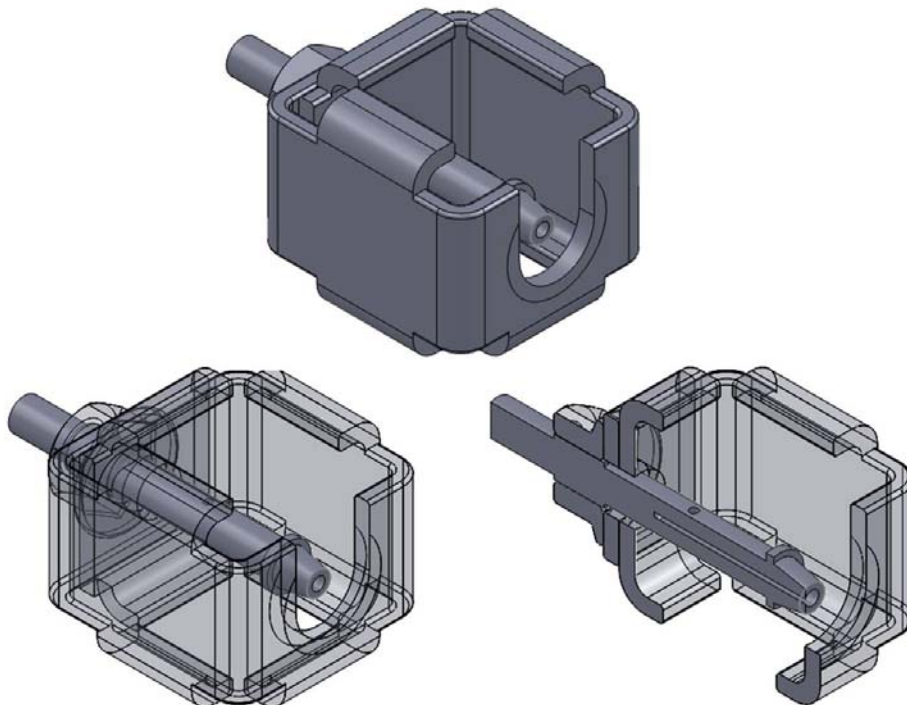
## **Stress analysis of Ammunition**

**Author: Chaiwat**

**Company: Srinakarinwirot**

***Note:***

*Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. Simulation helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.*



### **Description**

**Summarize the FEM analysis on new housing**

## Assumptions

### Model Information

| Document Name | Configuration | Document Path                                                                        | Date Modified            |
|---------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| new housing   | Default       | C:\Documents and Settings\TOSHIBA\Desktop\coolme design\ammuntion\new housing.SLDPRT | Thu Nov 12 07:56:52 2009 |

### Study Properties

| Study name                                                      | Study 1           |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
| Analysis type                                                   | Static            |
| Mesh Type:                                                      | Solid Mesh        |
| Solver type                                                     | FFEPlus           |
| Inplane Effect:                                                 | Off               |
| Soft Spring:                                                    | Off               |
| Inertial Relief:                                                | Off               |
| Thermal Effect:                                                 | Input Temperature |
| Zero strain temperature                                         | 298.000000        |
| Units                                                           | Kelvin            |
| Include fluid pressure effects from Solid Works Flow Simulation | Off               |
| Friction:                                                       | Off               |
| Ignore clearance for surface contact                            | Off               |
| Use Adaptive Method:                                            | Off               |

## Units

|                     |                  |
|---------------------|------------------|
| <b>Unit system:</b> | <b>SI</b>        |
| Length/Displacement | mm               |
| Temperature         | Kelvin           |
| Angular velocity    | rad/s            |
| Stress/Pressure     | N/m <sup>2</sup> |

## Material Properties

| No. | Body Name                                                                          | Material                       | Mass         | Volume                      |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------|-----------------------------|
| 1   | SolidBody 1 (Cut-Revolve2)                                                         | AISI 4340 Steel,<br>normalized | 0.0215615 kg | 2.74669e-006 m <sup>3</sup> |
| 2   | SolidBody 2 (<Hexagon Flange<br>Nut ISO - 4161 - M10 - N<br>0.33in.>-<EndChamfer>) | AISI 4340 Steel,<br>normalized | 0.0132036 kg | 1.68199e-006 m <sup>3</sup> |
| 3   | SolidBody 3 (Split Line3)                                                          | AISI 4340 Steel,<br>normalized | 0.139404 kg  | 1.77585e-005 m <sup>3</sup> |

|                            |                                    |
|----------------------------|------------------------------------|
| <b>Material name:</b>      | <b>AISI 4340 Steel, normalized</b> |
| Description:               |                                    |
| Material Source:           |                                    |
| Material Model Type:       | Linear Elastic Isotropic           |
| Default Failure Criterion: | Max von Mises Stress               |
| Application Data:          |                                    |

| Property Name                 | Value     | Units             | Value Type |
|-------------------------------|-----------|-------------------|------------|
| Elastic modulus               | 2.05e+011 | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Poisson's ratio               | 0.32      | NA                | Constant   |
| Shear modulus                 | 8e+010    | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Mass density                  | 7850      | kg/m <sup>3</sup> | Constant   |
| Tensile strength              | 1.11e+009 | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Yield strength                | 7.1e+008  | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Thermal expansion coefficient | 1.23e-005 | /Kelvin           | Constant   |
| Thermal conductivity          | 44.5      | W/(m.K)           | Constant   |
| Specific heat                 | 475       | J/(kg.K)          | Constant   |

## Loads and Restraints

### Fixture

| Restraint name        | Selection set       | Description |
|-----------------------|---------------------|-------------|
| Fixed-1 <new housing> | on 2 Face(s) fixed. |             |

### Load

| Load name             | Selection set                                                                                                | Loading type       | Description |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------|
| Force-1 <new housing> | on 1 Face(s) apply normal force 859 lbf using uniform distribution                                           | Sequential Loading |             |
| Force-2 <new housing> | on 1 Face(s) apply normal force 95.46 lbf using uniform distribution                                         | Sequential Loading |             |
| Gravity-1             | Gravity with respect to Top Plane with gravity acceleration -9.81 m/s <sup>2</sup> normal to reference plane | Sequential Loading |             |

## Connector Definitions

No Connectors were defined

## Contact

Contact state: Touching faces - Free

|                            |                                                 |
|----------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Component Contact-1</b> | <b>Contact component: Bonded on new housing</b> |
| Description:               |                                                 |

## Mesh Information

|                                  |                   |
|----------------------------------|-------------------|
| <b>Mesh Type:</b>                | <b>Solid Mesh</b> |
| Mesher Used:                     | Standard mesh     |
| Automatic Transition:            | Off               |
| Smooth Surface:                  | On                |
| Jacobian Check:                  | 4 Points          |
| Element Size:                    | 0.04 in           |
| Tolerance:                       | 0.002 in          |
| Quality:                         | High              |
| Number of elements:              | 142228            |
| Number of nodes:                 | 217814            |
| Time to complete mesh(hh:mm:ss): | 00:00:29          |
| Computer name:                   | TOSHIBA-ACB5212   |

## Sensor Results

No data available.

**Reaction Forces**

| Selection set | Units | Sum X   | Sum Y   | Sum Z    | Resultant |
|---------------|-------|---------|---------|----------|-----------|
| Entire Body   | N     | 4218.22 | 2.28652 | -1.78355 | 4218.22   |

**Free-Body Forces**

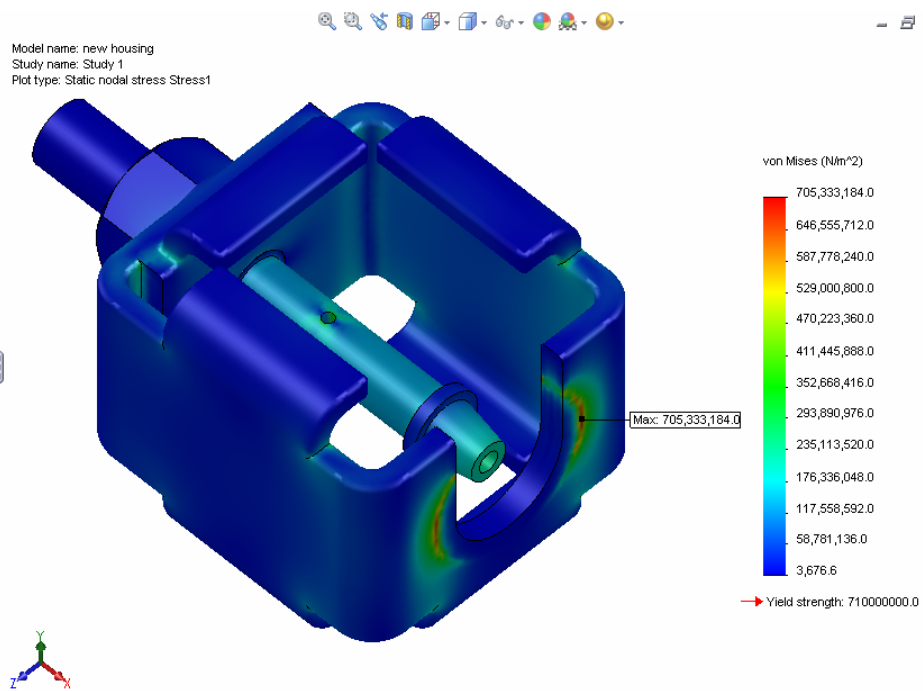
| Selection set | Units | Sum X     | Sum Y        | Sum Z       | Resultant |
|---------------|-------|-----------|--------------|-------------|-----------|
| Entire Body   | N     | -0.104546 | 8.68142e-005 | -0.00180757 | 0.104562  |

**Free-body Moments**

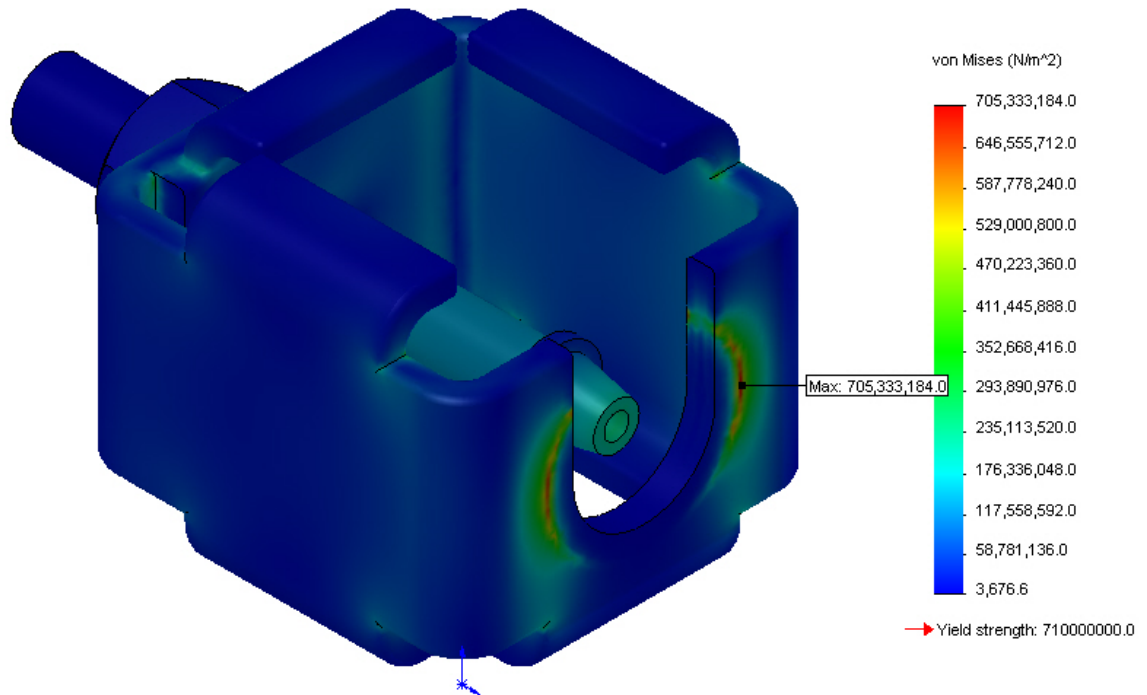
| Selection set | Units | Sum X | Sum Y | Sum Z | Resultant |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Entire Body   | N-m   | 0     | 0     | 0     | 1e-033    |

**Study Results****Default Results**

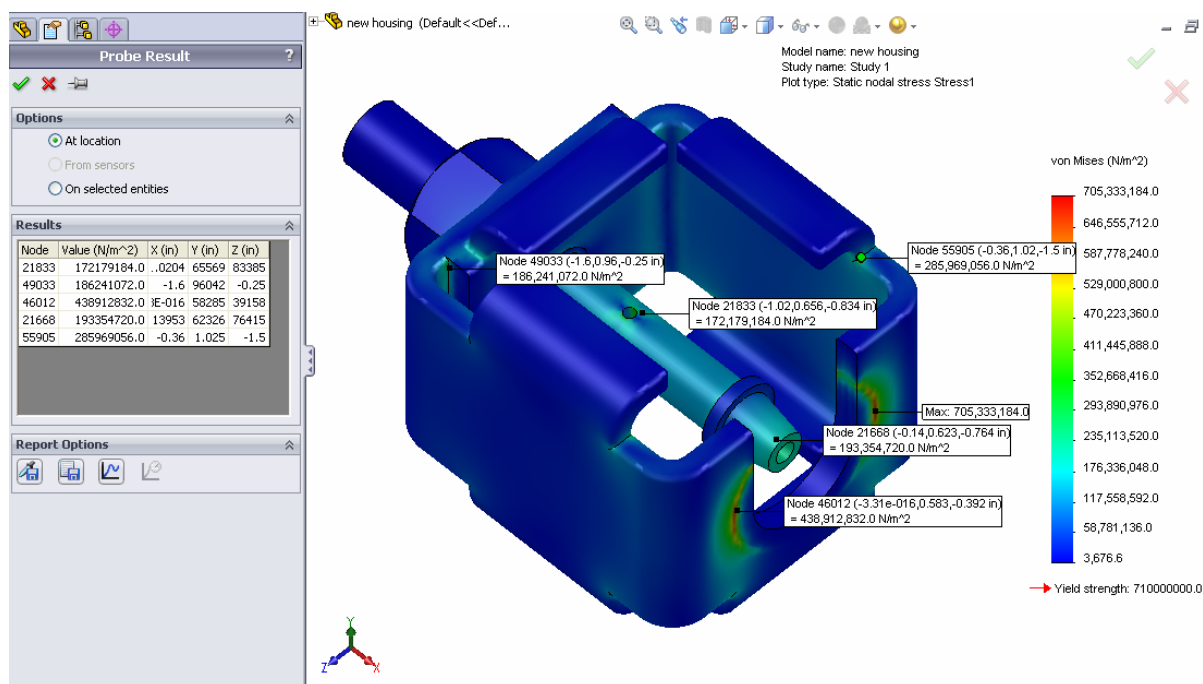
| Name          | Type                               | Min                              | Location                                       | Max                                   | Location                                           |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Stress1       | VON: von<br>Mises Stress           | 3676.65<br>N/m^2<br>Node: 523    | (-2.62118 in,<br>0.638825 in,<br>-0.678418 in) | 7.05333e+008<br>N/m^2<br>Node: 214713 | (-3.61718e-005 in,<br>0.534411 in,<br>-1.22609 in) |
| Displacement1 | URES:<br>Resultant<br>Displacement | 0 mm<br>Node: 45818              | (-0.125 in,<br>0.525 in,<br>-1.1125 in)        | 0.0913999 mm<br>Node: 21653           | (-0.122257 in,<br>0.60002 in,<br>-0.817745 in)     |
| Strain1       | ESTRN:<br>Equivalent<br>Strain     | 5.49693e-<br>008<br>Element: 346 | (-2.61443 in,<br>0.42347 in,<br>-0.688309 in)  | 0.00256506<br>Element:<br>53956       | (-0.0072907 in,<br>0.52666 in,<br>-1.22452 in)     |



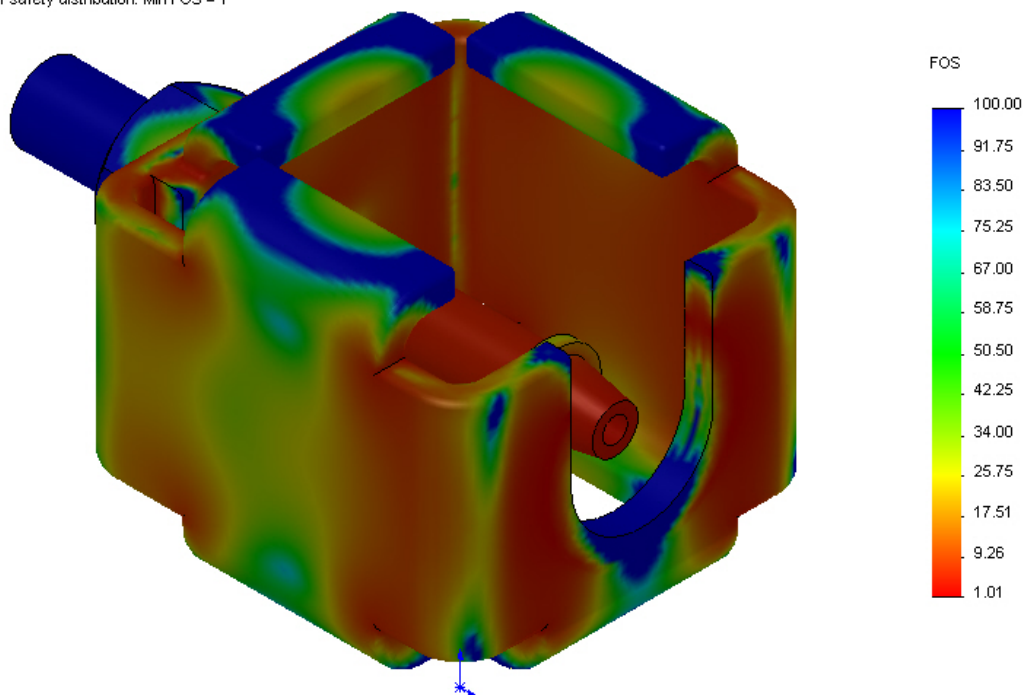
Model name: new housing  
Study name: Study 1  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 1



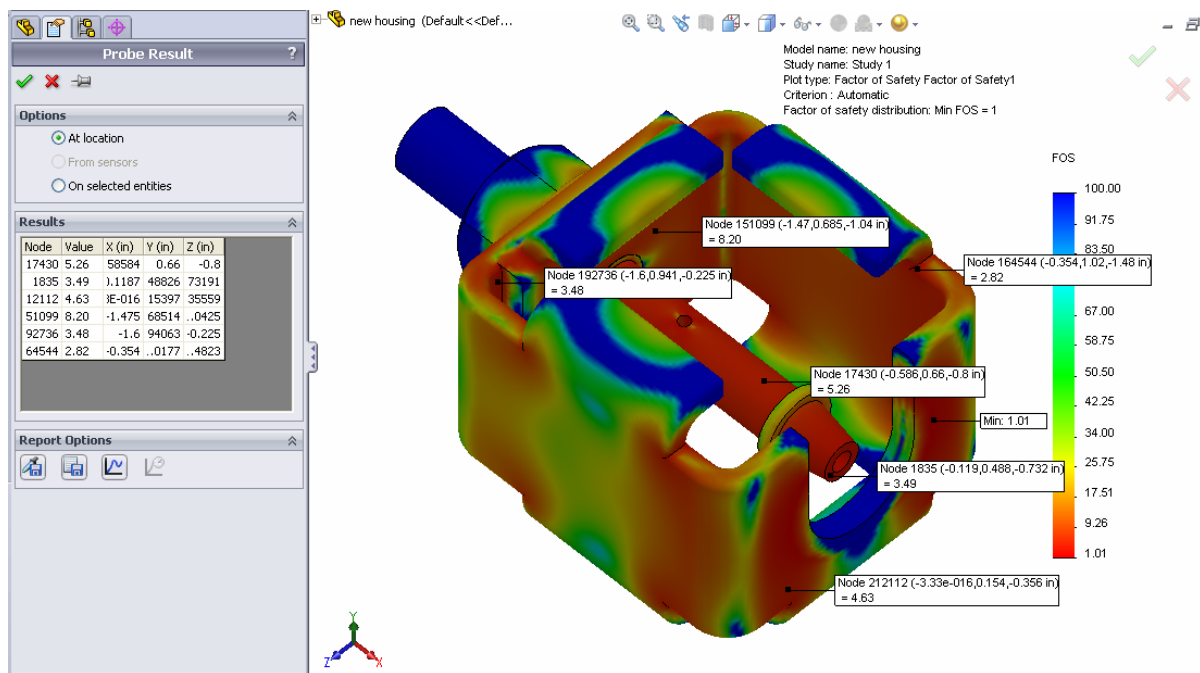
New Housing-Study 1-Stress-Stress1



Model name: new housing  
Study name: Study 1  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 1



New Housing-Study 1-Factor of Safety-Factor of Safety1



## ภาคผนวก ข

รายละเอียดการวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเครื่องทวิแรงถอยรูปทรงกระบอก (Non-Fillet)



## Stress analysis of Ammunition

**Author: Chaiwat**

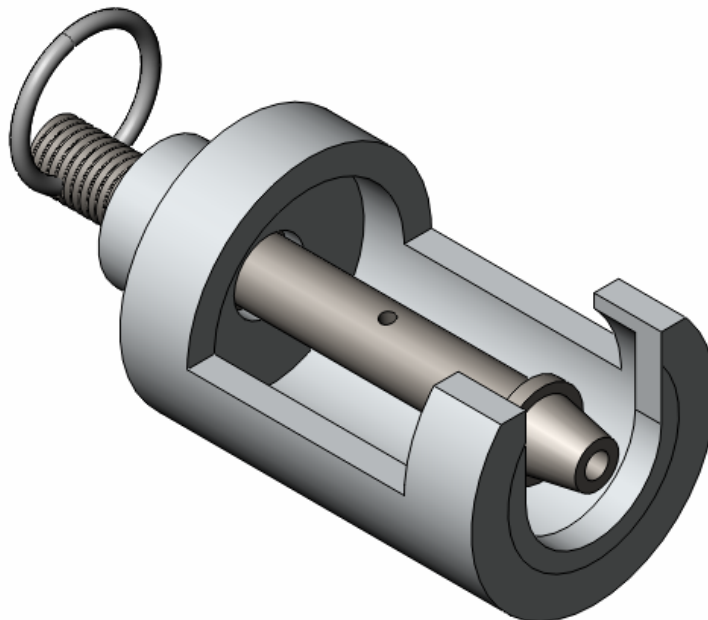
**Company: Srinakarinwirot**

### *Note:*

*Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. Simulation helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.*

### *Comments:*

### *Revolution-1*



## Description

Summarize the FEM analysis on ammunition-rev2

## Assumptions

### Model Information

| Document Name  | Configuration | Document Path                                                    | Date Modified               |
|----------------|---------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| ammuntion-rev2 | Default       | D:\Jobs\Surawut-<br>egat\CAD\ammuntion\ammuntion-<br>rev2.SLDPRT | Mon Apr 05<br>15:38:26 2010 |

### Study Properties

| Study name                                                      | Study 1           |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
| Analysis type                                                   | Static            |
| Mesh Type:                                                      | Solid Mesh        |
| Solver type                                                     | FFEPlus           |
| Inplane Effect:                                                 | Off               |
| Soft Spring:                                                    | Off               |
| Inertial Relief:                                                | Off               |
| Thermal Effect:                                                 | Input Temperature |
| Zero strain temperature                                         | 298.000000        |
| Units                                                           | Kelvin            |
| Include fluid pressure effects from Solid Works Flow Simulation | Off               |
| Friction:                                                       | Off               |
| Ignore clearance for surface contact                            | Off               |
| Use Adaptive Method:                                            | Off               |

**Units**

|                     |                  |
|---------------------|------------------|
| <b>Unit system:</b> | <b>SI</b>        |
| Length/Displacement | mm               |
| Temperature         | Kelvin           |
| Angular velocity    | rad/s            |
| Stress/Pressure     | N/m <sup>2</sup> |

**Material Properties**

| No. | Body Name                 | Material                           | Mass         | Volume                     |
|-----|---------------------------|------------------------------------|--------------|----------------------------|
| 1   | SolidBody 1(Cut-Extrude2) | [SW]AISI 4340 Steel,<br>normalized | 0.0180377 kg | 2.2978e-006 m <sup>3</sup> |

|                            |                                        |
|----------------------------|----------------------------------------|
| <b>Material name:</b>      | <b>[SW]AISI 4340 Steel, normalized</b> |
| Description:               |                                        |
| Material Source:           |                                        |
| Material Model Type:       | Linear Elastic Isotropic               |
| Default Failure Criterion: | Unknown                                |
| Application Data:          |                                        |

| Property Name                 | Value     | Units             | Value Type |
|-------------------------------|-----------|-------------------|------------|
| Elastic modulus               | 2.05e+011 | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Poisson's ratio               | 0.32      | NA                | Constant   |
| Shear modulus                 | 8e+010    | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Mass density                  | 7850      | kg/m <sup>3</sup> | Constant   |
| Tensile strength              | 1.11e+009 | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Yield strength                | 7.1e+008  | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Thermal expansion coefficient | 1.2e-005  | /Kelvin           | Constant   |
| Thermal conductivity          | 44.5      | W/(m.K)           | Constant   |
| Specific heat                 | 475       | J/(kg.K)          | Constant   |

## Loads and Restraints

### Fixture

| Restraint name           | Selection set       | Description |
|--------------------------|---------------------|-------------|
| Fixed-1 <ammuntion-rev2> | on 1 Face(s) fixed. |             |

### Load

| Load name                | Selection set                                                         | Loading type       | Description |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------|
| Force-2 <ammuntion-rev2> | on 1 Face(s) apply normal force<br>968 lbf using uniform distribution | Sequential Loading |             |

## Connector Definitions

**No Connectors were defined**

### Contact

**Contact state: Touching faces - Free**

**Mesh Information**

|                                         |                   |
|-----------------------------------------|-------------------|
| <b>Mesh Type:</b>                       | <b>Solid Mesh</b> |
| <b>Mesher Used:</b>                     | Standard mesh     |
| <b>Automatic Transition:</b>            | Off               |
| <b>Smooth Surface:</b>                  | On                |
| <b>Jacobian Check:</b>                  | 4 Points          |
| <b>Element Size:</b>                    | 0.072765 in       |
| <b>Tolerance:</b>                       | 0.0036382 in      |
| <b>Quality:</b>                         | High              |
| <b>Number of elements:</b>              | 6406              |
| <b>Number of nodes:</b>                 | 11001             |
| <b>Time to complete mesh(hh:mm:ss):</b> | 00:00:14          |
| <b>Computer name:</b>                   | JO                |

**Sensor Results****No data available.****Reaction Forces**

| <b>Selection set</b> | <b>Units</b> | <b>Sum X</b> | <b>Sum Y</b> | <b>Sum Z</b> | <b>Resultant</b> |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| Entire Body          | N            | 4244.81      | 0.0745392    | -0.0589709   | 4244.81          |

**Free-Body Forces**

| <b>Selection set</b> | <b>Units</b> | <b>Sum X</b> | <b>Sum Y</b> | <b>Sum Z</b> | <b>Resultant</b> |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| Entire Body          | N            | -0.000568024 | -0.000254655 | -0.000690692 | 0.000929815      |

### Free-body Moments

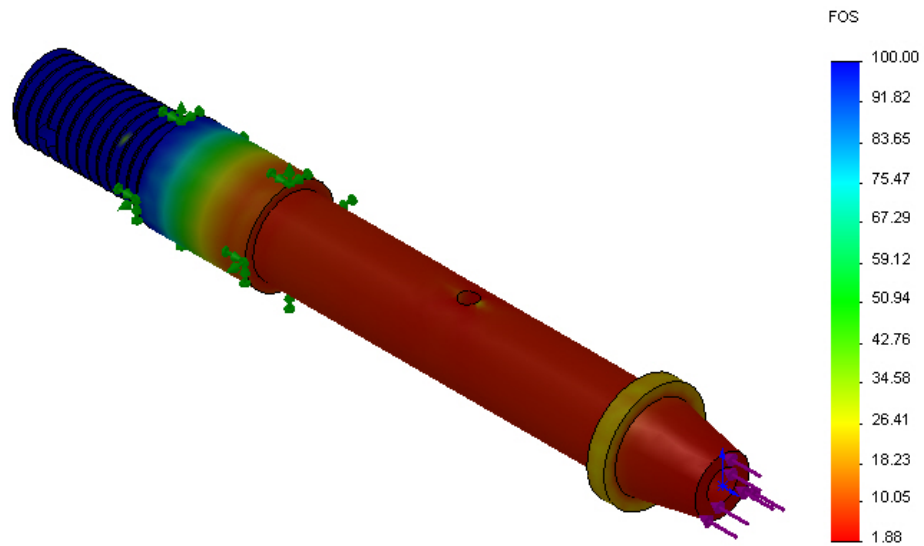
| Selection set | Units | Sum X | Sum Y | Sum Z | Resultant |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Entire Body   | N-m   | 0     | 0     | 0     | 1e-033    |

### Study Results

#### Default Results

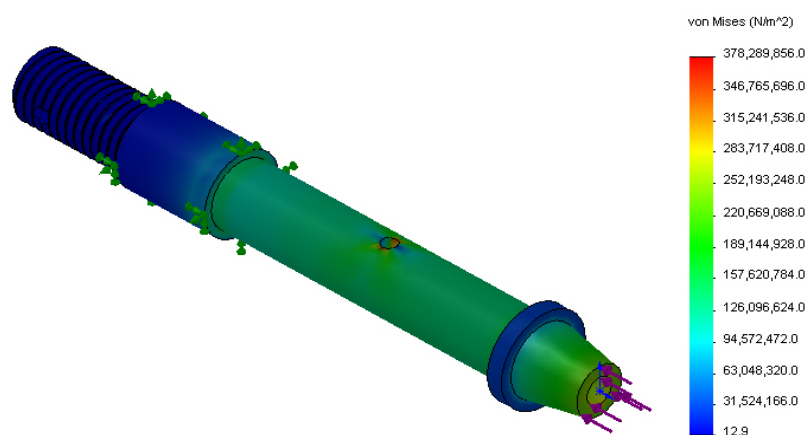
| Name          | Type                               | Min                                    | Location                                        | Max                                           | Location                                            |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Stress1       | VON: von<br>Mises Stress           | 12.859 N/m <sup>2</sup><br>Node: 10459 | (-2.48051 in,<br>-0.121582 in,<br>0.0586759 in) | 3.7829e+008<br>N/m <sup>2</sup><br>Node: 6810 | (-0.937957 in,<br>0.131439 in,<br>0.0310245 in)     |
| Displacement1 | URES:<br>Resultant<br>Displacement | 0 mm<br>Node: 610                      | (-1.6 in,<br>0.0825 in,<br>0.142894 in)         | 0.0296394<br>mm<br>Node: 6091                 | (-0.00115534<br>in,<br>0.0515532 in,<br>-0.0187 in) |
| Strain1       | ESTRN:<br>Equivalent<br>Strain     | 3.17276e-011<br>Element:<br>4732       | (-2.49209 in,<br>-0.123873 in,<br>0.031494 in)  | 0.00119161<br>Element: 5775                   | (-0.937958 in,<br>0.117387 in,<br>0.0398811 in)     |

Model name: ammunition-rev2  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion : Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 1.9



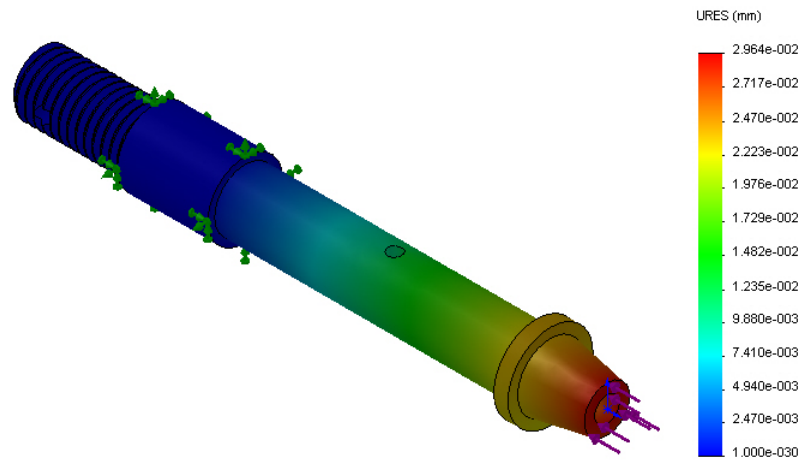
Ammunition-Study 1-Factor of Safety-Factor of Safety1

Model name: ammunition-rev2  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Static nodal stress Stress1  
 Deformation scale: 1



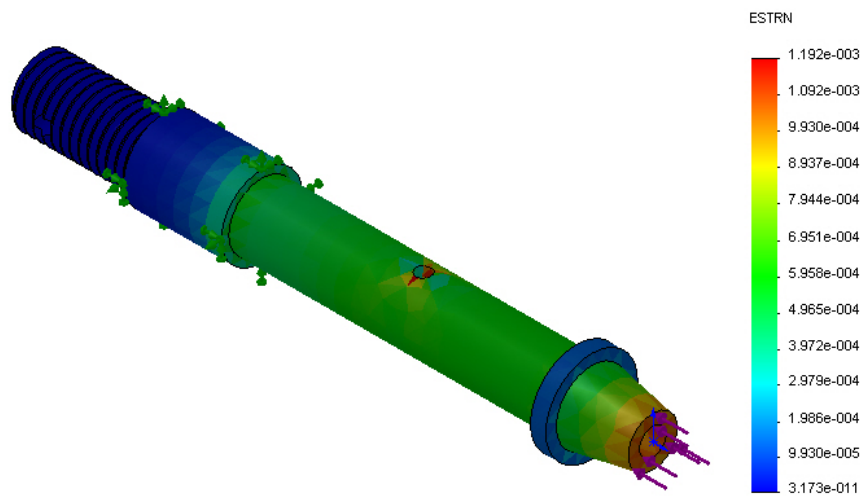
Ammunition-Study 1-Stress-Stress1

Model name: ammunition-rev2  
Study name: Study 1  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1



Ammunition-Study 1-Displacement-Displacement1

Model name: ammunition-rev2  
Study name: Study 1  
Plot type: Static strain Strain1  
Deformation scale: 1



Ammunition-Study 1-Strain-Strain1

## ภาคผนวก ค

รายละเอียดการวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเครื่องทวิแรงถอยรูปทรงกระบอก (Non-Fillet)



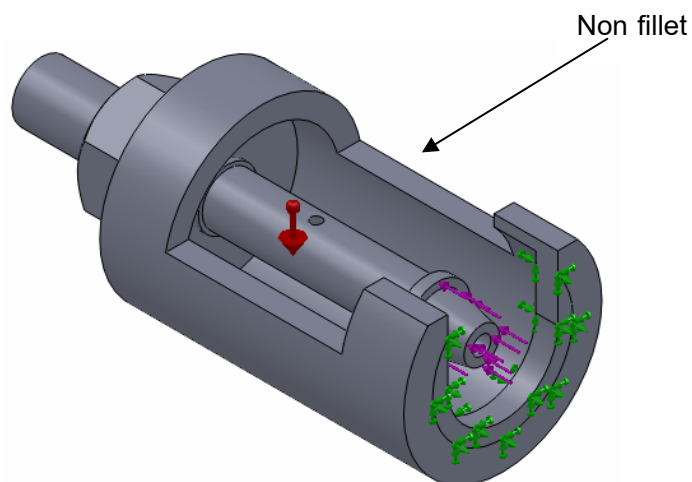
## Stress analysis of Ammunition

**Author: Chaiwat**

**Company: Srinakarinwirot**

***Note:***

*Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. Simulation helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.*



### **Description**

**Summarize the FEM analysis on housing#2**

## Assumptions

### Model Information

| Document Name | Configuration | Document Path                                                                      | Date Modified            |
|---------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| housing#2     | Default       | C:\Documents and Settings\TOSHIBA\Desktop\coolme design\ammuntion\housing#2.SLDPRT | Wed Nov 04 15:55:51 2009 |

### Study Properties

|                                                                 |                   |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
| Study name                                                      | Study 1           |
| Analysis type                                                   | Static            |
| Mesh Type:                                                      | Solid Mesh        |
| Solver type                                                     | FFEPlus           |
| Inplane Effect:                                                 | Off               |
| Soft Spring:                                                    | Off               |
| Inertial Relief:                                                | Off               |
| Thermal Effect:                                                 | Input Temperature |
| Zero strain temperature                                         | 298.000000        |
| Units                                                           | Kelvin            |
| Include fluid pressure effects from Solid Works Flow Simulation | Off               |
| Friction:                                                       | Off               |
| Ignore clearance for surface contact                            | Off               |
| Use Adaptive Method:                                            | Off               |

## Units

|                     |                  |
|---------------------|------------------|
| <b>Unit system:</b> | <b>SI</b>        |
| Length/Displacement | mm               |
| Temperature         | Kelvin           |
| Angular velocity    | rad/s            |
| Stress/Pressure     | N/m <sup>2</sup> |

## Material Properties

| No. | Body Name                                                                         | Material                       | Mass         | Volume                      |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------|-----------------------------|
| 1   | SolidBody 1(Cut-Extrude7)                                                         | AISI 4340 Steel,<br>normalized | 0.0227041 kg | 2.89225e-006 m <sup>3</sup> |
| 2   | SolidBody 2(Split Line2)                                                          | AISI 4340 Steel,<br>normalized | 0.0693049 kg | 8.82865e-006 m <sup>3</sup> |
| 3   | SolidBody 3(<Hexagon Flange<br>Nut ISO - 4161 - M10 - N<br>0.33in.>-<EndChamfer>) | AISI 4340 Steel,<br>normalized | 0.0132036 kg | 1.68199e-006 m <sup>3</sup> |

|                            |                                    |
|----------------------------|------------------------------------|
| <b>Material name:</b>      | <b>AISI 4340 Steel, normalized</b> |
| Description:               |                                    |
| Material Source:           |                                    |
| Material Model Type:       | Linear Elastic Isotropic           |
| Default Failure Criterion: | Max von Mises Stress               |
| Application Data:          |                                    |

| Property Name                 | Value     | Units             | Value Type |
|-------------------------------|-----------|-------------------|------------|
| Elastic modulus               | 2.05e+011 | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Poisson's ratio               | 0.32      | NA                | Constant   |
| Shear modulus                 | 8e+010    | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Mass density                  | 7850      | kg/m <sup>3</sup> | Constant   |
| Tensile strength              | 1.11e+009 | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Yield strength                | 7.1e+008  | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Thermal expansion coefficient | 1.23e-005 | /Kelvin           | Constant   |
| Thermal conductivity          | 44.5      | W/(m.K)           | Constant   |
| Specific heat                 | 475       | J/(kg.K)          | Constant   |

## Loads and Restraints

### Fixture

| Restraint name      | Selection set       | Description |
|---------------------|---------------------|-------------|
| Fixed-1 <housing#2> | on 2 Face(s) fixed. |             |

### Load

| Load name           | Selection set                                                                                                      | Loading type       | Description |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------|
| Force-1 <housing#2> | on 1 Face(s) apply normal force<br>920 lbf using uniform distribution                                              | Sequential Loading |             |
| Force-2 <housing#2> | on 1 Face(s) apply normal force<br>92 lbf using uniform distribution                                               | Sequential Loading |             |
| Gravity-1           | Gravity with respect to Top Plane<br>with gravity acceleration -9.81<br>m/s <sup>2</sup> normal to reference plane | Sequential Loading |             |

## Connector Definitions

**No Connectors were defined**

## Contact

**Contact state: Touching faces - Free**

|                            |                                               |
|----------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Component Contact-1</b> | <b>Contact component: Bonded on housing#2</b> |
| Description:               |                                               |

## Mesh Information

|                                  |                   |
|----------------------------------|-------------------|
| <b>Mesh Type:</b>                | <b>Solid Mesh</b> |
| Mesher Used:                     | Standard mesh     |
| Automatic Transition:            | Off               |
| Smooth Surface:                  | On                |
| Jacobian Check:                  | 4 Points          |
| Element Size:                    | 1 mm              |
| Tolerance:                       | 0.05 mm           |
| Quality:                         | High              |
| Number of elements:              | 88390             |
| Number of nodes:                 | 135529            |
| Time to complete mesh(hh:mm:ss): | 00:00:14          |
| Computer name:                   | TOSHIBA-ACB5212   |

## Sensor Results

**No data available.**

**Reaction Forces**

| Selection set | Units | Sum X   | Sum Y   | Sum Z       | Resultant |
|---------------|-------|---------|---------|-------------|-----------|
| Entire Body   | N     | 4478.27 | 1.02737 | -0.00258923 | 4478.27   |

**Free-Body Forces**

| Selection set | Units | Sum X      | Sum Y      | Sum Z        | Resultant |
|---------------|-------|------------|------------|--------------|-----------|
| Entire Body   | N     | -0.0401812 | 0.00017681 | -0.000317099 | 0.0401828 |

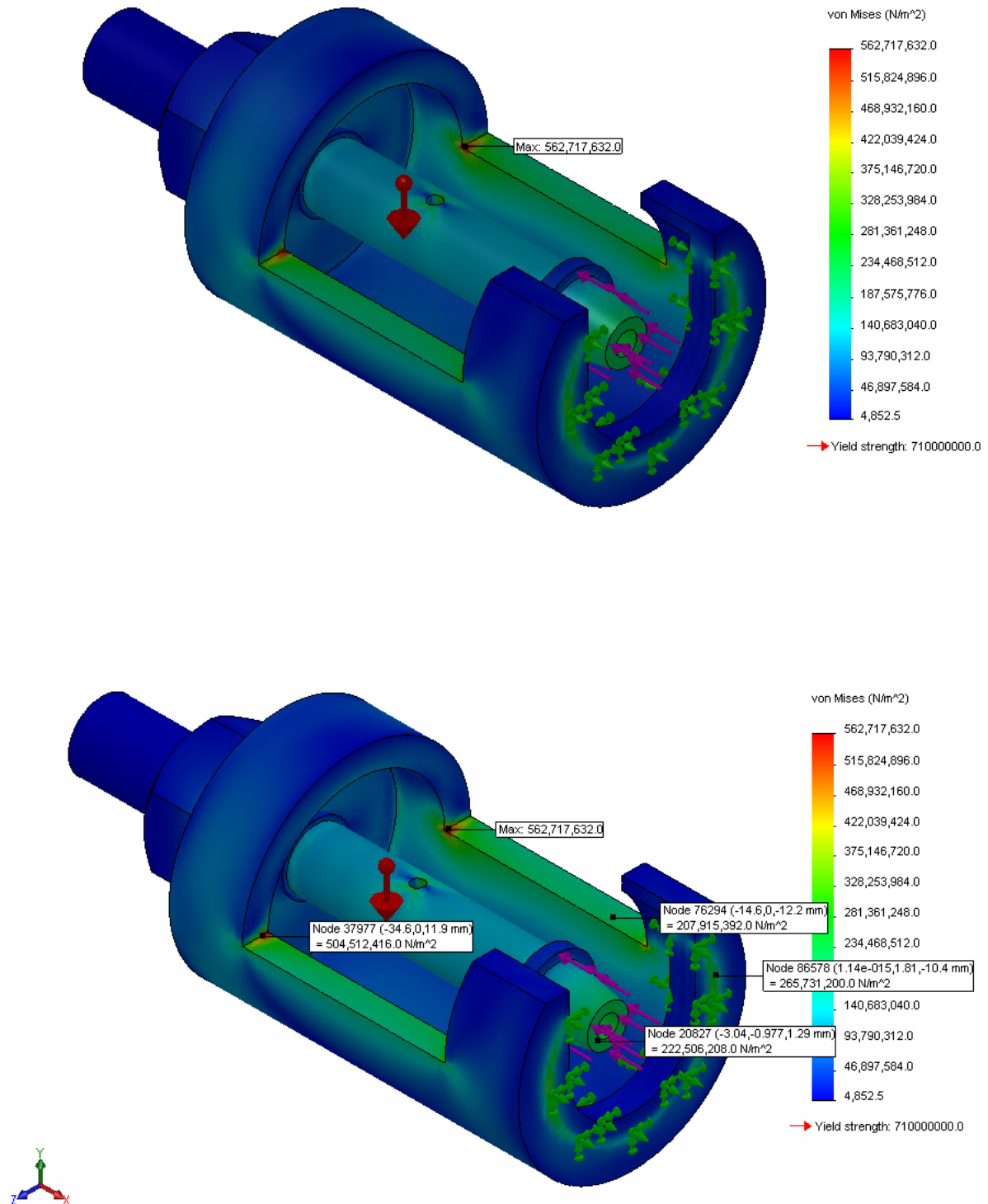
**Free-body Moments**

| Selection set | Units | Sum X | Sum Y | Sum Z | Resultant |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Entire Body   | N-m   | 0     | 0     | 0     | 1e-033    |

**Study Results****Default Results**

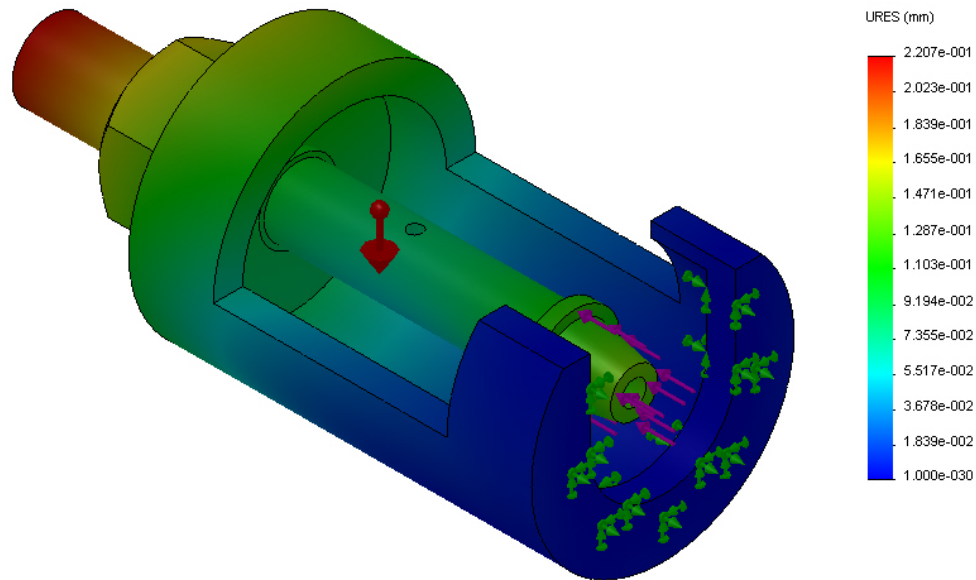
| Name          | Type                               | Min                                   | Location                                           | Max                                               | Location                                            |
|---------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Stress1       | VON: von<br>Mises Stress           | 4852.49 N/m <sup>2</sup><br>Node: 337 | (-66.6075 mm,<br>2.70798 mm,<br>-3.09133 mm)       | 5.62718e+00<br>8 N/m <sup>2</sup><br>Node: 108552 | (-34.6582 mm,<br>-0.0523849 mm,<br>-11.474 mm)      |
| Displacement1 | URES:<br>Resultant<br>Displacement | 0 mm<br>Node: 32999                   | (-3.175 mm,<br>-1.84692e-015<br>mm,<br>-7.9375 mm) | 0.220664 mm<br>Node: 29425                        | (-66.6141 mm,<br>4.04145 mm,<br>7.81071e-006<br>mm) |
| Strain1       | ESTRN:<br>Equivalent<br>Strain     | 7.62106e-008<br>Element: 3518         | (-66.4311 mm,<br>-2.81258 mm,<br>-2.90273 mm)      | 0.00241773<br>Element:<br>35643                   | (-34.3128 mm,<br>-0.198868 mm,<br>11.3736 mm)       |

Model name: housing#2  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Static nodal stress Stress1  
 Deformation scale: 1



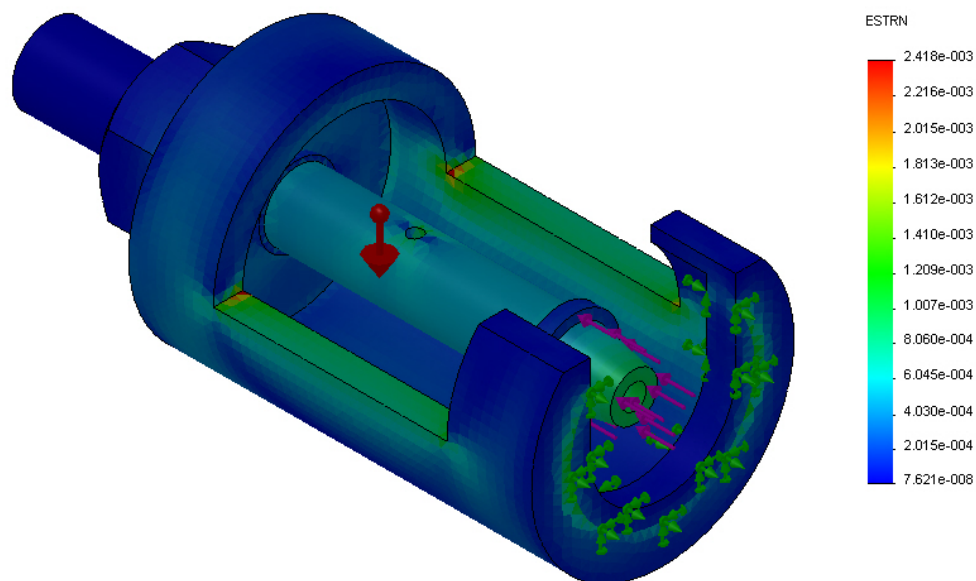
Housing#2-Study 1-Stress-Stress1

Model name: housing#2  
Study name: Study 1  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1



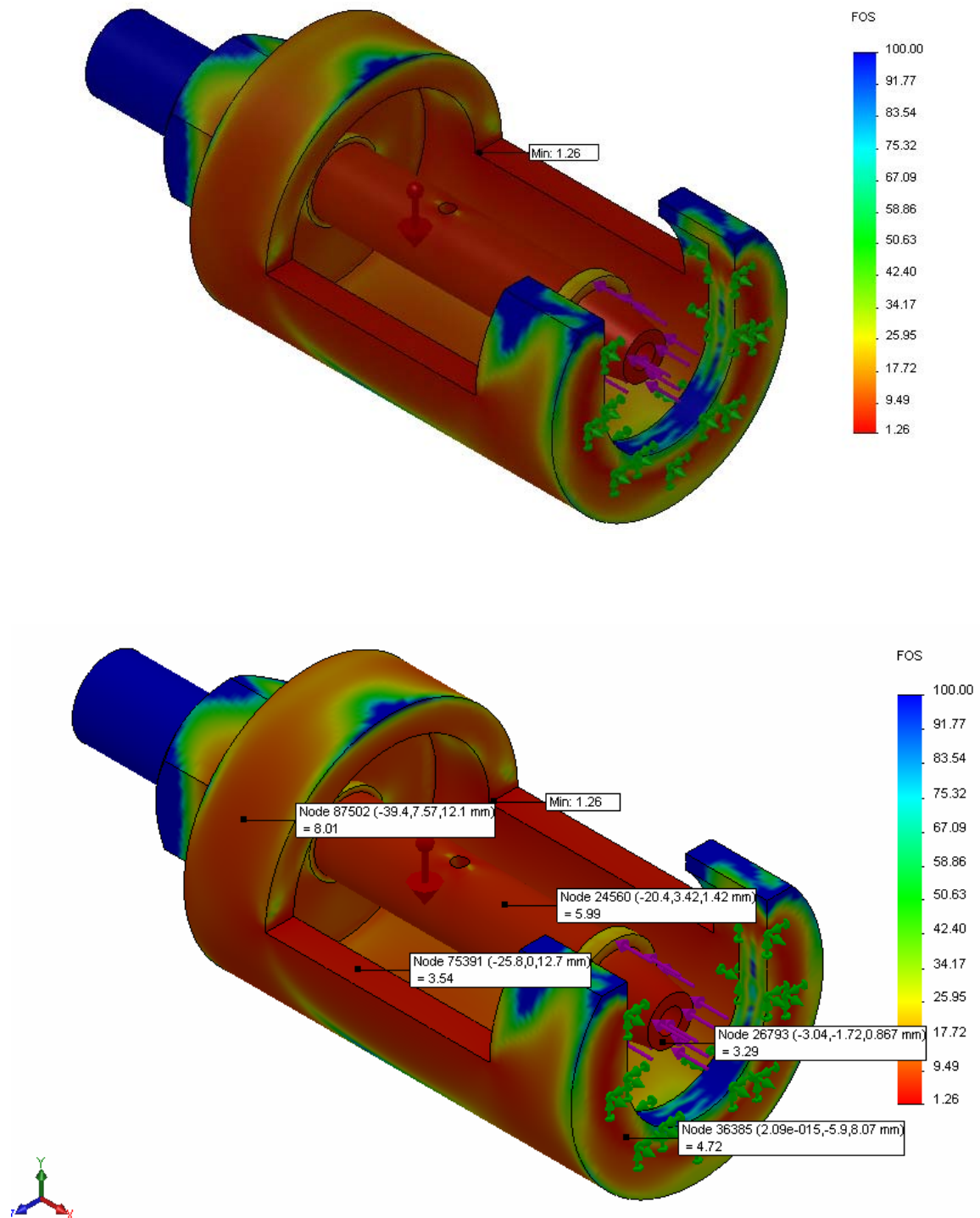
Housing#2-Study 1-Displacement-Displacement1

Model name: housing#2  
Study name: Study 1  
Plot type: Static strain Strain1  
Deformation scale: 1



Housing#2-Study 1-Strain-Strain1

Model name: housing#2  
 Study name: Study 1  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion: Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 1.3



Housing#2-Study 1-Factor of Safety-Factor of Safety1

## ภาคผนวก ง

รายละเอียดการวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเครื่องทวิแรงถอยรูปทรงกระบอก(Fillet)



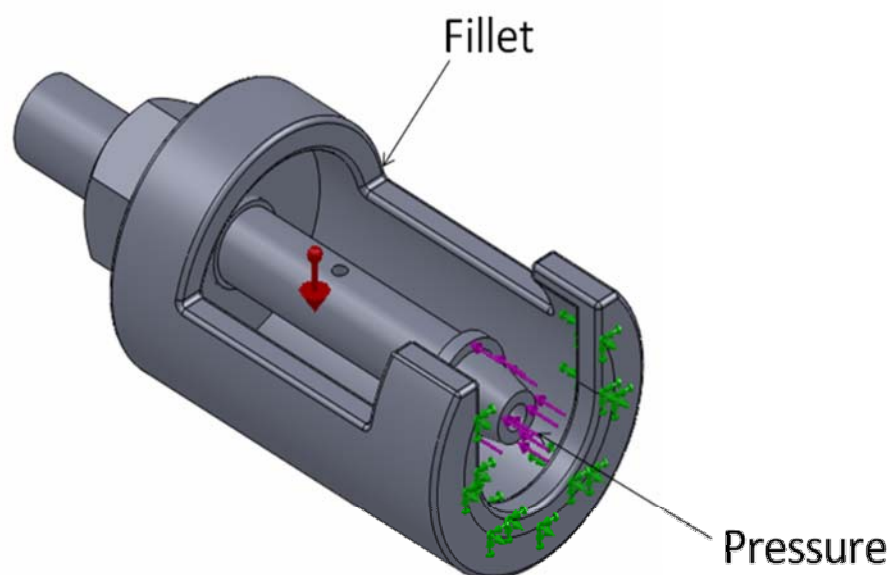
## Stress analysis of Ammunition

**Author: Chaiwat**

**Company: Srinakarinwirot**

***Note:***

*Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. Simulation helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.*



### **Description**

**Summarize the FEM analysis on housing#2**

## Assumptions

### Model Information

| Document Name | Configuration | Document Path                                                                                           | Date Modified            |
|---------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| housing#2     | Default       | C:\Documents and Settings\TOSHIBA\Desktop\coolme design\ammuntion\new test#2 ammuntion\housing#2.SLDPRT | Mon Nov 09 08:22:19 2009 |

### Study Properties

|                                                                 |                   |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Study name</b>                                               | <b>Study 2</b>    |
| Analysis type                                                   | Static            |
| Mesh Type:                                                      | Solid Mesh        |
| Solver type                                                     | FFEPlus           |
| Inplane Effect:                                                 | Off               |
| Soft Spring:                                                    | Off               |
| Inertial Relief:                                                | Off               |
| Thermal Effect:                                                 | Input Temperature |
| Zero strain temperature                                         | 298.000000        |
| Units                                                           | Kelvin            |
| Include fluid pressure effects from Solid Works Flow Simulation | Off               |
| Friction:                                                       | Off               |
| Ignore clearance for surface contact                            | Off               |
| Use Adaptive Method:                                            | Off               |

## Units

|                     |                  |
|---------------------|------------------|
| <b>Unit system:</b> | <b>SI</b>        |
| Length/Displacement | mm               |
| Temperature         | Kelvin           |
| Angular velocity    | rad/s            |
| Stress/Pressure     | N/m <sup>2</sup> |

## Material Properties

| No. | Body Name                                                                          | Material                       | Mass         | Volume                      |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------|-----------------------------|
| 1   | SolidBody 1(<Hexagon Flange Nut<br>ISO - 4161 - M10 - N 0.33in.>-<br><EndChamfer>) | AISI 4340 Steel,<br>normalized | 0.0132036 kg | 1.68199e-006 m <sup>3</sup> |
| 2   | SolidBody 2(Cut-Extrude7)                                                          | AISI 4340 Steel,<br>normalized | 0.0227041 kg | 2.89225e-006 m <sup>3</sup> |
| 3   | SolidBody 3(Split Line2)                                                           | AISI 4340 Steel,<br>normalized | 0.0727941 kg | 9.27314e-006 m <sup>3</sup> |

|                            |                                    |
|----------------------------|------------------------------------|
| <b>Material name:</b>      | <b>AISI 4340 Steel, normalized</b> |
| Description:               |                                    |
| Material Source:           |                                    |
| Material Model Type:       | Linear Elastic Isotropic           |
| Default Failure Criterion: | Max von Mises Stress               |
| Application Data:          |                                    |

| Property Name                 | Value     | Units             | Value Type |
|-------------------------------|-----------|-------------------|------------|
| Elastic modulus               | 2.05e+011 | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Poisson's ratio               | 0.32      | NA                | Constant   |
| Shear modulus                 | 8e+010    | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Mass density                  | 7850      | kg/m <sup>3</sup> | Constant   |
| Tensile strength              | 1.11e+009 | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Yield strength                | 7.1e+008  | N/m <sup>2</sup>  | Constant   |
| Thermal expansion coefficient | 1.23e-005 | /Kelvin           | Constant   |
| Thermal conductivity          | 44.5      | W/(m.K)           | Constant   |
| Specific heat                 | 475       | J/(kg.K)          | Constant   |

## Loads and Restraints

### Fixture

| Restraint name      | Selection set       | Description |
|---------------------|---------------------|-------------|
| Fixed-1 <housing#2> | on 3 Face(s) fixed. |             |

### Load

| Load name           | Selection set                                                                                                | Loading type       | Description |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------|
| Force-1 <housing#2> | on 1 Face(s) apply normal force 920 lbf using uniform distribution                                           | Sequential Loading |             |
| Force-2 <housing#2> | on 1 Face(s) apply normal force 92 N using uniform distribution                                              | Sequential Loading |             |
| Gravity-1           | Gravity with respect to Top Plane with gravity acceleration -9.81 m/s <sup>2</sup> normal to reference plane | Sequential Loading |             |

## Connector Definitions

**No Connectors were defined**

## Contact

**Contact state: Touching faces - Free**

|                            |                                               |
|----------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Component Contact-1</b> | <b>Contact component: Bonded on housing#2</b> |
| Description:               |                                               |

## Mesh Information

|                                  |                   |
|----------------------------------|-------------------|
| <b>Mesh Type:</b>                | <b>Solid Mesh</b> |
| Mesher Used:                     | Standard mesh     |
| Automatic Transition:            | Off               |
| Smooth Surface:                  | On                |
| Jacobian Check:                  | 4 Points          |
| Element Size:                    | 0.17728 in        |
| Tolerance:                       | 0.0088639 in      |
| Quality:                         | High              |
| Number of elements:              | 3469              |
| Number of nodes:                 | 6443              |
| Time to complete mesh(hh:mm:ss): | 00:00:04          |
| Computer name:                   | TOSHIBA-ACB5212   |

## Sensor Results

**No data available.**

**Reaction Forces**

| Selection set | Units | Sum X   | Sum Y   | Sum Z    | Resultant |
|---------------|-------|---------|---------|----------|-----------|
| Entire Body   | N     | 4108.78 | 1.73596 | -1.47322 | 4108.78   |

**Free-Body Forces**

| Selection set | Units | Sum X      | Sum Y       | Sum Z       | Resultant  |
|---------------|-------|------------|-------------|-------------|------------|
| Entire Body   | N     | 0.00325422 | 0.000226215 | -9.045e-005 | 0.00326333 |

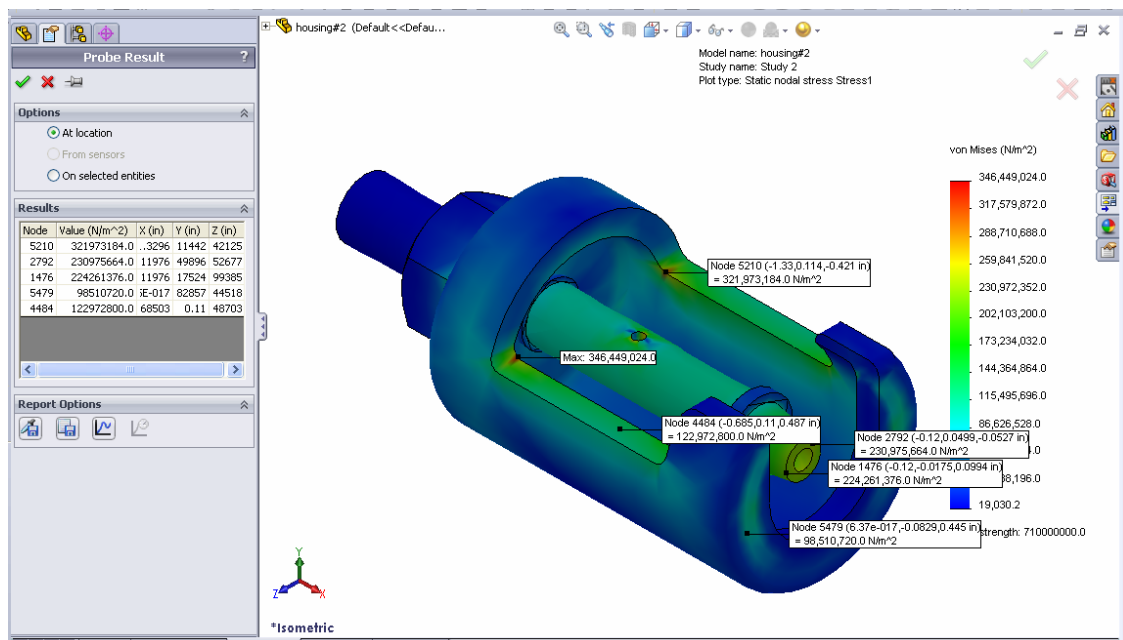
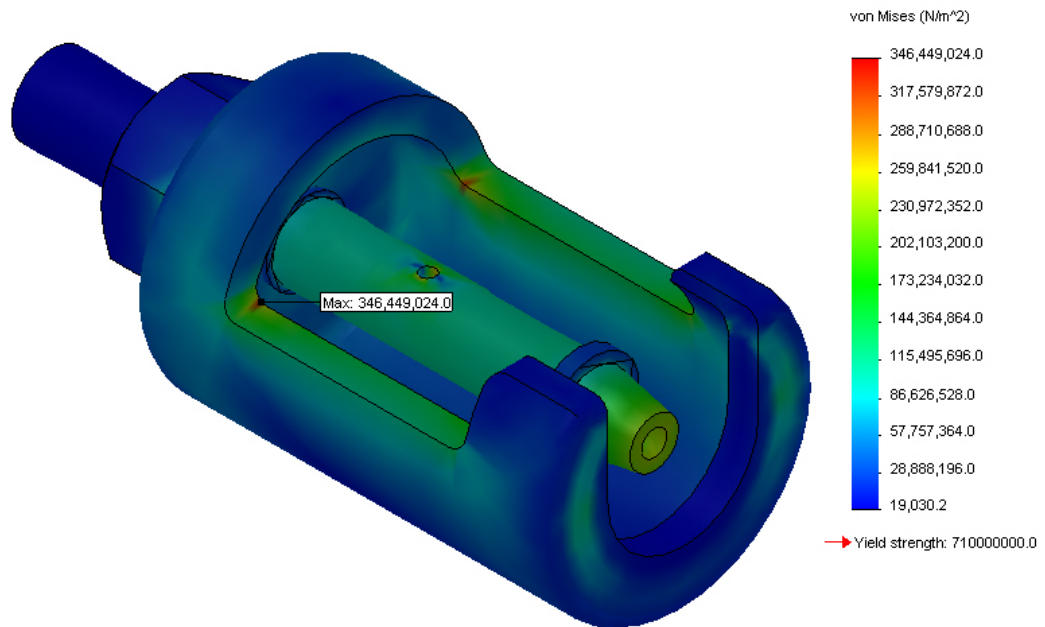
**Free-body Moments**

| Selection set | Units | Sum X | Sum Y | Sum Z | Resultant |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Entire Body   | N-m   | 0     | 0     | 0     | 1e-033    |

**Study Results****Default Results**

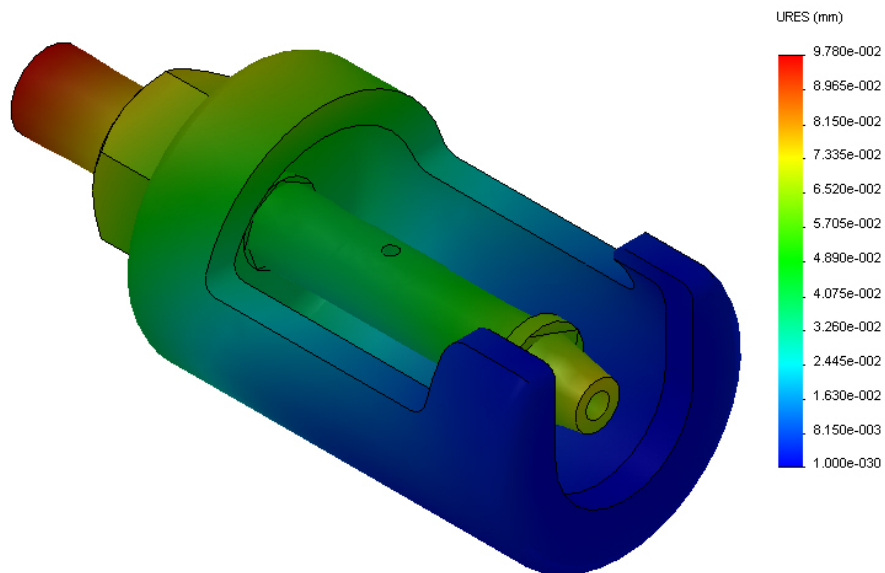
| Name          | Type                               | Min                           | Location                                          | Max                                 | Location                                           |
|---------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Stress1       | VON: von<br>Mises Stress           | 19030.2 N/m^2<br>Node: 3042   | (-2.61976 in,<br>0.167323 in,<br>1.69104e-016 in) | 3.46449e+008<br>N/m^2<br>Node: 3922 | (-1.32967 in,<br>0.114436 in,<br>0.421249 in)      |
| Displacement1 | URES:<br>Resultant<br>Displacement | 0 mm<br>Node: 3362            | (-0.125 in,<br>0.218856 in,<br>0.3125 in)         | 0.0978014 mm<br>Node: 3042          | (-2.62109 in,<br>0.163709 in,<br>-1.56116e-005 in) |
| Strain1       | ESTRN:<br>Equivalent<br>Strain     | 1.68755e-007<br>Element: 1141 | (-2.55234 in,<br>0.0763727 in,<br>0.0219611 in)   | 0.000981047<br>Element:<br>1586     | (-0.140001 in,<br>0.0102703 in,<br>0.0707455 in)   |

Model name: housing#2  
 Study name: Study 2  
 Plot type: Static nodal stress Stress1



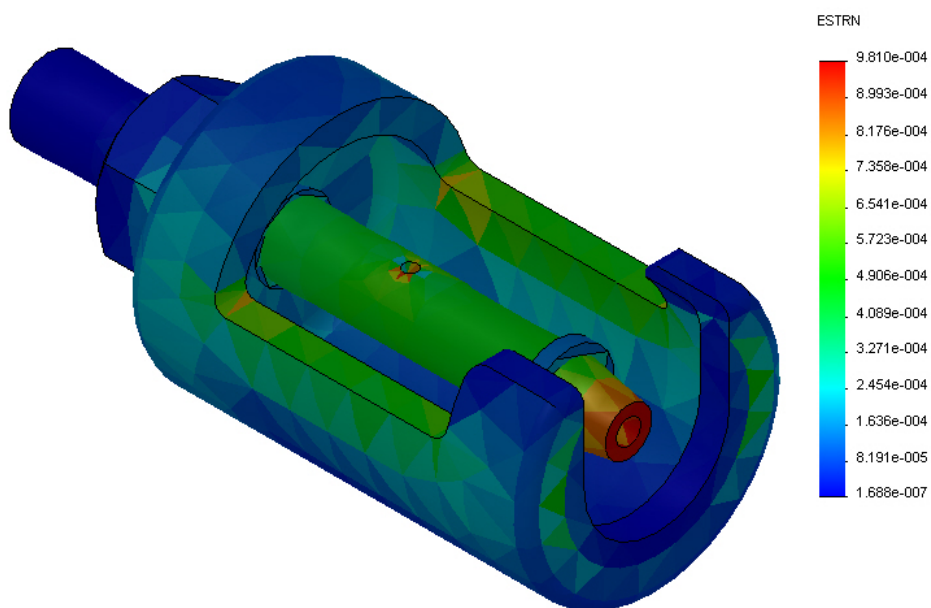
Housing#2-Study 2-Stress-Stress1

Model name: housing#2  
Study name: Study 2  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1



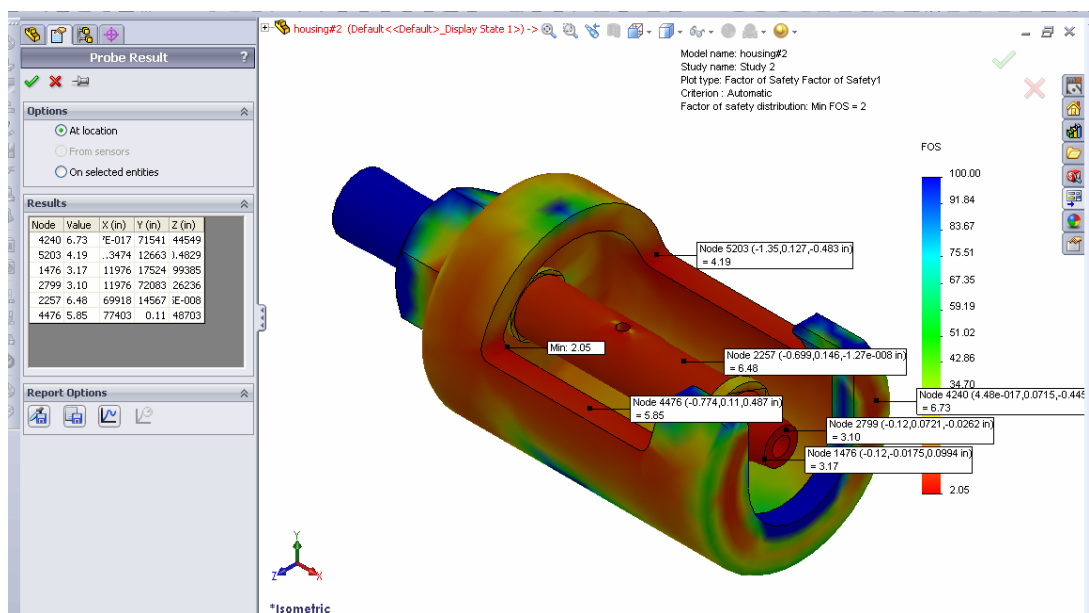
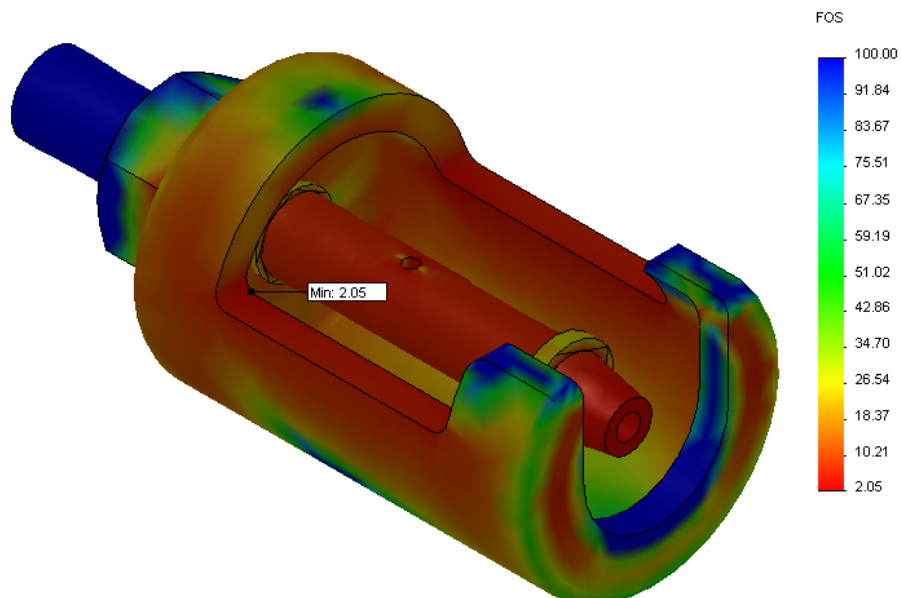
Housing#2-Study 2-Displacement-Displacement1

Model name: housing#2  
Study name: Study 2  
Plot type: Static strain Strain1  
Deformation scale: 1



Housing#2-Study 2-Strain-Strain1

Model name: housing#2  
 Study name: Study 2  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion : Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 2



Housing#2-Study 2-Factor of Safety-Factor of Safety1

## ภาคผนวก จ

รายละเอียดการวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยไฟไนต์เอลิเมนต์  
ของเครื่องทวีแรงถอยรูปทรงกระบอก หาแรงกระทำซ้ำ (Fatigue)



## **Fatigue analysis of Ammunition**

**Author: Chaiwat**

**Company: Srinakarinwirot**

### ***Note:***

*Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. Simulation helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.*

### **Description**

**Summarize the FEM analysis on housing\_2-Fatigue**

### **Assumptions**

### **Model Information**

| <b>Document Name</b> | <b>Configuration</b> | <b>Document Path</b>                                                                      | <b>Date Modified</b>        |
|----------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| housing_2-Fatigue    | Default              | C:\Documents and Settings\<br>Administrator\My Documents\<br>CAD\housing_2-Fatigue.SLDPRT | Thu Jan 03 00:56:55<br>2002 |

**Study Properties**

|                                                     |                               |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Study name</b>                                   | <b>Fatigue</b>                |
| Analysis type                                       | Fatigue                       |
| Interaction between event                           | Random                        |
| Stress component for alternating stress computation | Equivalent stress (von Mises) |
| S-N curve interpolation                             | Log-log                       |
| Fatigue strength reduction factor(Kf)               | 1                             |
| Shell face                                          | Top                           |

**Units**

|                     |                  |
|---------------------|------------------|
| <b>Unit system:</b> | <b>SI</b>        |
| Length/Displacement | m                |
| Temperature         | Kelvin           |
| Angular velocity    | rad/s            |
| Stress/Pressure     | N/m <sup>2</sup> |

**Material Properties****No data available.****S-N Curves**

| <b>No.</b> | <b>Name</b> | <b>Stress ratio(r)</b> |
|------------|-------------|------------------------|
| 1          | SN curve    | -1.000000              |

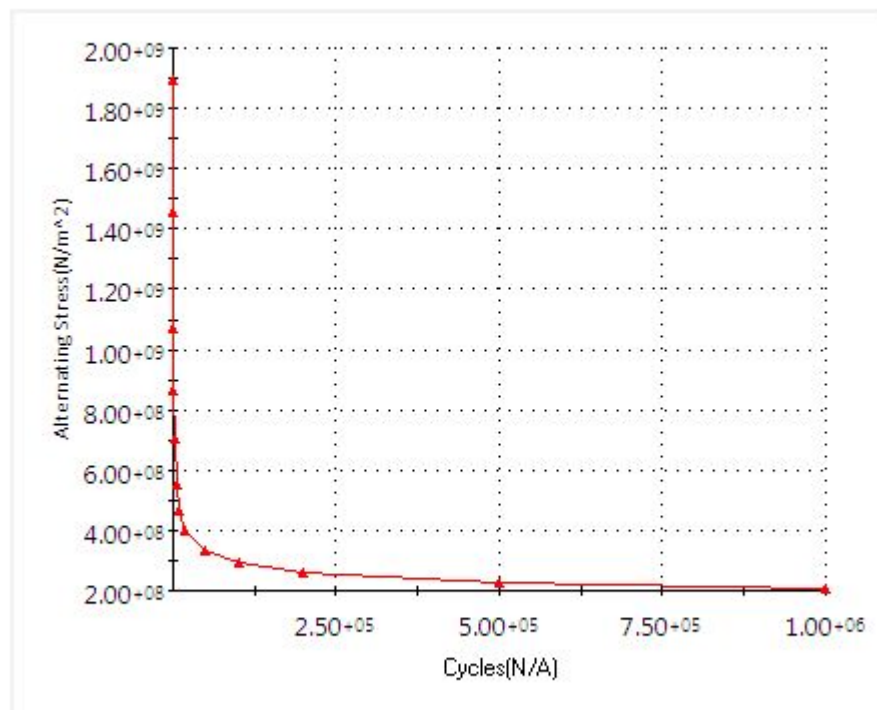
**S-N curve name: SN curve**

### Alternating stress vs Cycles

**Data Points:**

| Cycles | Alternating Stress (in N/m <sup>2</sup> ) |
|--------|-------------------------------------------|
| 100    | 1.8906e+009                               |
| 200    | 1.456e+009                                |
| 500    | 1.0721e+009                               |
| 1000   | 8.6201e+008                               |
| 2000   | 7.0265e+008                               |
| 5000   | 5.5053e+008                               |
| 10000  | 4.636e+008                                |
| 20000  | 4.0203e+008                               |
| 50000  | 3.3539e+008                               |
| 1e+005 | 2.9555e+008                               |
| 2e+005 | 2.6005e+008                               |
| 5e+005 | 2.2456e+008                               |
| 1e+006 | 2.05e+008                                 |

SN curve



0,0

SN curve

## Loads and Restraints

### Events

| Name    | No. of cycles | Loading ratio( LR ) | Study(s) |
|---------|---------------|---------------------|----------|
| Event-1 | 50000         | -1                  | Study 1  |

**Connector Definitions****Contact****Mesh Information**

**No data available.**

**Design Scenario Results**

**No data available.**

**Sensor Results**

**No data available.**

**Reaction Forces**

**Reaction Forces not available.**

**Free-Body Forces**

**Free Body Forces not available.**

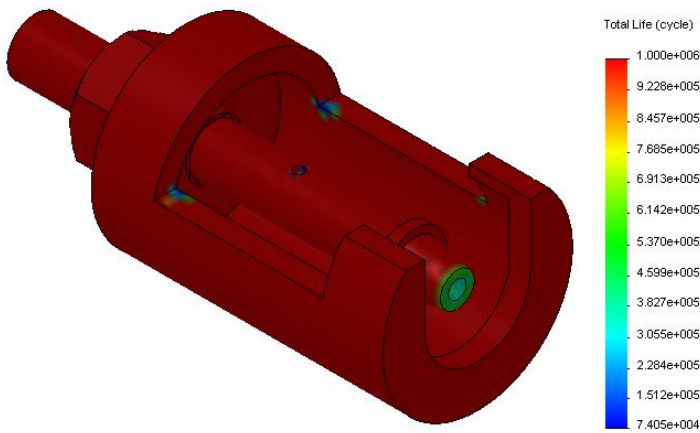
**Bolt Forces**

**No data available.**

**Pin Forces****No data available.****Study Results****Default Results**

| Name     | Type                     | Min                          | Location                                       | Max                     | Location                                        |
|----------|--------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|
| Results2 | Life plot                | 74049.8 cycle<br>Node: 10188 | (-1.31758 in,<br>0.11 in,<br>0.422429 in)      | 1e+006 cycle<br>Node: 1 | (-1.74774 in,<br>0.144906 in,<br>0.0836614 in)  |
| Results1 | Damage plot              | 0.05<br>Node: 1              | (-1.74774 in,<br>0.144906 in,<br>0.0836614 in) | 0.675221<br>Node: 10188 | (-1.31758 in,<br>0.11 in,<br>0.422429 in)       |
| Results3 | Factor of<br>safety plot | 1.07428<br>Node: 10188       | (-1.31758 in,<br>0.11 in,<br>0.422429 in)      | 28934.2<br>Node: 6253   | (-2.61976 in,<br>-0.118315 in,<br>-0.118315 in) |

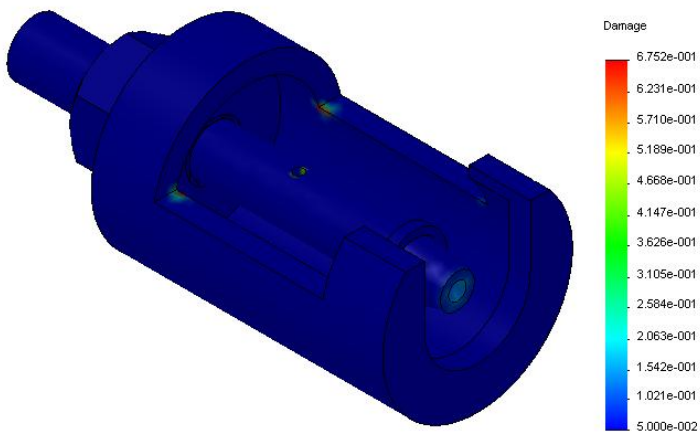
Model name: housing\_2-Fatigue  
Study name: Fatigue  
Plot type: Fatigue Results2



Educational Version. For Instructional Use Only

Housing\_2-Fatigue-Fatigue-Results-Results2

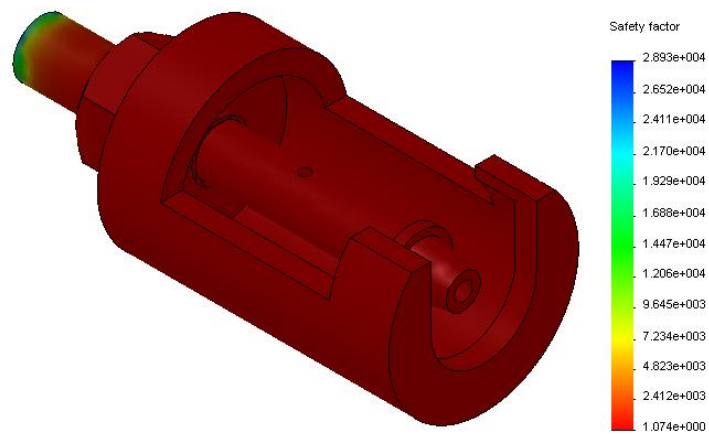
Model name: housing\_2-Fatigue  
Study name: Fatigue  
Plot type: Fatigue Results1



Educational Version. For Instructional Use Only

Housing\_2-Fatigue-Fatigue-Results-Results1

Model name: housing\_2-Fatigue  
Study name: Fatigue  
Plot type: Fatigue Results3



Educational Version. For Instructional Use Only

Housing\_2-Fatigue-Fatigue-Results-Results3

## ภาคผนวก จ

รายละเอียดของกลุ่มมีต้นฉบับจากกรมสรรพาวุธทหารบก

**SAA Pamphlet 23-1**

**SECTION XII**  
**5.56MM AMMUNITION**

**Cartridge, 5.56mm, Ball, M193****AMCTCM: 5143****STATUS: STD A**

|                         |                                                                       |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| SPECIFICATION :         | MIL-C-9963                                                            |
| WEAPON :                | Rifle, 5.56mm, M16; M16E1                                             |
| BALLISTIC PERFORMANCE : |                                                                       |
| VELOCITY :              | 3250 $\pm$ 40 ft/sec at 15 feet, Std Dev<br>40 ft/sec max.            |
| PRESSURE :              | 52,000 psi max. avg.; avg. pressure plus<br>3 Std Dev 58,000 psi max. |
| PORT PRESSURE :         | 15,000 psi $\pm$ 2,000 psi                                            |
| ACCURACY :              | 2.00" mean radius max. avg. at 200 yards                              |
| CARTRIDGE :             | D10523632 – 182 -14 grs                                               |
| CASE :                  | C10524200-94 – 5 grs                                                  |
| Cup :                   | Copper alloy (70/30) No. 260, Annealed,<br>Spec MIL-C-50              |
| BULLET :                | C10524197 – 56 – 2 grs                                                |
| Bullet Jacket :         | 17.5 – 1 grs                                                          |
| Cup :                   | Copper alloy (90/10) No. 220, Spec MIL-<br>C-21768, Annealed          |
| Slug :                  | 38.5 – 1 grs, lead-antimony, Spec MIL-<br>L-13283, Grade 1            |
| PRIMER PERCUSSION:      |                                                                       |
| Drawing No. :           | B10534013                                                             |
| Primer Weight :         | 4.0 grs approx.                                                       |
| Composition :           | Lead styphnate                                                        |
| PROPELLANT :            | Spec MIL-P-3984                                                       |

**IMR8208M WC846**

|                  |                      |                         |
|------------------|----------------------|-------------------------|
| Drawing No. :    | C10535450            | B10534784               |
| Type :           | Single base, tubular | Double base, spheroidal |
| Weight :         | 25.5 grs             | 28.5 grs                |
| IDENTIFICATION : | Plain tip            |                         |

**PACKAGING :**

F10523635 – Cartons; Box, Ammunition, M2A1; Box, Wirebound – 1440 ctgs

Est. Wt.: 59.4 lbs.

F10534605 – Cartons; Bandoleers; Box, Ammunition, M2A1; Box, Wirebound

1120 ctgs Est. Wt.: 50.84 lbs.

F10535858 – Cartons; Box, Ammunition, M2A1; Box, Wirebound – 1640 ctgs

Est. Wt.: 64.54 lbs.

F10542258 – 10 rd Clips; Cartons; Bandoleers; Box, Ammunition, M2A1; Box, Wirebound

– 1680 ctgs Est. Wt.: 68.77 lbs

**SAA Pamphlet 23-1****Cartridge, 5.56mm, Blank, XM200****AMCTCM : 5237****STATUS : LP**

SPECIFICATION : MIL-C-60616 (MU)

WEAPON : Rifle, 5.56mm, M16; XM16E1 with blankfiring attachment

BALLISTIC PERFORMANCE:

SCREEN PERFORATION : No perforations in paper screen at 15 ft

CYCLIC RATE : Min. 550 rds per minute, max. 800 rds  
Per minute

CARTRIDGE : C10542379, 109.5 – 4 grs

CASE : C10534927, 98-3 grs

Cup: Copper alloy No. 260 annealed, Spec MIL-C-50

BULLET : None, Case Mouth closed with 7 petal  
Rose crimp

PRIMER, PERCUSSION :

Drawing No. : B10534013

Primer Weight : 4.0 grs approx.

Composition : Lead Styphnate

PROPELLANT : HPC 13

Drawing No. : C10542380

Type : Double Base, Flake

Weight : 7.0 grs

WAD : None

IDENTIFICATION : Cannelure approx ½ “ from head and case  
Mouth closed with 7 petal rose crimp

#### **PACKAGING :**

F10542291 – Cartons; Box, Ammunition, M2A1; Box, Wirebound – 1880 ctgs

Est. Wt. : 51.4 lbs.

..... Cartridge, 5.56mm, Inert Loaded, M232

MCTCM : 4485 STATUS : STD A

SPECIFICATION : MIL-D-60254(MU)

WEAPON : Rifle, 5.56mm, XM16E1, M16

CARTRIDGE : D10534146, 181.5 – 7.0 grs

CASE : C10533842, 94 – 5 grs

Cup: Copper Alloy No. 260 Annealed, Spec MIL-C-50

BULLET : C10533843, 56 – 2 grs

Jacket : 17.5 – 1 grs

Cup : Copper Alloy No. 220 Annealed, Spec  
MIL-C-21768

Slug : 38.5 – 1 grs, Lead Spec MIL-L-13283, Grade 1

PRIMER : None

PROPELLANT : 31 grs Sodium Carbonate Monohydrate,  
Spec 0-C-275

IDENTIFICATION : Cartridge, chemical black, Spec MIL-F-495

**PACKAGING :**

F10523635 – Cartons ; Box, Ammunition, M2A1; Box, Wirebound – 1440 ctgs

Est. Wt.: 51.4 lbs.

F10535858 – Cartons ; Box, Ammunition M2A1; Box, Wirebound – 1640 ctgs

Est. Wt.: 64.54 lbs.

ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

|                              |                                                                                                                                                                  |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ ชื่อสกุล                | ร้อยเอกชัยวัฒน์ กริชนัยรวิวงศ์                                                                                                                                   |
| วันเดือนปีเกิด               | 19 กรกฎาคม 2523                                                                                                                                                  |
| สถานที่เกิด                  | จังหวัดพัทลุง                                                                                                                                                    |
| สถานที่อยู่ปัจจุบัน          | 471 หมู่ที่ 3 ซอยลาดปลาเค้า 63 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน<br>จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10220<br>โทรศัพท์ 02-5701423                                                     |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน | ผู้บังคับกองร้อยทหารช่างสนาม                                                                                                                                     |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน         | กองพันทหารช่างที่ 1 รักษาพระองค์                                                                                                                                 |
| ประวัติการศึกษา              |                                                                                                                                                                  |
| พ.ศ. 2536                    | ประถมศึกษา<br>จาก โรงเรียนอนุบาลพัทลุง จังหวัดพัทลุง                                                                                                             |
| พ.ศ. 2539                    | มัธยมศึกษาตอนต้น<br>จาก โรงเรียนพัทลุง จังหวัดพัทลุง                                                                                                             |
| พ.ศ. 2543                    | มัธยมศึกษาตอนปลาย<br>จาก โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดกรุงเทพมหานคร                                                                                                 |
| พ.ศ. 2547                    | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต<br>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง<br>จาก โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จังหวัดนครนายก                                          |
| พ.ศ. 2550                    | หลักสูตรนักเรียนนายร้อยทหารบกอังกฤษ<br>(Commissioning course)<br>จาก โรงเรียนนายร้อยทหารบกอังกฤษ ( Sandhurst )<br>ประเทศสหราชอาณาจักรบริเตนใหญ่และไอร์แลนด์เหนือ |
| พ.ศ. 2553                    | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล<br>จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ<br>กรุงเทพมหานคร                                                                  |