

การพิจารณาเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตท่อจรวด Design trade off study for rocket motor case materials

อดุลยศักดิ์ บุญพันธ์^{1*}, อธิพันธ์ หดย้อย¹, น.อ.คมสันต์ ประพันธ์กาญจน์¹ และ น.อ. เจษฎา ศิริรัฐนิคม¹

¹ ฝ่ายวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) อาคารสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม (แจ้งวัฒนะ) จ.นนทบุรี 11120

*ติดต่อ: adulyasak.b@dti.or.th, โทรศัพท์: 02 980 6200-207 ต่อ 330, โทรสาร: 02 980 6198

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตท่อมอเตอร์จรวดโดยเปรียบเทียบความเหมาะสมของวัสดุ 4 ประเภท คือ เหล็กชนิด AISI4130, เหล็กชนิด ST52.3, อลูมิเนียมชนิด AL7075T6 และอลูมิเนียม AL6061T6 พันทับด้วยเส้นใยแรงดันสูง เพื่อคำนวณหาจากการออกแบบระยะยิงโปรเจกไทล์ 60 กิโลเมตรขึ้นไปโดยใช้ค่า Hoop Stress และ Bending Moment มาเป็นหลักการในการพิจารณา โดยกำหนดค่าความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้ไม่เกิน 1800 psi ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของท่อ 230 มิลลิเมตร โดยที่ท่อสามารถทนต่อการกระแทกจากการขนส่งหรือติดตั้งบนยานยนต์ที่ความเร่ง 40g หลังจากนั้นคำนวณหาค่า Total Impulse เพื่อหาค่ากำลังขับของดินขับสามารถได้ระยะยิงโปรเจกไทล์ 60 กิโลเมตรขึ้นไป ถ้าระยะยิงยังไม่ได้ต้องการเพิ่มความยาวของท่อจรวดหรือเพิ่มดินขับ

คำหลัก: มอเตอร์จรวด, ความดันสูงสุดในท่อมอเตอร์, ความเค้นในแนวเส้นรอบวงสูงสุด

Abstract

This research is a study a suitable material for the production of rocket motors by comparing the four types of materials. Consists of steel type AISI4130, ST52.3 and aluminum type AL7075T6, AL6061T6 composite. The value of Hoop Stress and Bending Moment used to design distance of motion of a Projectile at 60 km up. The maximum pressure in the combustion chamber does not exceed 1800 psi. And used the outer diameter is 230 mm. Rocket motor need to withstand the impact of transport, or installed on a vehicle at a speed of 40 g. After that calculating the Total Impulse for find thrust of propellant at a distance of motion of a Projectile at 60 km up. If the distance of the shot is not. Should increase the length of the rocket motor or propellant.

Keywords: Rocket motor, Maximum Expected Operating Pressure (MEOP), Hoop Stress

1. บทนำ

การออกแบบมอเตอร์จรวดนั้นส่วนสำคัญอันดับแรกคือการเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ผลิตมอเตอร์จรวดส่วนใหญ่วัสดุที่ถูกเลือกใช้ทั่วไปในการผลิตท่อจรวดคือ เหล็ก อลูมิเนียม เหล็กสเตนเลส ไทเทเนียมอัลลอย

และคอมโพสิต [1] ในการเปรียบเทียบความเหมาะสมของวัสดุทั่วไปสำหรับเลือกใช้ผลิตมอเตอร์จรวดคำนึงจากการทนความร้อน การควบคุมคุณภาพในการผลิตปริมาณมาก น้ำหนักชิ้นงาน และราคาของวัสดุ [2] งานวิจัยนี้ศึกษาการเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตท่อ

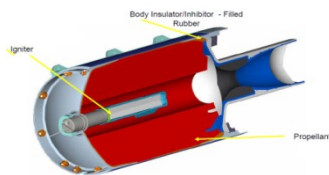
มอเตอร์จรวดโดยเปรียบเทียบความเหมาะสมของวัสดุ 4 ประเภท คือ เหล็กชนิด AISI4130, เหล็กชนิด ST52.3, อลูมิเนียมชนิด AL7075T6 และอลูมิเนียม AL6061T6 พันทับด้วยเส้นใยแรงดันสูง นำมาพิจารณาตามขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 1 คำนวณหาจากค่า Hoop Stress จากสมการ $\sigma_H = \frac{Pr}{t}$ เมื่อค่า σ_H คือความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (N/mm²), P คือ ความดัน (N/mm²), r คือ รัศมีเฉลี่ยของทรงกระบอกกึ่งกลางผนังบาง (mm) และ t คือ ของทรงกระบอกกึ่งกลางผนังบาง (mm) คำนวณหาค่า Bending Moment จากสมการ $\sigma_{Bending} = \frac{MC}{I}$ เมื่อค่า $\sigma_{Bending}$ คือความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (N/mm²), M คือ โมเมนต์การดัด (N.mm), C คือ จุดศูนย์กลางของวัสดุ (mm) และ I คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (mm⁴)

2. หลักการวิจัย

การออกแบบโครงสร้างและการเลือกชิ้นส่วนจรวด นอกจากการพิจารณาในการคำนวณระยะยิงเพื่อให้บรรลุเป้าหมายแล้วนั้นยังต้องคำนึงถึงวัสดุอุปกรณ์ในการผลิต พร้อมทั้งรวมถึงการขนส่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบเช่นกัน สำหรับงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการพิจารณาชิ้นส่วนที่ถือว่าเป็นจุดวิกฤติที่สุดมา เป็นกรณีศึกษา โดยพิจารณาในส่วนของมอเตอร์จรวดเป็นหลักในงานวิจัยนี้

2.1 ชิ้นส่วนสำหรับการวิเคราะห์

ส่วนประกอบที่ใช้ทำการวิเคราะห์ เป็นกลุ่มอุปกรณ์ในห้องเผาไหม้ (Chamber) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนในการบรรจุเชื้อของจรวด โดยในงานวิจัยนี้พิจารณาเชื้อเพลิงแข็งแบบคอมโพสิตในการพิจารณาออกแบบ



รูปที่ 1. แสดงส่วนประกอบต่างๆ ในห้องเผาไหม้

สำหรับห้องเผาไหม้ถือว่าเป็นชิ้นส่วนรองรับความดันจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงสูงและยังต้องคำนึงถึงความแข็งแรงทน สภาวะของการใช้งานต่างๆ

2.2 การคำนวณหาค่ากำลังขับของจรวด

การหาค่ากำลังขับจรวดสำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมิน Total Impulse กับน้ำหนักของเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้ได้ตามสมการดังนี้

$$\bar{F} = \frac{I_{sp} m_p}{t} \tag{1}$$

เมื่อ

$F_{reaction}$ คือ แรงปฏิกิริยาที่เกิดจากแรงขับ (Thrust)

I_{sp} คือ Specific Impulse หน่วย m/sec

m_p คือ Total mass of Propellant

2.3 การพิจารณาสำหรับการออกแบบมอเตอร์จรวด มอเตอร์จรวดเป็นชิ้นส่วนที่ถือว่าได้รับการโหลดจากการใช้งานหลักๆ คือ ความดันจากการเผาไหม้และการบรรจุทุกในการขนย้ายจรวดหรือการบรรจุในท่อยัง โดยมีหลักการพิจารณาดังนี้

2.3.1 การหาค่าความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้

สำหรับดินขับจรวดเชื้อเพลิงแข็งอัตราการเผาไหม้จะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความดันการเผาไหม้สูงขึ้นได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเผาไหม้กับอุณหภูมิของดินขับ ในรูปของ Temperature Sensitivity of Burning Rate ตามสมการดังนี้

$$\sigma_p = \left(\frac{\delta \ln r}{\delta T} \right)_p = \frac{1}{r} \left(\frac{\delta r}{\delta T} \right)_p \tag{2}$$

เมื่อ

σ_p Temperature Sensitivity of Burning Rate



r อัตราการเผาไหม้ของดินซึบ
T อุณหภูมิของดินซึบ

และความสัมพันธ์ระหว่างความดันในห้องเผาไหม้กับ
อุณหภูมิของดินซึบในรูปของ Temperature Sensitivity
of Pressure โดยค่า π_K (อัตราส่วนระหว่างพื้นที่เผาไหม้
ต่อพื้นที่หน้าตัด Nozzle) คงที่ ตามสมการดังนี้

$$\pi_K = \left(\frac{\delta \ln P}{\delta T} \right)_K = \frac{1}{P} \left(\frac{\delta P}{\delta T} \right)_K \quad (3)$$

เมื่อ

π_K Temperature Sensitivity of
Pressure

P ความดันในห้องเผาไหม้

สำหรับดินซึบโดยทั่วไปค่า π_K มีค่าประมาณ 0.216 ถึง
0.900% ต่อ °C

การหาค่าความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้ (Maximum
Expected Operating Pressure: MEOP) ระหว่างที่มี
การจุดตัวในห้องเผาไหม้ สำหรับเป็นข้อมูลพื้นฐานในการ
ออกแบบท่อมอเตอร์จรวดต่อไป

2.3.2 การพิจารณาค่าความเค้นในแนวเส้นรอบ
วงของท่อ (Hoop Stress)

การพิจารณาความแข็งแรงของท่อที่รับภาระ
โหดจากความดันจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งโดยมี
สมการดังนี้

$$\sigma_H = \frac{Pr}{t} \quad (4)$$

เมื่อ

σ_H = ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (N/mm²)
P = ความดันที่เกิดขึ้นในภาชนะ (N/mm²)
r = รัศมีเฉลี่ยของทรงกระบอกกลางผนังบาง (mm)
t = ความหนาของทรงกระบอกกลางผนังบาง (mm)

2.3.3 การพิจารณาค่าความเค้น จากการดัด
(Bending Moment)

เพื่อพิจารณาถึงความแข็งแรงจากการดัดตัวของ
โครงสร้างท่อจรวด โดยมีสมการในการออกแบบดังนี้

$$\sigma_{Bending} = \frac{MC}{I} = \frac{M}{Z} \quad (5)$$

และค่า Section Moment ของท่อกลม

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \left[\frac{D_o^3 - D_i^3}{D_o} \right] \quad (6)$$

เมื่อ

$\sigma_{Bending}$ = ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (N/mm²)

M = ค่าโมเมนต์การดัด (N*mm)

C = จุดศูนย์กลางของวัสดุ (mm)

I = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (mm⁴)

Z = ค่า Section Moment (mm³)

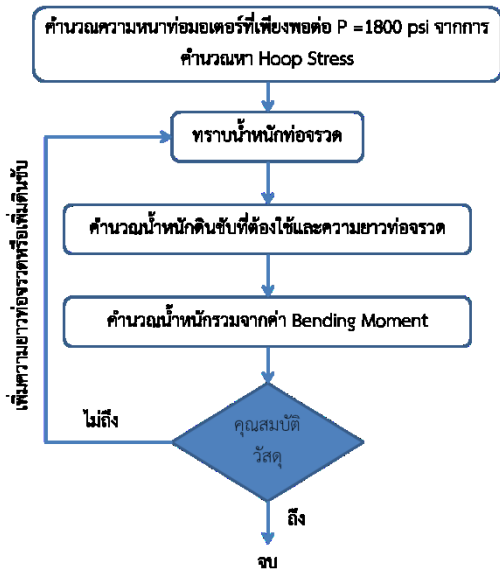
D_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (mm)

D_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (mm)

3. กรณีศึกษาของการออกแบบ

3.1 กระบวนการออกแบบ

การเลือกวัสดุสำหรับนำมาผลิตท่อจรวด นับว่า
ต้องนำเงื่อนไขต่างๆ เข้ามาร่วมพิจารณาเพื่อหาวัสดุที่
เหมาะสมสำหรับการออกแบบตามเงื่อนไขการออกแบบ
โดยสามารถเขียนเป็นกระบวนการในการออกแบบได้ดังนี้



รูปที่ 2. ขั้นตอนการพิจารณาเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตท่อมอเตอร์จรวด

3.2 การเลือกวัสดุในการออกแบบชิ้นงาน

สำหรับการเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตมอเตอร์จรวด ในงานวิจัยได้ทำการเลือกวัสดุทั่วไปเพื่อนำมาเปรียบเทียบตามตารางดังนี้

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบความเหมาะสมของวัสดุทั่วไปสำหรับเลือกใช้ผลิตมอเตอร์จรวด

วัสดุ	การทนความร้อน (A)	ความทนทานต่อการผลิตปริมาณมาก (B)	น้ำหนักชิ้นงาน (C)	ราคา (D)	ความเหมาะสมในการนำมาทำมอเตอร์จรวด (A)+(B)+(C)+(D)
Steel	ดีมาก (5)	ดีมาก (5)	แย (1)	ถูก (5)	อันดับ 1 (16)
Aluminums	แย (1)	ดี (4)	ดี (4)	พอใช้ (3)	(12)
Stainless Steel	พอใช้ (3)	ดีมาก (5)	แย (1)	พอใช้ (3)	(12)
Composite	พอใช้ (3)	พอใช้ (3)	ดีมาก (5)	พอใช้ (3)	อันดับ 2 (14)
Titanium alloy	ดี (4)	พอใช้ (3)	ดี (4)	แพง (1)	(12)

จากตารางเปรียบเทียบวัสดุเมื่อพิจารณา วัสดุที่เหมาะสมต่อการนำมาทำ มอเตอร์จรวด 2 อันดับแรก คือ เหล็ก (Steel) และ คอมโพสิท (Composite Material) โดยงานวิจัยฉบับนี้ได้นำหลักการการพิจารณา ค่า Hoop Stress และค่า Bending Moment ของท่อเพื่อคำนวณหาความหนาของมอเตอร์จรวดโดยอ้างอิงสมการ

4. ขั้นตอนการออกแบบวิจัย

4.1 การคำนวณ ความดันสูงสุดจากการเผาไหม้ (MEOP: Maximum Expected Operating Pressure)

สำหรับงานวิจัยได้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบท่อมอเตอร์จรวดดังนี้

- ความดันสูงสุดประมาณ 1,600 psi
- อุณหภูมิก่อนเผาไหม้ 30 °C
- อุณหภูมิสูงสุดของดินขับก่อนเผาไหม้ที่ 60 °C
- $\pi_K = 0.4 \%$
- ค่าความปลอดภัยสำหรับการออกแบบมอเตอร์ S.F.=1.25

แนวคิดในการออกแบบ

จากคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุตามที่กำหนดเบื้องต้น กำหนดความดันสูงสุดประมาณ 1,600 psi เมื่อดินขับมีอุณหภูมิก่อนเผาไหม้ 30 °C กำหนดอุณหภูมิสูงสุดของดินขับก่อนเผาไหม้ คือ 60 °C เลือกใช้ค่าสูง $\pi_K = 0.009$ ดังนั้นค่าความดันสูงสุดจากการเผาไหม้ (Maximum Expected Operating Pressure: MEOP) หาได้จากสมการ

$$\pi_K = \frac{1}{p_1} \left(\frac{\Delta p}{\Delta T} \right)$$

แทนค่า $\pi_K = 0.4 \%$ หรือ 0.004

$$T_1 = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 1,600 \text{ psi}$$

ลงในสมการ

$$0.004 = \frac{1}{1,600} \left(\frac{p_{60^\circ\text{C}} - 1,600}{60 - 30} \right)$$

$$P_{60^\circ\text{C}} = 1792 \text{ psi}$$

∴ ความดันสูงสุดจากการเผาไหม้ 1792 psi และเลือก
ที่ค่า 1800 psi เป็นค่าออกแบบต่อไป

เจาะหา ศิริรัฐนิคม เพื่อใช้คำนวณหาระยะยิงของจรวด
ตามรูปที่ (1)

4.2 การตรวจสอบ ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง
(Hoop Stress) และคำนวณหาความหนาของมอเตอร์
จรวด

หลักการพิจารณาข้อกำหนดในการออกแบบ
สำหรับ Hoop Stress ของท่อจรวดมีเงื่อนไขดังนี้

- ค่าความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้ไม่เกิน 1800 psi (จาก MEOP 1782 psi)
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกท่อ Out Dia. (OD) = 230 mm
- ค่าความปลอดภัยสำหรับการออกแบบมอเตอร์ S.F.=1.25

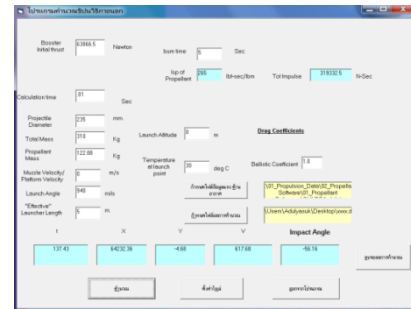
ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบวัสดุสำหรับหาค่าความหนา
ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขออกแบบ

Materials	Yield Strength (psi)	Pressure (psi)	S.F.	OD (mm)	thk. (mm)	thk. (mm)	ID (mm)
Steel							
AISI4130	135,000	1800	1.25	230	1.89	2	226
SS400	36,259	1800	1.25	230	6.72	6.75	216.5
AISI SAE 4041	130,000	1800	1.25	230	1.96	2	226
Aluminum							
Al 6061 T6	35,000	1800	1.25	230	6.95	7	216
Al 6061 T8	42,000	1800	1.25	230	5.85	6	218

4.3 การคำนวณหาค่ากำลังขับเคลื่อนและระยะยิงของจรวด
กำหนดสำหรับเงื่อนไขการออกแบบดังนี้
ข้อกำหนดในการออกแบบ :

- เวลาในการเผาไหม้ทั้งหมด $t = 5 \text{ sec}$
- ความยาวของมอเตอร์จรวดอยู่ที่ 2400 mm
- $I_{sp} = 265$ (สำหรับเชื้อเพลิงแบบคอมโพสิท)

จากสมการที่ (1) และเงื่อนไขกำหนดสามารถนำมาหาค่า
กำลังขับและระยะยิงได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม
ของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่พัฒนาโดย น.อ.



รูปที่ 3. แสดงโปรแกรมการหาระยะยิงของจรวด
ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบกำลังขับเคลื่อนและระยะยิง

Materials	OD (mm)	ID (mm)	weight		Thrust (N)	Dist (km)
			Propellant (kg)	Motor (kg)		
Steel						
AISI4130	230	226	122.8	27.57	63,847.40	64.18
SS400	230	216.5	108.74	91.12	56,537.19	48.03
AISI SAE 4041	230	226	122.8	27.57	63,847.40	64.18
Aluminum						
Al 6061 T6	230	216	108.1	32.42	56,204.43	47.37
Al 6061 T8	230	218	110.67	27.92	57,540.65	50.06

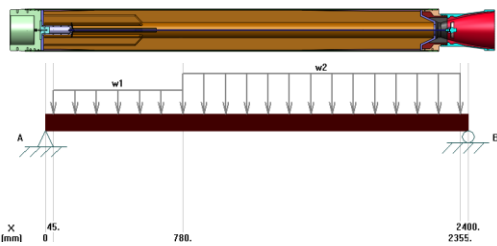
จากตารางที่ 3 ผลการคำนวณมีเพียง AISI4130 และ
AISI SAE 4041 ที่สามารถบรรจุเชื้อเพลิงแข็งได้เพียง
พอที่จะยิงได้ถึง 60 กิโลเมตรขึ้นไปตามเป้าหมาย

4.4 การตรวจสอบความเค้นดัด (Bending Moment)
โดยกำหนดสำหรับเงื่อนไขการออกแบบดังนี้

- ต้องสามารถทนต่อการกระแทกจากการขนส่ง
หรือติดตั้งบนยานยนต์ โดยมีความเร่ง 40 g
(MIL-STD-810F)
- กำหนดรองรับด้วย Sabot ที่ด้านหัวและท้าย
ของท่อมอเตอร์จรวด มีระยะห่างประมาณ
2.4 เมตร

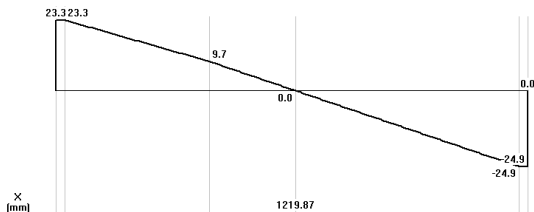
- น้ำหนักดินขับของจรวดไม่เกิน 122.86 kg.
(รูปดาว 34.68 kg., วงกลม 88.18 kg.) และ
ท่อมอเตอร์ชนิด AISI 4130

จากสมการการหาค่าโมเมนต์การตัดตามเงื่อนไข
ออกแบบสามารถนำมาพิจารณาหาค่าโมเมนต์สูงสุดและ
ระยะที่เกิดโมเมนต์สูงสุดได้ดังนี้
พิจารณาอิทธิพลของแรงต่อท่อมอเตอร์จรวด (Free
Body Diagram :FBD)



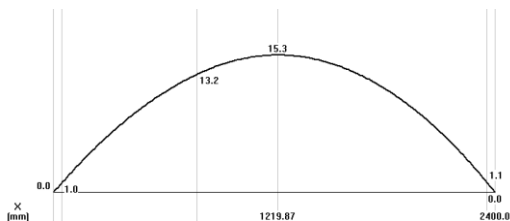
รูปที่ 4. แสดง Free Body Diagram (FBD)

พิจารณาแนวแรงต้อขึ้นงาน (Shear Force
Diagram :SFD)



รูปที่ 5. แสดง Shear Force Diagram (SFD)

พิจารณาค่าความเค้นดัด ณ จุดต่างๆ (Bending
Moment Diagram :BMD)



รูปที่ 6. แสดง Bending Moment Diagram (BMD)

ผลจากการวิเคราะห์

- Max. Moment อยู่ที่ 15.3 KN.m
- ที่ระยะ 1,219.87 มม จากตำแหน่งแรกที่วาง Sabot

ค่าความเค้นจากการตัดของจรวดจากสมการที่ (5) และ
(6) ได้ค่า

- Section Moment $Z = 8.1 \times 10^{-5}$ mm³
- Bending Stress $\sigma_{Bending} = 189$ MPa
- Safety Factor 4.93

5. สรุป วิเคราะห์ และวิจารณ์

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์

การเลือกวัสดุสำหรับนำมาใช้ผลิตท่อมอเตอร์
จรวดนอกจากการคำนึงถึงภาระจากความดันจากการเผา
ไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งในท่อมอเตอร์จรวด ยังต้องพิจารณา
ถึงปริมาณในการบรรจุเชื้อเพลิงแข็งซึ่งส่งผลโดยตรงต่อ
กำลังขับจรวดที่ต้องการระยะยิงที่ 60 กิโลเมตรขึ้นไป
จากงานวิจัยเมื่อกำหนดขนาดภายนอกของท่อจรวดและ
พิจารณาภาระจากความดันจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง
แบบคอมโพสิทที่ 1800 psi จากค่าคุณสมบัติทางกลของ
วัสดุสามารถคำนวณความหนาของวัสดุที่เพียงพอต่อ
ภาระความดันได้แตกต่างกัน และเมื่อนำไปพิจารณาหา
ค่ากำลังขับจรวดโดยกำหนดขนาดภายนอกและความยาว
ท่อมอเตอร์จรวดพบว่า มีเพียงท่อวัสดุ 2 ชนิดที่สามารถ
บรรจุเชื้อเพลิงแข็งแบบคอมโพสิทได้เพียงพอคือ
AISI4130 และ AISI SAE 4010 โดยมีขนาด OD 230 มม
และ ID 226 มม โดนมีน้ำหนักมอเตอร์เท่ากับ 27.57
กิโลกรัมและน้ำหนักดินที่ 122.86 กิโลกรัม (รูปดาว
34.68 กิโลกรัม, วงกลม 88.18 กิโลกรัม) ได้ระยะยิงที่
64.18 กิโลเมตร และเมื่อพิจารณาเรื่องความแข็งแรงการ
บรรจุสำหรับการบรรจุทุกโดยอ้างอิง MIL-STD-810F
กำหนดให้พิจารณาที่ 40g พิจารณาที่ระยะวาง sabot ที่
2400 มม ท่อมอเตอร์ AISI4130 ได้ค่าความเค้นดัดที่
189 MPa โดยมีค่าความปลอดภัยที่ 4.93

5.2 วิจารณ์การวิจัย

งานวิจัยนอกจากเหล็กและอลูมิเนียมแล้วยังมีวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถนำมาใช้ผลิตท่อมอเตอร์จรวดทั้งอันลอย ไทเทเนียมอัลลอย และคอมโพสิท โดยเฉพาะคอมโพสิทนั้นมีความน่าสนใจในการนำเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเพราะสามารถรับภาระโหลดต่างๆ ได้สูงและมีน้ำหนักเบา แต่ถ้ามูลค่าสูงในอุตสาหกรรมบ้านเรา และจากงานวิจัยสำหรับวัสดุอื่นที่ความจุเชื้อเพลิงไม่เพียงพอสามารถแก้ไขได้ปรับขนาดความยาวของตัวท่อมอเตอร์จรวดซึ่งก็ต้องพิจารณาการเพิ่มความยาวให้เหมาะกับกำลังขับที่เพียงพอและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทั้งขอท่อมอเตอร์และน้ำหนักดิน

[5] จำรูญ ตันติพิศาลกุล , (2542). การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 2. ว.พีเชรสกุล, พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2542.

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) กระทรวงกลาโหมที่เอื้อเฟื้อโปรแกรมและข้อมูลการออกแบบในงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sutton, G. (1992). Rocket Propulsion Elements, 6th edition, ISBN: 0-471-52938-9, John Wiley & Sons, New York.
- [2] เจษฎา ศิริรัฐนิคม , อุดลยศักดิ์ บุญพันธ์ และ ไกรสุเนตร เข้มสุข , การคำนวณแรงขับของดินขับจรวดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ , การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2 4, 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี
- [3] อุดลยศักดิ์ บุญพันธ์,เจษฎา ศิริรัฐนิคม และ อิทธิพันธ์ หดย้อย, การออกแบบหาหน้าตัดที่เหมาะสมของดินขับแบบเชื้อเพลิงแข็ง , การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2 5, 19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่
- [4] R.C.BAHL, V.K. GOEL, (1974).Mechanical Machine Design, Standard Publishers Distributors. 1974.