การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

AME-0013

การวิเคราะห์เสถียรภาพของจรวดแบบหมุนที่ใช้ครีบหางในการรักษาเสถียรภาพ
The Analysis of Stability of Spinning Fin Stabilized Rocket

สุรสิทธิ์ ปาลสาร* และ อดุลยศักดิ์ บุญพันธ์

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ กระทรวงกลาโหม ชั้น 4 อาคารสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม (แจ้งวัฒนะ)
47/433 หมู่ 3 ต.บ้านใหม่ อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120
*ติดต่อ: surasith.p@dti.or.th

บทคัดย่อ

ความต้องการทางภารกิจของจรวดที่ใช้ในทางทหารนั้นมุ่งเน้นไปที่ความแม่นยำในการกระทบเป้าหมายของจรวดและพิสัยทำการที่ต้องการ การที่จรวดจะบรรลุเป้าหมายดังกล่าวจำเป็นต้องมีเสถียรภาพระหว่างที่ลอยอยู่ในอากาศ การรักษาเสถียรภาพมีหลายวิธี เช่นการใช้ครีบหาง หรือการทำให้จรวดหมุนตลอดเวลาเป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของจรวดแบบหมุนที่ใช้ครีบหางในการรักษาความเสถียร ขนาด 122 มม. โดยอาศัยครีบหางแบบพับได้และกางออกหลังจากพ้นท่อยิง ผลการวิเคราะห์พบว่าจรวดมีค่าความเสถียรแบบสถิตมากกว่า 0.5 คาลิเบอร์ ดังนั้นจรวดมีเสถียรภาพแบบสถิตและความเสถียรแบบไจโรสโคปิก ค่าความเสถียรแบบพลวัตมีค่า 1.62 ถึง 1.83 อยู่ระหว่าง 0 ถึง 2 ดังนั้นจรวดมีความเสถียรแบบพลวัต การมีความเสถียรทั้งสามแบบจรวดจะสามารถรักษาแนวบินเอาไว้ได้ ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่ามีการเกิดคลื่นช็อคเมื่อจรวดบินผ่านความเร็วมากกว่าความเร็วเสียง แต่การเกิดคลื่นช็อคไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของจรวด

คำหลัก: กระสุนวิถีโค้ง, เสถียรภาพแบบสถิต, เสถียรภาพไจโรสโคปิก, เสถียรภาพแบบพลวัต

Abstract

The mission requirement of military rockets are focus on the rocket's target impact accuracy and required range. In order for a rocket to achieve this goal, it is necessary to remain stable while in the air. There are several methods of stabilization. For example, the use of fix fins or canted fins to spin rocket all the time. In this research, the stability of the 122 mm spinning fin stabilized rocket were analyzed by using wraparound fins that were unfold after the launcher. The analysis showed that the rocket had a static margin greater than 0.5 caliber, so the rocket was statically stabled and gyroscopically stabled. The dynamic stability factor is 1.62 to 1.83, which between 0 and 2, so the rocket was dynamically stabled. By three types of stabilization, the rocket would be able to maintain its flight. The results of computer simulations showed that shock wave were generated when the rocket passed the speed of sound. However the shock wave were not affected the stability of the rocket.

Keywords: Projectiles, Spin Stabilized Rocket, Static Stability, Gyroscopic Stability, Dynamic Stability

1 บทนำ

การพัฒนาจรวดสมรรถนะสูงโดยสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ มีความต้องการพัฒนาจรวดพื้นสู่พื้น ที่มีความแม่นยำมากขึ้น มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของกองทัพบก จรวดที่พัฒนาขึ้นเป็นจรวดชนิดเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้เชื้อเพลิงแบบคอมโพสิต (composite propellant) และเป็นระบบจรวดไม่นำวิถี (unguided) สมรรถนะจรวดแบบไม่นำวิถีขึ้นอยู่กับ ระยะยิง และความแม่นยำในการทำลายเป้าหมาย สิ่งสำคัญที่จรวดจะทำได้ตามวัตถุประสงค์ คือ การมีเสถียรภาพในการบิน เนื่องจากเป็นระบบจรวดแบบไม่นำวิถี การยิงจรวดให้กระทบเป้า จำเป็นต้องเป็นไปตามโปรแกรมการยิงที่ตั้งเอาไว้เพื่อให้จรวดบินตามวิถีที่ถูกต้อง หากจรวดมีเสถียรภาพไม่ดี จรวดจะเบี่ยงเบนออกจากวิถีและไม่กระทบเป้าหมายที่ต้องการ

การพัฒนาระบบจรวดของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ใช้รูปแบบของจรวดยิงจากพื้นสู่พื้น ขนาด 122 มม. การบินของจรวดเป็นแบบหมุนตัวโดยใช้ครีบหางในการรักษา

เสถียรภาพ (wraparound fins) โดยออกแบบให้ครีบหางกางออกหลังจากพ้นจากท่อยิง ครีบหางติดตั้งทำมุมเอียงกับลำตัวจรวดเล็กน้อย ทำให้จรวดหมุนตัวในระหว่างการบินเนื่องจากแรงอากาศพลศาสตร์ ท่อยิงมีร่องบังคับให้จรวดหมุนในอัตราต่ำหลังจากพ้นจากท่อยิง การทำให้จรวดหมุนในอัตราต่ำจะช่วยลดผลจากการเบี่ยงเบนของแรงขับ และผลของความคลาดเคลื่อนจากการผลิต ลักษณะของจรวดมีความซับซ้อนด้านอากาศพลศาสตร์ การหาค่าคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของจรวดแบบนี้มีหลายวิธี ผู้วิจัยได้อ้างอิงงานวิจัยของ วันชัย เจียจันทร์ และนุกูล สุขุประการ [1] ซึ่งได้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในการหาค่าอากาศพลศาสตร์ของจรวด 2.75 นิ้ว ที่ใช้ครีบหางแบบพับได้ในการรักษาเสถียรภาพ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับจรวด 122 มม. ค่าที่ได้จากการทำ CFD นำมาคำนวณค่าเสถียรภาพแบบสถิต เสถียรภาพแบบไจโรสโคปิก และความเสถียรแบบพลวัตของจรวด 122 มม. ในส่วนของการหาเสถียรภาพแบบไจโรสโคปิก งานวิจัยของ Gkritzapis D.N. [2] ได้แสดงผลการคำนวณขีปนวิธีภายนอกและการคำนวณความเสถียรแบบไจโรสโคปิก ที่มุมยิง 45 องศา และ 70 องศา ของกระสุนปืนขนาด 105 มม.

2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เสถียรภาพแบบสถิต (Static Stability)

ความต้องการที่สำคัญของกระสุนปืนหรือจรวดหมุนตัวคือเสถียรภาพ จรวดต้องมีความเสถียรแบบสถิต (static) และแบบไจโรสโคปิก (gyroscopically) และจำเป็นต้องมีความเสถียรแบบพลวัต (dynamic) ด้วย แม้ว่าเส้นทางการบินจะสั้นก็ตาม เสถียรภาพแบบสถิต (static stability) สัมพันธ์กับตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงดันดัน (center of pressure) ของแรงอากาศพลศาสตร์ เทียบกับจุดศูนย์ถ่วง (center of gravity) ของจรวด ถ้าตำแหน่ง c.p. อยู่หลังจุด c.g.จรวดจะมีความเสถียรแบบสถิต จาก [4] ตำแหน่ง c.p. ควรอยู่หลัง c.g. เป็นระยะมากกว่า 0.5 คาลิเบอร์(เทียบกับขนาดของจรวด) นั่นคือ

$$\left|X_{c.p.} - X_{c.g.}\right| > 0.5 \qquad (1)$$

ระยะดังกล่าวรวมการชดเชยค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ และถ้าระยะระหว่าง c.p. และ c.g. มากกว่าหนึ่งคาลิเบอร์ จะพบว่าการกระจายตัวของจุดตกเพิ่มมากขึ้น [4] ตำแหน่ง c.p. อยู่หลังจุด c.g. การส่าย (yaw) ของจรวดทำให้เกิดโมเมนต์รอบจุด c.g. โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะทำให้จรวดกลับมาอยู่ในตำแหน่งเดิมก่อนการส่าย ถ้า c.p. อยู่หน้าจุด c.g. โมเมนต์ที่เกิดขึ้นทำให้จรวดส่ายไปมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าจรวดหมุนรอบตัวเองเร็วพอการส่ายจะไม่เร็วนัก แต่อาจจะเปลี่ยนทิศทางไป เราเรียกว่าจรวดมีเสถียรภาพแบบไจโรสโคปิก (gyroscopically stable) แม้ว่าจะไม่มีเสถียรภาพแบบสถิตก็ตาม

2.2 เสถียรภาพแบบไจโรสโคปิก (Gyroscopic Stability)

เสถียรภาพของจรวดแบบไจโรสโคปิก ของจรวดแบบหมุนสามารถหาได้โดยการคำนวณค่า S_g (gyroscopic stability factor) โดย [7]

$$P = \frac{pd}{V}\left(\frac{I_x}{I_y}\right) \qquad (2)$$

$$M = \frac{\rho S d^3}{2I_y} C_{M_\alpha} \qquad (3)$$

$$S_g = \frac{P^2}{4M} = \frac{I_x^2 p^2}{2\rho I_y S d V^2 C_{M_\alpha}} \qquad (4)$$

โดยที่

I_x = โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนตามยาว kg-m^2
I_y = โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนตามขวาง kg-m^2
p = ความเร็วเชิงมุมรอบแกนตามยาว rad/s
S = พื้นที่หน้าตัดจรวด m^2
ρ = ความหนาแน่นของอากาศ kg/m^3
d = ขนาดจรวดสูงสุด m
V = ความเร็วอากาศ m/s
C_{M_α} = Static Moment Coefficient/radian

เงื่อนไขความเสถียรแบบไจโรสโคปิก สามารถหาได้จากอสมการ

$$4M(S_g - 1) > 0 \qquad (5)$$

สำหรับกระสุนปืนหรือจรวดที่ไม่มีความเสถียรแบบสถิต (c.p. อยู่หน้า c.g.) ค่า $M > 0$ อสมการที่ (5) ลดรูปลงกลายเป็นอสมการเสถียรภาพแบบไจโรสโคปิกนั่นคือ

$$S_g > 1 \qquad (6)$$

เงื่อนไขสองประการของเสถียรภาพแบบไจโรสโคปิก แสดงตามตารางที่1 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 1 เงื่อนไขของเสถียรภาพแบบไจโรสโคปิก

ชนิดของกระสุนหรือจรวด	Gyroscopic Stability Criterion
จรวดแบบหมุน (Spin) (M>0)	$S_g > 1$
จรวดแบบครีบหาง (fin) (M<0)	มีเสถียรภาพไจโรสโคปิก (แม้ไม่มีการหมุน)

2.3 เสถียรภาพแบบพลวัต (Dynamic Stability)

อ้างอิงจาก [4] ค่าเสถียรภาพแบบพลวัตแทนด้วย S_d โดยที่

$$S_d = \frac{2T + 2\lambda}{H + 2\lambda} \quad (7)$$

$$H = \frac{\rho Sd}{2m}\left[C_{L_\alpha} - C_D - k_t^{-2}\left(C_{M_q} + C_{M_\alpha}\right)\right] \quad (8)$$

$$T = \frac{\rho Sd}{2m}\left[C_{L_\alpha} + k_a^{-2} C_{M_{p\alpha}}\right] \quad (9)$$

โดยที่

λ = damping exponent per caliber

m = มวลจรวด kg

k_a^{-2} = Axial radius of gyration (md^2/I_x)

k_t^{-2} = Transverse radius of gyration (md^2/I_y)

C_{L_α} = Lift coefficient per radian

C_D = Drag coefficient

$C_{M_q} + C_{M_\alpha}$ = Damping moment coefficient per rad/sec

$C_{M_{p\alpha}}$ = Magnus moment coefficient per rad/sec

ในทางปฏิบัติ เราให้ λ มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสมการ (7) กลายเป็น

$$S_d = \frac{2T}{H} \quad (10)$$

เงื่อนไขของเสถียรภาพแบบพลวัตของจรวดที่มีความเสถียรแบบสถิต (M<0)

1) จรวดที่มีความเสถียรแบบสถิต จะมีความเสถียรแบบไจโรสโคปิกเสมอแม้จะไม่มีการหมุน
2) ถ้าค่าเสถียรภาพแบบพลวัต S_d โดยที่ $0 < S_d < 2$ จรวดที่มีความเสถียรแบบสถิต จะมีความเสถียรแบบพลวัตเสมอแม้จะไม่มีการหมุน
3) ถ้าค่า S_d มากกว่า 2 หรือน้อยกว่า 2 การหมุนเร็วเกินไปอาจจะทำให้ จรวดที่มีความเสถียรแบบสถิต ไม่มีความเสถียรแบบพลวัตได้ ขอบเขตของ การหมุนตามแนวแกน (axial spin) ที่ทำให้จรวดเสถียรแบบพลวัต หาได้จากได้จากอสมการ

$$P^2 < \left[\frac{4M}{S_d(2 - S_d)}\right] \quad (11)$$

เงื่อนไขของเสถียรภาพแบบพลวัตของจรวดที่ไม่มีความเสถียรแบบสถิต (M>0)

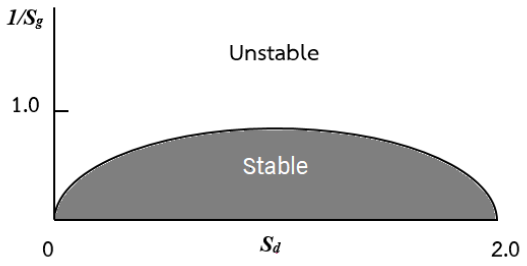
1) สำหรับจรวดที่ไม่มีเสถียรภาพแบบสถิต ถ้าจรวดมีเสถียรภาพแบบไจโรสโคปิก จรวดอาจจะมีหรือไม่มีเสถียรภาพแบบพลวัตก็ได้ แต่ถ้าจรวดไม่มีเสถียรภาพแบบไจโรสโคปิกจรวดจะไม่มีเสถียรภาพแบบพลวัตด้วย
2) ถ้าค่า S_d มีค่าอยู่ระหว่าง $0 < S_d < 2$ จรวดที่ไม่มีความเสถียรแบบสถิตจำเป็นต้องมีการหมุนเพื่อให้มีความเสถียรแบบพลวัต ค่าการหมุนที่ต้องการมีค่าตามอสมการ

$$P^2 > \left[\frac{4M}{S_d(2 - S_d)}\right] \quad (12)$$

3) ถ้าค่า S_d มากกว่า 2 หรือน้อยกว่า 0 จรวดที่ไม่มีเสถียรภาพแบบสถิต จะไม่สามารถมีเสถียรภาพแบบพลวัตได้ (แม้จะหมุนเร็วเท่าไรก็ตาม)
4) สำหรับจรวดที่มีความเสถียรแบบสถิตจะมีความเสถียรแบบพลวัตได้ตามอสมการ

$$\frac{1}{S_g} < S_d\left(2 - S_d\right) \quad (13)$$

เมื่อพล็อตกราฟ โดยแกนนอนคือ S_d และ $1/S_g$ เป็นแกนตั้ง จะได้กราฟแสดงเสถียรภาพตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขอบเขตของการมีเสถียรภาพของจรวดแบบหมุน [4]

3 การคำนวณเสถียรภาพของ จรวด 122 มม.

จรวดขนาด 122 มม. เป็นจรวดที่มีครีบหางแบบพับได้ ครีบหางจะกางออกเมื่อจรวดพ้นออกจากฐานยิง จรวดจะหมุนควงเนื่องจากท่อยิงมีร่องบังคับให้จรวดหมุนตัว เมื่อยิงออกไปแล้วจรวดจะหมุนตัวด้วยอัตราเริ่มต้นค่าหนึ่ง ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของจรวดจะพิจารณาเสถียรภาพแบบสถิตและแบบไจโรสโคปิก รวมทั้งแบบพลวัต

เสถียรภาพแบบสถิตจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงดัน c.p. สัมพันธ์กับจุดศูนย์ถ่วง c.g. ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ CFD ในการหา c.p. และใช้ข้อมูลการทดสอบจากตารางที่ 2 สำหรับตำแหน่ง c.g.

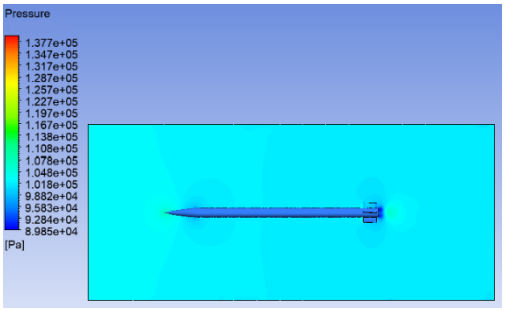
รูปที่ 2 การวัดค่าคุณสมบัติทางกลของจรวด 122 มม.

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติของจรวด 122 มม.

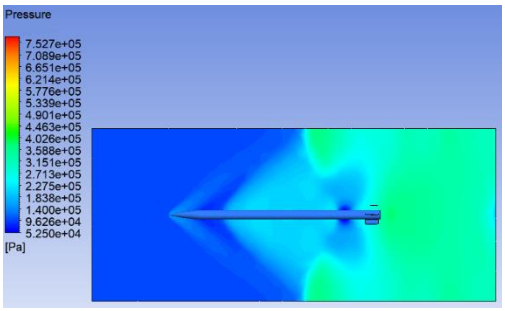
Rocket 122 mm		Weight	Rocket Parameter			
			Rocket Length	CG	MOI	Polar
		kg	mm	mm	$kg.m^2$	$kg.m^2$
Design	Bef Burn	67.10	2756.80	1340.48	42.420	0.150
	Aft Burn	43.60	2756.80	1167.20	33.430	0.110
Test	Bef Burn	66.98	2757.00	1323.56	41.590	0.146
	Aft Burn	42.39	2757.00	1140.89	30.477	0.113

4 ผลการดำเนินงานวิจัย

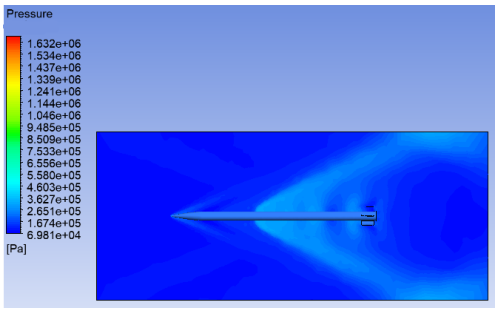
ลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ และการคำนวณจุดศูนย์กลางแรงดันของจรวดแบบหมุนสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) การจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศรอบๆ จรวด สิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อจรวดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ โปรแกรม CFD สามารถแสดงให้เห็นอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 3 - 8 การคำนวณตำแหน่งจุด c.p. แสดงดังรูปที่ 9 การคำนวณค่าอากาศพลศาสตร์ของจรวด 122 มม. แสดงดังตารางที่ 3



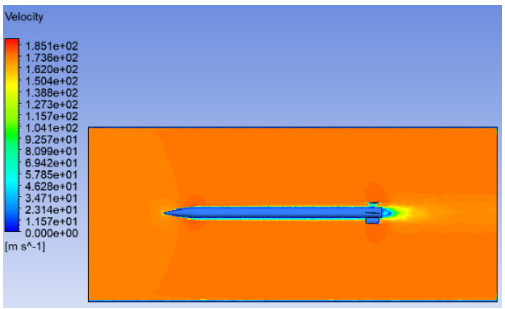
รูปที่ 3 แผนภาพ Pressure ที่ความเร็ว M_a = 0.5



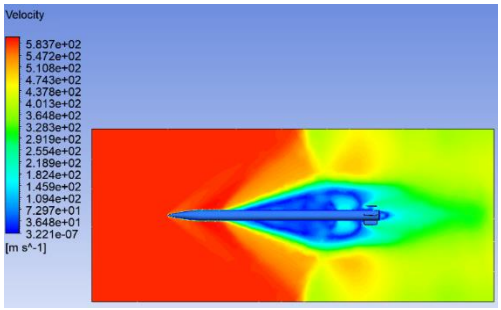
รูปที่ 4 แผนภาพ Pressure ที่ความเร็ว M_a = 1.7



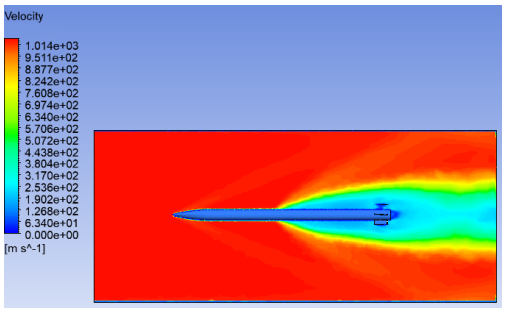
รูปที่ 5 แผนภาพ Pressure ที่ความเร็ว M_a = 3.0



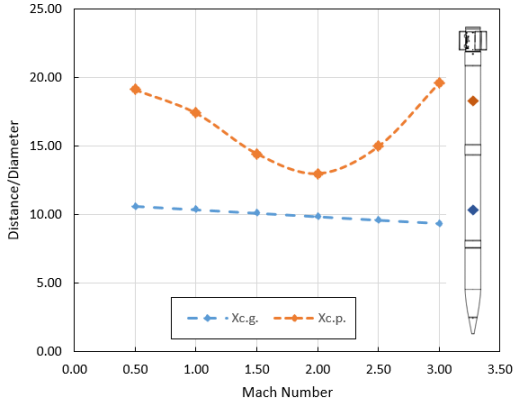
รูปที่ 6 แผนภาพ Velocity ที่ความเร็ว M_a = 0.5



รูปที่ 7 แผนภาพ Velocity ที่ความเร็ว M_a = 1.7



รูปที่ 8 แผนภาพ Velocity ที่ความเร็ว M_a = 3.0



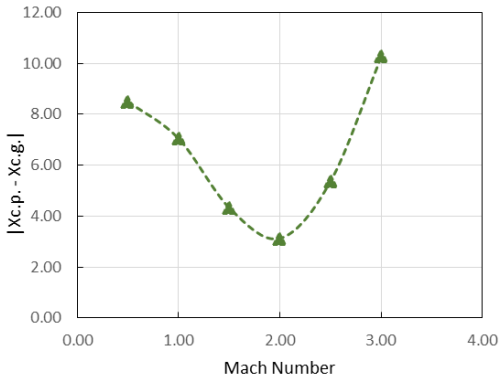
รูปที่ 9 ตำแหน่ง c.g. และ c.p. ตามค่า Mach Number (α=0°)

ตารางที่ 3 ค่าอากาศพลศาสตร์ของจรวด 122 มม.(α=0°)

Mach Number	C_d	C_{la}	C_{ma}	$C_{Mq}+C_{Ma}$	C_{Mpa}
0.8	0.39	7.59	-5.21	-220.00	0.50
1.1	0.60	9.55	-6.97	-220.00	0.50
1.5	0.59	9.13	-6.54	-290.00	0.50

4.1 เสถียรภาพแบบสถิต (Static Stability)

ค่าความเสถียรแบบสถิต (Static Margin) หาได้จากอสมการ (1) ในหน่วยคาลิเบอร์ (เทียบกับขนาดของจรวด) จากข้อมูลตำแหน่ง c.g. และ c.p. เราได้ค่าความเสถียรแบบสถิตตามเลขมัค (Mach Number) ตามรูปที่ 10

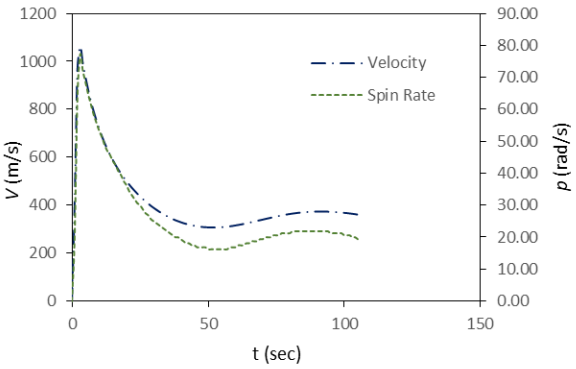


รูปที่ 10 ค่า Static Margin ตามค่า Mach Number

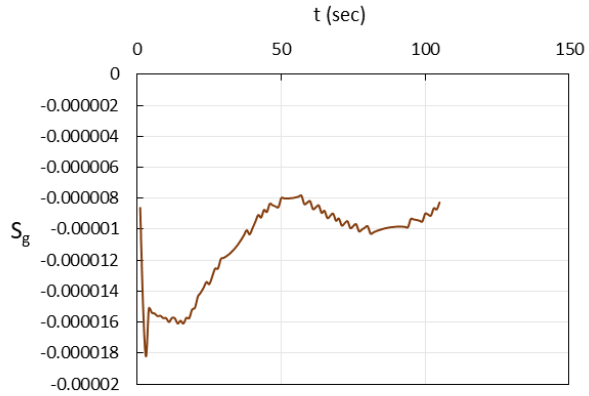
4.2 เสถียรภาพแบบไจโรสโคปิก (Gyroscopic Stability)

การคำนวณความเร็วและอัตราการหมุนของจรวดหาได้จากการคำนวณขีปนวิถีภายนอก ดังรูปที่ 11

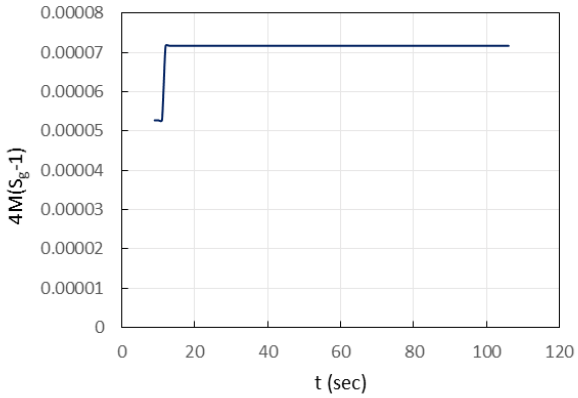
การประเมินความเสถียรแบบไจโรสโคปิก ของจรวด 122 มม. ตามสมการที่ (4) และ (5) โดยอาศัยข้อมูลจากตารางที่ 2 ผลการประเมินแสดงดังรูปที่ 12 และ รูปที่ 13 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 11 ค่าความเร็วและอัตราการหมุนของจรวด



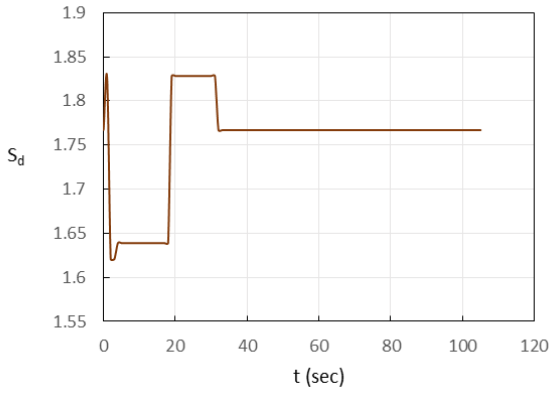
รูปที่ 12 ค่า Gyroscopic Stability Factor จรวด 122 มม.



รูปที่ 13 การคำนวณความเสถียรแบบไจโรสโคปิก

4.3 เสถียรภาพแบบพลวัต (Dynamic Stability)

อาศัยข้อมูลการจำลองด้วยโปรแกรม CFD ตามตารางที่ 3 สามารถหาค่าความเสถียรแบบพลวัตจากสมการ (8),(9) และ (10) ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ค่า Dynamic Stability Factor ของจรวด 122 มม.

5 วิเคราะห์ผลการคำนวณ

การจำลองด้วย CFD จากรูปที่ 3 แสดงค่าความดันที่ M_a=0.5 พบว่าความดันรอบๆ จรวดมีค่าประมาณ 104,800 Pa ที่หัวจรวดและท้ายจรวด พบย่านความดันสูงขึ้นเล็กน้อย จากรูปที่ 6 แสดงค่าความเร็วอากาศที่ M_a=0.5 พบความเร็วรอบๆ จรวดมีค่าประมาณ 173.6 m/s และพบย่านความเร็วต่ำลงที่หัวและท้ายจรวด รูปที่ 4 แสดงค่าความดันที่ M_a=1.7 พบว่ามีการเกิดแนวคลื่นช็อค (shock wave) มีการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างชัดเจน ความดันสูงขึ้นเมื่อผ่านแนวคลื่นช็อค ตรงข้ามกับความเร็วในรูปที่ 7 ความเร็วต่ำลงหลังจากผ่านแนวของคลื่นช็อค รูปที่ 5 แสดงความดันที่ความเร็วเริ่มต้น M_a=3.0 แนวของคลื่นช็อคมีการเอียงไปด้านท้ายจรวด ความดันสูงขึ้นเมื่อผ่านแนวของคลื่นช็อค รูปที่ 8 แสดงความเร็วของอากาศที่ M_a=3.0 พบว่าความเร็วต่ำลงอย่างชัดเจนเมื่อจรวดผ่านคลื่นช็อค

ผลการคำนวณเสถียรภาพแบบสถิตตามรูปที่ 9 แสดงตำแหน่งของ $X_{c.g.}$ และ $X_{c.p.}$ (α=0°) ที่ได้จากการคำนวณด้วย CFD และรูปที่ 10 แสดงค่าความเสถียรแบบสถิต ของจรวดมีค่าต่ำสุดที่ 3.13 ที่ M_a= 2.0 ค่าสูงสุดเท่ากับ 10.28 ที่ M_a=3.0 นั่นคือความเสถียรแบบสถิตมากกว่า 0.5 คาลิเบอร์ในทุกย่านความเร็วของจรวด ผลที่ได้แสดงว่าจรวดมีความเสถียรแบบสถิต อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้การศึกษาในส่วนของการเลื่อนของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงดันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะ การศึกษาเพิ่มเติมจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ได้สมบูรณ์ขึ้น

รูปที่ 11 แสดงการคำนวณความเร็วและอัตราการหมุนของจรวดตลอดเวลาที่จรวดลอยอยู่ในอากาศ ความเร็วสูงสุดของจรวดประมาณ 1,060 m/s เท่ากับประมาณ M_a = 3.0 ในขณะที่อัตราการหมุนสูงสุดอยู่ที่ 77 rad/s ความเร็วสูงสุดจะเกิดขึ้นที่จุดที่เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้จนหมด โดยใช้ความเร็วและอัตราหมุนสามารถคำนวณความเสถียรแบบไจโรสโคปิกแสดงตามรูปที่ 12 พบว่า ค่า S_g < 0 ตลอดช่วงการบินของจรวด จากรูปที่ 13 พบว่า $4M$ (S_g - 0) อยู่ระหว่าง 0.00005 ถึง 0.000075 ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขความเสถียรตามสมการที่ (5) ดังนั้นจึงประเมินได้ว่าจรวดมีความเสถียรแบบไจโรสโคปิก และจากรูปที่ 14 การคำนวณความเสถียรแบบพลวัต พบว่า S_d อยู่ระหว่าง 1.62 - 1.83 ในระหว่างช่วงการบิน ดังนั้นจึงประเมินได้ว่า จรวด 122 มม. มีความเสถียรแบบพลวัต

6 ผลสรุป

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของจรวด 122 มม. พบว่าจรวดใช้ครีบหางและหมุนตัว มีค่าความเสถียรแบบสถิตมากกว่า 0.5 คาร์ลิเบอร์ ส่งผลให้จรวดมีเสถียรภาพแบบสถิต เมื่อจรวดเอียงไปจากแนวบินจรวดสามารถกลับตำแหน่งเดิมเนื่องจากแรงอากาศพลศาสตร์ที่กระทำกับจรวด การมีความเสถียรแบบสถิตทำให้จรวดมีความเสถียรแบบไจโรสโคปิกด้วย ค่าความเสถียรแบบพลวัตอยู่ระหว่างมีค่าระหว่าง 1.62 ถึง 1.83 ซึ่งอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2 ดังนั้นจรวดมีเสถียรภาพแบบพลวัต การมีความเสถียรแบบพลวัตจรวดจะสามารถรักษาแนวบินเอาไว้ได้แม้จะมีลมพัดมากระทบระหว่างการบิน การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่ามีการเกิดคลื่นช็อคเมื่อจรวดบินผ่านความเร็วมากกว่าความเร็วเสียง แต่การเกิดคลื่นช็อคไม่ส่งผลต่อความเสถียรของจรวด

7 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ กระทรวงกลาโหม ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

8 เอกสารอ้างอิง

[1] วันชัย เจียจันทร์และนุกูล สุขุประการ (2560). การวิเคราะห์ค่าอากาศพลศาสตร์ของจรวดความเร็วเหนือเสียงขนาด 2.75 นิ้ว โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล,*วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรืออากาศ*, 13, พฤศจิกายน 2560 หน้า 34 – 44.

[2] Gkritzapis D.N., (2008). Prediction of The Impact Point for Spin and Fin Stabilized Projectiles, *WSEAS Transactions on Information science and Applications*, Vol.12(5), pp 1667-1676.

[3] Gkritzapis D.N., (2009). Accurate Computation of the Trajectory of the Spin and Fin-Stabilized Projectiles, *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, vol.2(3), pp 73 – 80.

[4] Headquarters U.S. Army Material Command, (1966). *Design For Control of Projectile Flight Characteristics Engineering Design Handbook*, U.S. army.

[5] Anderson, J.D. (2001). *Fundamentals of Aero dynamics*, McGraw-Hill Inc, New York.

[6] Etkin, B. (2005). *Dynamics of Atmospheric Flight*, Dover Publications Inc, Mineola, New York.

[7] McCoy, R.L. (2012). *The Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles, Modern Exterior Ballistics*, Schiffer Publishing Ltd, Atglen, PA.

[8] Guidos, B., and Cooper, G., (2000). *Closed Form Solution of Finned Projectile Motion Subjected to a Simple In-Flight Lateral Impulse*," AIAA Paper.