การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

แนวทางวิเคราะห์เสถียรภาพการบินของจรวดแรงดันน้ำ

An Approach to Analysis the Flight Stability of Water Jet Rocket

อรรณพ เรืองวิเศษ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทร 0-2470-9117 โทรสาร 0-2470-9111 E-mail: annop.rua@kmutt.ac.th

Annop RUANGWISET
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
91 Pracha-u-tid Rd. Bangmod Tungkru Bangkok 10140 Thailand
Tel 0-2470-9117 Fax 0-2470-9111 E-mail:annop.rua@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

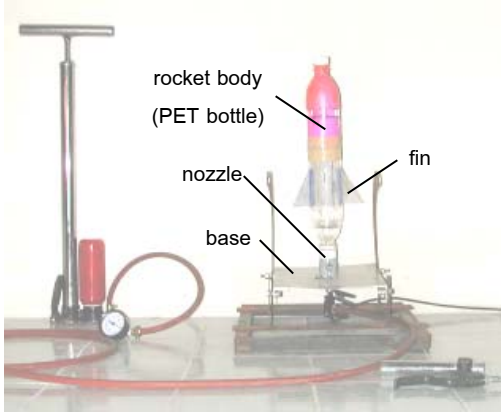
จรวดแรงดันน้ำเป็นจรวดที่สร้างแรงขับเคลื่อนจากการขยายตัวของอากาศความดันสูงและปล่อยน้ำภายในตัวขวดออกมาด้วยความเร็วสูง ดังนั้นจึงสามารถสร้างได้ง่ายและมีความปลอดภัยในการใช้ ในโครงการวิจัยด้านอากาศยานไร้นักบินขนาดเล็กได้มีแนวความคิดที่จะนำจรวดแรงดันน้ำมาประยุกต์ใช้ในการยิงส่งยาน แต่เนื่องจากปัจจุบันการออกแบบจรวดแรงดันน้ำส่วนใหญ่เป็นการออกแบบตามประสบการณ์ การศึกษาทางทฤษฎีในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพการบินของจรวดน้ำ และการกำหนดขนาดและตำแหน่งของแพนหางที่เหมาะสมในการสร้างจรวดแรงดันน้ำที่มีเสถียรภาพการบิน

Abstract

Water jet rocket is the rocket that generates thrust from the expansion of high pressure air and the high velocity blowout of water inside. Thus the water jet rocket is easy to build and safe to use. In the micro aerial vehicle project, we have an idea to apply the water jet rocket to launch the vehicle. However, almost all of the designs of water jet rocket in existence are depends on experiences. The theoretical study in this paper proposes the analysis of the flight stability of the water jet rocket and the decision of appropriate size and position of fin to build the stable water jet rocket.

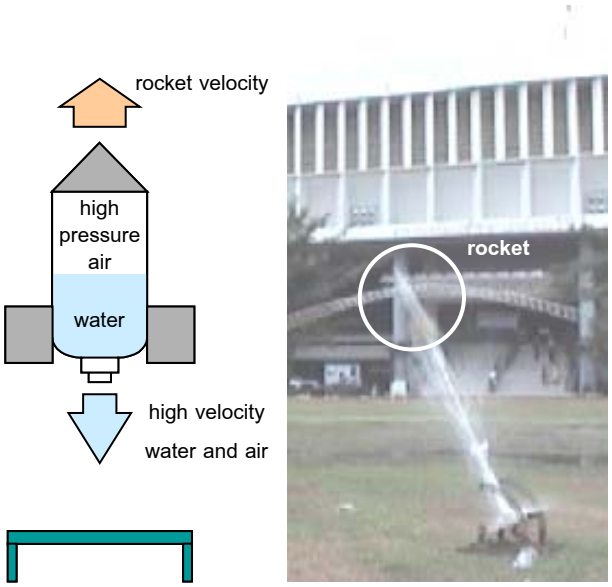
1. บทนำ

การละเล่นจรวดแรงดันน้ำกำลังเป็นที่นิยมมากโดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา ตัวจรวดชนิดนี้จะทำจากขวดพลาสติกสำหรับบรรจุน้ำอัดลมเนื่องจากวัสดุทนต่อแรงดันสูงและหาได้ง่าย นำมาต่อเติมแพนหางและหัวจรวดซึ่งทำด้วยพลาสติกหรือกระดาษดังรูปที่ 1



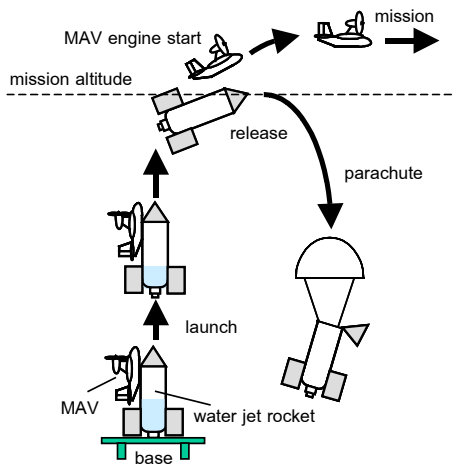
รูปที่ 1 จรวดแรงดันน้ำ

วิธีสร้างแรงขับ (thrust) ของจรวดแรงดันน้ำทำโดยบรรจุน้ำไว้ในตัวจรวด จากนั้นใช้ปั๊มลมอัดอากาศเข้าสู่ภายในตัวจรวดเพื่อให้อากาศภายในตัวจรวดมีความดันสูง เมื่อยิงปล่อยจรวดอากาศภายในจะขยายตัวและดันน้ำผ่านปากขวดออกมาด้วยความเร็วสูงเกิดเป็นแรงขับดังเค้าโครงในรูปที่ 2 การสร้างแรงขับของจรวดขวดน้ำใช้หลักการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมเช่นเดียวกับจรวดชนิดอื่นๆ แต่ต่างกันที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงจึงมีความปลอดภัยในการนำมาใช้



รูปที่ 2 การสร้างแรงขับของจรวดแรงดันน้ำ

เนื่องจากจรวดแรงดันน้ำสามารถสร้างได้ง่าย มีความปลอดภัยสูง และต้นทุนที่ต่ำ จึงได้มีแนวความคิดที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการยิงส่งอากาศยานไร้นักบินขนาดเล็ก (MAV: Micro Aerial Vehicle) ซึ่งเป็นอากาศยานที่มีความยาวแต่ละด้านไม่เกิน 15 cm ตัวอย่างเช่น black widow [1] โดยทั่วไปอากาศยานประเภทนี้จะใช้เครื่องยนต์หรือมอเตอร์ขนาดเล็กเป็นแหล่งกำเนิดสร้างแรงในการขับเคลื่อน หากจะนำแรงขับนี้มาใช้ในการบินขึ้นไปสู่ระดับความสูงที่จะปฏิบัติภารกิจก็จะต้องใช้เชื้อเพลิงหรือพลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นเป็นผลให้น้ำหนักรวมของอากาศยานมากขึ้นกลายเป็นข้อเสียของอากาศยานขนาดเล็ก แต่ถ้าใช้จรวดแรงดันน้ำยิงส่งอากาศยานขึ้นสู่ความสูงที่ต้องการแล้วต่อจากนั้นจึงใช้แรงขับของอากาศยานในการปฏิบัติภารกิจดังรูปที่ 3 ก็จะสามารถสร้างอากาศยานที่มีน้ำหนักและขนาดเล็กลงได้ยิ่งขึ้นเป็นการเพิ่มความสามารถในการปฏิบัติภารกิจของอากาศยานขนาดเล็ก

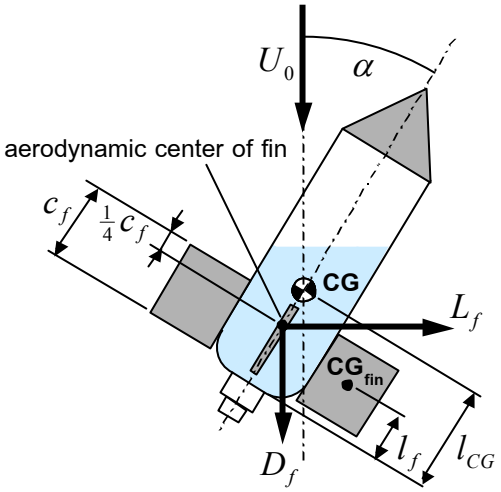


รูปที่ 3 การใช้จรวดแรงดันน้ำยิงส่งอากาศยานขนาดเล็ก

ขอบเขตการใช้จรวดแรงดันน้ำในปัจจุบันยังเป็นการละเล่น การออกแบบและกำหนดขนาดของแพนหางจะใช้ประสบการณ์ของผู้เล่นเป็นส่วนใหญ่ การพิจารณาทางทฤษฎียังมีอยู่น้อยและเป็นการพิจารณาเกี่ยวกับแรงขับของจรวดแรงดันน้ำ [2, 3] ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงได้นำเอาวิธีการพิจารณาเสถียรภาพของเครื่องบินมาประยุกต์ใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของจรวดแรงดันน้ำ เพื่อเสนอเป็นแนวทางในการกำหนดขนาดของแพนหางที่จะทำให้จรวดแรงดันน้ำที่สร้างขึ้นมีเสถียรภาพในการบินสามารถนำไปใช้งานได้จริงต่อไป

2. การพิจารณาเสถียรภาพการบินของจรวดแรงดันน้ำ

ดังแสดงในรูปที่ 3 การใช้จรวดแรงดันน้ำยิงส่งอากาศยานไร้นักบินขนาดเล็กจะยิงขึ้นเป็นเส้นตรงในแนวดิ่งเพื่อให้เคลื่อนที่ถึงระดับความสูงที่ต้องการเร็วที่สุด ดังนั้นการพิจารณาเสถียรภาพของจรวดแรงดันน้ำในที่นี้จะพิจารณาเสถียรภาพในการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในระนาบแนวดิ่งโดยไม่คิดอิทธิพลจากการหมุนของจรวด หลักการพิจารณาจะพิจารณาตามแนวทางพิจารณาเสถียรภาพการบินของเครื่องบิน [4] คือ เมื่อมีอิทธิพลจากปัจจัยภายนอก เช่น ลมพัดมากระทำต่อจรวดทำให้จรวดหันเหไปจากแนวดิ่ง หากจรวดมีเสถียรภาพการบินจะต้องมีโมเมนต์เกิดขึ้นในทิศทางที่จะทำให้จรวดหันกลับมายังแนวดิ่งเช่นเดิม



รูปที่ 4 แรงที่เกิดจากแพนหางของจรวดแรงดันน้ำ

ขณะที่จรวดกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U_0 ถ้าหัวจรวดหันเหไปจากแนวทางการเคลื่อนที่เป็นมุม α ดังรูปที่ 4 ส่วนแพนหางจะมีแรงยก (lift: L_f) และแรงต้าน (drag: D_f) กระทำที่จุดศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ของแพนหาง โดยทั่วไปแพนหางของจรวดจะทำจากแผ่นกระดาษหรือพลาสติกจึงเป็นปีกแบบสมมาตร (symmetry airfoil) ซึ่งจะมีจุดศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์อยู่ห่างจากขอบหน้าของแพนหางเป็น 1/4 เท่าของความยาวคอร์ด และจุดศูนย์กลางมวลของแพนหาง (CG_{fin}) จะอยู่ที่กึ่งกลางแผ่นแพนหาง ดังนั้นหากมุม α เป็นมุมเล็กๆ จะสามารถคิดโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางมวล (CG) ของจรวดได้เป็น

$$M = [L_f \cos\alpha + D_f \sin\alpha][l_{CG} - (l_f + \tfrac{1}{4}c_f)]$$
$$M \cong L_f [l_{CG} - (l_f + \tfrac{1}{4}c_f)] \quad (1)$$

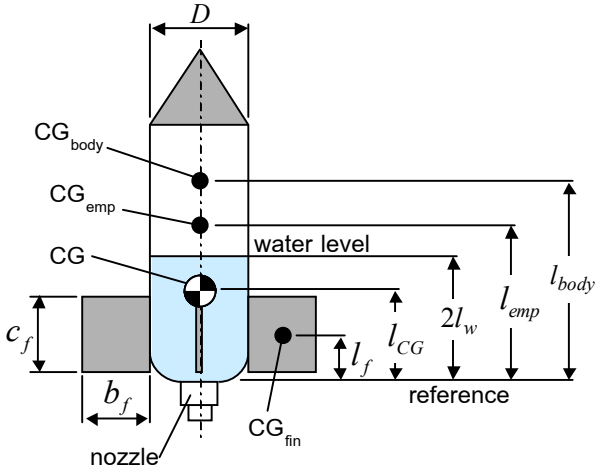
โดยที่ l_{CG} : ระยะจากปลายขวดถึงจุดศูนย์กลางมวลของจรวด
l_f : ระยะจากปลายขวดถึงจุดศูนย์กลางมวลของแพนหาง
c_f : ความยาวคอร์ดของแพนหาง

เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) จรวดแรงดันน้ำจะมีเสถียรภาพการบินตามนิยามที่ตั้งไว้เบื้องต้นเมื่อตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลเป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ (2) ซึ่งหมายถึงตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของจรวดจะต้องอยู่สูงกว่าจุดศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ของแพนหาง

$$l_{CG} - (l_f + \tfrac{1}{4}c_f) > 0 \quad (2)$$

3. การกำหนดตำแหน่งและขนาดของแพนหาง

ขณะที่จรวดแรงดันน้ำเคลื่อนที่น้ำภายในจรวดจะถูกปล่อยออกมาเรื่อย ๆจนกว่าน้ำจะหมดหรือความดันอากาศภายในตัวจรวดจะเท่ากับความดันอากาศภายนอก ทำให้ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลของจรวด (l_{CG}) เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำที่เหลือภายในจรวด ดังนั้นจะต้องกำหนดตำแหน่ง (l_f) ความยาวคอร์ด (c_f) และความกว้าง (b_f) ของแพนหางให้เหมาะสมเพื่อทำให้เงื่อนไขในสมการที่ (2) เป็นจริงตลอดการเคลื่อนที่



รูปที่ 5 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล

ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลของจรวดแรงดันน้ำขณะที่เคลื่อนที่จะกำหนดให้

m_{body} เป็นมวลของตัวจรวดที่ไม่มีแพนหางและไม่มีน้ำ
m_w เป็นมวลของน้ำที่เหลืออยู่ภายในจรวด
m_f เป็นมวลของแพนหาง 1 แผ่น
n_f เป็นจำนวนแผ่นของแพนหาง
ρ_w เป็นความหนาแน่นของน้ำ
ρ_f เป็นความหนาแน่นต่อพื้นที่ของแพนหาง
CG เป็นจุดศูนย์กลางมวลของจรวดทั้งลำ
CG_{emp} เป็นจุดศูนย์กลางมวลของจรวดที่ไม่มีน้ำ
CG_{body} เป็นจุดศูนย์กลางมวลของตัวจรวดที่ไม่มีแพนหางและไม่มีน้ำ
CG_{fin} เป็นจุดศูนย์กลางมวลของแผ่นแพนหาง

โดยจุดศูนย์กลางมวลในแต่ละกรณีมีตำแหน่งดังรูปที่ 5

จากตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของแผ่นแพนหางและตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของตัวจรวดที่ไม่มีแพนหางและไม่มีน้ำ จะสามารถคำนวณตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของจรวดในกรณีที่ไม่มีน้ำและในกรณีที่มีน้ำได้ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$l_{emp} = \frac{(m_b)\cdot l_b + (n_f m_f)\cdot l_f}{m_b + n_f m_f} \quad (3)$$

$$l_{CG} = \frac{(m_b + n_f m_f)\cdot l_{emp} + (m_w)\cdot l_w}{m_b + n_f m_f + m_w} \quad (4)$$

เมื่อนำสมการที่ (3) และ (4) แทนในสมการที่ (2) แล้วจัดรูปสมการจะได้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพการบินของจรวดแรงดันน้ำเป็น

$$\left.\begin{aligned} f(l_w) &= (m_b l_b + n_f m_f l_f + m_w l_w) \\ &\quad - (m_b + n_f m_f + m_w)(l_f + \tfrac{1}{4}c_f) \\ f(l_w) &> 0 \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

โดยที่ มวลของแพนหาง 1 แผ่น $m_f = \rho_f b_f c_f$
มวลของน้ำภายในจรวด $m_w \approx \rho_w(\pi D^2/4)\cdot 2l_w$

ดังนั้นเงื่อนไขที่ได้ในสมการที่ (5) สามารถที่จะนำไปใช้กำหนดตำแหน่ง ความยาวคอร์ด และความกว้างของแพนหางที่ทำให้จรวดแรงดันน้ำมีเสถียรภาพการบิน

4. ตัวอย่างการออกแบบจรวดแรงดันน้ำ

ตัวอย่างการออกแบบจะแสดงการพิจารณาเสถียรภาพการบินของจรวดแรงดันน้ำที่ทำจากขวดพลาสติกสำหรับบรรจุน้ำอัดลมปริมาตร 500 ml และใช้แผ่นพลาสติกทำเป็นแพนหางรูปสี่เหลี่ยมขนาดต่าง ๆกัน โดยที่

มวลของตัวจรวดที่ไม่มีแพนหางและไม่มีน้ำ
m_{body} = 0.07 kg
ความสูงของตัวจรวดจากเส้นอ้างอิงถึงปลายหัวจรวด 0.34 m
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวจรวด
D = 0.06 m
ความสูงของจุดศูนย์กลางมวลตัวจรวดที่ไม่มีแพนหางและไม่มีน้ำ
l_{body} = 0.17 m
ความสูงของน้ำที่บรรจุในจรวดขณะเริ่มต้น
$2l_w$ = 0.14 m
ความหนาแน่นต่อพื้นที่ของแผ่นพลาสติกที่ทำแพนหาง
ρ_f = 0.46 kg / m^2

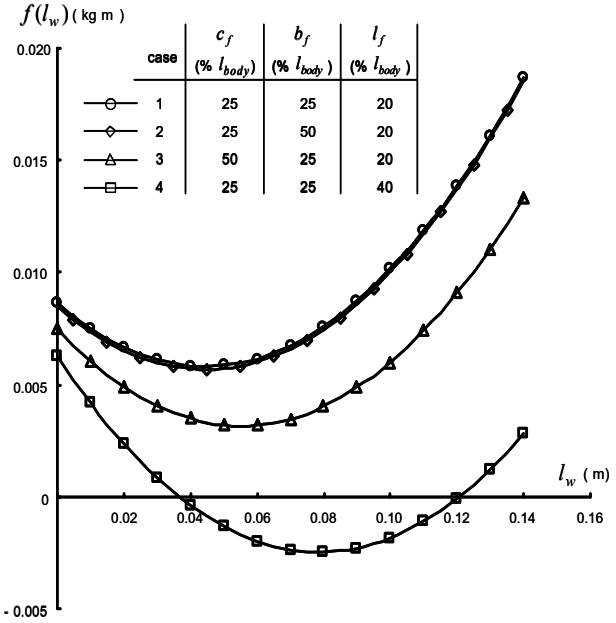
จำนวนแพนหาง

n_f = 4

ขนาดและตำแหน่งของแพนหางจะพิจารณาทั้งหมด 4 กรณี โดยเทียบกับค่าความสูงของจุดศูนย์กลางมวลตัวจรวดที่ไม่มีแพนหางและไม่มีน้ำ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดและตำแหน่งของแพนหางที่พิจารณา

กรณีที่	ความยาวคอร์ด c_f (% l_{body})	ความกว้าง b_f (% l_{body})	ตำแหน่ง l_f (% l_{body})
1	25	25	20
2	25	50	20
3	50	25	20
4	25	25	40



รูปที่ 6 ผลการพิจารณาเสถียรภาพการบินของจรวดแรงดันน้ำ

จากผลการพิจารณาเสถียรภาพการบินของจรวดแรงดันน้ำที่มีขนาดและตำแหน่งของแพนหางต่างกันโดยคำนวณค่าของฟังก์ชัน $f(l_w)$ ในสมการที่ (5) และนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์กับระดับความสูงของน้ำที่เหลืออยู่ในจรวดได้ผลดังรูปที่ 6 บริเวณที่เส้นกราฟอยู่เหนือแกนนอนจะเป็นบริเวณที่ $f(l_w)$ > 0 ซึ่งหมายถึงจรวดมีเสถียรภาพการบิน

เมื่อเปรียบเทียบจรวดกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ซึ่งแตกต่างกันที่ความกว้างของแพนหางจะเห็นว่าเส้นกราฟไม่แตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความกว้างของแพนหางจะมีผลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลของจรวด แต่ในกรณีที่ 3 เมื่อเพิ่มความยาวคอร์ดของแพนหางเส้นกราฟจะลดต่ำลงคือเสถียรภาพการบินของจรวดกรณีนี้ลดลงกว่ากรณีที่ 1 และ 2 เนื่องจากการเพิ่มความยาวคอร์ดของแพนหางในกรณีนี้น้ำหนักแพนหางที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลของจรวดต่ำลงมาอยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ของแพนหาง

เมื่อเพิ่มความสูงในการติดตั้งแพนหางให้สูงขึ้นเป็นกรณีที่ 4 ขณะเริ่มต้นจรวดจะมีเสถียรภาพในการบิน แต่เมื่อระดับความสูงของน้ำในจรวดลดลงจนเหลือ 0.12 m และลดต่อไปจนถึง 0.04 m จะเป็นช่วงที่จรวดไม่มีเสถียรภาพในการบิน ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงนั้นตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของจรวดจะอยู่ต่ำกว่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ของแพนหาง ดังนั้นถ้าหัวของจรวดหันเหไปจากแนวการเคลื่อนที่โมเมนต์ที่เกิดจากแรงที่แพนหางจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศที่จะทำให้หัวจรวดหันกลับมาทิศเดิม ในกรณีนี้หัวจรวดจะหมุนเอียงจากทิศการเคลื่อนที่เดิมมากขึ้นเรื่อยๆและตกในที่สุด

4. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีพิจารณาเสถียรภาพการบินของจรวดแรงดันน้ำตามหลักการพิจารณาเสถียรภาพการบินของเครื่องบิน และได้ข้อสรุปเป็นแนวทางในการออกแบบจรวดแรงดันน้ำให้มีเสถียรภาพการบิน คือจะต้องออกแบบให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของจรวดซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาที่น้ำพุ่งออกจากจรวดอยู่สูงกว่าจุดศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ของแพนหางตลอดการเคลื่อนที่ของจรวด ดังนั้นจึงควรใช้แพนหางที่มีความยาวคอร์ดที่พอเหมาะเพียงที่จะไม่อ่อนเกินไปจนทำให้เกิดการงอ และเพิ่มพื้นที่ของแพนหางโดยการเพิ่มความกว้าง ส่วนการติดตั้งควรให้แพนหางอยู่ต่ำที่สุดหรืออาจใช้แพนหางรูปสามเหลี่ยมเพื่อให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ของแพนหางอยู่ต่ำลงมาจากจุดศูนย์กลางมวลของจรวด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณอภิชัย หล้าบ้านโพน และคุณปณต รักแจ้ง ที่ทำให้มีการเริ่มต้นงานวิจัยเกี่ยวกับจรวดแรงดันน้ำและช่วยทำการทดลองวิเคราะห์แรงขับและการเคลื่อนที่ของจรวดแรงดันน้ำ

เอกสารอ้างอิง

[1] Joel M. Grasmeyer and Matthew T. Keennon, “Development of the Black Widow Micro Air Vehicle,” AIAA-2001-0127.

[2] Hsing-Juin Lee, Chih-Hong Chiu and Wen-Kung Hsia, “Integrated Energy Method for Propulsion Dynamics Analysis of Air-Pressurized Waterjet Rocket,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 44 No. 143, 2001, pp. 1 – 7.

[3] Takayuki Ota and Akira Umemura, “Parametric Study of Water Rocket for Optimum Flight,” Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 49, No. 574, 2001, pp. 382 – 387. (in Japanese)

[4] John D. Anderson, JR., “Introduction to Flight,” McGraw-Hill Book Company, 1989.