

**เทคนิคการคำนวณความดันเผาไหม้ของดินขับจรวดโดยการผลิตแบบไม่มีส่วนหุ้ม  
จนวนหัว-ท้ายดิน**  
**Techniques for calculating pressure of solid propellant rocket  
with un-insulated grain ends**

อนันต์ จันทร์เฝือก<sup>1</sup>, น.อ.คมสันต์ ประพันธ์กาญจน์<sup>2</sup>, ณัฐวัฒน์ วิญญาณ<sup>3,\*</sup>

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) กระทรวงกลาโหม ชั้น 4 อาคารสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม (แจ้งวัฒนะ)  
47/433 หมู่ 3 ต.บ้านใหม่ อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120

\* ติดต่อ: E-mail: [nattawat.w@dti.or.th](mailto:nattawat.w@dti.or.th) โทรศัพท์: 02 980 6199-207 ต่อ 329 โทรสาร: 02 980 6198

**บทคัดย่อ**

บทความวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงโปรแกรมคำนวณชีพวิถีภายในของจรวดเชื้อเพลิงแข็ง (Solid Propellant Rocket) ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโปรแกรมคำนวณชีพวิถีภายในของดินขับจรวดที่มีจนวนหุ้มด้านข้าง และด้านหัว-ท้าย โดยแบ่งแท่งดินขับเป็น Segment เท่ากัน เพื่อคำนวณหาอัตราการเกิดก๊าซจากการเผาไหม้และการเปลี่ยนแปลงตามความยาว (L) ของดินขับ และในงานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงโปรแกรม เพื่อใช้คำนวณหาแรงขับ (Thrust) และรูปร่างของแรงขับ (Thrust Profile) ของจรวดที่ผลิตแบบไม่มีส่วนหุ้มจนวนหัว-ท้ายดินขับ ทำให้พื้นที่การเผาไหม้มีมากกว่า 1 ทิศทาง เป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเผาไหม้ทำให้จรวดมีแรงขับในช่วงแรก (Initial Thrust) เพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกตัวของจรวด งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบรูปร่างแรงขับระหว่างผลการจตุทดสอบจรวดจริง กับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณชีพวิถีภายในของจรวดที่ปรับปรุง

**คำหลัก:** มอเตอร์จรวด, ดินขับจรวด, อัตราการเผาไหม้

**Abstract**

The objective of this work is to present improvements to a computer program for calculation of internal ballistics of solid propellant rocket motors. Previous works have presented a program for propellant grains with inhibited sides and grain ends. The propellant grain was divided into segments to calculate combustion gas generation within the bore along the length of the propellant grain. This work involves modification of the program to include combustion at the grain ends, which allows combustion to occur in more than 1 direction, and increases initial thrust, which in turn, improves rocket launch effectiveness. Comparison was also made between calculation results and results from actual static test firings.

**Keywords:** Rocket motor, Burning rate, Propellant

## 1. บทนำ

การออกแบบดินขับที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนเชื้อเพลิงแข็ง มักกำหนดให้แท่งดินขับเผาไหม้จากโพรงกลางของแท่งดินขับออกสู่ภายนอก (Internal Burning) โดยหัว-ท้ายไม่ให้เกิดการเผาไหม้แต่ในบางกรณีจำเป็นต้องออกแบบดินขับให้หัว-ท้ายของแท่งดินขับไม่มีฉนวนหุ้มเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ด้วย งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงโปรแกรมคำนวณชีพนวิธภายในของจรวดเชื้อเพลิงแข็งเพื่อให้สามารถจำลองลักษณะการเผาไหม้ของแท่งดินขับที่เกิดการเผาไหม้หัว-ท้ายของดินขับพร้อมกับการเผาไหม้ในลักษณะกลางแท่งดินขับออกสู่ภายนอก

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผ่านมามีการพัฒนาการออกแบบรูปร่างดินขับจรวดโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณต่าง ๆ เพื่อหาค่าความดัน (Pressure) กำลังขับ (Thrust) รูปร่างดินขับ (Thrust Profile) เมื่อเทียบกับเวลา [1, 2] และงานวิจัยที่ผ่านมาของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) เป็นการนำเสนอกระบวนการออกแบบรูปร่างดินขับจรวดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับดินขับแบบเชื้อเพลิงแข็ง (Solid Propellant) ทั้งแบบดินขับแบบฐานคู่ (Double-Base Propellant) และดินขับแบบคอมโพสิต (Composite Propellant) เพื่อหาค่าแรงขับ เมื่อเทียบกับเวลาและความดัน ณ เวลา สามารถคำนวณชีพนวิธภายในของดินขับจรวดที่มีฉนวนหุ้มด้านข้าง และด้านหัว-ท้าย แบ่งแท่งดินขับเป็น Segment เท่ากัน เพื่อคำนวณหาอัตราการเกิดก๊าซจากการเผาไหม้และการเปลี่ยนแปลงตามความยาว (L) ของดินขับ จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณรูปร่างแรงขับเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการจุดทดสอบจรวดจริงให้ผลใกล้เคียงกัน [3] ต่อมามีการพัฒนาให้จรวดมีประสิทธิภาพในการออกตัวเพิ่มขึ้นโดยออกแบบจรวดมีการเผาไหม้มากกว่า 1 ทิศทาง งานวิจัยของ Willcox และคณะได้ออกแบบให้ดินขับมีการเผาไหม้ 1, 2 และ 3 ทิศทางของการเผาไหม้ เพื่อหาค่าคำนวณรูปร่างแรงขับที่ดีที่สุดและศึกษาผลกระทบของ

ปรากฏการณ์ Erosive Burning พบว่าความดันระยะเวลาสั้นมักจะเกิดขึ้นในมอเตอร์มีขนาดเล็กและความยาว (L) ของจรวด มีอิทธิพลต่อพลวัตของเผาไหม้ขณะที่ระยะเวลานานความดันระยะเวลายาวมักจะพบที่เกิดขึ้นหน้าตัดรูปดาวเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ Erosive Burning และผลจากการทดลองพบว่า การเพิ่มทิศทางการเผาไหม้ ส่งผลให้เพิ่มพื้นที่ในการเผาไหม้ทำให้จรวดมีแรงขับช่วงแรกเพิ่มขึ้น [4] ดังเช่นงานวิจัยของ Shekhar [5] ได้ออกแบบการคำนวณดินขับโดยให้มีการเผาไหม้ส่วนหัว-ท้าย โดย คี กษา สัต ส่วน ความยาว กับ เส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D), สัดส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง (d/D) และ มุมส่วนท้ายจรวด ( $\theta$ ) พบว่าพื้นผิวการเผาไหม้อัตราส่วนความยาวกับเส้นผ่าศูนย์กลาง (L / D) ที่ต่ำ และมุมเอียง ( $\theta$ ) ต่ำกว่าส่งผลให้การเผาไหม้รูปร่างแรงขับเพิ่มขึ้น

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาและปรับปรุงโปรแกรม เพื่อใช้คำนวณหาแรงขับ (Thrust) และรูปร่างของแรงขับ (Thrust Profile) ของจรวดที่ผลิตแบบไม่มีส่วนหุ้มฉนวนหัว-ท้ายดินขับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกตัวของจรวด ด้วยโปรแกรมคำนวณชีพนวิธภายในของจรวดที่ปรับปรุงขึ้น โดยการนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ออกแบบการเผาไหม้ดินขับมากกว่า 1 ทิศทาง และงานวิจัยนี้ได้นำจรวดขนาดเล็กมาทดสอบภาคสถิตนำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมคำนวณชีพนวิธภายในของจรวดที่ปรับปรุง

ในการออกแบบรูปร่างดินขับส่วนสำคัญคือการหาอัตราการเผาไหม้ของดินขับ งานวิจัยนี้ใช้ดินขับชนิดคอมโพสิตซึ่งการหาอัตราการเผาไหม้ เป็นไปตามกฎของวีเอ (ville's law) [6] สามารถหาจากสมการ (1)

$$r_b = aP^n \quad (1)$$

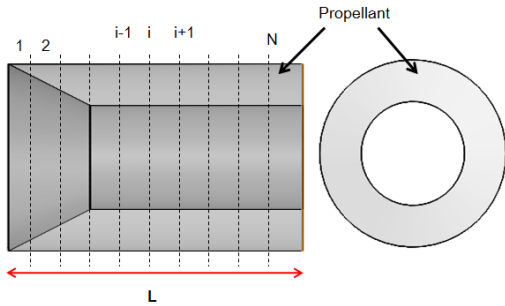
$P$  = ความดันภายในท่อจรวด (MPa หรือ psia)

$r_b$  = อัตราเผาไหม้ของดินขับ

a = Pre-exponential Factor เป็น  
ฟังก์ชันของอุณหภูมิดินขับ

n = Pressure Exponent ของดินขับ

ในการคำนวณแบ่งดินขับออกเป็น ส่วนตามความยาวโดยมีขนาดเท่ากัน (Segment) แสดงดัง รูปที่ 1



รูปที่ 1 แบ่งแท่งดินขับออกเป็น Segment เพื่อ  
คำนวณหาอัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้  
ของดินขับ

จากรูปที่ 1 ดินขับไม่มีส่วนหุ้มฉนวนหัว-ท้ายดินขับ  
ลักษณะการเผาไหม้จะเผาไหม้แนวตั้งฉากกับ  
พื้นที่ผิวดินขับเมื่อไม่มีฉนวนหุ้มหัว-ท้ายลักษณะการ  
เผาไหม้มีมากกว่าสองทิศทางแสดงดังรูปที่ 2 เมื่อเวลา  
ผ่านไปดินขับจะถูกเผาไหม้เนื้อดินขับมีขนาดลดลง  
สามารถอธิบายดังสมการ (2) แสดงพื้นที่ดินขับที่  
เปลี่ยนแปลงไป

$$S = \frac{\pi(d + 2w)(l - w \tan(\theta/2))}{D^2 - (d + 2w)^2 \sin^2 \theta} \quad (2)$$

S = พื้นที่ดินขับเมื่อเวลาใดๆ

d = รัศมีดินขับที่เวลา t = 0

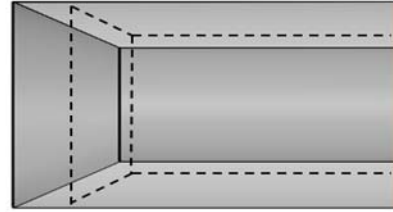
D = รัศมีดินขับที่เวลา t = t

w = ความหนาดินขับที่ถูกเผาไหม้

$\theta$  = มุมของดินขับ

จากอัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับ  
(3) เมื่อคำนวณได้ค่า P แล้วจึงนำไปคำนวณค่าแรง  
ขับ F ตามสมการที่ (4) เมื่อค่า  $C_F$  คือค่า Thrust  
Coefficient

$$m = P A_t C^* \quad (3)$$



รูปที่ 2 ขนาดดินขับ ณ เวลา t = t

P = ความดันภายในท่อจรวด

$A_t$  = พื้นที่หน้าตัดของ Nozzle

$C^*$  = Characteristic Velocity ของดินขับ

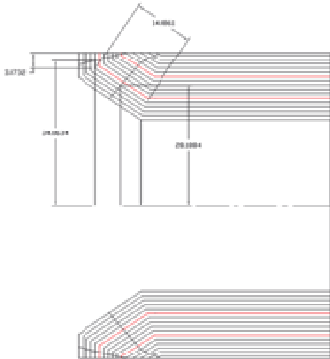
$$F = C_F P A_t \quad (4)$$

ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองหาค่าความดัน ระยะเวลา  
เผาไหม้ และแรงขับของจรวด ณ เวลาต่างๆ เพื่อ  
คำนวณอัตราเผาไหม้ โดยการเปรียบเทียบกับ  
งานวิจัยที่ผ่านมาแล้ว และยังนำจรวดขนาดเล็กมา  
ทดสอบภาคสถิติ ประโยชน์ของการศึกษาอัตราการ  
เผาไหม้ของดินขับจรวดช่วยให้การออกแบบดินขับ  
จรวดให้มีลักษณะรูปร่างแรงขับ (Thrust Profile) ได้  
แม่นยำมากขึ้น

### 3. การปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นคำนวณ  
ออกแบบดินขับจรวดที่ไม่มีฉนวนหุ้มหัว-ท้าย โดยการ  
คำนวณเพื่อเพิ่มพื้นที่การเผาไหม้ด้านหัวและ เพื่อเพิ่ม  
อัตราการไหลของก๊าซเข้า Segment และอัตราการ  
ไหลของก๊าซออกของ Segment สุดท้าย และหา  
พื้นที่การเผาไหม้ด้านหัว-ท้ายซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  
ระยะทางที่เผาไหม้จากผิวหน้าของดินขับ โดยการใช้  
ข้อมูลจากการเขียนแบบด้วยโปรแกรม CAD รูปที่ 3  
ภาคหน้าตัดด้านข้างของแท่งดินขับ เกิดการเผาไหม้  
ในทิศตั้งฉากกับพื้นที่ผิวของแท่งดินขับ การหาพื้นที่  
การเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Pappus จากความยาวของ  
เส้นตรงศูนย์กลางด้วยระยะทางที่ Centroid ของเส้นตรงนั้น  
เคลื่อนที่รอบแกนกลางของแท่งดินขับ ณ เวลาใดๆ ใน  
การเผาไหม้ดินขับขนาดดินขับมีขนาดและความยาว  
ลดลง ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ส่วนหัวท้ายจรวด ในการ

คำนวณหาว่าพื้นที่เผาไหม้ดินขับส่วนหัว-ท้าย อยู่ในตำแหน่งใดของ Segment ที่แบ่งขึ้นและความยาวของ Segment หัว-ท้ายมีความยาวเหลือเท่าไร



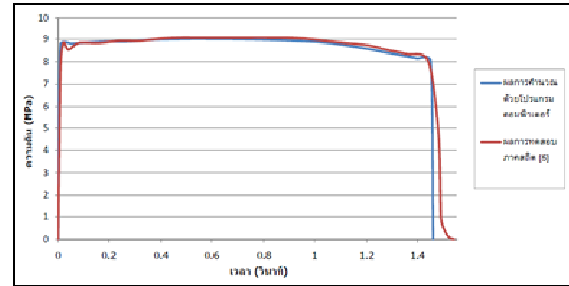
รูปที่ 3 การเผาไหม้ดินขับ ณ เวลาใดๆ

#### 4. การทดสอบโปรแกรมที่ปรับปรุง

1. นำข้อมูลผลการทดลองของ Shekhar แสดงดังตารางที่ 1 เปรียบเทียบกราฟด้วยโปรแกรมคำนวณชีพวิถีภายในของจรวดที่ปรับปรุงได้ผลดังแสดงรูปที่ 4

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของดินขับตามการทดลองของ Shekhar เพื่อป้อนให้โปรแกรม [5]

พารามิเตอร์	ขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (D), mm	72
เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (d), mm	40.5
ความยาวดินขับ (l), mm	46.5
มุมเอียง ( $\theta$ )	34
ความหนาแน่นดินขับ ( $\rho$ ), g/cc	1.58
Characteristic velocity ( $C^*$ ), m/s	1360
อัตราเผาไหม้ที่ความดัน 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, mm/s	10.47
Burn rate exponent (n),	0.114
Throat area (A)	25.517



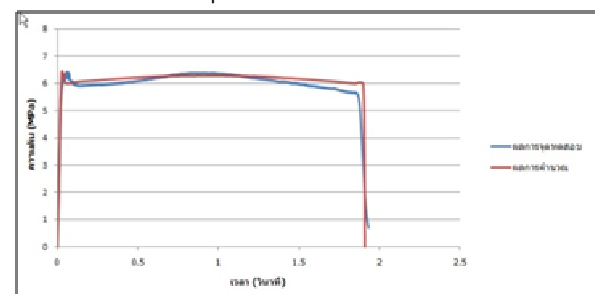
รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลการคำนวณ กับผลการทดลองของ Shekhar [5]

2. นำจรวดต้นแบบขนาดเล็ก มาทดสอบภาคสถิติ โดยจรวดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของดินขับ เส้นผ่าศูนย์กลางในของดินขับและความหนาของชั้นดินขับ และนำจรวดขนาดเล็กมาจุดทดสอบภาคสถิติ



รูปที่ 5 การทดสอบภาคสถิติจรวดขนาดเล็ก

รูปที่ 5 เป็นการทดลองภาคสถิติของจรวดเล็กที่ผลิตขึ้นโดยขณะจุดมีการวัดความดัน ระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งสามารถแสดงค่าได้ดังรูปที่ 6 ทำให้คำนวณค่าอัตราการเผาไหม้ของดินขับ และนำกราฟมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมคำนวณชีพวิถีภายในของจรวดที่ปรับปรุง



รูปที่ 5 เปรียบเทียบความดันกับเวลา (Pressure Profile) ที่วัดได้ กับค่าที่คำนวณ

## 5.สรุปผลการทดลอง

ผลการคำนวณรูปร่างแรงขับเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าที่วัดได้จากการทดสอบภาคสถิติจรวด กราฟที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานสำหรับการออกแบบรูปร่างดินขับจรวดที่มีการเผาไหม้หัว-ท้าย หรือแบบอื่นๆ ต่อไป

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Willcox, M.A., Brewster,M.Q, Tang, K.C.,and Stewart, D.S. (2007). Solid propellant grain design and burnback simulation using a minimum distance function, Journal of Propulsion and Power, Vol.23, No.2 March-April 2007, pp.465-475
- [2] Yildirim, C., and Aksel, M.H., (2005). Numerical simulation of the grain burnback in solid propellant rocket motor, AIAA paper 2005-4160, July 2005.
- [3] เจษฎา ศิริรัฐนิคม, อุดุลยศักดิ์ บุญพันธ์ และไกรสุ เนตร เข็มสุข (2553). การออกแบบรูปร่างดินขับโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี
- [4] Willcox, M.A., Brewster,M.Q, Tang, K.C., Stewart, D.S.,and Kuznetsov I.,(2007). Solid rocket moter Internal ballistics simulation using three-dimenional grain burnback, Journal of Propulsion and Power, Vol.23, No.3 May-June 2007, pp.575-584
- [5] Shekhar, H., (2009), Design of funnel port tular propellant grain for neutral bruning profile in rockets, Defence Science Journal, Vol.50, No.5, September 2009, pp 494-498
- [6] Sutton,G.P., and Biblarz, O, (2001), *Rocket Propulsion Elements*. 7<sup>th</sup> Edition, John Wiley&Sons