ME-NETT 25
The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

AME 06

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25
19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

การวัดอัตราเผาไหม้และคุณสมบัติ Erosive Burning ของดินขับจรวดโดยใช้มอเตอร์จรวดขนาดเล็ก

Solid Propellant Burning Rate and Erosive Burning Property Measurement using Small Rocket Motors

น.ท.นฤพณ พิทยประเสริฐกิจ[1], ณัฐวัฒน์ วิญญา [1,*]และ พ.อ.อ. นิกร กุหลาบอ่ำ[1]

[1]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[2] โทรศัพท์: 02 980 6199-207 ต่อ 329 โทรสาร: 02 980 6198

บทคัดย่อ

Erosive Burning คือปรากฏการณ์ที่การเผาไหม้ของดินขับภายในมอเตอร์จรวดมีอัตราการเผาไหม้ (Burning Rate) สูงกว่าปกติ ในบริเวณที่มีแก๊สจากการเผาไหม้ไหลผ่านด้วยความเร็วสูง ในงานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการวัดอัตราเผาไหม้ และคุณสมบัติ Erosive Burning ของดินขับจรวด โดยใช้มอเตอร์จรวดขนาดเล็ก นำผลการวัดความดันภายในมอเตอร์จรวดในระหว่างการเผาไหม้ มาคำนวณหาอัตราเผาไหม้ และอัตราการไหลของแก๊ส ณ บริเวณ ต่าง ๆ ภายในมอเตอร์จรวดนั้น เพื่อใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์เอมพิริคัลของคุณสมบัติ Erosive Burning ประโยชน์ของการศึกษา Erosive Burning ภายในห้องเผาไหม้ของมอเตอร์จรวด คือ จะช่วยให้สามารถออกแบบดินขับจรวดให้มีลักษณะแรงขับ (Thrust Profile) ตามที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ

คำหลัก: ดินขับจรวด, อัตราเผาไหม้, มอเตอร์จรวด, Erosive burning

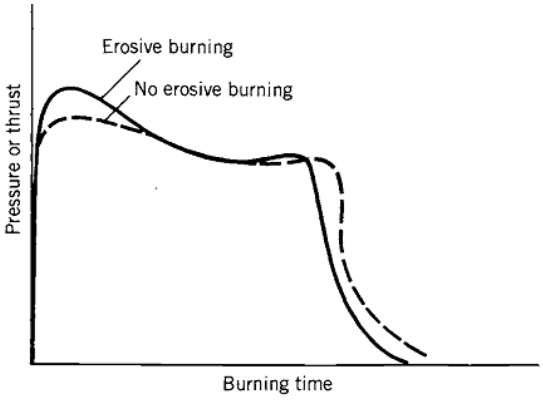
Abstract

Erosive Burning refers to phenomena burning of propellant in rocket motors caused by the high velocity flow of gas combustion over the burning surface of solid propellant. The objective of this work is to study burning rate and erosive burning properties using small rocket motors. Measured pressure is used to calculate burning of rate of propellant and flow rate of gas within the rocket motor, which allows calculation of the empirical erosive burning parameter. The study of erosive burning assists in the design of propellant grain to deliver the required thrust profile.

Keywords: Rocket motor, Burning rate, Erosive burning, Propellant

1. บทนำ

Erosive Burning คือ ปรากฏการณ์การเผาไหม้ของดินขับภายในมอเตอร์จรวดมีอัตราการเผาไหม้สูงกว่าปกติในบริเวณที่มีแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ไหลผ่านด้วยความเร็วสูง (ดังรูปที่1) เป็นผลให้ดินขับด้านท้ายจรวดเผาไหม้หมดก่อนด้านหัว และแรงขับแรกเริ่มของจรวดมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มี Erosive Burning ประโยชน์ของการศึกษา Erosive Burning เพื่อคำนวณออกแบบดินขับจรวดให้มีลักษณะ (Thrust Profile) ตามต้องการได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 1 การเกิดปรากฏการณ์ Erosive Burning [1]

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในกรณีที่ไม่มีแก๊สความเร็วสูงไหลผ่านดินขับ อัตราการเผาไหม้ของดินขับจรวด จะเป็นไปตามกฎของวีเอ (Ville's law) สามารถหาจากสมการ (1)

$$r_b = aP^n \quad \text{---(1)}$$

P = ความดันภายในท่อจรวด

r_b = อัตราเผาไหม้ของดินขับ

a = Pre-exponential Factor เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิดินขับ

n = Pressure Exponent ของดินขับ

Lenoir และ Robillard [2] พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า Erosive Burning ได้แก่ ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux) ความเร็วของแก๊สไหลในขณะเกิดการเผาไหม้ ความดัน และลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) แบบจำลองการเผาไหม้ของ ดินขับเมื่อเกิดปรากฏการณ์ Erosive Burning ของ Lenoir และ Robillard ได้รับการพัฒนามาเป็นลำดับ ปัจจุบันรูปแบบของสมการอัตราเผาไหม้ที่มี Erosive Burning จะเป็น ตามสมการ (2)

$$r_b = aP^n + \alpha G^{0.8} D^{-0.2} \exp(-\beta r_b \rho / G) \quad \text{---(2)}$$

P = ความดันภายในท่อจรวด

ρ = ความหนาแน่นของดินขับ

G = อัตราการไหลของมวลต่อพื้นที่หน้าตัด ของ Port = $\dot{m}_p / A_p$

A_p = พื้นที่หน้าตัด Port

D = Characteristic Dimension ของ $Port = 4A_p / S$

S = เส้นรอบรูปของหน้าตัด Port

α = เป็นค่าคงที่เอมพิริคัล

β = เป็นค่าคงที่เอมพิริคัล โดย β = 53 ในกรณีใช้หน่วย SI

Furfaro [3] ศึกษาการเผาไหม้ Erosive Burning โดยนำมอเตอร์จรวดขนาดเล็กมาเชื่อมต่อกัน 6-12 นัด และวัดอัตราการเผาไหม้ของดินขับด้วยอุปกรณ์อัลทราโซนิก

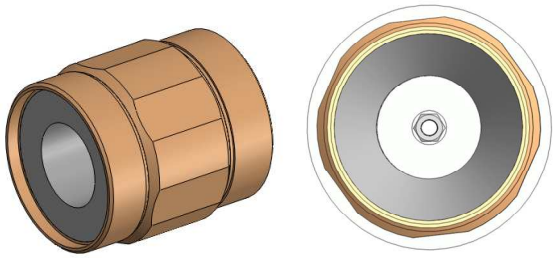
การหาค่าคงที่เอมพิริคัล α จากการทดลองจะทำให้สามารถทำนายอัตราเผาไหม้ของดินขับได้อย่างแม่นยำ

3. การศึกษาแนวทางวัดอัตราเผาไหม้และคุณสมบัติ Erosive Burning

ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองโดยนำจรวดขนาดเล็ก (ดังรูปที่ 2) มาจุดทดสอบภาคสถิต หาค่าความดัน ระยะเวลาเผาไหม้ และแรงขับของจรวด ณ เวลาต่างๆ เพื่อคำนวณอัตราเผาไหม้ที่มีปรากฏการณ์ Erosive Burning

รูปที่ 3 การทดสอบภาคสถิตจรวดขนาดเล็กโดยดินขับของต้นแบบจรวดขนาดเล็ก ที่จุดทดสอบมีรูกลางแท่งดินขับ หน้าตัดกลม ปลายด้านหัวของแท่งดินขับตัดตรงและหุ้มฉนวน ปลายด้านท้ายมีลักษณะเป็นกรวยเอียงไม่หุ้มฉนวน ลักษณะแท่งดินขับคล้ายคลึงกับดินขับที่ศึกษาโดย Shekhar [4] ดินขับ

ชนิดนี้เผาไหม้ให้ความดันค่อนข้างคงที่ และสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่สามารถคำนวณลักษณะการเผาไหม้ได้ใกล้เคียงผลการทดลองจริง

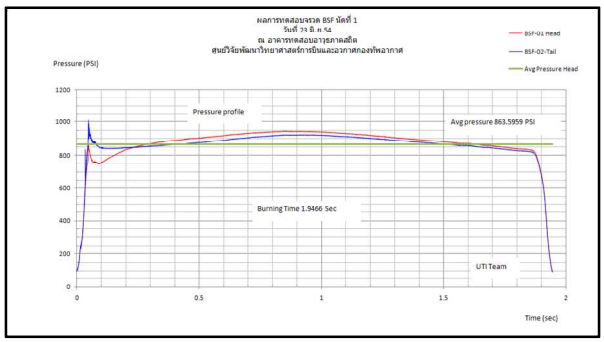


รูปที่ 2 มอเตอร์จรวดขนาดเล็ก

รูปที่ 3 การทดสอบภาคสถิตจรวดขนาดเล็ก

4. ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจุดทดสอบภาคสถิต แสดงตามรูป 4 นำค่าความดัน มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ใช้ค่าคงที่เอมพิริคัล α ค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 พบว่าการแปรค่า α มีผลต่อ Pressure Profile น้อย ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะแท่งดินขับมีรูกลางขนาดใหญ่ และดินขับมีความยาวน้อย ความเร็วของแก๊สที่ไหลภายในรูกลางดินขับจึงมีค่าน้อย ส่งผลให้ไม่เกิด Erosive Burning รุนแรง



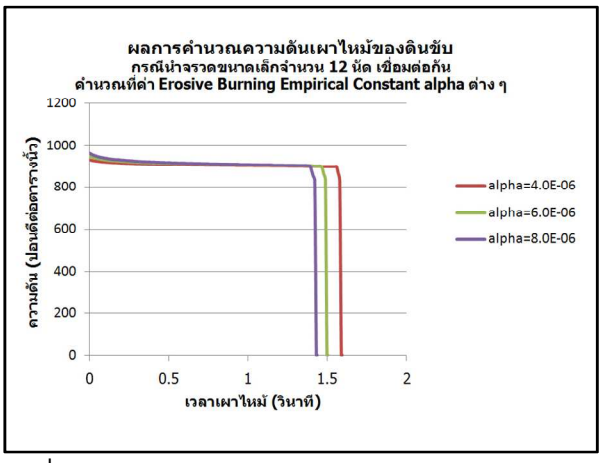
รูปที่ 4 ความดันที่วัดได้จากการจุดทดสอบภาคสถิตจรวดขนาดเล็ก

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความดันที่วัดได้จากการทดลอง กับค่าที่คำนวณได้ โดยใช้ค่าคงที่เอมพิริคัล α ค่าต่าง ๆ

เวลา (วินาที)	ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)			
	ผลการทดลอง	ผลคำนวณเมื่อ		
		α = 6.0E-06	α = 6.0E-05	α = 6.0E-04
0	850	869	869	870
0.5	875	904	904	904
1.0	914	914	914	914
1.5	860	897	897	897
1.8	825	875	875	875
1.85	650	870	870	870

แนวทางการตรวจวัดคุณสมบัติ Erosive Burning โดยใช้มอเตอร์จรวดขนาดเล็ก กระทำได้โดยนำมอเตอร์จรวดมาเชื่อมต่อกัน ตามวิธีการของ Furfaro เพื่อเพิ่มปริมาณและความเร็วของแก๊สภายในรูกลางดินขับด้านท้ายของจรวด ให้เกิด Erosive Burning ชัดเจน โดยปรับขยายพื้นที่หน้าตัดของ Nozzle ขึ้นตามส่วนเพื่อรักษาความดันการเผาไหม้ไว้ในช่วงเดิม

เมื่อคำนวณ Pressure Profile ในกรณีนำจรวดขนาดเล็ก 12 นัด มาเชื่อมต่อกัน ผลการคำนวณที่ใช้ค่าคงที่เอมพิริคัล α ค่าต่าง ๆ แสดงให้เห็นได้ว่า ดินขับที่มีคุณสมบัติ Erosive Burning ต่างกัน จะแสดงค่า Pressure Profile ที่แตกต่างกัน ชัดเจนเพียงพอที่จะนำผลมาคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าคงที่เอมพิริคัล α จาก Pressure Profile ที่วัดได้ต่อไป



รูปที่ 5 ผลการคำนวณความดัน กรณีนำจรวดขนาดเล็ก 12 นัดมาเชื่อมต่อกัน คำนวณที่ค่าคงที่เอมพิริคัล α ค่าต่าง ๆ

5. สรุป วิเคราะห์ และวิจารณ์

ผลการจุดจรวดทดสอบภาคสถิต และผลคำนวณค่าความดัน แสดงว่าจรวดขนาดเล็ก ที่แท่งดินขับมีรูกลางขนาดใหญ่ และดินขับมีความยาวน้อยจะไม่แสดงลักษณะการเผาไหม้แบบ Erosive Burning ชัดเจนเพียงพอที่จะนำผลมาคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าคงที่เอมพิริคัล α จาก Pressure Profile ที่วัดได้

การวัดค่าค่าคงที่เอมพิริคัล α ของ Erosive Burning สามารถกระทำได้โดยนำมอเตอร์จรวดขนาดเล็กมาเชื่อมต่อกันเพื่อเพิ่มปริมาณและความเร็วของแก๊สภายในรูกลางดินขับ ซึ่งขณะนี้อยู่ในระหว่างการดำเนินการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Sutton, G. (1992). *Rocket Propulsion Elements*, 6th edition, ISBN: 0-471-52938-9, John Wiley & Sons, New York. pp 380-381

[2] Lenoir , J.M , and Robillard , G ,"A Mathematical Method to Predict the Effects of Erosive Burning in Solid Propellant Rocket", Sixth Symposium (International) on combustion The combustion, institute , Pittsburgh , 1957 . pp 663-667.

[3] Furfaro, J. (2003) "Erosive burning study utilizing ultrasonic measurement techniques," AIAA Paper 2003-4806.

[4] Shekhar, H., (2009), Design of funnel port tubular propellant grain for neutral burning profile in rockets, Defence Science Journal, Vol.50, No.5, September 2009, pp 494-498