

การคำนวณการเผาไหม้ของดินขับจรวดแบบไม่มีส่วนหุ้มฉนวนหัว-ท้ายดิน Calculation on the Combustion of Propellant Brains for Unihibited Ends

คมสันต์ ประพันธ์กาญจน์ ณัฐวัฒน์ วิญญาณ * อนันต์ จันทร์เฝือก เจษฎา ศิริรัฐนิคม
สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) กระทรวงกลาโหม
อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120

Komson Prapunkarn Nattawat Winya* Anun Junpuak Chesda Krirathikom
Defence Technology Institute (Public Organization) Ministry of Defence
Pakkret, Nonthaburi 11120

Tel : 0-2980-6200 Ext. 329 E-mail: nattawat.w@dti.or.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงโปรแกรมคำนวณชีพนวิธีภายในของจรวดเชื้อเพลิงแข็ง (solid propellant rocket) ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโปรแกรมคำนวณชีพนวิธีภายในของดินขับจรวดที่มีฉนวนหุ้มด้านข้าง และด้านหัว-ท้าย โดยแบ่งแท่งดินขับเป็น Segment เท่ากัน เพื่อคำนวณอัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้และการเปลี่ยนแปลงตามความยาว (L) ของดินขับ และในงานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงโปรแกรมเพื่อใช้คำนวณหาแรงขับ และรูปร่างของแรงขับของจรวดที่ผลิตแบบไม่มีส่วนหุ้มฉนวนหัว-ท้ายดินขับ ทำให้พื้นที่การเผาไหม้มีมากกว่า 1 ทิศทาง เป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเผาไหม้ทำให้จรวดมีแรงขับในช่วงแรก (initial thrust) เพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกตัวของจรวด งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบรูปร่างแรงขับระหว่างผลการจุดทดสอบจรวดจริง กับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณชีพนวิธีภายในของจรวดที่ปรับปรุงให้ผลใกล้เคียงกัน มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย จากรายละเอียดรูปร่างดินขับแบบจำลองและเอมพิริคัลที่ใช้จำลองปรากฏการณ์ Erosive Burning

คำหลัก มอเตอร์จรวด อัตราการเผาไหม้ ดินขับจรวด

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. The results were in agreement with slight difference due to details of the propellant grain dimensions and the erosive burning empirical model used.

Keywords: Rocket motor, burning rate, propellant

1. บทนำ

ส่วนขับเคลื่อนของจรวดเชื้อเพลิงแข็ง มีคำศัพท์เฉพาะเรียกว่ามอเตอร์จรวด มีลักษณะสำคัญ คือ มีแท่งดินขับที่เป็นของแข็งบรรจุภายในท่อซึ่งทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ เรียกแท่งดินขับนี้ว่า เกรน (grain) มีส่วนผสมของสารเคมีที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้สมบูรณ์ภายในตัว แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ของดินขับจะไหลผ่านท่อท้าย (nozzle) ด้วยความเร็วสูงเกิดแรงขับ (thrust) ทำให้จรวดเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

มอเตอร์จรวดที่ใช้ในทางทหาร แต่ละแบบต้องการแรงขับที่มีลักษณะแตกต่างกัน ตามภารกิจ เช่น มอเตอร์จรวดสำหรับขับเคลื่อนอาวุธนำวิถีพื้นสู่อากาศ ต้องการแรงขับตอนต้นสูง เพื่อเร่งความเร็วให้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นต้องการแรงขับที่ลดลงพอชดเชยแรงต้านอากาศเพื่อรักษาความเร็วไว้ ส่วนอาวุธปล่อยนำวิถีต่อต้านเรือต้องการแรงขับต่ำเป็นเวลานาน เพื่อให้อาวุธปล่อยนั้น เคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้ความเร็วเสียงได้เป็นระยะทางไกล เป็นต้น

จรวดเชื้อเพลิงแข็งเมื่อจุดแล้วไม่สามารถปรับแรงขับได้ การออกแบบจรวดต้องกำหนดรูปร่างของแท่งดินขับเพื่อให้ได้ลักษณะแรงขับ (thrust profile) ที่ต้องการ

การออกแบบดินขับจรวดเพื่อให้อัตราการจรวดมี Thrust Profile ตามที่ต้องการ จำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่สามารถคำนวณแรงขับซึ่งได้จากการเผาไหม้ของแท่งดินขับซึ่งมีรูปร่างต่าง ๆ นั้นได้

การออกแบบดินขับที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนเชื้อเพลิงแข็ง มักกำหนดให้แท่งดินขับเผาไหม้จากโพรงกลางของแท่งดินขับออกสู่ภายนอก (internal burning) โดยหัว-ท้ายไม่ให้เกิดการเผาไหม้แต่ในบางกรณีจำเป็นต้องออกแบบดินขับให้หัว-ท้ายของแท่งดินขับไม่มีฉนวนหุ้มเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ด้วย

ในต่างประเทศ มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับใช้ออกแบบรูปร่างดินขับจรวดและมีการใช้งานแพร่หลาย เช่น ในสหรัฐอเมริกา มีการใช้โปรแกรม SPP (Solid Performance Program) ซึ่งมีมอเตอร์ขับเคลื่อนนำวิถีภายใน ใช้สร้างรูปร่างแท่งดินขับขึ้นจากรูปร่างมาตรฐานในฐานะข้อมูล แล้วคำนวณหาความดันภายในมอเตอร์จรวดและแรงขับได้โดยใช้วิธีการวนซ้ำ (iteration) เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของแก๊สจากการเผาไหม้ [1] โปรแกรมสำเร็จรูปนี้มีราคาค่อนข้างสูง และรัฐบาลสหรัฐควบคุมการส่งออกโปรแกรมดังกล่าว

ในการวิจัยและพัฒนาจรวดในประเทศไทย ได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับใช้ออกแบบรูปร่างดินขับจรวด โดยอาศัยหลักการคำนวณหาอัตราการไหลของแก๊สจากการเผาไหม้ โดยใช้วิธี iteration ร่วมกับข้อมูลทางเรขาคณิตของแท่งดินขับที่คำนวณได้จากการเขียนแบบ หรือการใช้โปรแกรม CAD โดย

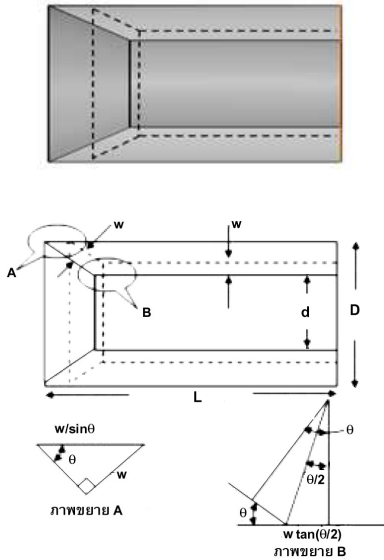
สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) ได้นำเสนอกระบวนการออกแบบรูปร่างดินขับจรวดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับดินขับแบบเชื้อเพลิงสามารถคำนวณขึ้นวิถีภายใน ได้แก่ ลักษณะความดัน (pressure profile) และ thrust profile ของดินขับจรวดที่มีฉนวนหุ้มด้านข้าง และด้านหัว-ท้าย โดยแบ่งแท่งดินขับเป็น segment เพื่อคำนวณหาอัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้และการเปลี่ยนแปลงตามความยาว ของดินขับ จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณรูปร่างแรงขับเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการจุดทดสอบจรวดจริง ให้ผลใกล้เคียงกัน [2]

ต่อมา สถาบันฯ มีการพัฒนาให้จรวดมีแรงขับต้นเพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกตัวโดยออกแบบดินขับจรวดให้มีการเผาไหม้ด้านหัว-ท้าย ด้วยจึงจำเป็นต้องปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ให้รองรับการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นดังกล่าว

Willcox และคณะ [3] ได้พัฒนากระบวนการจำลองแบบการเผาไหม้ของแท่งดินขับ โดยแบ่งแท่งดินขับและโพรงภายในแท่งดินขับออกเป็นกริดสามมิติ แล้วใช้โปรแกรม CAD คำนวณหา minimum distance function ซึ่งเท่ากับระยะทางใกล้ที่สุดระหว่างจุด กริดแต่ละจุดกับพื้นผิวการเผาไหม้ Willcox และคณะ [3] ได้นำวิธีการนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ดินขับที่มีการเผาไหม้ใน 1 2 และ 3 ทิศทาง เพื่อศึกษาการเผาไหม้และผลกระทบของปรากฏการณ์ erosive burning ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของดินขับภายในมอเตอร์จรวดมีอัตราการเผาไหม้สูงกว่าปกติในบริเวณที่มีแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ไหลผ่านด้วยความเร็วสูง [4]

วิธีการของ Willcox ให้ความละเอียดในการคำนวณสูง และเป็นการสร้างฟังก์ชันพื้นที่เผาไหม้ขึ้นโดยอัตโนมัติ จึงสามารถพัฒนาต่อยอดให้เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่สะดวกต่อการใช้งานได้ต่อไป แต่การเขียนโปรแกรมมีความซับซ้อนมาก

Shekhar [5] ได้พัฒนากระบวนการจำลองแบบการเผาไหม้ของดินขับ ซึ่งมีการเผาไหม้ส่วนหัว-ท้าย รูปกรวย โดยใช้วิธีการทางเรขาคณิตศึกษาสัดส่วนความยาวกับเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) สัดส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง (d/D) และ มุมส่วนท้ายจรวด (θ) ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะดินขับ ซึ่งมีการเผาไหม้ส่วนหัว-ท้าย รูปกรวย ที่ศึกษาโดย Shekar [5]

ลักษณะการเผาไหม้จะเผาไหม้แนวตั้งฉากกับพื้นที่ผิวดินขับเมื่อไม่มีฉนวนหัว-ท้ายลักษณะการเผาไหม้มีมากกว่าสองทิศทางแสดง เมื่อเวลาผ่านไปดินขับจะถูกเผาไหม้เนื้อดินขับมีขนาดลดลงสามารถอธิบายดังสมการ (1) แสดงพื้นที่ดินขับที่เปลี่ยนแปลงไป

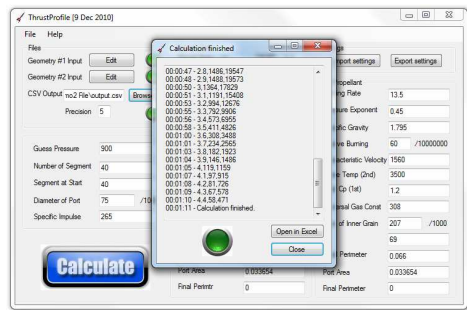
$$S = \pi(d + 2W)(l - w \tan(\frac{\theta}{2})) + \frac{\pi}{4} \frac{(D^2 - (d + 2w)^2)}{\sin \theta} \quad (1)$$

เมื่อ

- S = พื้นที่ดินขับเมื่อเวลาใดๆ
- d = เส้นผ่าศูนย์กลางรูกลางดินขับ
- D = เส้นผ่าศูนย์กลางนอกของดินขับ
- w = ความหนาดินขับที่ถูกเผาไหม้
- θ = มุมของดินขับ

วิธีการทางเรขาคณิตนี้ใช้ได้กับดินขับเฉพาะที่มีรูปทรงอย่างง่าย แต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้คำนวณหาพื้นที่เผาไหม้ส่วนหัว-ท้าย ของดินขับรูปแบบอื่น ที่มีลักษณะส่วนหัว-ท้าย เป็นรูปกรวยเอียงได้ต่อไป

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาและปรับปรุงโปรแกรมวิซวลเบสิก (Visual Basic Dot Net : VB.NET) แสดงดังรูปที่ 2 เพื่อใช้คำนวณหาความดัน (pressure) และแรงขับ (thrust) รวมถึงรูปร่างของความดันและแรงขับ (pressure and thrust Profile) ของจรวดที่ผลิตแบบไม่มีส่วนหุ้มฉนวนหัว-ท้ายดินขับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกตัวของจรวด ด้วยโปรแกรมคำนวณเชิงปริมาตรภายในของจรวดที่ปรับปรุงขึ้น โดยการนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ออกแบบการเผาไหม้ดินขับมากกว่า 1 ทิศทาง และงานวิจัยนี้ได้นำจรวดขนาดเล็กมาทดสอบภาคสถิตนำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมคำนวณเชิงปริมาตรภายในของจรวดที่ปรับปรุง



รูปที่ 2 โปรแกรมสำหรับการออกแบบรูปร่างดินขับจรวด เวอร์ชัน 1.0

2. การปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับใช้ออกแบบรูปร่างดินขับจรวดที่ได้มีการพัฒนาไว้เดิม มีการคำนวณโดยถือว่าจรวดทำงานในภาวะเสมือนสถานะคงตัว โดย

$$\dot{m}_{Nozz} = \dot{m}_p \quad (2)$$

เมื่อ \dot{m}_{Nozz} = อัตราการไหลของแก๊สที่ออกจาก Nozzle

\dot{m}_p = อัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับ

อัตราการไหลของแก๊สออกจาก Nozzle สัมพันธ์กับ ความดันภายในท่อจรวด [3]

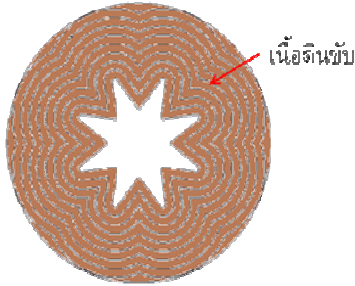
$$\dot{m}_{NOZZ} = \frac{P A_t}{C^*} \quad (3)$$

เมื่อ P = ความดันภายในท่อจรวด

A_t = พื้นที่หน้าตัดของ Nozzle

C^* = Characteristic Velocity ของดินขับ

ส่วนอัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดิน
 ชั้บคำนวณได้จากมวลของดินชั้บที่เผาไหม้ต่อหน่วย
 เวลา โดยที่ลักษณะการเผาไหม้ของดินชั้บเป็นไปตาม
 กฎของฟิโอบีร์ท (Piobert's Law) คือ ทิศทางการเผาไหม้
 ของดินชั้บ จะตั้งฉากกับผิวของดินชั้บเสมอ ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะการเผาไหม้ของดินชั้บจรวด มีทิศทางการเผาไหม้
 ตั้งฉากกับผิวของดินชั้บเสมอ

ดังนั้น จึงคำนวณอัตราการเกิดแก๊สจากการเผา
 ไหม้ของดินชั้บ ได้จาก

$$\dot{m}_p = \int \rho r_b dA \quad (4)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของดินชั้บ
 r_b = อัตราเผาไหม้ของดินชั้บ
 A = พื้นที่เผาไหม้ของดินชั้บ

การเผาไหม้ในลักษณะดังกล่าว ยังใช้ในการหา
 รูปลักษณะของแท่งดินชั้บที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วย
 ในกรณีดินชั้บจรวดชนิด composite นั้น อัตรา
 เผาไหม้เป็นฟังก์ชันของความดัน ตามกฎของวีเอ
 (Vielle's Law) [6] ตามสมการ (5) แสดงดังรูปที่ 4

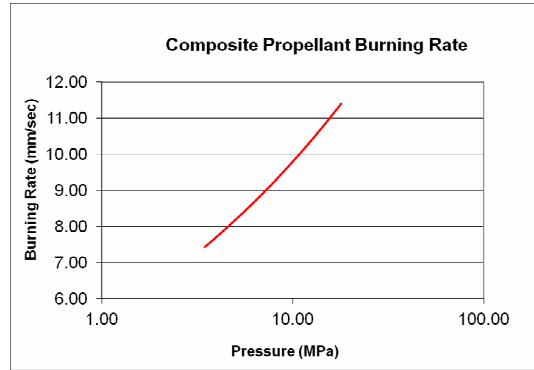
$$r_b = aP^n \quad (5)$$

เมื่อ a = Pre-exponential Factor เป็นฟังก์ชันของ
 อุณหภูมิดินชั้บ
 n = Pressure Exponent ของดินชั้บ

เมื่อดินชั้บเผาไหม้ภายในมอเตอร์จรวดจริง
 อัตราการเผาไหม้ยังเป็นฟังก์ชันของความเร็วของแก๊สที่
 ไหลผ่านผิวหน้าดินชั้บอีกด้วย เรียกว่าปรากฏการณ์
 erosive burning

Lenoir และ Robillard [7] พบว่า ปัจจัยที่ส่งผล
 ต่อค่า erosive burning ได้แก่ ฟลักซ์ความร้อน (heat

flux) ความเร็วของแก๊สไหลในขณะเกิดการเผาไหม้
 ความดัน และลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent
 flow)



รูปที่ 4 อัตราเผาไหม้ของดินชั้บจรวดเป็นฟังก์ชันของความดัน

แบบจำลองการเผาไหม้ของดินชั้บเมื่อเกิด
 ปรากฏการณ์ erosive burning ของ Lenoir และ
 Robillard ได้รับการพัฒนามาเป็นลำดับ ปัจจุบัน
 รูปแบบของสมการอัตราเผาไหม้ที่มี erosive burning
 จะเป็น ตามสมการ

$$r_b = aP^n + \alpha G^{0.8} D^{-0.2} \exp(-\beta r_b \rho / G) \quad (6)$$

G = อัตราการไหลของมวลต่อพื้นที่หน้าตัด ของ

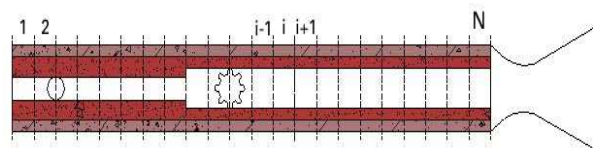
$$Port = \dot{m}_p / A_p$$

A_p = พื้นที่หน้าตัด Port

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

S = เส้นรอบรูปของหน้าตัด Port α และ β เป็น
 ค่าคงที่เอมพิริคัล โดย $\beta = 53$ ในกรณีใช้
 หน่วย SI

การหาปริพันธ์ของฟังก์ชันที่มีความซับซ้อน
 ตามสมการ (4) สามารถกระทำได้โดยแบ่งดินชั้บ
 ออกเป็น N ส่วน (segment) ตามความยาวแท่งดินชั้บ ดัง
 รูปที่ 5



รูปที่ 5 การแบ่งแท่งดินชั้บออกเป็น Segment เพื่อคำนวณหา
 อัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินชั้บ

พิจารณา segment ที่ i ของแท่งดินขับ อัตราการไหลของแก๊สออกจาก port ใน segment ที่ $i =$ อัตราการไหลเข้า segment ที่ i จาก segment ที่ $i - 1 +$ อัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับใน segment ที่ i

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{i-1} + \dot{m}_{gen\ i} \quad (7)$$

แต่ อัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับใน segment ที่ i ;

$$\dot{m}_{gen\ i} = \rho r_b(P, \dot{m}_i) A_i \quad (8)$$

ในการคำนวณ จะสร้างตาราง พื้นที่หน้าตัด port (A_p) และ เส้นรอบรูปของหน้าตัด port (S) สำหรับแต่ละ Segment เป็นฟังก์ชันของระยะทางที่เผาไหม้จากผิวหน้าเดิมของดินขับใน segment นั้น (ξ) การหาค่า $A_p(\xi)$ และ $S(\xi)$ นี้ กระทำได้โดยวาดแบบหน้าตัดโพรงกลางของดินขับด้วยโปรแกรม CAD แล้วขยายผิวการเผาไหม้ออกไปตั้งฉากกับผิวการเผาไหม้เดิม ในลักษณะเดียวกับการเผาไหม้ของดินขับตาม Piobert's Law

เมื่อเริ่มคำนวณ สมมุติ (guess) ค่าความดัน P จากนั้นเริ่มคำนวณจาก segment ที่ 1 โดยกำหนดให้อัตราการไหลของมวลแก๊ส เข้าสู่ segment ที่ 1 เท่ากับอัตราการไหลของแก๊สจากตัวจุดจรวด

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_{igniter}(t) \quad (9)$$

กรณี $t \leq$ เวลาเผาไหม้ของ Igniter ;

$$\dot{m}_{igniter} = \dot{m}_{igniter} / \text{เวลาเผาไหม้ของ Igniter}$$

กรณี $t >$ เวลาเผาไหม้ของ Igniter; $\dot{m}_{igniter} = 0$

อัตราการไหลของมวลแก๊สออกจาก segment ที่ 1 ไปเข้าสู่ Segment ที่ 2

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_0 + \rho r_{b1}(P, (\dot{m}_1 + \dot{m}_0)/2) A_1(\xi) \quad (10)$$

อัตราการไหลของมวลแก๊ส ออกจาก segment ที่ 2 ไปเข้าสู่ segment ที่ 3

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \rho r_{b2}(P, (\dot{m}_2 + \dot{m}_1)/2) A_2(\xi) \quad (11)$$

คำนวณเช่นนี้เรื่อยไป จนถึง Segment ที่ N

$$\dot{m}_N = \dot{m}_p \quad (12)$$

คืออัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับทั้งหมด

ตรวจสอบว่า ค่า P จากความสัมพันธ์ $\dot{m}_N = \dot{m}_p = \dot{m}_{Nozz} = P A_t C^*$ เท่ากับค่า P ที่สมมุติไว้ในครั้งแรกหรือไม่

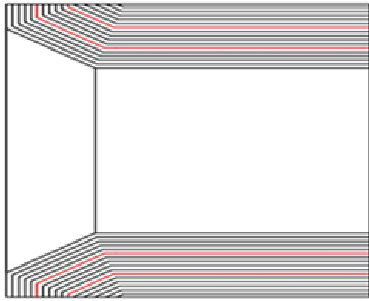
หากยังไม่เท่ากัน ใช้ ค่า P ที่คำนวณได้ใหม่เป็นค่า P ที่สมมุติ นำกลับไปคำนวณวนซ้ำ (iterate) จนค่า P ที่สมมุติ กับค่า P ที่คำนวณได้ ใกล้เคียงกันภายใน convergence limit ที่ต้องการ

เมื่อคำนวณได้ค่า ความดัน P แล้ว สามารถคำนวณหาค่าแรงขับ F ได้จากสมการ (13)

$$F = C_F P A_t \quad (13)$$

เมื่อ $C_F =$ ค่า Thrust Coefficient

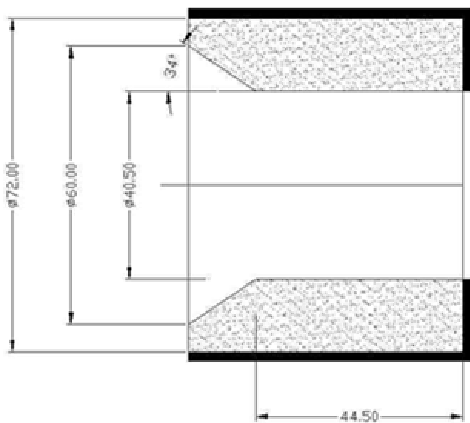
ในการวิจัยเดิม [2] ได้ใช้วิธีการที่กล่าวมาพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้คำนวณชนิดวิธภายในของจรวดหาค่าความดัน ระยะเผาไหม้ และแรงขับของจรวด ณ เวลาต่างๆ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับดินขับที่เผาไหม้ จากภายในโพรงกลางของแท่งดินขับ (internal burning) โดยที่หน้าตัดโพรงกลางดินขับ (port) เป็นรูปใด ๆ และแท่งดินขับมีการหุ้มฉนวนด้านหัว-ท้าย เพื่อไม่ให้เกิดการเผาไหม้ ในการคำนวณถือว่าการเผาไหม้ของดินขับ มีปรากฏการณ์ erosive burning ด้วย ในการวิจัยนี้ได้ปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาไว้เดิมนั้น ให้สามารถคำนวณการเผาไหม้ของดินขับจรวดที่ไม่มีฉนวนหุ้มหัว-ท้าย โดยการเพิ่มพื้นที่การเผาไหม้ด้านหัวและท้าย ด้วยการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สเข้า segment แรก และอัตราการไหลของแก๊สออกของ segment สุดท้าย และหาพื้นที่การเผาไหม้ด้านหัว-ท้ายซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางที่เผาไหม้จากผิวหน้าของดินขับ โดยการใช้ข้อมูลจากการเขียนแบบด้วยโปรแกรม CAD ตามรูปที่ 6 ภาคน้ำตัดด้านข้างของแท่งดินขับ แสดงเกิดการเผาไหม้ในทิศตั้งฉากกับพื้นที่ผิวของแท่งดินขับ สามารถหาพื้นที่การเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Pappus [5] จากความยาวของเส้นตรงคูณด้วยระยะทางที่ centroid ของเส้นตรงนั้นเคลื่อนที่รอบแกนกลางของแท่งดินขับ ณ เวลาใดๆ ในการเผาไหม้ดินขับจะมีขนาดและความยาวลดลง ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ส่วนหัวท้ายจรวด ในการคำนวณจึงต้องหาว่าพื้นที่เผาไหม้ดินขับส่วนหัว-ท้าย อยู่ในตำแหน่งใดของ segment ที่แบ่งขึ้นและความยาวของ segment หัว-ท้ายมีความยาวเหลือเท่าใด



รูปที่ 6 ภาคนำตัดด้านข้างของแท่งดินขับ แสดงการเผาไหม้ดินขับ ณ เวลาใดๆ

3. ผลการทดสอบโปรแกรมที่ปรับปรุง

ทดลองคำนวณการเผาไหม้ของดินขับที่มีขนาดและคุณสมบัติ ตามงานวิจัยของ Shekhar [6] แสดงดังรูปที่ 7 และตารางที่ 1



รูปที่ 7 ภาคนำตัดด้านข้างของแท่งดินขับ ตามงานวิจัยของ Shekhar [5]

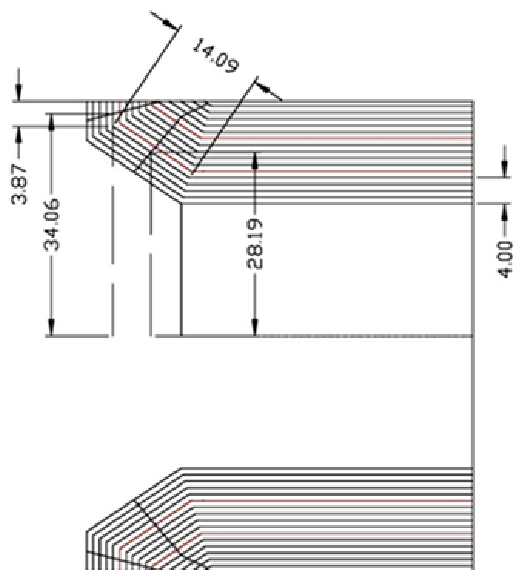
ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของดินขับ ตามการทดลองของ Shekhar [6] เพื่อป้อนให้โปรแกรม

พารามิเตอร์	ขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (D), mm	72
เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (d), mm	40.5
ความยาวดินขับ (l), mm	46.5
มุมเอียง (θ)	34
ความหนาแน่นดินขับ (ρ), 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

หาพื้นที่การเผาไหม้ด้านท้ายของแท่งดินขับด้วยทฤษฎี Pappus ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 8 แสดงค่ามิติ ที่ใช้ในการหาพื้นที่เผาไหม้ด้านท้าย เมื่อดินขับเผาไหม้ เป็นระยะทาง 4 มิลลิเมตร

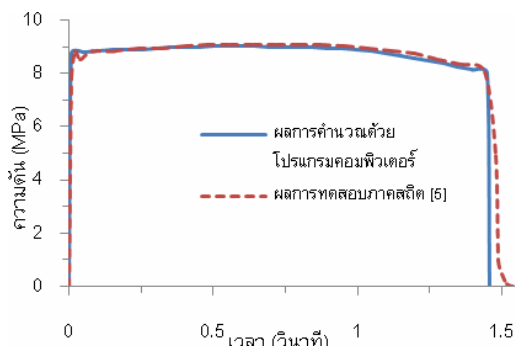
ตารางที่ 2 การหาพื้นที่การเผาไหม้ด้านท้ายของแท่งดินขับด้วยทฤษฎี Pappus

ระยะเผาไหม้ (มม.)	ความยาวส่วนตรง (มม.)	ระยะ Centroid ส่วนตรง (มม.)	ความยาวส่วนเอียง (มม.)	ระยะ Centroid ส่วนเอียง (มม.)	พื้นที่เผาไหม้ด้านท้าย(มม.) ²
0.00	6.00	33.00	17.44	25.13	3997
2.00	4.94	33.53	15.76	26.66	3680
4.00	3.87	34.06	14.09	28.19	3324
6.00	2.81	34.60	12.41	29.72	2928
8.00	1.75	35.13	10.74	31.25	2494
10.00	0.68	35.66	9.06	32.78	2020
12.00	0	36.19	6.71	34.13	1438
14.00	0	36.72	3.13	35.13	691
15.75	0	0.00	0.00	36.13	0



รูปที่ 8 ภาคนำตัดด้านข้างของแท่งดินขับตามงานวิจัยของ Shekhar แสดงมิติที่ใช้ในการหาพื้นที่เผาไหม้ด้านท้าย ณ เวลาที่ดินขับเผาไหม้เป็นระยะทาง 4 มิลลิเมตร

นำข้อมูลผลการทดลองของ Shekhar [6] เปรียบเทียบกับกราฟซึ่งเป็นผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ปรับปรุง ได้ผลตามรูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของ Shekhar ให้ผลใกล้เคียงกัน มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย จากรายละเอียดรูปร่างดินขับแบบจำลองและเอมพิริคัลที่ใช้จำลองปรากฏการณ์ erosive burning



รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลการคำนวณ กับผลการทดลองของ Shekhar [6]

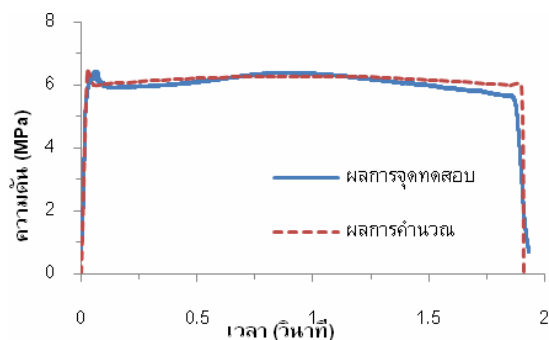
นำจรวดต้นแบบขนาดเล็ก มาทดสอบภาคสถิติ โดยจรวดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของดินขับ เส้นผ่าศูนย์กลางในของดินขับ และความหนาของชั้นดินขับ ตามมาตรฐานของสถาบันฯ



รูปที่ 10 การทดสอบภาคสถิติจรวดขนาดเล็ก

รูปที่ 10 เป็นการทดลองภาคสถิติของจรวดเล็กที่ผลิตขึ้นโดยขณะจุดมีการวัดความดัน ระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งสามารถแสดงค่าได้ดังรูปที่ 11 ทำให้คำนวณค่าอัตราการเผาไหม้ของดินขับ และนำกราฟมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมคำนวณซึ่งป็นวิธีภายในของ

จรวดที่ปรับปรุง ผลการคำนวณกับผลการจุดทดลอง ให้ผลใกล้เคียงกัน มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย จากรายละเอียดรูปร่างดินขับแบบจำลองและเอมพิริคัลที่ใช้จำลองปรากฏการณ์ Erosive Burning



รูปที่ 11 เปรียบเทียบความดันกับเวลา (Pressure Profile) ที่วัดได้ กับค่าที่คำนวณ

5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) กระทรวงกลาโหม ที่ให้การสนับสนุนบทความวิจัยนี้

6.สรุปผลการทดลอง

ผลการคำนวณรูปร่างแรงขับเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าความดันที่วัดได้จากการทดสอบภาคสถิติจรวด กราฟที่ได้มีลักษณะให้ผลใกล้เคียงกัน มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย จากรายละเอียดรูปร่างดินขับแบบจำลองและเอมพิริคัลที่ใช้จำลองปรากฏการณ์ erosive burning ดังนั้นในการปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานสำหรับการออกแบบรูปร่างดินขับจรวดที่มีการเผาไหม้หัว-ท้าย หรือแบบอื่นๆ ต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Coats, D.E., Levine, J.N., Cohen, N.S., Nickerson, G.R., Tyson, T.J.1975. A computer program for the prediction of solid propellant rocket motor performance. Volume I, Report AFRPL-TR-75-36, Ultrasystems, Inc., pp 3-17.
 [2] เจษฎา ศิริรัฐนิคม, อุดุลยศักดิ์ บุญพันธ์ และ ไกรสุเนตร เข้มสุข (2553). การออกแบบรูปร่างดินขับโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์. การประชุมวิชาการ

เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่
24. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี.

- [3] 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
- [4] Willcox, M.A., Brewster, M.Q, Tang, K.C., Stewart, D.S., and Kuznetsov I. 2007. Solid rocket motor Internal ballistics simulation using three-dimensional grain burnback, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.23, No.3 May-June 2007, pp.575-584
- [5] Akimichi. S. 2553. เก่งเลขให้ถึงแก่นด้วยทฤษฎีบทคณิตศาสตร์, สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, พิมพ์ครั้งที่ 5/2553.
- [6] Shekhar, H. 2009. Design of funnel port tular propellant grain for neutral burning profile in rockets, *Defence Science Journal*, Vol.50, No.5, September 2009, pp 494-498.
- [7] 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.