

การพัฒนาโปรแกรมจำลองการคำนวณอัตราการเผาไหม้ของมอเตอร์จรวด

Development of simulator for calculating the burning rate of solid propellant motors

น.อ.คมสันต์ ประพันธ์กาญจน์¹, น.อ.เจษฎา คีรีรัฐนิคม¹, ณัฐวัฒน์ วิญญา^{1*}, นพปฎล ชะภูิล¹

¹สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (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 โทรศัพท์: 02 980 6199-207 ต่อ 329 โทรสาร: 02 980 6198

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เสนอการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองการเผาไหม้ของดินขับจรวดด้วยโปรแกรมวิซวลเบสิก (Visual Basic Dot Net : VB.NET) เพื่อคำนวณหาค่า ความดัน (Pressure), แรงขับ (Thrust), และรูปร่างของแรงขับ (Thrust Profile) แทนโปรแกรมคิวเบสิก (QBasic) ที่มีอยู่เดิม โดยในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงเพิ่มความสามารถ เช่น มีส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphic User Interface : GUI) ทำให้การป้อนข้อมูลต่าง ๆ สะดวกขึ้น มีการพัฒนามอดูลคำนวณหาข้อมูลทางเรขาคณิตของแท่งดินขับ ใช้หาพื้นที่และเส้นรอบรูปหน้าตัดโพรงกลางแท่งดินขับ ผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมที่มีอยู่เดิมกับโปรแกรมที่พัฒนาใหม่พบว่าให้ผลการคำนวณไม่แตกต่างจาก โดยโปรแกรมที่พัฒนาใหม่ใช้เวลาคำนวณลดลงกว่าเดิมประมาณ 3.7 เท่า การคำนวณความดันเปรียบเทียบกับผลการจุดทดสอบจรวดภาคสถิติ พบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน

คำหลัก: ดินขับจรวด, รูปร่างของแรงขับ, มอเตอร์จรวด, อัตราการเผาไหม้

Abstract

This paper presents the development of a rocket propellant combustion simulation program with Visual Basic Dot Net to calculate pressure, thrust and thrust profile in order to replace an existing QBasic program. In this work, the program ability was improved, such as a Graphic User Interface (GUI) was added to facilitate propellant data input. A module was also developed to calculate geometric data of the propellant grain such as port area and periphery. Comparison between calculation results using the previously existing program and the newly developed program showed no difference. The new program calculation time was about 3.7 times lower than that of the existing program. Comparison between calculation and actual static test data found that the results were similar.

Keywords: Rocket Propellant, Thrust Profile, Rocket Motor, Burning Rate

1. บทนำ

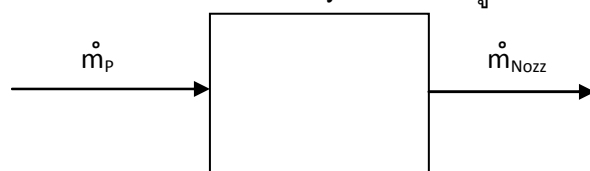
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับใช้ออกแบบรูปร่าง ดินขับจรวดมีหลายโปรแกรม เช่น โปรแกรม SPP (Solid Performance Program) ของประเทศ สหรัฐอเมริกา [1] ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้เป็นโปรแกรม สำเร็จรูปที่มีราคาสูง และมีการควบคุมการส่งออกของ โปรแกรมดังกล่าว ในประเทศไทยได้มีการพัฒนา โปรแกรมการจำลองการเผาไหม้ของดินขับจรวด เพื่อ ใช้ออกแบบรูปร่างดินขับในงานวิจัยและพัฒนาจรวด เป็นโปรแกรมคิวเบสิก (QBasic) ซึ่ง สถาบัน เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) ได้นำเสนอรายละเอียดของโปรแกรมนี้อย่างแล้ว (เจษฎา และ คณะ [2])

โปรแกรมคิวเบสิกดังกล่าว ยังมีข้อที่ควรพัฒนา เพิ่มเติมเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น เช่น ควร มีส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphic User Interface :GUI) เพื่อความสะดวกในการป้อนข้อมูล และควรมีמודูลวาดแบบของดินขับ พร้อมกับ คำแนะนำข้อมูลทางเรขาคณิต เช่น พื้นที่หน้าตัด Port และ เส้นรอบรูปของหน้าตัด Port เพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งานของโปรแกรม [2]

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โปรแกรมคิวเบสิกที่มีการพัฒนาไว้เดิม อาศัย หลักการคำนวณหาอัตราการไหลของแก๊สจากการเผา ไหม้ โดยใช้วิธีการวนซ้ำ (Iteration) ร่วมกับข้อมูลทาง เรขาคณิตของแท่งดินขับ ดังนี้

การคำนวณอัตราการไหลของก๊าซที่เกิดขึ้น ในขณะเผาไหม้โดยจะไม่มีผลกระทบในมอเตอร์จรวด และสมมติให้เป็นแบบ Steady State ได้ดังรูปที่ 1.



รูปที่ 1 สมดุลอัตราการไหลก๊าซ

จากการทำสมดุลมวลดังสมการ (1)

$$\dot{m}_{NOZZ} = \dot{m}_p \quad \text{----(1)}$$

$\dot{m}_{NOZZ}$ = อัตราการไหลของแก๊สที่ออกจาก Nozzle

$\dot{m}_p$ = อัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับ

โดยที่อัตราการไหลของแก๊สออกจาก Nozzle สัมพันธ์กับความดันภายในท่อจรวด ดังสมการ (2)

$$\dot{m}_{NOZZ} = \frac{PA_t}{C^*} \quad \text{----(2)}$$

P = ความดันภายในท่อจรวด

A_t = พื้นที่หน้าตัดของ Nozzle

C^* = Characteristic Velocity ของดินขับ

ส่วนอัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับ คำนวณได้จากมวลของดินขับที่เผาไหม้ต่อหน่วยเวลา โดยที่ลักษณะการเผาไหม้ของดินขับเป็นไปตามกฎ ของฟิโอบีร์ท (Piobert's Law) คือ ทิศทางการเผาไหม้ ของดินขับ จะตั้งฉากกับผิวของดินขับเสมอ ดังนั้น จึง คำนวณอัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับ ได้จากสมการ (3)

$$\dot{m}_p = \int \rho r_b dA \quad \text{----(3)}$$

ρ = ความหนาแน่นของดินขับ

r_b = อัตราเผาไหม้ของดินขับ

A = พื้นที่เผาไหม้ของดินขับ

การเผาไหม้ในลักษณะดังกล่าว ยังใช้ในการหา รูปลักษณะของแท่งดินขับที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยใน กรณีดินขับจรวดชนิดคอมโพสิต นั้น อัตราเผาไหม้ เป็นฟังก์ชันของความดัน ตามกฎของวีเอ (Viele's Law) ดังสมการ (4)

$$r_b = aP^n \quad \text{----(4)}$$

a = Pre-exponential Factor เป็นฟังก์ชันของ อุณหภูมิดินขับ

n = Pressure Exponent ของดินขับ

เมื่อดินขับเผาไหม้ภายในมอเตอร์จรวดจริง อัตรา การเผาไหม้ยังเป็นฟังก์ชันของความเร็วของแก๊สที่ ไหลผ่านผิวหน้าดินขับอีกด้วย เรียกว่าปรากฏการณ์ Erosive Burning สามารถจำลองค่าด้วยสมการ (5)

$$r_b = aP^n + \alpha G^{0.8} D^{-0.2} \exp(-\beta r_b \rho / G) \quad \text{----(5)}$$

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

A_p = พื้นที่หน้าตัด Port

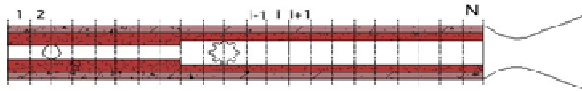
D = Characteristic Dimension ของ

Port = $4A_p / S$

S = เส้นรอบรูปของหน้าตัดโพรงกลางแท่งดิน
ขับ (Port)

α, β = เป็นค่าคงที่เอมพิริคัล โดย $\beta = 53$ ในกรณี
ใช้หน่วย SI

การหาปริพันธ์ของฟังก์ชันที่มีความซับซ้อน
สามารถทำได้โดยแบ่งดินขับออกเป็น N ส่วน
(Segment) ตามความยาวแท่งดินขับดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การแบ่งแท่งดินขับออกเป็น Segment เพื่อ
คำนวณหาอัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับ

พิจารณา Segment ที่ i ของแท่งดินขับอัตราการ
ไหลของแก๊สออกจาก Port ใน Segment ที่ i = อัตรา
การไหลเข้า Segment ที่ i จาก Segment ที่ $i-1$ =
อัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับใน
Segment ที่ i ; สมการ (6)

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{i-1} + \dot{m}_{gen_i} \quad \text{----(6)}$$

แต่อัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับ
ใน Segment ที่ i ; สมการ (7)

$$\dot{m}_{gen_i} = \rho r_b (P, \dot{m}_i) A_i \quad \text{----(7)}$$

ในการคำนวณ จะสร้างตาราง พื้นที่หน้าตัด Port
(A_p) และ เส้นรอบรูปของหน้าตัด Port (S) สำหรับ
แต่ละ Segment เป็นฟังก์ชันของระยะทางที่เผาไหม้
จากผิวหน้าเดิมของดินขับใน Segment นั้น (ξ) การ
หาค่า $A_p(\xi)$ และ $S(\xi)$ นี้ กระทำได้โดยวาดแบบ
หน้าตัดโพรงกลางของดินขับด้วยโปรแกรม CAD แล้ว
ขยายผิวการเผาไหม้ออกไปตั้งฉากกับผิวการเผาไหม้
เดิม ในลักษณะเดียวกับการเผาไหม้ของดินขับตาม
Piobert's Law

เมื่อเริ่มคำนวณ สมมุติ (Guess) ค่าความดัน P
จากนั้นเริ่มคำนวณจาก Segment ที่ 1 โดยกำหนดให้
อัตราการไหลของมวลแก๊ส เข้าสู่ Segment ที่ 1
เท่ากับอัตราการไหลของแก๊สจากตัวจุดจรวดตั้ง

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

กรณี $t \leq$ เวลาเผาไหม้ของ Igniter

$$\dot{m}_{igniter} = m_{igniter} / t$$

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

อัตราการไหลของมวลแก๊สออกจาก Segment ที่
1 ไปเข้าสู่ Segment ที่ 2 สมการ 8

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_0 + \rho r_{b1} (P, (\dot{m}_1 + \dot{m}_0) / 2) A_1(\xi) \quad \text{----(8)}$$

อัตราการไหลของมวลแก๊ส ออกจาก Segment ที่
2 ไปเข้าสู่ Segment ที่ 3 สมการ (9)

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \rho r_{b2} (P, (\dot{m}_2 + \dot{m}_1) / 2) A_2(\xi) \quad \text{----(9)}$$

คำนวณ จนถึง Segment ที่ N ดังนั้น $\dot{m}_N = \dot{m}_p$

คืออัตราการเกิดแก๊สจากการเผาไหม้ของดินขับ
ทั้งหมด โดยการตรวจสอบว่า ค่า P จากความสัมพันธ์
 $\dot{m}_N = \dot{m}_p = \dot{m}_{Nozz} = P A_C^*$ เท่ากับค่า P ที่สมมุติไว้
ในครั้งแรกหรือไม่

หากยังไม่เท่ากัน ใช้ ค่า P ที่คำนวณได้ใหม่ เป็น
ค่า P ที่สมมุติ นำกลับไปคำนวณวนซ้ำ (Iterate) จน
ค่า P ที่สมมุติ กับค่า P ที่คำนวณได้ ใกล้เคียงกัน
ภายใน Convergence Limit ที่ต้องการ เมื่อคำนวณได้
ค่า ความดัน P แล้ว สามารถคำนวณหาค่าแรงขับ F
ได้จากสมการ (10)

$$F = C_F P A_i \quad \text{----(10)}$$

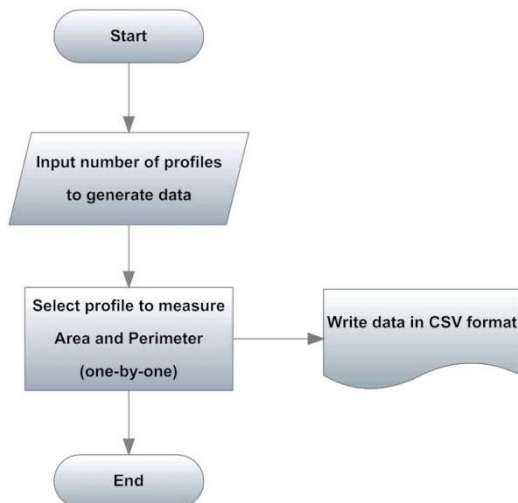
3.การปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาจากงานวิจัยเดิม โดยนำ
Source Code ต้นฉบับคิวเบสิก มาปรับเป็นโปรแกรม
วิซวลเบสิก (Visual Basic Dot Net : VB.NET) พร้อม
กับเพิ่มส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ ทำให้การใช้
งานของโปรแกรมง่ายขึ้น และเป็นการพัฒนา
โปรแกรมให้เหมาะสมกับ ฮาร์ดแวร์ และ
ระบบปฏิบัติการของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน

นอกจากนี้ยังได้เพิ่มมอดูลคำนวณหาข้อมูลทาง
เรขาคณิตของดินขับ เช่น พื้นที่หน้าตัด Port และ เส้น
รอบรูปของหน้าตัด Port

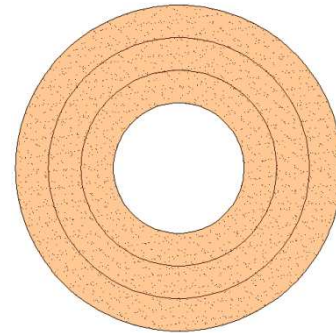
มอดูลคำนวณหาข้อมูลทางเรขาคณิตของดินขับ
พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม Microsoft Visual Basic โดย
นำมาใช้ร่วมกับโปรแกรม DWGeditor โดยก่อน

คำนวณ ผู้ใช้งานต้องวาดแบบหน้าตัดของแท่งดินขับด้วยโปรแกรม CAD แสดงเส้นรอบรูปของผิวการเผาไหม้แรกเริ่ม แล้วสร้างโพรไฟล์การเผาไหม้ของดินขับตั้งฉากกับผิวการเผาไหม้เดิม (เช่น การใช้ฟังก์ชัน Parallel ของโปรแกรม DWGeditor) จากนั้นบันทึกไฟล์ของหน้าตัดดินขับในรูปแบบของสกุล .dwg



รูปที่ 3 flow chart การรันโปรแกรม

รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการทำงานของมอดูล โดยมอดูลจะเริ่มต้นจากการขอข้อมูลจำนวนโพรไฟล์ของหน้าตัดดินขับที่มีอยู่ในแบบวาดจากผู้ใช้ งาน ตัวอย่างจากรูปที่ 4 แสดงหน้าตัดดินขับที่มีจำนวนโพรไฟล์เท่ากับ 3 หลังจากนั้นมอดูลจะให้ผู้ใช้งานทำการเลือกโพรไฟล์ที่จะอ่านโดยเริ่มจากโพรไฟล์ที่อยู่ด้านในสุดก่อน เมื่อโปรแกรมได้รับโพรไฟล์และแปลงค่าเป็นพื้นที่หน้าตัด Port และเส้นรอบรูปหน้าตัด Port แล้วโปรแกรมจะทำการเขียนข้อมูลลงในไฟล์ซึ่งมีรูปแบบสกุล .csv (Comma-Separated Values) เมื่อครบจำนวนโพรไฟล์ของหน้าตัดดินขับ มอดูลจะสิ้นสุดการทำงาน และผู้ใช้งานสามารถนำไฟล์ข้อมูลไปใช้กับโปรแกรมจำลองการเผาไหม้ของดินขับจรวดได้ทันที



รูปที่ 4 หน้าตัดดินขับแสดงโพรไฟล์การเผาไหม้ของดินขับตั้งฉากกับผิวการเผาไหม้เดิม

โปรแกรมวิซวลเบสิกที่พัฒนามีข้อดี คือ มีส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ ทำให้สามารถป้อนข้อมูลต่าง ๆ สะดวกขึ้น สามารถอ่านข้อมูลรูปร่างดินขับได้ทั้งจากข้อมูลในคลิปปอร์ดและจากไฟล์ .csv สามารถบันทึก/เรียกใช้การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้จากไฟล์การตั้งค่า สามารถสั่งงานผ่านทางบรรทัดคำสั่ง (Command Line) ให้ทำงานโดยอัตโนมัติ สามารถเขียน Batch File ให้ทำงานหลาย ๆ งานต่อเนื่องกันได้

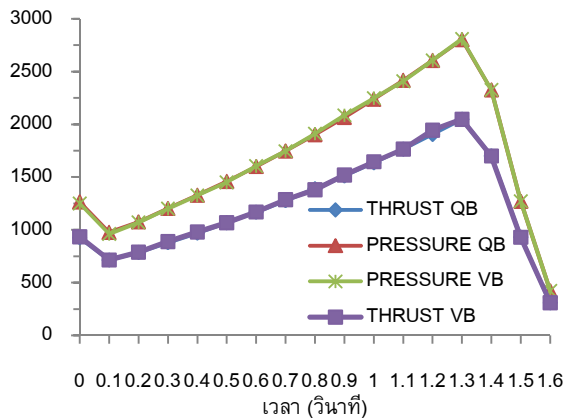
4. การทดสอบโปรแกรมที่ปรับปรุง

1. นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับค่ารูปร่างความดันและแรงขับ จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคิวเบสิกสำหรับจรวด CRV-7 ซึ่งเป็นจรวดขนาด 2.75 นิ้ว ดินขับชนิดหุ้ม (Inhibited) มีโพรงส่วนกลางตามแนวยาวตัดเป็นรูปกลมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์จรวด CRV-7 เพื่อป้อนให้โปรแกรม

พารามิเตอร์	ขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (D), mm	64
เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (d), mm	21
ความยาวดินขับ (l), mm	800
ความหนาแน่นดินขับ (ρ), g/cc	1.78
Characteristic velocity(C^*), m/s	1580
Burn rate coefficient (a), mm/s	7
Burn rate exponent (n),	0.26
Throat diameter (mm)	20

จากรูปที่ 5 การเปรียบเทียบแรงขับและความดันของ 2 โปรแกรม โดยที่ QB คือ กราฟที่ได้จากการใช้โปรแกรมคิวเบสิก และ VB คือกราฟที่ได้จากการคำนวณโปรแกรมวิซวลเบสิก



รูปที่ 5 เปรียบเทียบรูปร่างแรงขับและความดัน

เปรียบเทียบผลการคำนวณพบว่าทั้งโปรแกรมคิวเบสิกเดิมและโปรแกรมวิซวลเบสิกที่พัฒนาขึ้นใหม่ให้ผลการคำนวณไม่แตกต่างกัน

จากการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ระหว่างโปรแกรมคิวเบสิกเดิม กับโปรแกรมวิซวลเบสิกที่พัฒนาขึ้นใหม่ พบว่าโปรแกรมที่พัฒนาใหม่ใช้ระยะเวลาคำนวณลดลงกว่าเดิมประมาณ 3.7 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 2

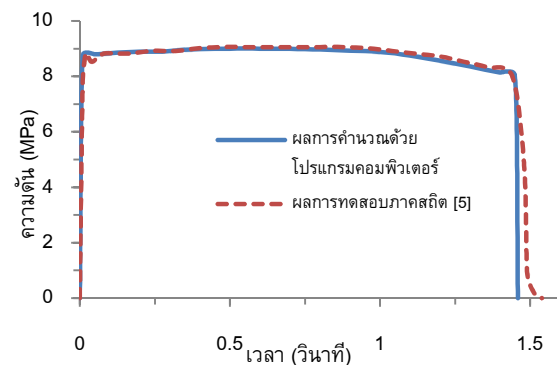
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบระยะเวลาการประมวลผล

โปรแกรม	การประมวลผล (วินาที)
QBasic	188
Visual Basic .NET	51

2. นำข้อมูลความดันเผาไหม้จากผลการทดลองของ Shekhar [3] ที่ได้จุดทดสอบภาคสถิติดินขับจรวด ซึ่งมีโพรงส่วนกลางตามแนวยาวหน้าตัดเป็นรูปกลมด้านหัวหุ้มฉนวน ด้านท้ายมีลักษณะเป็นกรวยทำมุม 34 องศา ไม่หุ้มฉนวน แสดงดังตารางที่ 3 เปรียบเทียบกับกราฟที่คำนวณด้วยโปรแกรมจำลองการเผาไหม้ของดินขับที่พัฒนาใหม่ ตามรูปที่ 6

ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของดินขับ ตามการทดลองของ Shekhar [3] 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
Burn rate coefficient (a), mm/s	10.47
Burn rate exponent (n),	0.114
Throat area (A)	25.517



รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลการคำนวณ กับผลการทดลองของ Shekhar [3]

5.สรุปผลการทดลอง

ผลการคำนวณรูปร่างแรงขับเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าที่วัดได้จากการทดสอบภาคสถิติจรวด กราฟที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานสำหรับการออกแบบรูปร่างดินขับจรวดแบบต่างๆ ได้ รวมถึงดินขับที่มีการเผาไหม้หัว-ท้ายด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Coats, D.E. et al (1975). *A Computer Program For The Prediction of Solid Propellant Rocket Motor Performance*. Volume I, Report AFRPL-TR-75-36, Ultrasystems, Inc., p. 3-17.

[2] เจษฎา ศิริรัฐนิคม, อุดยศักดิ์ บุญพันธ์ และไกรสุ เนตร เข้มสุข (2553). การออกแบบรูปร่างดินขับโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี

[3] 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