การศึกษาเกณฑ์การออกแบบตัวจุดจรวดด้วยวิธีคำนวนสมดุลมวลสารและพลังงานเทียบกับวิธีความดันวิกฤต

Rocket Motor Igniter Design Criteria base on Mass and Energy Balance compare with Critical Pressure Design

ไพศาล อภิณหพัฒน์[1,*], นายอนันต์ จันทร์เผือก[1] ,พ.อ.อ.เอกนิกร กุหลาบอ่ำ[1] และ น.อ.เจษฎา คีรีรัฐนิคม[1]

[1] ฝ่ายวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) อาคารสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม (แจ้งวัฒนะ) จ.นนทบุรี 11120
*ติดต่อ: paisan.a@dti.or.th, โทรศัพท์: 02 980 6200-207 ต่อ 330, โทรสาร: 02 980 6198

บทคัดย่อ

ตัวจุดจรวดสำหรับจรวดเชื้อเพลิงแข็ง มักใช้การเผาไหม้ของดินจุดซึ่งเป็นสารไพโรเทคนิคทำให้เกิดพลังงานความร้อนกระจายไปสู่ดินขับจรวด ในการออกแบบเพื่อคำนวณปริมาณดินจุดมีหลายวิธี วิธีหนึ่งคือการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากการคำนวณสมดุลมวลสารและพลังงานเพื่อคำนวณปริมาณดินจุดเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ให้ความดันสูงกว่าค่าความดันวิกฤตสำหรับการจุดติดของดินขับในมอเตอร์จรวด งานวิจัยนี้ได้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปริมาณดินจุดกับวิธีความดันวิกฤต เพื่อหาความดันภายในมอเตอร์จรวดซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาในช่วงที่ตัวจุดทำงาน นำความดันที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับความดันวิกฤต ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณดินจุดชนิด Boron Potassium Nitrate ที่คำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกัน แบบจำลองที่สร้างขึ้น สามารถนำมาใช้ในการออกแบบตัวจุดจรวดได้ต่อไป โดยเฉพาะตัวจุดสำหรับจรวดที่มีปริมาตรอิสระมาก ซึ่งการจุดดินขับกระทำได้ยาก

คำหลัก: ตัวจุด, ปริมาตรอิสระ, ดินจุดไพโรเทคนิค, ความดันวิกฤต

Abstract

Solid propellant rocket motor igniters normally use combustion of pyrotechnic igniter compositions as heat source to ignite the rocket propellant. Several igniter design methods exist. Mass and energy balance differential equation method is used in this paper. Another igniter design method involves calculating the amount of igniter composition giving a combustion pressure higher than the critical pressure required to ignite the propellant. This study compares the amounts of ignition composition derived by mass and energy balance differential equation design criteria and the critical pressure design criteria. A mathematical model to find the rocket motor pressure during igniter firing was developed. Results of the study showed that the amounts of Boron Potassium Nitrate igniter derived by the two design criteria are in agreement. The mathematical model is useful in igniter design, especially for cases where the rocket motor free volume is high, resulting in difficult propellant ignition.

Keywords: igniter, free volume, pyrotechnic igniter composition, critical pressure

1. บทนำ

ตัวจุดจรวดสำหรับจรวดเชื้อเพลิงแข็ง มักใช้การเผาไหม้ของดินจุดซึ่งเป็นสารไพโรเทคนิคทำให้เกิดพลังงานความร้อนกระจายไปสู่ดินขับจรวด โดยการพาความร้อนจากแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ และการนำความร้อนจากผลผลิตการเผาไหม้ที่เป็นของเหลวซึ่งสาดไปบนผิวหน้าดินขับจรวด

ในทดสอบการยิงจรวดในระยะใกล้ๆ การบรรจุดินขับในมอเตอร์จรวดจะมีปริมาณน้อยกว่าปกติเป็นผลทำให้เกิดปริมาตรอิสระในห้องเผาไหม้ของมอเตอร์มาก ในการออกแบบการคำนวณปริมาณตัวจุดไพโรเทคนิคจึงต้องหาวิธีที่เหมาะสมเพื่อใช้คำนวนปริมาณตัวจุดที่ต้องใช้ ตัวจุดจะสามารถทำให้เกิดการจุดติดของดินขับในมอเตอร์จรวดได้หรือไม่ขึ้นกับความดันเป็นสำคัญ โดยเมื่อเกิดการจุดติดของตัวจุด ก๊าซร้อนที่เกิดขึ้นจะต้องมีความดันมากกว่าความดันวิกฤติซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่จะทำให้ดินขับในมอเตอร์เกิดการจุดติดต่อไปได้ ความดันที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ตัวจุดจะขึ้นกับชนิดของสารที่นำมาทำเป็นตัวจุด น้ำหนักของตัวจุดเป็นสำคัญ [1]

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวจุดจะสามารถทำให้เกิดการจุดติดของดินขับในมอเตอร์จรวดได้หรือไม่ขึ้นกับความดันเผาไหม้เป็นสำคัญ โดยที่เมื่อเกิดการจุดติดของตัวจุด แก๊สร้อนที่เกิดขึ้นจะต้องมีความดันมากกว่าความดันวิกฤติ, P^* ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่จะทำให้ดินขับเกิดการจุดติดต่อไปได้

2.1 ความดันวิกฤติ

ที่ความดันต่ำๆ พลังงานความร้อนในการจุดดินขับของมอเตอร์จรวดจะขึ้นอยู่กับความดันเป็นอย่างมาก การหาขนาดของตัวจุดจึงขึ้นกับความดันที่จะให้ในมอเตอร์จรวด เมื่อเกิดการเผาไหม้ของตัวจุดจะเกิดความร้อนและความดันขึ้น ความดันดังกล่าวจะต้องมีค่าถึงระดับหนึ่งจึงทำให้ดินขับในมอเตอร์จรวดสามารถเกิดการจุดติดและเกิดการเผาไหม้ต่อเนื่องได้ ค่าความดันดังกล่าวเรียกว่าความดันวิกฤต [2] มีหลายวิธีในการคำนวณหาความดันวิกฤต ใช้หลักการเมื่อรูปลายท่อ (nozzle) มีขนาดเล็กหรือมีแผ่นปิดรูปลายท่อที่แข็งแรงจนเสมือนว่าทำให้ปริมาตรอิสระในมอเตอร์เป็นระบบปิด ความดันที่เกิดจากการเผาไหม้ตัวจุดสามารถคำนวณได้จากปริมาตรอิสระนี้ซึ่งเสมือนถังปิด

ความดันวิกฤต สามารถหาได้จากประสบการณ์ทำดินขับมอเตอร์จรวด หรือทำการทดสอบการจุดตัวจุด หรือคำนวณโดยใช้สมการฟอน-เอลเบ (Von-Elbe) [3]

$$P^* = \left[C_1 \frac{2kn}{c\rho b}\right]^{\frac{1}{1+n}} ; C_1 = \frac{A_s}{V}\rho RT ; b = \frac{r}{P^n} \qquad (1)$$

P* =ความดันวิกฤต, atm

k = ค่าการนำความร้อนของดินขับ cal/cm-sec-K

n = ค่าเอ็กโพเนนของดินขับ

c = ค่าความร้อนจำเพาะของดินขับ, cal/g-K

ρ = ค่าความหนาแน่นของดินขับ, g/cm^3

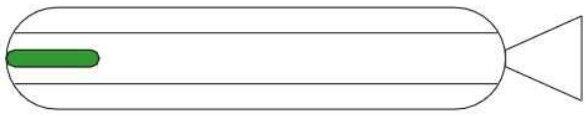
As = ค่าพื้นที่ผิวของดินขับในมอเตอร์, cm^2

V = ปริมาตรอิสระของดินขับ, cm^3

R = ค่าคงที่ของก๊าซ, cm^3-atm/g-K

T = ค่าอุณหภูมิของเปลวไฟดินขับ, K

r = อัตราการเผาไหม้ของดินขับ, cm/sec



รูปที่ 1 ตำแหน่งของตัวจุดและปริมาตรอิสระในมอเตอร์

ความดันที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ตัวจุดขึ้นกับชนิดและน้ำหนักของดินจุดเป็นสำคัญ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการคำนวณปริมาณดินจุดชนิด Boron Potassium Nitrate ($BKNO_3$) ซึ่งเป็นดินจุดที่มีใช้งานแพร่หลายในปัจจุบัน

2.2 คุณสมบัติของเม็ดดินจุด

เม็ดดินจุดไพโรเทคนิคที่นิยมใช้มี 3 ชนิดซึ่งมีคุณสมบัติทางความร้อนแสดงดังตารางที่ 1 [4]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางความร้อนของเม็ดดินจุดไพโรเทคนิคที่นิยมใช้

ชนิด	$BKNO_3$	Alclo	MgTFE
อัตราการเผาไหม้, mm/sec	43.2	9.9	10.2
เอ็กโพเนนอัตราการเผาไหม้	0.32	ใกล้ 1	0.22
ค่าความร้อน, cal/g	1550	2490	2200

เกณฑ์ในการออกแบบวิธีหนึ่งที่นิยมและไม่ยุ่งยากคืออาศัยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินจุดไพโรเทคนิคที่ใช้เทียบกับปริมาตรอิสระของมอเตอร์จรวด [5] ข้อดีของวิธีในการคำนวณแบบนี้คือ เร็ว ง่าย การคำนวณไม่ยุ่งยากมาก นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นๆ เช่น วิธีคำนวณโดยใช้พื้นที่ผิวดินขับ, วิธีไบรอัน-ลอเร้นซ์ (Bryan-Lawrence) โดยใช้คุณสมบัติของมอเตอร์ในการคำนวณ, และวิธีการไหลความร้อน (Heat Flux Method) เป็นต้น [6]

2.3 สมการทางคณิตศาสตร์จากการคำนวณสมดุลมวลสารสารและพลังงาน

ความดันในห้องเผาไหม้ของมอเตอร์จรวดที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของเวลา สามารถคำนวณได้จากสมดุลมวลและสมดุลพลังงานตามลำดับ

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{dN}{dt} - \frac{dN_t}{dt} \qquad (2)$$

N_i คือมวลของก๊าซที่อยู่ในห้องเผาไหม้
N คือมวลของก๊าซที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้
N_t คือมวลของก๊าซที่ออกจากห้องเผาไหม้
t คือเวลา

$$C_V \frac{d(N_i T_i)}{dt} = C_V T_0 \frac{dN}{dt}(1-\beta) - C_p T_i \frac{dN_t}{dt} \qquad (3)$$

C_V คือค่าความจุความร้อนของก๊าซร้อนที่ปริมาตรคงที่
T_i คืออุณหภูมิของก๊าซที่เผาไหม้
T_0 คืออุณหภูมิของก๊าซที่ปริมาตรคงที่
β คือสัดส่วนความร้อนสูญเสีย
C_p คือค่าความจุความร้อนของก๊าซร้อนที่ความดันคงที่

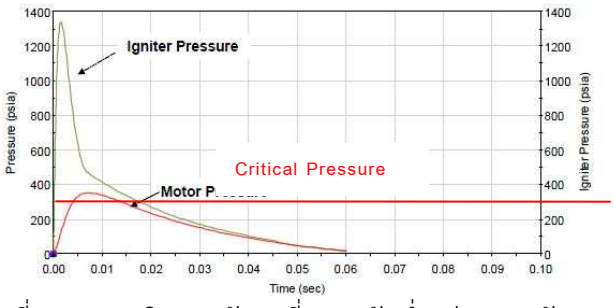
อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของดินจุด ขึ้นกับฟอร์มฟังก์ชันของรูปร่างเม็ดดินจุด ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของมวลดินจุดที่เผาไหม้ไปแล้ว, G กับสัดส่วนความหนาของเม็ดดินจุด (Web Fraction) ที่เผาไหม้ไปแล้ว, σ

$$G(\sigma) = \frac{N}{C} = a_1\sigma + a_2\sigma^2 + a_3\sigma^3 \qquad (4)$$

N คือมวลของเม็ดดินจุดที่ถูกเผาไหม้
C คือมวลของเม็ดดินจุดเริ่มต้น
σ คือสัดส่วนความหนาเม็ดดินที่ถูกเผาไหม้
a_1, a_2, a_3 คือค่าคงที่ฟอร์มฟังก์ชัน

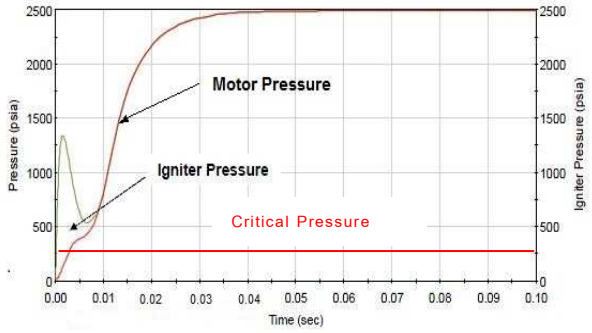
เมื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากความสัมพันธ์ข้างต้น แล้ว นำปริมาณดินจุดจากการคำนวณด้วยเกณฑ์ปริมาตรอิสระ มาคำนวณหาความดันในมอเตอร์จรวด เปรียบเทียบกับความดันวิกฤต

หากใช้ปริมาณเม็ดดินจุดที่น้อยเกินไป เมื่อทำการจุดเม็ดดินในมอเตอร์จรวดแม้ความดันในกลักตัวจุดจะสูง แต่จะไม่ทำให้ช่องว่างอิสระในมอเตอร์เกิดความดันสูงกว่าความดันวิกฤตเป็นผลทำให้ไม่เกิดการจุดติดของดินขับในมอเตอร์จรวดนำไปสู่การไม่เกิดการเผาไหม้ของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 2 การจุดติดของตัวจุดที่ความดันต่ำกว่าความดันวิกฤต

ในทางตรงกันข้าม หากใช้ปริมาณเม็ดดินจุดที่มากพอ เมื่อทำการจุดเม็ดดินในมอเตอร์จรวดแม้ความดันในกลักตัวจุดจะสูงและจะทำให้ช่องว่างอิสระในมอเตอร์เกิดความดันที่สูงกว่าความดันวิกฤตเป็นผลทำให้เกิดการจุดติดของดินขับในมอเตอร์จรวดนำไปสู่การเผาไหม้ของมอเตอร์ดังแสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 3 การจุดติดของตัวจุดที่ความดันสูงกว่าความดันวิกฤต

3. แบบจำลองและการคำนวณ

แบบจำลองของลักษณะดินขับในมอเตอร์จรวดกำหนดให้รูปร่างของดินขับในมอเตอร์จรวดเป็นทรงกระบอกกลวง

จากสูตรการคำนวณหาค่าความดันวิกฤตในสมการที่ (1) เมื่อใส่ตัวแปรต่างๆ ก็จะสามารถคำนวณได้ว่าที่สภาวะนั้น ๆ ความดันวิกฤติจะมีค่าเป็นเท่าใด จากนั้นจึงทำการคำนวณหาความดันที่เกิดขึ้นจริงโดยใช้สมการสมดุลมวลสารและพลังงานต่อไป

จากสมการสมดุลมวลสารและพลังงานจากที่กล่าวไว้ข้างต้น สามารถจัดรูปเพื่อคำนวณหาค่าต่างๆอันได้แก่ P_i, σ, P_{port}, T_p ในรูปของสมการอนุพันธ์ดังนี้

$$\frac{dy}{dt} = qP_1^n f y^n - qP_1^n hy \qquad (5)$$

เมื่อ $y = \frac{P_i}{P_1}$

t คือเวลา

P_i คือความดัน ณ เวลาใดๆ

P_1 = $CF(1-\beta)/[V_i(1-\alpha]$

C คือ น้ำหนักของเม็ดดินไพโรเทคนิค

F คือ effective pyrotechnic force constant

Vi คือ ปริมาตรอิสระ

α = $C/(\rho_i V_i)$

ρ_i คือ ความหนาแน่นของเม็ดดินจุด

q คือ propellant quickness = $2C'/W_o$

C' คือ pressure coefficient of burning rate

W_o คือ ความหนาของเม็ดดินจุด

n คือ burning rate exponent of pressure

$$f = a_1 + 2a_2\sigma + 3a_3\sigma^2$$

$$h = \frac{\gamma C_d K A_i P_1^{1-n}}{Cq(1-\beta)} \sqrt{\frac{T_i}{T_0}}$$

C_d คือ orifice coefficient

K คือ constant for isentropic flow

A_i คือ orifice area

$$\frac{d\sigma}{dt} = qP_i^n \qquad (6)$$

$$\frac{dP_{port}}{dt} = V_i F \gamma \theta_i (1-\beta) - \gamma C_d K A_t P_{port} V_p F \theta_{port}^{0.5} \qquad (7)$$

เมื่อ P_{port} คือความดันในห้องเผาไหม้

$$\theta_i = \frac{T_i}{T_0}$$

$$\theta_{port} = \frac{T_p}{T_0}$$

At *คือ* throat area of motor

V_p คือ ปริมาตรอิสระของมอเตอร์

T_p คือ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของมอเตอร์

$$\frac{d\theta_p}{dt} = \gamma\theta_i(1-\beta)\theta_p \frac{F}{P_{port}} y - \frac{V_p}{F} y - C_d K A_t (1-\gamma)\theta_{port}^{1.5} \qquad (8)$$

จากสมการที่ (5) – (8) สามารถทำการคำนวณหาค่าของความดันในตัวจุดที่เวลาใด และคำนวณหาค่าของความดันในห้องเผาไหม้ที่เวลาใด ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สภาวะการคำนวณที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบคือ

3.1 เปรียบเทียบผลการคำนวนจากสมการทางคณิตศาสตร์ของ B.E. Paul and R.L. Lovine

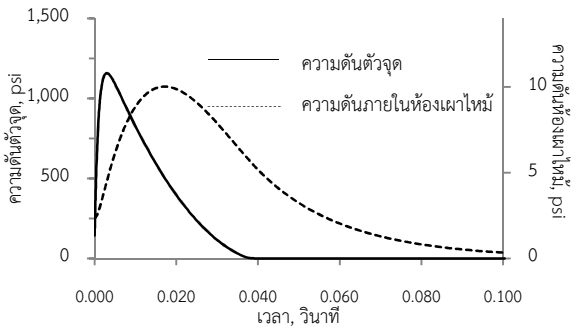
3.2 คำนวณจากข้อมูลของจรวดที่ใช้ดินขับปกติซึ่งมีปริมาตรอิสระไม่มากคือมีปริมาตรอิสระ 0.074 ลูกบาศก์เมตร

3.3 คำนวณจากข้อมูลของจรวดที่ใช้ดินขับที่มีปริมาตรอิสระมากคือมีปริมาตรอิสระ 0.284 ลูกบาศก์เมตร และใช้เม็ดดินเท่าจรวดที่ใช้ดินขับปกติคือ เม็ดดินจุด 380 กรัม

3.4 คำนวณจากข้อมูลของจรวดที่ใช้ดินขับที่มีปริมาตรอิสระมากคือมีปริมาตรอิสระ 0.284 ลูกบาศก์เมตร และใช้เม็ดดินจุดเป็น 1.5 เท่าของจรวดที่ใช้ดินขับปกติคือ เม็ดดินจุด 570 กรัม

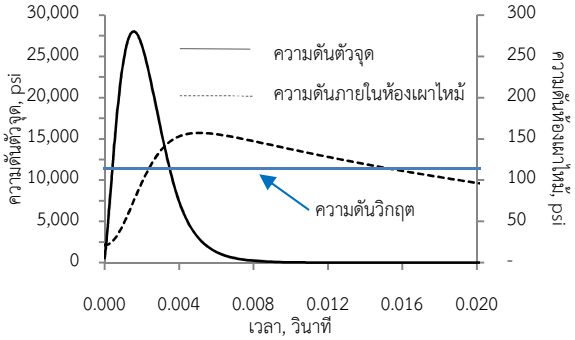
4. ผลการทดสอบ

4.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ของ B.E. Paul and R.L. Lovine แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าลักษณะของความดันที่เวลาใดๆ สอดคล้องกัน ทำให้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณมีความถูกต้อง



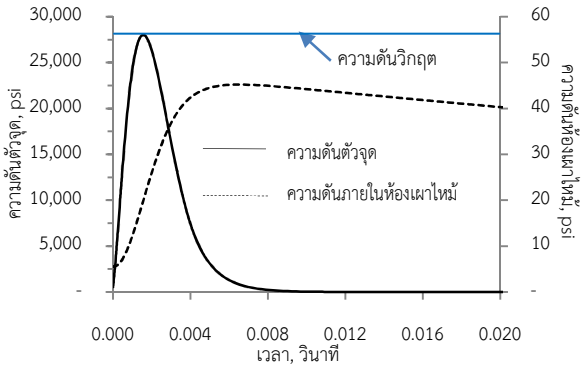
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันในตัวจุดและความดันในห้องเผาไหม้เทียบกับเวลาของ B.E. Paul and R.L. Lovine

4.2 ผลการคำนวณจากข้อมูลของจรวดที่ใช้ดินขับปกติซึ่งมีปริมาตรอิสระไม่มากคือมีปริมาตรอิสระ 0.074 ลูกบาศก์เมตร แสดงในรูปที่ 5 จากการคำนวณค่าความดันวิกฤตที่สภาวะนี้มีค่า 110 psi ซึ่งจะรูปพบว่า ค่าความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ที่ค่าสูงสุดมีค่า 150 psi ซึ่งสูงกว่าค่าความดันวิกฤติ แสดงถึงว่าจรวดสามารถจุดติดได้



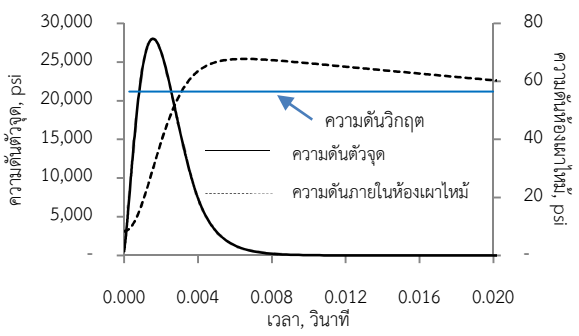
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันในตัวจุดและความดันในห้องเผาไหม้เทียบกับเวลาของจรวดที่ใช้ดินขับขนาดปกติ

4.3 ผลการคำนวณจากข้อมูลของจรวดที่ใช้ดินขับที่มีปริมาตรอิสระมากคือมีปริมาตรอิสระ 0.284 ลูกบาศก์เมตร และใช้เม็ดดินเท่าจรวดที่ใช้ดินขับปกติคือ เม็ดดิน 380 กรัม แสดงในรูปที่ 6 จากการคำนวณค่าความดันวิกฤตที่สภาวะนี้มีค่า 58 psi ซึ่งจากรูปพบว่า ค่าความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ที่ค่าสูงสุดมีค่า 45 psi ซึ่งต่ำว่าค่าความดันวิกฤติ แสดงถึงว่าจรวดไม่สามารถจุดติดได้



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันในตัวจุดและความดันในห้องเผาไหม้เทียบกับเวลาของจรวดที่มีปริมาตรอิสระ 0.284 ลูกบาศก์เมตร เม็ดดินจุด 380 กรัม

4.4 ผลการคำนวณจากข้อมูลของจรวดที่ใช้ดินขับที่มีปริมาตรอิสระมากคือมีปริมาตรอิสระ 0.284 ลูกบาศก์เมตร และใช้เม็ดดินจุดเป็น 1.5 เท่าของจรวดที่ใช้ดินขับปกติคือ เม็ดดินจุด 570 กรัม แสดงในรูปที่ 7 จากการคำนวณค่าความดันวิกฤตที่สภาวะนี้มีค่า 58 psi ซึ่งจะรูปพบว่า ค่าความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ที่ค่าสูงสุดมีค่า 67 psi ซึ่งสูงกว่าค่าความดันวิกฤติ แสดงถึงว่าจรวดสามารถจุดติดได้



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันในตัวจุดและความดันในห้องเผาไหม้เทียบกับเวลาของจรวดที่มีปริมาตรอิสระ 0.284 ลูกบาศก์เมตร เม็ดดินจุด 570 กรัม

5. สรุปผลการทดสอบ

วิธีคำนวณโดยใช้ สมการทางคณิตศาสตร์จากการคำนวณสมดุลมวลสารและพลังงาน สามารถใช้คำนวณ เพื่อหาน้ำหนักที่เหมาะสมของเม็ดดินจุดสำหรับจรวดที่มีช่องว่างในห้องเผาไหม้ ที่แตกต่างจากจรวดปกติได้ โดยการคำนวณดังกล่าวได้ใช้ค่าความดันวิกฤตเป็นตัวเทียบ เมื่อปริมาตรอิสระมีค่ามากขึ้น จำเป็นต้องใช้ปริมาณเม็ดดินจุดมากขึ้น เพื่อให้เกิดความดันในห้องเผาไหม้ที่มีค่าสูงกว่าความดันวิกฤต ในขณะเดียวกันเมื่อปริมาตรอิสระมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความดันวิกฤตมีค่าต่ำลง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Carr, C.E. and Thomas, M.J. , “Factors Influencing BKNO3 Igniter Performance”, AIAA Paper No. 87-1985, June, 1987.

[2] Bryant, G.J.; and Lawrence, Evan K.: A Method for Predicting Ignition Energy Requirements of Practical Propellant Systems. Part III, NAVORD Report 6134, Naval Ordnance Lab., Feb. 2, 1959 (Confidential)

[3] Von Elbe, G., “Theory of Solid Propellant Ignition and Response to Pressure Transients”, Bulletin of the Interagency Solid Propulsion Meeting, Vol III, July, 1963.

[4] Robertson, W.E., “Igniter Material Considerations and Applications”, AIAA Paper No. 72-1195, November, 1972.

[5] Nachbar, D.; et all.: Aft-End Ignition Large Solid Rocket Program. Final Report SSD-TDR-62-103, Aerojet-General Corp., Oct. 1962.

[6] Keller, R.B. Jr, ed., Solid Rocket Motor Igniters, NASA SP-8051, March 1971.