

# การวิเคราะห์ความเค้นความเครียดจากฟองอากาศ ในเนื้อดินขับเชื้อเพลิงแข็งโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สุรสิทธิ์ ปาลสาร<sup>1\*</sup> และ ทวีศักดิ์ โสภณลักษณ์<sup>2</sup>

วันที่รับ 13 มิถุนายน 2566 วันที่แก้ไข 26 กรกฎาคม 2566 วันที่ตอบรับ 31 สิงหาคม 2566

## บทคัดย่อ

ปัญหาหนึ่งที่เกิดในการหล่อดินขับจรวด คือ ปัญหาการเกิดฟองอากาศในเนื้อดินขับ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแท่งดินขับจากการใช้งานจรวดในสภาวะต่าง ๆ ความสำเร็จของการใช้งานจรวดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย สิ่งหนึ่งคือความแข็งแรงของแท่งดินขับ ค่าความแข็งแรงดินขับประเมินได้จากการสร้างกราฟหลัก ซึ่งได้จากผลการทดสอบการดึงชิ้นงานตัวอย่างดินขับเชื้อเพลิงแข็ง ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ความเค้นความเครียดในแท่งเชื้อเพลิงที่มีฟองอากาศอยู่ภายในโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์กรณีอุณหภูมิสูง 60°C พิจารณาค่าความเครียดสูงสุดจากฟองอากาศ พบว่า ความเครียดต่ำกว่าค่าสูงสุด นั่นคือผลของอุณหภูมิและฟองอากาศไม่ได้ทำให้แท่งดินขับเสียหาย ในกรณีความดันภายในมอเตอร์จรวดความเครียดของดินขับก็ยังอยู่ในระดับที่รับได้ และในกรณีความเร่ง 70 g ความเค้นที่ต่ำกว่าค่าสูงสุด โดยที่ค่าความปลอดภัยอยู่ที่ระดับ 1.3 นั่นคือ จากทั้งสามกรณี ความเร่งของจรวดส่งผลต่อดินขับค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีปัญหาฟองอากาศ ดินขับก็ยังสามารถรับภาระกรรมจากการใช้งานของจรวดได้

**คำสำคัญ :** ดินขับเชื้อเพลิงแข็ง, ปัญหาฟองอากาศ, ไฟไนต์เอลิเมนต์, กราฟหลัก, คุณสมบัติทางกล

<sup>1</sup> ส่วนงานวิศวกรรมระบบขับเคลื่อน, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

<sup>2</sup> ส่วนคุณภาพและความปลอดภัย, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

\* ผู้แต่ง, อีเมล: surasith.p@dti.or.th

# The Analysis of Stress Strain from Voids in Solid Propellant by using Finite Element Method

Surasith Palasarn <sup>1\*</sup> and Taweesak Sophonlukana <sup>2</sup>

Received 13 June 2023, Revised 26 July 2023, Accepted 31 August 2023

## Abstract

One problem encountered in the casting of rocket propellants is the problem of voids in the propellant which affects load in the propellant from the use of rockets in various conditions. The success of a rocket depends on many factors. One thing is the strength of the propellant. The strength of propellant was estimated by constructing the master curve which obtained from the results of the tensile test of propellant samples. In this research, stress strain analysis in propellant containing voids is performed by using the finite element method. The result of analysis in case of high temperature at 60 degree Celsius the maximum stress from voids. It was found that the strain was below the maximum value. That is, the effect of temperature and voids did not damage the propellant. In the case of the pressure inside motor, the strain of the propellant remains at an acceptable level. The case of an acceleration of 70 g, the stress below the maximum value which safety factor 1.3, that is from three cases, the acceleration of the rocket rather affects the propellant. However, even though there is a problem with voids, the propellant can still hold the loads of working of rocket.

**Keywords :** Solid propellant, Voids problem, Finite element method, Master curve, Mechanical behavior

---

<sup>1</sup> Propulsion Systems Division, Defence Technology Institute

<sup>2</sup> R&D Workshop Quality and Safety Division, Defence Technology Institute

\* Corresponding author, E-mail: surasith.p@dti.or.th

## 1. บทนำ

ระบบขับเคลื่อนของจรวดเชื้อเพลิงแข็ง (Solid Rocket Motor) ในปัจจุบันนั้น นิยมใช้เชื้อเพลิงแบบคอมโพสิต (Composite Propellant) ซึ่งมีส่วนประกอบของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต (AP) มีตัวประสานคือ ไฮดรอกซิลเทอร์มินเนตโพลีบิวทาไดเอิน (Hydroxyl-terminated Polybutadiene) หรือ HTPB และเชื้อเพลิงเป็นผงอะลูมิเนียม (AL) ลักษณะของเชื้อเพลิงคอมโพสิตมีคุณสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืด (Viscoelastic) วัสดุประเภทยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืดนี้สิ่งที่มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุประการแรก คือ อัตราเร็วของการดึง (Strain rate) ประการที่สอง คือ อุณหภูมิ (Temperature) ของดินขับ คุณสมบัติประการหนึ่งที่เป็นตัวบ่งบอกถึงความแข็งแรงของเชื้อเพลิง คือ โมดูลัสของการคลายตัว (Relaxation modulus) หากเราสร้างกราฟระหว่างโมดูลัสของการคลายตัวและเวลาลดแรงดึง (Reduced time) เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิหนึ่งเป็นอุณหภูมิอ้างอิง โมดูลัสของการคลายตัวจะมีลักษณะเหมือนกัน ข้อมูลจะเลื่อนในแนวนอน (shift) ไปตามค่าอุณหภูมิ ค่าการเลื่อนดังกล่าวเรียกว่า ค่าคงที่การเลื่อน (Shift Factor) ค่าคงที่นี้เป็นตัวแปรที่จะแสดงผลของอุณหภูมิและความเร็วการดึงได้พร้อม ๆ กัน กราฟที่ได้จากโมดูลัสของการคลายตัวและเวลาลดแรงดึงต่อค่าการเลื่อนเรียกว่า กราฟหลัก (Master Curve)

งานวิจัยของ Walid และ Liang [1] - [2] แสดงถึงการใช่วิธีต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน ในการสร้างกราฟหลักของโมดูลัสของการคลายตัว และการประเมินคุณลักษณะทางกลของเชื้อเพลิงที่ใช้ HTPB ภายใต้ระดับอุณหภูมิที่ต่างกันและอัตราการดึงต่าง ๆ ผลการวิจัยแสดงว่า กราฟความเค้นความเครียดจากการทดสอบการดึงที่อุณหภูมิสูงมีค่าความเค้นน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และมีลักษณะเช่นเดียวกับผลการทดสอบ

การดึงที่อัตราต่ำ งานวิจัยของ Chyuan [3] - [4] มีบทวิเคราะห์เชิงตัวเลขของความแข็งแรงของเชื้อเพลิงที่ใช้ HTPB เป็นหลัก ผลของแรงเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเนื่องจากความดัน รวมถึงอัตราส่วนปัวซองจากความดันภายใน โดยใช้แบบจำลองที่สร้างจากการทดสอบการคลายตัว ใช้วิธีการแบบ Time - temperature Superposition (TTS) และวิธี William, Landel and Ferry (WLF) งานวิจัยของ Wang และคณะ [5] เกี่ยวกับการสร้างโมเดลการคำนวณความแข็งแรงของดินขับคอมโพสิตโดยใช้การทดสอบการดึงแบบทิศทางเดียว (Uniaxial Tensile Test) และการทดสอบการดึงแบบสองทิศทาง (Biaxial Tensile Test) Bihari และคณะ [6] ใช้สองวิธี ได้แก่ วิธี WLF และวิธีแบบ Arrhenius ในการประเมินพลังงานปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงคอมโพสิตเพื่อประเมินอายุการใช้งานของเชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้ใช้ผลการทดสอบเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราการดึงต่าง ๆ เพื่อใช้ในการสร้างกราฟหลักของค่าความเค้น โมดูลัสของการยืดหยุ่น และความเครียด ภายใต้กราฟลอการิทึมเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินความสามารถในการรับความเค้นจากปัญหาฟองอากาศเกิดขึ้นภายในแท่งเชื้อเพลิง โดยอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ช่วยในการประเมินความเค้นที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการใช้งานต่าง ๆ กัน ได้แก่ ภายใต้อุณหภูมิการใช้งานของจรวด ความดันการเผาไหม้และความเร่งของจรวด

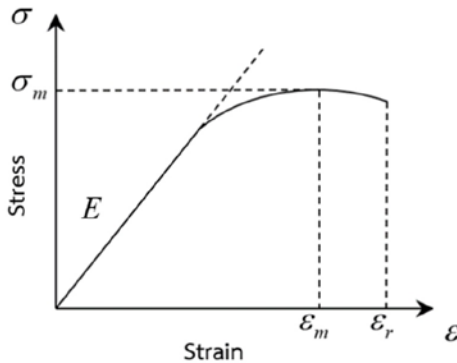
## 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คุณสมบัติทางกลของแท่งเชื้อเพลิง

การทดสอบการดึง (Tensile Test) ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการประเมินความแข็งแรงของแท่งดินขับ รวมถึงการควบคุมคุณภาพการผลิตของแท่งเชื้อเพลิง เนื่องจากวัสดุไม่เป็นการยืดหยุ่นแบบ

เชิงเส้นจึงจำเป็นต้องมีการนิยามจำนวนตัวแปรที่เหมาะสมและดีพอที่จะแสดงผลลัพธ์จากการทดสอบ ดังรูปที่ 1

ค่าของตัวแปรแต่ละตัวเปลี่ยนแปลงขึ้นกับชนิดของเชื้อเพลิง ความดัน อุณหภูมิ และอัตราเร็วของการดึง รวมไปถึงช่วงเวลากการเก็บและความชื้น ก็มีผลกับตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ด้วย ในระหว่างการทดสอบการดึงจะเกิดการขยายตัวของปริมาตรของตัวอย่าง มีสาเหตุมาจากการเกิดช่องว่างรอบ ๆ ผลึกของแข็งในเนื้อดินขับ ในการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสามารถหาได้จาก การวัดความดันที่เปลี่ยนไป ซึ่งเป็นผลโดยตรงต่อปริมาตรของดินขับ



รูปที่ ๑ ตัวแปรที่แสดงผลของกราฟการดึง

โดยที่  $E$  คือ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น, MPa

$\sigma_m$  คือ ความเค้นสูงสุด, MPa

$\epsilon_m$  คือ ความเครียดที่จุดความเค้นสูงสุด

$\epsilon_r$  คือ ความเครียดที่จุดฉีกขาด

## 2.2 การทดสอบการคลายตัว (Relaxation Test)

คุณลักษณะยืดหยุ่นของแท่งเชื้อเพลิงสามารถทดสอบได้ โดยการทดสอบการคลายตัว (Relaxation Test) ทำได้โดยการยึดชิ้นงานที่จุดยึดตัว (Elongation) คงที่ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่วัดได้ โดยการใส่แรงกระทำกับชิ้นงานที่

ติดกับผิวท่อที่อุณหภูมิคงที่ ในการทดสอบนี้ใช้ชิ้นงานแบบแกนเดียว (Uniaxial specimen) สมมติว่าการยึดตัวของตัวอย่างมีค่าคงที่ เท่ากับ  $\epsilon_i$  และสมมติค่า  $\sigma(t)$  ถูกวัดตามเวลา ค่ามอดูลัสของการคลายตัว  $E_R(t)$  แสดงโดยสมการ (1)

$$E_R(t) = \frac{F(t)}{A\epsilon} \quad (1)$$

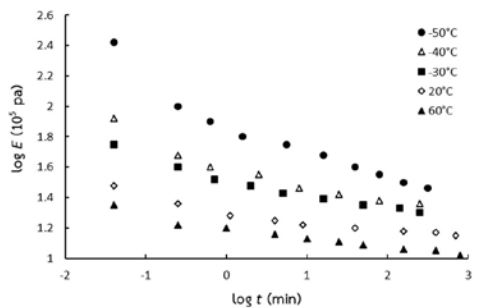
$E_R(t)$  คือ ค่ามอดูลัสของการคลายตัว, MPa

$F(t)$  คือ แรงดึงตามเวลา, N

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินขับ, m<sup>2</sup>

$\epsilon$  คือ ความเครียดค่าคงตัว

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นกราฟของมอดูลัสของการคลายตัว แนวโน้มของมอดูลัสของการคลายตัวมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้น และลดช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ ๒ มอดูลัสของการคลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเครียดเท่ากับ 10% [7]

## 2.3 การสร้างกราฟหลัก (Master Curve)

การสร้างกราฟหลักสามารถใช้วิธี TTS ที่ใช้สร้างกราฟหลักของความเค้น ความเครียด และมอดูลัสการคลายตัว ซึ่งสำหรับมอดูลัสการคลายตัวนี้ มีการใช้วิธี TTS วิธี WLF และวิธี Arrhenius Method

## 2.4 Time - temperature Superposition Method (TTS)

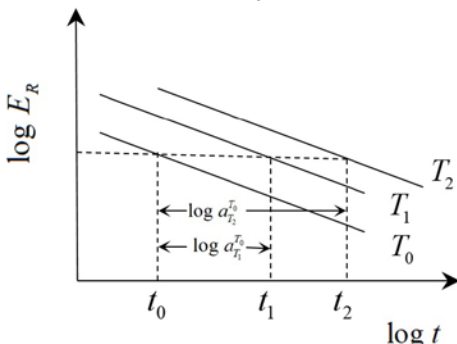
วิธี TTS ใช้ในการหาค่าการเลื่อน (Shift Factor) ด้วยการพล็อตกราฟมาตราส่วนลอการิทึมของโมดูลัสการคลายตัว และกราฟลอการิทึมของเวลา ดังกราฟในรูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อโมดูลัสการคลายตัวแสดงดังสมการที่ (2) - (4)

$$E_R(t_o, T_o) = E_R(t_1, T_1) = E_R(t_2, T_2) \quad (2)$$

$$\log t_1 = \log t_o + \log a_{T_1}^{T_o} \quad (3)$$

$$\log t_2 = \log t_o + \log a_{T_2}^{T_o} \quad (4)$$

โดยที่  $a_{T_1}^{T_o}$ ,  $a_{T_2}^{T_o}$  คือ ค่าการเลื่อนเนื่องจากอุณหภูมิ  
 $T_o$  คือ อุณหภูมิอ้างอิง  
 $T_1, T_2$  คือ อุณหภูมิการทดสอบ



รูปที่ ๓ การหาค่าการเลื่อน  $a_{T_i}^{T_o}$  โดยวิธี TTS

William และคณะ [8] ได้พัฒนาหลักการสมการที่ใช้ประเมินค่าการเลื่อน ตามอุณหภูมิต่าง ๆ เทียบกับอุณหภูมิอ้างอิง ในงานวิจัยของ Walid [1] ได้ใช้สมการ WLF แสดงความสัมพันธ์ของค่าการเลื่อนและอุณหภูมิของดินซึบคอมโพสิตชนิด AP/HTPB ตามสมการที่ (5)

$$\log a_t = \frac{-5.4(T - 20)}{770.27 + T - 20} \quad (5)$$

หลักการ เวลา-อุณหภูมิ สามารถใช้กับคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ถูกวัดค่าระหว่างการทดสอบการดึง

ขึ้นงาน ได้แก่ โมดูลัสการยืดหยุ่น  $E$  ค่าความเค้นสูงสุด  $\sigma_m$  และความเครียดที่ความเค้นสูงสุด  $\epsilon_m$  ในกรณีของการทดสอบดึง อาจจะใช้หลักการ อัตราเร็วการดึง-อุณหภูมิ สมการกราฟหลักอาจจะนิยามตามค่าเวลาที่จุดสูงสุดต่อค่าการเลื่อน นั่นคือ  $t_m / a_T$  ดังสมการที่ (6) - (8)

$$\log E = f(\log t_m / a_T) \quad (6)$$

$$\log \sigma_m = g(\log t_m / a_T) \quad (7)$$

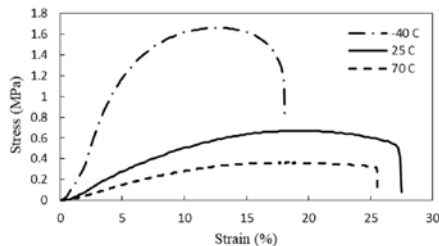
$$\log \epsilon_m = h(\log t_m / a_T) \quad (8)$$

## 3. การวิเคราะห์ปัญหาฟองอากาศ

### 3.1 การสร้างกราฟหลัก (Master Curve) ของดินซึบคอมโพสิตแบบ HTPB

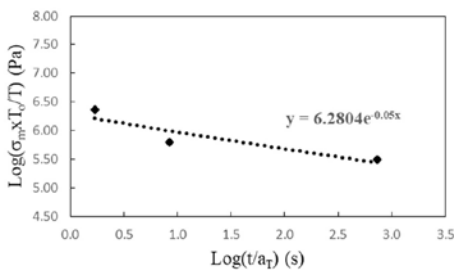
ดินซึบที่ใช้ในจรวดที่ทำการวิเคราะห์นี้ เป็นดินซึบที่ประกอบด้วยแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต (AP) ผงอะลูมิเนียม (AL) และตัวประสาน HTPB เป็นองค์ประกอบหลัก รวมกับส่วนผสมอื่น ๆ ในปริมาณเล็กน้อย ส่วนผสมต่าง ๆ ถูกผสมเข้าด้วยกันและหล่อขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบการดึง และผ่านการอบในตู้สุญญากาศและอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 120 ชั่วโมง

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบการดึง (Uniaxial Tensile Test) ที่สามอุณหภูมิและอัตราการดึงต่าง ๆ ได้แก่ ที่อุณหภูมิปกติ 25°C อัตราการดึงเท่ากับ 100 mm/min การดึงที่อุณหภูมิต่ำ -40°C ใช้อัตราการดึงเท่ากับ 100 mm/min เช่นเดียวกัน ในขณะที่การดึงที่อุณหภูมิสูง 70°C ใช้อัตราการดึงเท่ากับ 2 mm/min

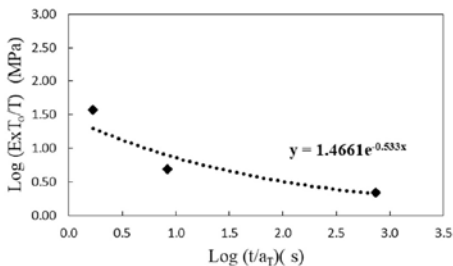


รูปที่ ๔ ผลการทดสอบการดึง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ที่มีต่อกราฟความเค้น-ความเครียด

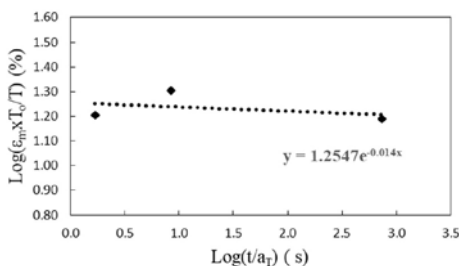
ผลการทดสอบตามรูปที่ 4 สามารถนำมาสร้างกราฟหลัก (Master Curve) ของความเค้นสูงสุดของดินขับ ความเครียดที่ความเค้นสูงสุด และมอดุลัสยืดหยุ่น ตามรูปที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ จากภาพจะเห็นว่า คุณสมบัติทางกลของดินขับมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับหลักการขึ้นกับเวลา-อุณหภูมิ (Time-temperature dependent)



รูปที่ ๕ กราฟหลักความเค้นสูงสุดของดินขับ HTPB



รูปที่ ๖ กราฟหลักมอดุลัสยืดหยุ่นของดินขับ HTPB



รูปที่ ๗ กราฟหลักความเครียดสูงสุดของดินขับ HTPB

### 3.2 การวิเคราะห์ฟองอากาศในดินขับโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

ในการใช้งานจรวดนั้น จรวดอาจจะต้องรับภาระกรรมที่เกิดขึ้น ซึ่งมีทั้งอุณหภูมิการใช้งานจรวด ซึ่งมีทั้งอุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิต่ำ ความดันภายในระหว่างการจุดชนวนเชื้อเพลิง รวมถึงความเร่งของตัวจรวดเองในระหว่างที่จรวดออกตัว ภาระกรรมต่างๆนี้อาจส่งผลต่อดินขับ เช่น ทำให้ดินขับเกิดการแตกร้าว จนส่งผลต่อความดันภายในจรวดที่สูงขึ้น จนเกินขีดจำกัดของโครงสร้าง ซึ่งทำให้จรวดระเบิดได้

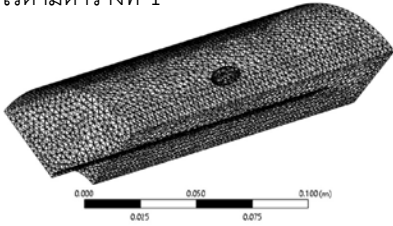
ในระหว่างกระบวนการหล่อดินขับในมอเตอร์จรวดอาจเกิดฟองอากาศในเนื้อดินขับ ในระหว่างการทำงานอาจเกิดความเค้นสะสม (Stress concentration) รอบ ๆ ฟองอากาศในการวิเคราะห์ความเค้นนี้ ผู้เขียนจำลองฟองอากาศทรงรีขนาด 10x20 mm เกิดขึ้นในแท่งดินขับ และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ทำการวิเคราะห์โดยมีภาระกรรมต่างๆ ได้แก่

- 1) สภาวะอุณหภูมิสูง ที่ 60°C
- 2) ความดันภายในมอเตอร์จรวดที่ 19.6 MPa ที่อุณหภูมิ 60°C
- 3) ความเร่งออกตัว 70 g อุณหภูมิ 60°C

ผลการวิเคราะห์ภาระกรรมต่างๆ เปรียบเทียบกับความแข็งแรงของดินขับที่หาได้จากกราฟหลัก จะบอกได้ว่าฟองอากาศจะทำให้เกิดความเสียหายต่อแท่งดินขับในระหว่างการทำงานของจรวดจนส่งผลต่อโครงสร้างได้หรือไม่ การใช้กราฟหลักเป็นผลจากการทดสอบการดึง (Tensile) ดังนั้น การเปรียบเทียบต้องเปรียบเทียบในกรณีที่ภาระกรรมอยู่ภายใต้แรงดึง ไม่ใช่แรงกดอัด

ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ใช้แบบจำลองวัสดุประเภทยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืด (Viscoelastic) โดยมีการกำหนดเงื่อนไขทั้งสามสภาวะ คุณสมบัติในการคำนวณ FEM ใช้ค่าที่ได้จาก

กราฟหลัก แห่งดินขับจรวดขนาด 122 mm ยาว 1,650 mm เพื่อให้ง่ายต่อการจำลอง จึงใช้ขอบเขตโดเมนของการจำลองโดยการแบ่งดินขับเป็น 1/4 ส่วน ยาว 200 mm มีฟองอากาศขนาด 10x20 mm อยู่ภายใน แสดงดังรูปที่ 8 คุณสมบัติของดินขับแสดงไว้ตามตารางที่ 1



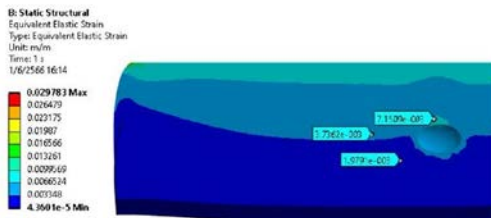
รูปที่ ๘ ขอบเขตโดเมนของการจำลอง FEM

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินขับเชื้อเพลิงแข็ง

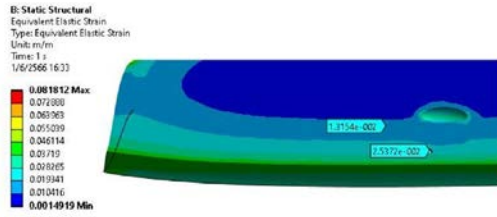
Density	1757	kg/m <sup>3</sup>
Young's Modulus	6.6x10 <sup>8</sup>	Pa
Poisson's Ratio	0.49	
Bulk Modulus	1.098x10 <sup>10</sup>	Pa
Shear Modulus	2.211x10 <sup>8</sup>	Pa
Secant Coefficient of Thermal Expansion	9.99x10 <sup>-5</sup>	1/°C
Thermal Conductivity	0.16	W/m·°C

#### 4. ผลการวิเคราะห์ Finite Element Method

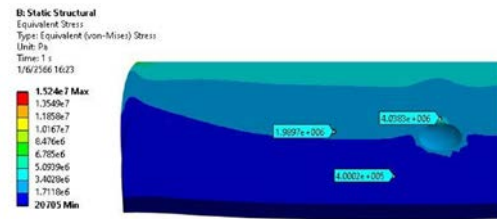
รูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์ความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในดินขับคอมโพสิตที่มีฟองอากาศเกิดขึ้นในสภาวะอุณหภูมิ 60°C รูปที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดจากความดันภายในมอเตอร์จรวดในสภาวะอุณหภูมิ 60°C รูปที่ 11 แสดงถึงความเค้นในรอบ ๆ ฟองอากาศ เมื่อจรวดมีความเร่ง 70 g ในสภาวะอุณหภูมิ 60°C



รูปที่ ๙ ความเครียดรอบฟองอากาศในสภาวะอุณหภูมิ 60°C



รูปที่ ๑๐ ความเครียดรอบฟองอากาศจากความดันภายในมอเตอร์จรวด ในสภาวะอุณหภูมิ 60°C



รูปที่ ๑๑ ความเค้นที่ความเร่ง 70 g ในสภาวะอุณหภูมิ 60°C

#### 5. การวิเคราะห์ผลจากกรณีต่าง ๆ

รูปที่ 7 แสดงกราฟหลัก (Master Curve) ของความเครียดของดินขับ สมการเป็นเอกโพเนนเชียล อุณหภูมิอ้างอิงที่ 20°C ค่าการเลื่อน  $a_T = 0.54$  ค่า  $t_m = 28,800$  sec ผลของอุณหภูมิ 60°C แสดงดังตารางที่ 2 ความเครียดสูงสุดที่ได้รับจากกราฟหลักเท่ากับ 0.170 ผลการวิเคราะห์ FEM แสดงความเครียดที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ฟองอากาศเท่ากับ 0.0072 โดยมีค่า Safety Factor เท่ากับ 23.6 ผลดังกล่าวหมายถึงดินขับสามารถรับอุณหภูมิ 60°C ได้ การขยายตัวที่เกิดขึ้นไม่ทำให้ดินขับเกิดการเสียหาย

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของดินขับจาก Master Curve และวิธี FEM

	Condition	Maximum	FEM	SF
Effect of temperature	Strain	0.170	0.0072	23.6
	Strain	0.214	0.0131	16.3
Effect of acceleration	Stress (MPa)	5.26	4.04	1.3

ผลของความดันภายในมอเตอร์ ที่อุณหภูมิ 60°C  $t_m = 0.035$  sec จากตารางที่ 2 ความเครียดสูงสุดเท่ากับ 0.214 ผลการวิเคราะห์ FEM แสดง

ความเครียดที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ฟองอากาศเท่ากับ 0.0131 โดยมีค่า Safety Factor เท่ากับ 16.3

ผลของความเร่ง 70 g ที่อุณหภูมิ 60°C ใช้ค่า  $t_m = 0.035$  sec จากกราฟหลัก ความเค้นสูงสุดเท่ากับ 5.26 MPa ผลการวิเคราะห์ FEM แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ฟองอากาศเท่ากับ 4.04 MPa ค่า Safety Factor เท่ากับ 1.3 จะเห็นว่าทั้งสามกรณีผลการวิเคราะห์สามารถยอมรับได้

## 6. ข้อสรุป

ความแข็งแรงของดินขับเชื้อเพลิงชนิด HTPB เป็นฐานสามารถประเมินได้จากการสร้างกราฟหลักที่ได้จากผลการทดสอบการดึง และโดยหลักของ Time-temperature Dependent กราฟหลักของความเค้น ความเครียด และโมดูลัสของดินขับสามารถใช้ประเมินความแข็งแรงเมื่อดินขับได้รับการกระทำโดยภาระกรรมต่าง ๆ ทั้งกรณีปกติและกรณีที่เกิดปัญหาฟองอากาศในเนื้อดินขับได้

ปัญหาฟองอากาศในดินขับสามารถพิจารณาได้โดยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ผลการวิเคราะห์กรณีอุณหภูมิสูง 60°C พิจารณาค่าความเครียดสูงสุดจากฟองอากาศ ความเครียดต่ำกว่าค่าสูงสุดอย่างมาก ดังนั้น ผลของอุณหภูมิและฟองอากาศไม่ได้ทำให้ดินขับเสียหาย ในกรณีความดันภายในมอเตอร์ ความเครียดของดินขับก็ยังอยู่ในระดับที่รับได้ และในกรณีความเร่งของจรวด ความเร่ง 70 g ความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าค่าสูงสุด โดยค่าความปลอดภัยอยู่ที่ระดับ 1.3 นั่นคือ ความเร่งของจรวดส่งผลต่อดินขับค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีปัญหาฟองอากาศ ดินขับก็ยังสามารถรับภาระกรรมจากการใช้งานของจรวดได้

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] W. M. Adel and L. Guo - Zhu, "Analysis of Mechanical Properties for AP/HTPB Solid Propellant under Different Loading

Conditions," *Int. J. Aerosp. Mech. Eng.*, vol. 11, no. 12, pp. 1915 - 1919, 2017.

- [2] W. M. Adel and L. Guo - Zhu, "Different Method for Developing Relaxation Modulus Master Curves of AP-HTPB Solid Propellant," *Chin. J. Energ. Mater.*, vol. 25, no. 10, pp. 810 - 816, 2017.
- [3] S. W. Chyuan, "Nonlinear Thermoviscoelastic Analysis of Solid Propellant Grains Subject to Temperature Loading," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 38, no. 7, pp. 613 - 630, 2002.
- [4] S. W. Chyuan, "Studies of Poisson's Ratio Variation for Solid Propellant Grains Under Ignition Pressure Loading," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 80, no. 12, pp. 871 - 877, 2003.
- [5] Z. J. Wang, H. F. Qiang, G. Wang, and B. Geng, "Strength Criterion of Composite Solid Propellants Under Dynamic Loading," *Def. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. 457 - 462, 2018.
- [6] B. K. Bihari, V. S. Wani, N. P. N. Rao, P. P. Singh, and B. Bhattacharya, "Determination of Activation Energy of Relaxation Events in Composite Solid Propellants by Dynamics Mechanical Analysis," *Def. Sci. J.*, vol. 64, no. 2, pp. 173 - 178, 2014.
- [7] A. Davenas, *Solid Rocket Propulsion Technology*. New York, NY, USA: Pergamon Press, 1989.
- [8] M. L. Williams, R. F. Landel, and J. D. Ferry, "The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 77, no. 14, pp. 3701 - 3707, 1955.