

# การวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิและความเค้นจากอุณหภูมิ ในลูกสูบรถยนต์ที่สภาวะต่าง ๆ

## Temperature and Elastic Thermal Stress Analyses in Engine Pistons at Various Conditions

พรรรณพ บุญชู\* และ สายประสิทธิ์ เกิดนิยม\*

### บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของวิจัย เพื่อศึกษาพฤติกรรมลูกสูบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์โดยสนใจลักษณะการกระจายของอุณหภูมิของลูกสูบ การขยายตัว และการเกิดความเค้นภายในลูกสูบ 2 ชนิดคือ อะลูมิเนียมและเหล็กหล่อที่ความเร็วรอบต่าง ๆ กัน

การศึกษานี้ใช้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์พฤติกรรมของลูกสูบโดยพิจารณาผลทางด้านความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิโดยใช้การวิเคราะห์กับโมเดล 3 มิติที่มีรูปร่างสมมาตร มีการกำหนดภาวะที่กระทำให้สม่ำเสมอ (Uniform) กำหนดภาวะที่กระทำให้คงที่ตลอดระยะเวลาที่จำลองหาพฤติกรรมของลูกสูบโดยคิดภาวะที่กระทำว่าเป็นค่าเฉลี่ยที่ความเร็วของเครื่องยนต์ต่าง ๆ ผลจากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิของเหล็กหล่อสูงกว่าอะลูมิเนียมทุกความเร็วรอบ และอุณหภูมิที่บริเวณแหวนลูกสูบของทั้งวัสดุจะมีอุณหภูมิแตกต่างกันเนื่องจากความร้อนจะถ่ายเทผ่านแหวนลูกสูบซึ่งส่งผลให้ความเค้นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิตรงบริเวณแหวนลูกสูบ และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเค้นที่แหวนลูกสูบจะมากกว่าที่หัวลูกสูบและจะเป็นสัดส่วนตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการทำงานด้วย ในกรณีของการยึดตัวของอะลูมิเนียมจะมีค่ามากกว่าเหล็กหล่อ และการขยายตัวของวัสดุทั้งสองจะมีแนวโน้มเดียวกันคือ การขยายตัวที่หัวลูกสูบจะมีค่ามากกว่าที่กระโปรงลูกสูบ ทำให้แนวโน้มของการสึกหรอของลูกสูบอะลูมิเนียมจะมีค่ามากที่หัวลูกสูบเมื่อ

เปรียบเทียบกับลูกสูบของเหล็กหล่อ ซึ่งทำให้ต้องใช้ช่องว่างระหว่างลูกสูบกับกระบอกสูบมีค่ามากกว่าเพื่อป้องกันการสึกหรอ

### Abstract

The objective of research is to study the responses of two different piston materials such as aluminum and cast iron using the commercial finite element method software named ABAQUS. With such technique, temperature and elastic stress analysis including the piston displacement subjected to the various engine speeds can be investigated. The investigation is based on the results from thermal stresses on the one-fourth 3-D piston model under the uniform heat flux throughout the different average thermal engine cycle. As a result, cast iron piston has a higher temperature than aluminum temperature on every engine speed. In addition, the temperature at the piston ring of both materials has a high temperature gradient due to the high heat transfer by conduction through the ring. This results in the higher thermal stress at the ring that is also related to the engine speed. In term of piston displacement of both materials, aluminum piston has a higher deformation at the piston head

\* ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

more than the piston skirt in comparison with cast iron piston. As a result, the trend of aluminum piston requires more space between the piston bore and the piston in order to prevent piston wear.

## 1. บทนำ

โดยปกติแล้วเมื่อเครื่องยนต์ทำงานอยู่ที่ความเร็วรอบสูง อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จะสูงตามปริมาณเชื้อเพลิงก่อนเกิดการเผาไหม้ ถ้าปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้สูงขึ้นซึ่งมากพอที่จะทำให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุก็จะสูญเสียไป ซึ่งดีกรีการสูญเสียคุณสมบัตินี้ก็จะแตกต่างกันไปจากวัสดุหนึ่งไปยังวัสดุหนึ่ง ดังนั้นการเลือกวัสดุที่ใช้มาทำลูกสูบของรถยนต์นั้น จะต้องคำนึงปัจจัยหลายอย่างเช่น การตอบสนองของวัสดุทั้งในเชิงอุณหภูมิ และความเค้นต่อสภาพการทำงาน ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องยนต์จากการใช้วัสดุที่ทำลูกสูบและความคงทนของการใช้งาน

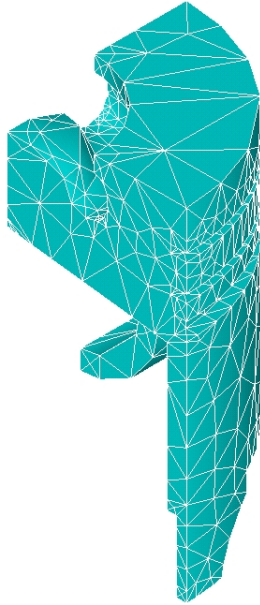
ในวงการอุตสาหกรรม วัสดุที่เป็นที่นิยมใช้คือ เหล็กหล่อ ซึ่งง่ายต่อการขึ้นรูป และ ความคงทนต่อการสึกหรอ เนื่องจากในเนื้อของเหล็กหล้อมีกราฟไฟต์ผสมอยู่ ซึ่งมีสมบัติของการหล่อสลายในตัวของวัสดุ ลูกสูบที่มีขนาดเล็กมักทำด้วยอะลูมิเนียม ส่วนลูกสูบที่มีขนาดใหญ่มักทำด้วยเหล็กหล่อ [1] ซึ่งปัจจุบันเหล็กหล่อเป็นที่นิยมใช้ทำเป็นจานเบรกรถยนต์มากกว่าวัสดุอื่น ส่วนวัสดุที่นิยมใช้ในปัจจุบันนี้สำหรับลูกสูบของเครื่องยนต์คืออะลูมิเนียม ซึ่งสาเหตุหลักก็คือเพื่อลดน้ำหนักซึ่งมีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นบนลูกสูบเนื่องจากพลังงานจลน์ ในขณะที่ความเร็วรอบสูงๆ [2] อย่างไรก็ตามวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีข้อดีและข้อเสียในเชิงวิศวกรรมซึ่งขึ้นอยู่กับ การประยุกต์ใช้ของวัสดุดังกล่าว อีกทั้งขณะที่เครื่องยนต์ทำงานอยู่ ความแตกต่างของการขยายตัวของลูกสูบจะเกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ รูปร่างของลูกสูบ และสภาพแวดล้อมของอุณหภูมิภายนอกที่กระทำ โดยที่การขยายตัวนี้จะมีส่งผลโดยตรงต่อความเค้นภายในลูกสูบซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำลูกสูบ เมื่อเปรียบเทียบกับความ

เค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉื่อยที่กระทำกับลูกสูบซึ่งจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของลูกสูบและความเร็วของลูกสูบมากกว่ารูปร่าง ด้วยเหตุนี้เองวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ก็เพื่อตรวจสอบการตอบสนอง พฤติกรรมของลูกสูบทางด้านอุณหภูมิและความเค้นรวมทั้งการขยายตัวของวัสดุทั้งสองชนิดได้แก่เหล็กหล่อและ อะลูมิเนียมมากกว่าการตรวจสอบเชิงประสิทธิภาพของกำลังเครื่องยนต์และความเค้นเนื่องจากแรงกระทำภายนอก นอกจากนี้สภาพของการทำงานขณะที่เครื่องยนต์เย็นและเครื่องยนต์ทำงานอยู่ที่อุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์ก็จะนำมาพิจารณาด้วย ในการวิเคราะห์ทั้งหมดนี้วิธีการทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาพฤติกรรมของลูกสูบโดยใช้โปรแกรม ABAQUS 6.2 [3] ซึ่งสามารถวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิและความเค้นแบบยืดหยุ่นได้ โดยที่ลูกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลจะถูกนำมาจำลองเนื่องจากลูกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลจะรับภาระจากเผาไหม้มากกว่าเครื่องยนต์เบนซิน

## 2. แบบจำลองของลูกสูบและวัสดุ

ลักษณะเด่นของลูกสูบที่นำมาวิเคราะห์นี้เป็นลูกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลของรถยนต์กระบะรุ่น ISUZU 2500 DI ลักษณะเด่นของลูกสูบดีเซลรุ่นนี้คือส่วนเว้าด้านบนของลูกสูบจะเว้าลงไปสำหรับห้องเพิ่มปริมาณของห้องเผาไหม้ภายในลูกสูบ และส่วนบนของลูกสูบด้านบนจะเป็นวงรีมากกว่าส่วนล่างของลูกสูบ แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของลูกสูบจะสมมาตรกันตามแนวยาวของลูกสูบ ประกอบกับภาระทางด้านอุณหภูมิที่กระทำต่อลูกสูบก็จะมีลักษณะสมมาตรด้วย ทำให้การสร้างแบบจำลองของลูกสูบจะทำเพียงหนึ่งในสี่ของลูกสูบจริง อีกทั้งการใช้เพียงหนึ่งในสี่ส่วนจะลดระยะเวลาและหน่วยความจำในการคำนวณได้ ดังนั้นเอลิเมนต์ที่ใช้จะเป็นสามเหลี่ยมชนิด Tetrahedron Second order จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 4589 เอลิเมนต์ถูกใช้สำหรับการจำลองหนึ่งส่วนสี่ของลูกสูบแบบสามมิติดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมากเพียงพอสำหรับตรวจสอบแนวโน้มของการตอบสนองในเชิงอุณหภูมิและความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิได้การสร้าง

แบบจำลองของลูกสูบนี้จะใช้โปรแกรม Ansys[4] ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณทางด้านอุณหภูมิและความเค้นในโปรแกรม ABAQUS ได้



รูปที่ 1 แบบจำลองลูกสูบที่แบ่งเอลิเมนต์แล้ว

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทำลูกสูบ

Temperature (°C)	Conductivity (W/mm/°C)	Specific heat (J/kg/°C)	Coefficient of linear thermal expansion (K-1)	Poisson's ratio	Density (kg m-3)
กรณีเหล็กหล่อ Young's modulus: 116.5 GPa					
20	0.0533	103	10.42E-6	0.26	7050
100	0.0525	247	N/A	0.26	7050
200	0.0515	427	11.58E-6	0.26	7050
300	0.0505	607	N/A	0.26	7050
400	0.0495	697	14.58E-6	0.26	7050
กรณีอะลูมิเนียมอัลลอย Young's modulus: 73.1 GPa					
25	0.168	883	23.0E-6	0.35	2790

ในกรณีของการวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิการจำลองวัสดุที่ใช้สำหรับเหล็กหล่อและอะลูมิเนียมอัลลอยนั้นจะใช้ค่าหาแน่น ค่าการนำความร้อน และค่าความร้อน

จำเพาะซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ สำหรับการวิเคราะห์เชิงความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิแบบจำลองที่ใช้สำหรับวัสดุทั้งสองจะเป็นแบบ อีลาสติก ซึ่งต้องการใช้ค่าของโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิตั้งแสดงอยู่ในตารางที่ 1 [5-7]

### 3. วิธีการและขอบเขตของการวิเคราะห์

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้านอุณหภูมิของลูกสูบและความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิโดยขอบเขตและสภาวะแวดล้อมของลูกสูบจะถูกแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ การวิเคราะห์ของลูกสูบที่สภาวะเครื่องเย็น (25 °C) และที่สภาวะเครื่องยนต์ร้อน (ที่อุณหภูมิการทำงานเครื่องยนต์) โดยทั้งสองสภาวะแวดล้อมนี้ลูกสูบจะรับภาระเนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบต่างๆ เช่น 2400, 3600 และ 4600 รอบต่อนาที นอกเหนือจากนี้แล้วการวิเคราะห์พฤติกรรมของลูกสูบนี้จะพิจารณาที่วัสดุแตกต่างกันสองอย่างคือ เหล็กหล่อและอะลูมิเนียมอัลลอย

ในส่วนแรกการวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิภายใต้สภาวะการทำงานของลูกสูบที่ความเร็วต่างๆกันของวัสดุทั้งสองชนิดจะถูกพิจารณาก่อนโดยเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้ขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างพลังงานความร้อนเข้าและออกจากลูกสูบซึ่งทำให้อุณหภูมิของลูกสูบคงที่ตลอดภายใต้เงื่อนไขที่ระบุไว้ ในส่วนหลังอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในลูกสูบภายใต้เงื่อนไขต่างๆจะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์หาความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิเพื่อตรวจสอบค่าความเค้นสูงสุดและตำแหน่งที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของการวิเคราะห์ต่างๆ

### 4. พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ลูกสูบ

พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นกับลูกสูบได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังผนังด้านบนของห้องเผาไหม้ และส่วนบนของหัวสูบ อุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณเชื้อเพลิงที่ผสมอยู่กับอากาศภายในห้องเผาไหม้ ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่หัว

ลูกสูบในกรณีนี้คำนวณมาจากอุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วยรอบของเครื่องยนต์ดีเซล ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 2 และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนหัวลูกสูบ โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นตลอดช่วงของความเร็วยรอบดังแสดงในสมการที่ 1 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตลอดช่วงของวัฏจักรของเครื่องยนต์ จะแสดงอยู่ในสมการที่ 2 [8]

$$\bar{T}_g = \frac{1}{4\pi h_g} \int_0^{4\pi} h_g T_g d\varphi \quad (1)$$

$$\bar{h}_g = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} h_g d\varphi \quad (2)$$

โดยที่

$\bar{T}_g$  = อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้เฉลี่ยตลอดวัฏจักร

$T_g$  = อุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ที่เวลาใดๆ

$\bar{h}_g$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของก๊าซเผาไหม้ตลอดวัฏจักร

$h_g$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของก๊าซเผาไหม้

$\varphi$  = องศาการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยง

ในสภาพของการทำงานขณะที่เครื่องยนต์เย็นและเครื่องยนต์อยู่ที่อุณหภูมิการทำงาน พลังงานความร้อนที่เข้าสู่หัวลูกสูบจะมีปริมาณคงที่ตลอดหัวลูกสูบ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ใช้เป็นค่าเฉลี่ยตลอดวัฏจักรของการทำงานของเครื่องยนต์

**ตารางที่ 2** อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องเผาไหม้และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่หัวลูกสูบที่หัวลูกสูบที่ความเร็วยรอบต่างๆ [8]

ความเร็วยรอบเครื่องยนต์ (รอบ/นาที)	อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่หัวลูกสูบ W/(m <sup>2</sup> K)
2400	990	182
3600	1027	243
4600	1062	280

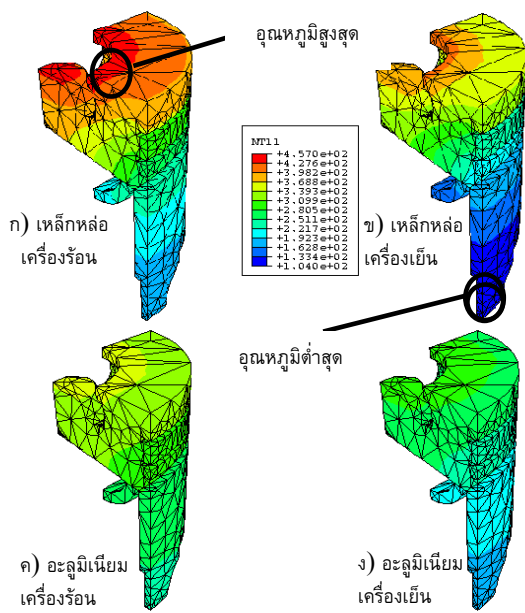
## 5. พลังงานความร้อนที่ออกสู่หัวลูกสูบ

ในสภาพการทำงานทั้งสองแบบคือ อุณหภูมิของเครื่องเย็นอยู่ และ เครื่องร้อนอยู่ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะออกจากลูกสูบโดยทางด้านล่างและด้านข้างของลูกสูบ โดยที่อุณหภูมิแวดล้อมของลูกสูบทั้งสองแบบจะแตกต่างกัน กล่าวคือ ขณะวิเคราะห์ที่เครื่องยนต์เย็นอุณหภูมิเฉลี่ยด้านข้างและด้านล่างจะมีค่าเท่ากับ 25°C ในกรณีเครื่องยนต์ทำงานที่อุณหภูมิทำงาน อุณหภูมิเฉลี่ยที่ด้านล่างจะมีค่าเท่ากับ 127 °C ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิเดียวกับน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์ เช่นเดียวกับอุณหภูมิที่ด้านข้างของลูกสูบจะใช้อุณหภูมิที่ 95 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเดียวกับน้ำหล่อเย็น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวด้านข้าง และที่ใต้หัวลูกสูบจะมีค่าเท่ากับ 150 และ 50 W/(m.K) ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณเชิงตัวเลขเปรียบเทียบ ผลจากการทดลองของลูกสูบในขนาดเดียวกัน [8]

## 6. ผลและการวิเคราะห์

### 6.1 พฤติกรรมทางด้านอุณหภูมิของลูกสูบ

ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากค่าสูงสุดและต่ำสุดภายในลูกสูบที่ทำมาจากเหล็กหล่อจะสูงกว่าของอะลูมิเนียมอัลลอย โดยที่แนวโน้มของอุณหภูมิของลูกสูบทั้งสองชนิดนี้จะแปรผันโดยตรงกับความเร็วยรอบของเครื่องยนต์ และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในลูกสูบทั้งสองชนิดจะมีค่ามากที่สุด ถ้าอุณหภูมิหล่อเย็นของเครื่องยนต์อยู่ที่อุณหภูมิห้อง (เครื่องเย็น) ดังแสดงในตารางที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนที่เข้าสู่ลูกสูบจะเกิดจากน้ำหล่อเย็นของกระบอกสูบและความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใต้ลูกสูบ ในการพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิดังแสดงในรูป 2 ซึ่งเปรียบเทียบอุณหภูมิของลูกสูบทั้งสองชนิดและที่สภาวะต่างๆ ในช่วงสุดท้ายของสมดุลทางพลังงาน ณ ความเร็วยรอบที่ 4600 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดของลูกสูบเหล็กหล่อที่บริเวณขอบของหลุมห้องเผาไหม้บนหัวลูกสูบจะสูงกว่าประมาณ 25 % ของอะลูมิเนียมอัลลอยและอุณหภูมิ



รูปที่ 2 การกระจายของอุณหภูมิของลูกสูบที่ช่วงสุดท้ายของสภาวะสมดุล ณ ความเร็วรอบที่ 4600 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของอุณหภูมิภายในลูกสูบทั้งสองชนิดและสองแบบ ขณะอยู่ที่สภาวะสมดุล ณ ความเร็วรอบที่ต่างๆ

ความเร็วของเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที)	อุณหภูมิของเหล็กหล่อ (°C)		อุณหภูมิของอะลูมิเนียมอัลลอย (°C)	
	สภาวะเครื่องร้อน	สภาวะเครื่องเย็น	สภาวะเครื่องร้อน	สภาวะเครื่องเย็น
2400	340.7 (Max.)	286.7 (Max.)	264.1 (Max.)	205.6 (Max.)
	148.2 (Min.)	78.89 (Min.)	192.9 (Min.)	127.7 (Min.)
3600	414.1 (Max.)	365.5 (Max.)	318.3 (Max.)	263.5 (Max.)
	162.3 (Min.)	94.76 (Min.)	224.7 (Min.)	161.3 (Min.)
4600	457.0 (Max.)	410.9 (Max.)	349.9 (Max.)	297.1 (Max.)
	171.2 (Min.)	104.0 (Min.)	243.4 (Min.)	180.9 (Min.)

หมายเหตุ ค่าสูงสุดจะอยู่ที่ส่วนหัวของลูกสูบและค่าต่ำสุดจะอยู่ที่ส่วนปลายสุดของลูกสูบ

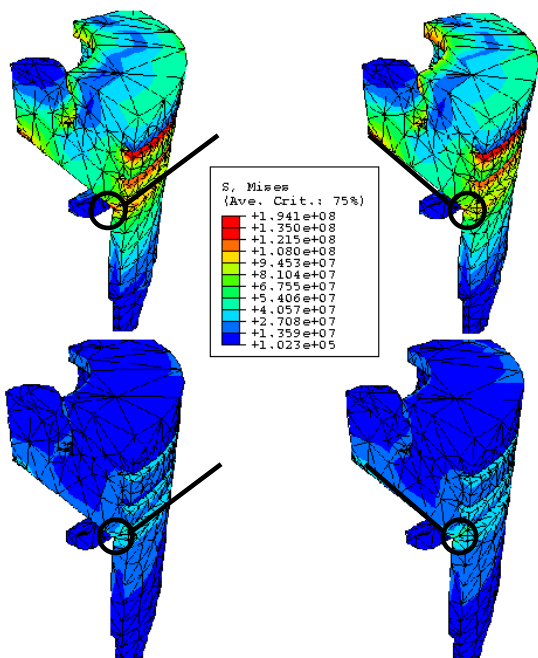
ต่ำสุดของลูกสูบเหล็กหล่อจะต่ำกว่าประมาณ 35 % ของอะลูมิเนียมอัลลอยโดยจะเกิดที่กระโปรงด้านล่างของลูกสูบ ทั้งนี้เนื่องจากค่าการนำความร้อนของเหล็กหล่อต่ำกว่าอะลูมิเนียมอัลลอยประมาณสามเท่า อย่างไรก็ตามค่าความจุความร้อนจำเพาะต่อปริมาตรลูกสูบของเหล็กหล่อสูงกว่าของอะลูมิเนียมอัลลอยประมาณสองเท่า ที่อุณหภูมิสูงด้วยเหตุนี้เองทำให้ระยะเวลาในการที่ลูกสูบเข้าสู่สภาวะสมดุลของลูกสูบทั้งสองชนิดแตกต่างกัน โดยที่เหล็กหล่อจะใช้ระยะเวลา 450 วินาที ส่วนของอะลูมิเนียมอัลลอยจะใช้เวลาประมาณ 350 วินาที เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2 ที่บริเวณพื้นที่ร่องแหวนและด้านข้างของลูกสูบชนิดเดียวกันทั้งสองสภาวะ (เครื่องร้อนและเครื่องเย็น) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดที่สภาวะเครื่องเย็นมากกว่าเครื่องร้อนซึ่งมีสาเหตุมาจากค่าการพาความร้อนที่ร่องแหวนจะสูงซึ่งเป็นลักษณะอย่างหนึ่งของการระบายความร้อนผ่านแหวนลูกสูบ

ในการวิเคราะห์ Temperature history ที่ตำแหน่งหัวลูกสูบและร่องแหวนตัวบนของลูกสูบทั้งสองชนิดที่ความเร็ว 4600 รอบต่อนาที ณ สภาวะเครื่องเย็นต่างๆ แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างระหว่างหัวลูกสูบกับแหวนลูกสูบจะแตกต่างกันมากในกรณีของลูกสูบเหล็กหล่อ โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะมีมากในช่วงต้นก่อน เวลา 200 วินาที และจะลดลงในช่วงหลังทั้งนี้เนื่องจากลูกสูบในช่วงแรกความร้อนจะสะสมในตัวลูกสูบ และช่วงหลังปริมาณที่ความร้อนเข้าและออกเกิดการสมดุลซึ่งลูกสูบไม่สามารถสะสมพลังงานความร้อนได้

## 6.2 พฤติกรรมทางด้านความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ

เมื่อนำผลจากอุณหภูมิของลูกสูบมาเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ความเค้นจะเห็นได้ว่าความเค้นจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างส่วนหัวของลูกสูบและกระโปรงลูกสูบดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3 ทั้งนี้เกิดเนื่องจากการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สูงหรือความเค้นเนื่องจากการขยายตัวซึ่งจะเกิดแล้วแต่ชนิดและสภาวะ

ต่างกัน ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นความเค้นสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างกันของลูกสูบทั้งสองชนิดที่สภาวะต่างกัน จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าความเค้นสูงสุดของลูกสูบเหล็กหล่อจะเกิดที่สภาวะเครื่องร้อนมากกว่าเครื่องเย็น ทั้งนี้เนื่องจากการขยายตัวของลูกสูบที่สภาวะเครื่องร้อนจะมีมากกว่าเครื่องเย็นทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของส่วนหัวลูกสูบ ในทางกลับกันความเค้นสูงสุดของลูกสูบอะลูมิเนียมจะเกิดขึ้นที่สภาวะเครื่องเย็นมากกว่าเครื่องร้อน ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของลูกสูบที่ส่วนหัวและส่วนกระโปรงจะมีมากกว่าที่สภาวะเครื่องร้อน อย่างไรก็ตามความเค้นที่ได้จากตารางดังกล่าวจะเป็นความเค้นส่วนสุดท้ายของสภาวะลูกสูบสมดุลทางด้านอุณหภูมิ แต่ในความเป็นจริงแล้วความเค้นที่เกิดขึ้นจะสูงมากก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุล คือความเค้นที่หัวลูกสูบซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะมีค่าสูงในช่วงแรกและจะลดลงในช่วงสุดท้ายของสภาวะสมดุลของอุณหภูมิ ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของ

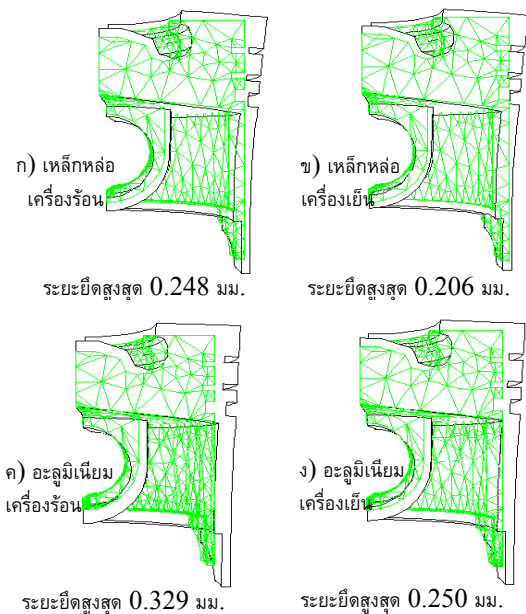


รูปที่ 3 การกระจายของความเค้นภายในลูกสูบที่ช่วงสุดท้ายของสภาวะสมดุล ณ ความเร็วรอบที่ 4600 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4 ค่าสูงสุดของความเค้นภายในลูกสูบทั้งสองชนิดและสองแบบ ขณะอยู่ที่สภาวะสมดุล ณ ความเร็วรอบที่ต่างๆ

ความเร็วของเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที)	ความเค้นของเหล็กหล่อ		ความเค้นของอะลูมิเนียมอัลลอย	
	สภาวะเครื่องร้อน	สภาวะเครื่องเย็น	สภาวะเครื่องร้อน	สภาวะเครื่องเย็น
2400	110.0 MPa (Max.)	94.1 MPa (Max.)	45.6 MPa (Max.)	52.6 MPa (Max.)
3600	156.1 MPa (Max.)	142.3 MPa (Max.)	62.4 MPa (Max.)	70.1 MPa (Max.)
4600	194.1 MPa (Max.)	178.3 MPa (Max.)	72.0 MPa (Max.)	80.3 MPa (Max.)

หมายเหตุ ค่าสูงสุดจะอยู่ที่รอยต่อระหว่างลูกสูบส่วนบนและกระโปรงลูกสูบ รูป 3 ประกอบ



รูปที่ 4 การยึดตัวของลูกสูบทั้งสองชนิดที่ความเร็ว 4600 รอบต่อนาที ณ สภาวะเครื่องยนต์ต่างๆ

อุณหภูมิจะมีมากในช่วงแรกและจะน้อยลงในช่วงท้ายของอุณหภูมิ จากการพิจารณาความเค้นในรูปที่ 3 จะเห็นว่าที่บริเวณแหวนลูกสูบทั้งสองชนิดจะเกิดความเค้นค่อนข้างสูงตลอดทั้งสภาวะเครื่องร้อนและเครื่องเย็น ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากที่บริเวณแหวนลูกสูบจะมีการระบายความร้อนสูงทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิมาก

ส่วนการขยายตัวของทั้งสองชนิดนั้นจะมีแนวโน้มเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4 คือ ที่สภาวะเครื่องร้อนมากกว่าเครื่องเย็นของลูกสูบทั้งสองชนิด แต่การขยายตัวของลูกสูบอะลูมิเนียมโดยรวมแล้วจะมีค่าสูงกว่าลูกสูบเหล็กหล่อ ด้วยเหตุนี้เองทำให้การออกแบบลูกสูบอะลูมิเนียมจะต้องมีระยะเผื่อสำหรับการขยายตัว เพื่อป้องกันผนังของลูกสูบเสียหายได้

## 7. สรุป

ก) ลูกสูบชนิดอะลูมิเนียมจะมีอุณหภูมิโดยรวมต่ำกว่าลูกสูบชนิดเหล็กหล่อเพราะค่าการนำความร้อนสูงจะทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของหัวลูกสูบกับกระโปรงลูกสูบมีค่าต่างกันน้อย ส่งผลให้ปริมาณความร้อนจากหัวลูกสูบสามารถระบายออกได้ที่กระโปรงลูกสูบโดยการพาความร้อนมากกว่าลูกสูบเหล็กหล่อ ดังนั้นทำให้อุณหภูมิภายในลูกสูบโดยรวมลดลง อีกทั้งลูกสูบอะลูมิเนียมจะเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่าลูกสูบเหล็กหล่อเนื่องจากค่าความจุความร้อนต่ำกว่า

ข) แนวโน้มของอุณหภูมิ,ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ การขยายตัวภายในลูกสูบจะมีทิศทางเดียวกันขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ลูกสูบมีค่ามากในขณะที่ปริมาณความร้อนออกสู่ลูกสูบมีเท่าคงที่

ค) อุณหภูมิการหล่อเย็น (สภาวะเครื่องร้อนหรือเย็น) จะมีผลต่อความเค้นของลูกสูบมาก ทั้งนี้เกิดเนื่องจากอุณหภูมิการหล่อเย็นส่งผลต่อปริมาณความร้อนออกสู่ลูกสูบตรงจุดบริเวณที่การหล่อเย็นของลูกสูบ เช่นบริเวณแหวนลูกสูบ ทำให้อุณหภูมิที่บริเวณนั้นสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการหล่อเย็น

ง) ความเค้นภายในของลูกสูบเกิดขึ้นจากการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในลูกสูบ อีกทั้งเกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของลูกสูบเอง เช่น ร่องของหัวลูกสูบ

จ) ลูกสูบของเหล็กหล่อจะเกิดความเค้นมากกว่าอะลูมิเนียมซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการยึดตัวแบบไม่หดกลับได้มากกว่าและส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ในที่สุด ในทางกลับกันการขยายตัวของอะลูมิเนียมจะมีค่ามากกว่าเหล็กหล่อ ด้วยเหตุนี้เองทำให้การออกแบบระยะห่างระหว่างลูกสูบและเสื้อสูบมีค่ามากกว่าเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายเนื่องจากการขยายตัว

## เอกสารอ้างอิง

1. จอห์น บี. เฮย์วูด. เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ทฤษฎีและการคำนวณ. แปลโดยวีระศักดิ์ กรัยวิเชียร. กรุงเทพฯ : วิทยพัฒน์, 2543.
2. บุญธรรม ภัทราจารุกุล. เครื่องยนต์แก๊สโซลีน. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2543.
3. ABAQUS, Version 6.2, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2001
4. ANSYS, Version 5.4, Swanson Analysis Systems, Inc., 1994
5. Gilbert, G. N. J.. 'Engineering Data On Gray Cast Irons-- SI Unit', British Cast Iron Research Association, BCIRA, 1977.
6. HIBBELER, R.C. MECHANICS of MATERIALS. Prentice Hall International, Inc., 1997.
7. Frank P. Incropera and David P. DeWitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Fourth Edition, School of Mechanical Engineering Purdue University, 1996.
8. Chin-Hsiu Li, Piston Thermal Deformation and Friction Considerations. Detroit, Michigan, 1982.