

## การสำรวจพฤติกรรมการนำความร้อนแบบไม่เชิงเส้นของผ้าเบรกรถยนต์

ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย<sup>1</sup>, สุภชัย หลักล้า<sup>2</sup> และ ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี<sup>3</sup>  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ถนนประชาราษฎร์ 1 กรุงเทพฯ 10800

### บทคัดย่อ

ผ้าเบรกถือเป็นชิ้นส่วนสำคัญด้านความปลอดภัยของรถยนต์ แต่ในปัจจุบันผู้ผลิตชิ้นส่วนผ้าเบรกต่างประสบปัญหาด้านสมบัติทางความร้อนของวัสดุ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการรักษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและความปลอดภัยในการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมการนำความร้อนของผ้าเบรกรถยนต์ โดยใช้ผ้าเบรกที่มีส่วนผสมหลักแตกต่างกัน 3 สูตร ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบริษัทคอมพิวเตอร์เนชั่นแนล (1994) จำกัด โดยทำการจำลองการใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 400 °C ที่สภาวะความดัน 1, 5 และ 8 MPa จากนั้นทำการตรวจวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) เพื่อคำนวณค่าการนำความร้อนแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่างๆ ควบคู่ไปกับการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สภาวะการใช้งานเดียวกัน ผลการทดสอบสะท้อนให้เห็นว่าผ้าเบรกแต่ละชนิดมีการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำความร้อนแบบไม่เชิงเส้น โดยผ้าเบรกที่มีส่วนผสมจากไฟเบอร์สูงจะมีค่าการนำความร้อนค่อนข้างแปรปรวน ในขณะที่สารหล่อลื่นที่มีอยู่ในผ้าเบรกจะช่วยให้ค่าการนำความร้อนมีเสถียรภาพในสภาวะอุณหภูมิที่หลากหลายที่ความดันเดียวกัน ในทางตรงกันข้าม ผ้าเบรกที่ประกอบด้วยทองแดงปริมาณมากจะมีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิเดียวกัน แม้ว่าจะใช้งานที่ความดันแตกต่างกัน ซึ่งค่าการนำความร้อนดังกล่าวจะแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจริง

**คำสำคัญ :** การนำความร้อน / ผ้าเบรก / สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

\* Corresponding author : phupoom.p@rmutp.ac.th

1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
2 อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

## An Investigation on Non-linear Thermal Conductivity Behavior of Brake Pads

Phupoom Puangcharoenchai<sup>1\*</sup>, Supachai Lakkam<sup>2</sup> and Songwut Mongkonerdmance<sup>3</sup>

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Pracharat 1 Road, Bangkok Thailand 10800

### Abstract

Brake pads are an important part of the automotive safety. Nevertheless, brake pads manufacturer are facing with a problem related to the pad heat transfer properties, which subsequently affect the friction coefficient of the pads and hence the safety of the automobiles using such pads. This study therefore aimed at investigating the thermal conductivity behavior of 3 different brake pads, which were supported by Compact International (1994) Co., Ltd. Experiments were conducted at simulated brake conditions at temperatures between 50 and 400°C and at applied pressures of 1, 5 and 8 MPa. The non-linear thermal conductivity values of the pads were calculated from the temperature under steady state condition. The results showed that the pads composing of high-fiber content exhibited fluctuating thermal conductivity values. Lubricants presented in the pads could nevertheless helped improve the stability of the thermal conductivity at different temperatures at the same applied pressure. On the other hand, the pads with high copper content exhibited narrower range of thermal conductivity at different applied pressures at the same temperature. The conductivity value was noted to be in inverse proportion with the coefficient of kinetic friction.

**Keywords :** Heat Conductivity / Brake Pads / Friction of Coefficient

---

\* Corresponding author : [phupoom.p@rmutp.ac.th](mailto:phupoom.p@rmutp.ac.th)

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering.

## 1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์ได้มีการเติบโตและเข้ามามีบทบาทอย่างมากในประเทศไทย ผ้าเบรกถือว่าเป็นวัสดุความเสียดทานที่เป็นอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีบทบาทในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ และด้วยหน้าที่การทำงานของผ้าเบรกที่จำเป็นจะต้องสัมผัสกับจานเบรกที่เป็นโลหะในช่วงสภาวะอุณหภูมิสูงอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้บ่อยครั้งที่ผ้าเบรกไม่สามารถระบายความร้อนและรักษาสมบัติของตัวเองได้ (เกิดการเฟดตัว) เป็นสาเหตุให้ผ้าเบรกแตกกร้าว และหลุดร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผ้าเบรกชนิดดรัมเบรกที่มีความสามารถระบายความร้อนต่ำกว่าแบบดิสก์ นอกจากนี้ความเร็วรถยนต์ยังเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของจานเบรกในขณะที่เบรก และเป็นปัจจัยส่งเสริมให้เกิดการสั่นสะเทือน[1] อีกทั้งยังกระทบต่อการสูญเสียความสามารถในการสร้างแรงเสียดทาน นำไปสู่การเสียความควบคุมเกิดอันตรายต่อผู้ขับขี่และผู้ร่วมทางบนท้องถนนในที่สุด

เนื่องจากผ้าเบรกเป็นวัสดุผสมที่ผลิตจากสารตั้งต้นมากกว่า 1 ชนิด ดังนั้นพฤติกรรมของวัสดุดังกล่าวจึงมีความหลากหลายแต่ต่างกันไปตามส่วนผสม ค่าการนำความร้อนจึงถือเป็นสมบัติสำคัญที่ส่งผลกระทบอย่างมากต่อการใช้งาน เนื่องจากเป็นค่าที่ชี้วัดความสามารถส่งถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการห้ามล้อไปยังอุปกรณ์ใกล้เคียง และเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดความเสียหาย ไม่เพียงแต่กระทบต่อความสามารถในการรักษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่ออายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ข้างเคียงด้วย ซึ่งผลกระทบที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะส่งผลโดยตรงต่อความปลอดภัยในการใช้งาน

จากการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุผสมพบว่าการทดสอบหาสมบัติหลายด้านจากวัสดุผสมหลายชนิด ซึ่งมีจุดประสงค์ของการศึกษาแตกต่างกันออกไป สำหรับการศึกษพฤติกรรมความเครียดของวัสดุผสมสามารถใช้วิธี Compressive split Hopkinson pressure bar (SHPB) เพื่อหาสมบัติการอัดตัวในลักษณะระนาบการสั่นของวัสดุผสมระหว่าง แก้ว/อีพอกซี และคาร์บอน/อีพอกซีได้ โดยมุ่งเน้นการวัดค่าความเครียดบริเวณตำแหน่งการตัดตัว

สูงสุด[2] ซึ่งผลของการศึกษาคือค่าสมบัติของวัสดุที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบผลิตตามจุดประสงค์การใช้งาน

นอกจากนี้ยังการทดสอบการอัดตัวของผ้าเบรกที่ได้จากส่วนผสมที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของผ้าเบรก[3] และการหาทั้งความเค้นและความเค้นเฉือนของวัสดุผสมคาร์บอน[4] ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และในห้องปฏิบัติการที่บรรจุก๊าซออกอนที่อุณหภูมิ 1,000°C ภายใต้สภาวะความดันต่างๆ เพื่อคำนวณหาความเค้นเฉือน 1 มิติ และ 2 มิติ ทำให้เข้าใจพฤติกรรมวัสดุมากขึ้นและสามารถนำผลจากการทดสอบไปช่วยออกแบบผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้

สำหรับวิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผ้าเบรก โดยการประยุกต์ใช้เครื่องทดสอบแบบ Universal Testing ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ [5] และการทดสอบสมบัติทาง Tribology โดยวิธีการลากผ่านระนาบเพื่อตรวจสอบอิเล็กทรอนิกส์ผ่านเครื่องมือวัดไมโครสโคป และฉายรังสีเพื่อตรวจสอบความร้อนที่เกิดขึ้นหลังการทดลอง[6] ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อเป็นการทดสอบทางเลือกที่สามารถลดต้นทุนด้านการทดสอบได้

นอกเหนือจากการวิเคราะห์วัสดุผสมหลังจากการผลิตแล้ว การคำนึงถึงสารตั้งต้นก่อนการผลิตยังเป็นการศึกษาปัจจัยทางกระบวนการผลิตที่มีผลต่อสมบัติทาง Tribology ของวัสดุ[7] โดยมีผลลัพธ์หลายประเด็นเช่น การต้านทานการสึกหรอ และความสามารถในการรักษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นสมบัติด้านการนำความร้อนจึงถือได้ว่าเป็นอีกประเด็นของการศึกษา[8] ซึ่งได้ยกเอาวัสดุความเสียดทานที่มีสมบัติเป็นวัสดุผสมโดยมียางเป็นสารตั้งต้นพื้นฐานผสมกับสารอีกหลายชนิด และทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำสร้างความเชื่อมโยงระหว่างสมบัติทาง Tribology และสารตั้งต้นของวัสดุได้

จากการสำรวจวรรณกรรมดังกล่าวยังไม่พบการศึกษาค่าการนำความร้อนของผ้าเบรกซึ่งเป็นสมบัติสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการแตกกร้าวและหลุดร่อนของผ้าเบรกในการใช้งาน

## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การสำรวจพฤติกรรมการนำความร้อนของผ้าเบรกจำเป็นจะต้องเข้าใจลักษณะการใช้งานที่เกิดขึ้นกับผ้าเบรก โดยทางทฤษฎีวัสดุที่เคลื่อนที่เสียดทานกันจะเกิดความร้อนซึ่งส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เช่นเดียวกับการเบรกแต่ละครั้ง แรงที่กดลงที่ผ้าเบรกจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งรถยนต์หยุดสนิท ดังนั้นเพื่อให้ผลทดสอบมีความคล้ายคลึงกับการใช้งานจริง จึงได้กำหนดแรงกดในการทดสอบแบ่ง

เป็น 3 ระดับ และบันทึกค่าที่ได้จากการทดสอบก่อนนำไปคำนวณหาค่าการนำความร้อน

### 2.1 การเตรียมผ้าเบรก

ในการทดสอบจะบันทึกอุณหภูมิโดยแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิลดลงการทดสอบชิ้นงานจะทำการทดสอบจากตัวอย่างผ้าเบรก 3 ชนิด คือ ชนิด A ชนิด B และชนิด C โดยแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบของวัสดุต่างๆ ดังแสดงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของผ้าเบรกแต่ละชนิด

| ส่วนประกอบ  | ชนิด A<br>(%) | ชนิด B<br>(%) | ชนิด C<br>(%) |
|-------------|---------------|---------------|---------------|
| โฟเบอร์     | 2             | 15            | 18            |
| สารหล่อลื่น | 10            | 15            | 13            |
| ทองแดง      | 5             | 6             | 15            |
| อื่นๆ       | 83            | 64            | 63            |

ชิ้นงานทดสอบ (ผ้าเบรก) จะถูกกำหนดขนาดให้มีขนาด 7 mm × 11 mm × 22 mm จากนั้นนำไปเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 mm จำนวน 2 รู เพื่อติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิระยะห่างระหว่างจุด 7 mm ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นงานทดสอบ

### 2.2 เครื่องกดผ้าเบรก และตู้รักษาอุณหภูมิ

เครื่องทดสอบ Tensile testing machine ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อกดชิ้นงานทดสอบ โดยเพิ่มการติดตั้งตู้รักษาอุณหภูมิเข้ากับเครื่องทดสอบ ภายในตู้ทำการบดอัด ซึ่งสามารถรักษาอุณหภูมิระหว่างการทดสอบได้ค่าค่อนข้างคงที่ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องกดผ้าเบรก และตู้รักษาอุณหภูมิ

### 2.3 สภาวะการทดสอบ

ในการทดสอบเพื่อให้ค่าเหมือนกับสภาวะการใช้งานจริงจึง ดึงนั้นการทดสอบจึงใช้ผ้าเบรกรยชนิดแบบ ดิสก์ชนิด A, B และ C สภาวะความดันที่ 1, 5 และ 8 MPa ภายใต้แรงกด 242, 1,210 และ 1,936 N ด้วย

การเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 50 ถึง 400 °C และลดอุณหภูมิ ลงจาก 400 ถึง 50 °C ทำการทดสอบบนพื้นที่หน้าตัด ขนาด  $2.42 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  สำหรับสภาวะการทดสอบแสดง ดังตารางที่ 2

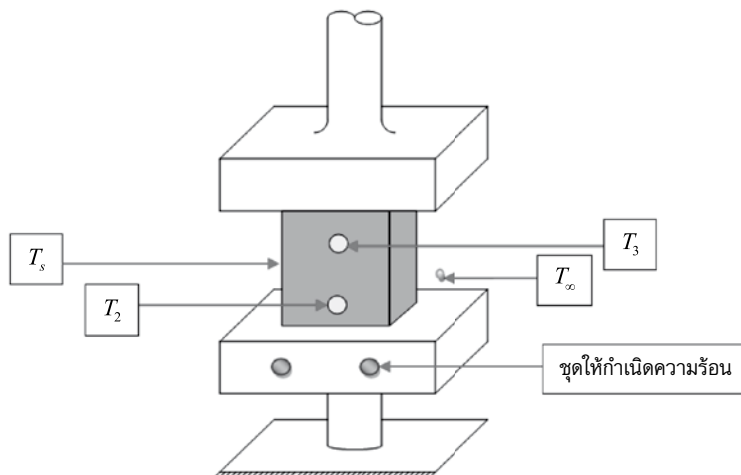
ตารางที่ 2 สภาวะการทดสอบ

| ชนิดของ<br>ผ้าเบรก | ความดัน<br>(MPa) | แรงกด<br>(N) | อุณหภูมิ (C) |            | พื้นที่หน้าตัดชิ้นทดสอบ<br>( $\text{m}^2$ ) |
|--------------------|------------------|--------------|--------------|------------|---|
|                    |                  |              | UP           | Down       |   |
| A                  | 1                | 242          |              |            | $2.42 \times 10^{-4}$                       |
|                    | 5                | 1,210        |              |            |   |
|                    | 8                | 1,936        |              |            |   |
| B                  | 1                | 242          | 50 ถึง 400   | 400 ถึง 50 |   |
|                    | 5                | 1,210        |              |            |   |
|                    | 8                | 1,936        |              |            |   |
| C                  | 1                | 242          |              |            |   |
|                    | 5                | 1,210        |              |            |   |
|                    | 8                | 1,936        |              |            |   |

### 2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ในการคำนวณหาค่าการนำความร้อนของผ้าเบรก ทั้ง 3 ชนิด (A, B และ C) ทางผู้จัดทำโครงการมีความ จำเป็นต้องทราบข้อมูลของอุณหภูมิผิว ( $T_s$ ) อุณหภูมิในเนื้อ

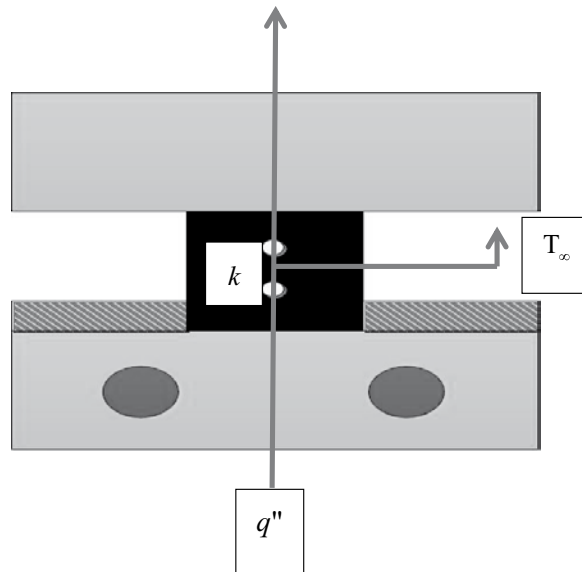
ผ้าเบรกที่ติดกับหัวควดวัสดุ ( $T_3$ ) อุณหภูมิในเนื้อผ้าเบรก ที่ติดกับฐานรองรับ ( $T_2$ ) และอุณหภูมิโดยรอบ ( $T_\infty$ ) เพื่อให้ ง่ายต่อการพิจารณาทางคณะผู้จัดทำได้แสดงภาพตำแหน่ง การวัดอุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิ

จากแนวคิดและหลักการดังกล่าว การหาค่าการนำความร้อนโดยการให้ความร้อนวัตถุตั้งรูปที่ 3 ความร้อนจะถูกถ่ายเทเข้าวัตถุด้วยการนำความร้อน จนกระทั่งวัตถุเกิดสภาวะอิมิตัว หลังจากนั้นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

จากผิววัตถุออกไปสู่สิ่งแวดล้อมจะเกิดขึ้นอย่างคงที่ เนื่องจากอยู่ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิซึ่งเป็นระบบปริมาตรคงที่ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การถ่ายโอนความร้อนในชั้นงานทดสอบ

จากผลการทดสอบ ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาค่า Rayleigh number ดังสมการที่ 1

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \tag{1}$$

เมื่อ

- $Ra_L$  คือ Rayleigh number
- $g$  คือ แรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.81\text{m/s}^2$ )
- $\beta$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร,  $\text{K}^{-1}$
- $\nu$  คือ ความหนืด,  $\text{m}^2/\text{s}$
- $\alpha$  คือ ค่าแพร่กระจายความร้อน,  $\text{m}^2/\text{s}$
- $T_s$  คือ อุณหภูมิผิววัตถุ,  $\text{K}$
- $T_\infty$  คือ อุณหภูมิที่สิ่งแวดล้อม,  $\text{K}$
- $L$  คือ ระยะทางการเคลื่อนความร้อน,  $\text{m}$

จากนั้นจะอาศัยการตั้งสมมุติฐานการพาความร้อนแบบอิสระ ซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ

ภายในของไหล เนื่องจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จนทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้นซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$C Ra_L^n = \frac{\bar{h}_c L}{k} \tag{2}$$

เมื่อ

- $\bar{h}_c$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน,  $\text{W/m}^2 \text{K}$
- $L$  คือ ความยาว,  $\text{m}$
- $k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของไหล,  $\text{W/m K}$
- $C, n$  คือ ค่าคงที่  $C = 0.59$  และ  $n = \frac{1}{4}$  เมื่อ  $(10^4 \leq Ra_L \leq 10^9)$  หรือ  $C = 0.10$  และ  $n = \frac{1}{3}$  เมื่อ  $(10^9 \leq Ra_L \leq 10^{13})$

จากนั้นอาศัยหลักการสมดุลพลังงานของการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงที่(Steady state) ซึ่งจะไม่มีการเก็บพลังงานเดิมเข้าไปในวัตถุ และสามารถหาความ

สัมพัทธ์ได้จากสมการที่ (3)

$$k = \frac{\bar{h}_c A_2 (T_s - T_\infty) \Delta x}{(T_2 - T_3) A_1} \quad (3)$$

เมื่อ

$T_2$  คือ อุณหภูมิของจุดที่จุดแรก, K

$T_3$  คือ อุณหภูมิของจุดที่ต้องการวัด, K

$A_1$  คือ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน,  $m^2$

$A_2$  คือ พื้นที่รับความร้อนของวัตถุที่สัมผัสกับแผ่นให้ความร้อน,  $m^2$

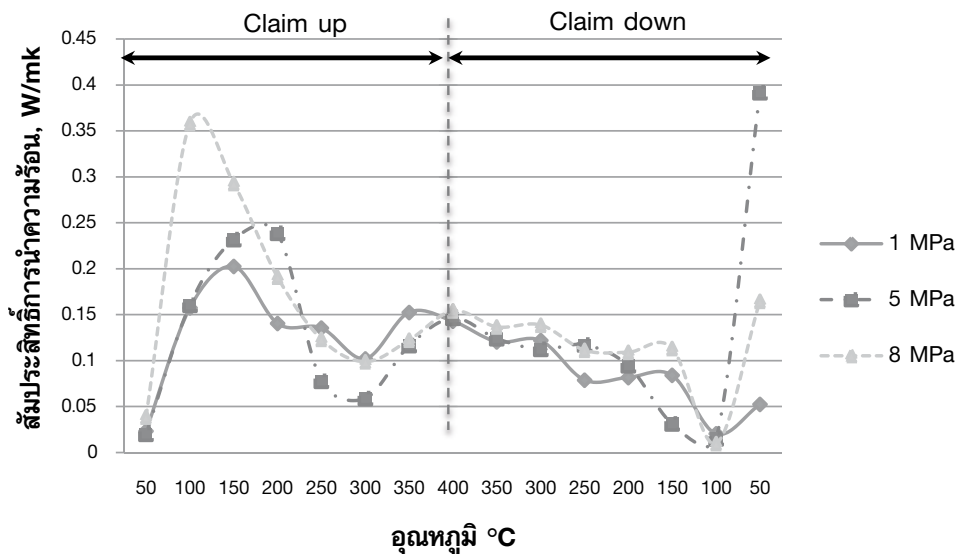
### 3. ผลการทดลอง

จากขั้นตอนการดำเนินโครงการดังกล่าว นำไปสู่การทดสอบผ้าเบรกทั้ง 3 ชนิด ภายใต้สภาวะการทดสอบที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 ถึง 400 °C (Climb up) และ

ลดอุณหภูมิลงจาก 400 ถึง 50 °C (Climb down) ที่ความดัน 1, 5 และ 8MPa ตามลำดับ โดยใช้ผ้าเบรกที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกันไป

#### 3.1 ผลการทดสอบผ้าเบรกชนิด A

ผลการทดสอบผ้าเบรกชนิด A แสดงให้เห็นว่าในช่วงการให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Claim up) ผ้าเบรกชนิด A มีค่าการนำความร้อนสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 150 °C ภายใต้สภาวะความดันที่ 8 MPa และมีค่าต่ำสุดที่ 300 °C ภายใต้สภาวะความดันที่ 5 MPa ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลมาจากการสะสมพลังงานความร้อนภายในของผ้าเบรกเมื่อได้รับความร้อน รวมไปถึงอุณหภูมิและเวลาที่ให้ความร้อน ในขณะที่ในช่วงลดอุณหภูมิ (Claim down) พบว่าผ้าเบรกชนิด A มีค่าการนำความร้อนลดลงใกล้เคียงกันในทุกๆ ความดัน อันเป็นผลมาจากการเย็นตัวลงอย่างอิสระดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการทดสอบผ้าเบรกชนิด A

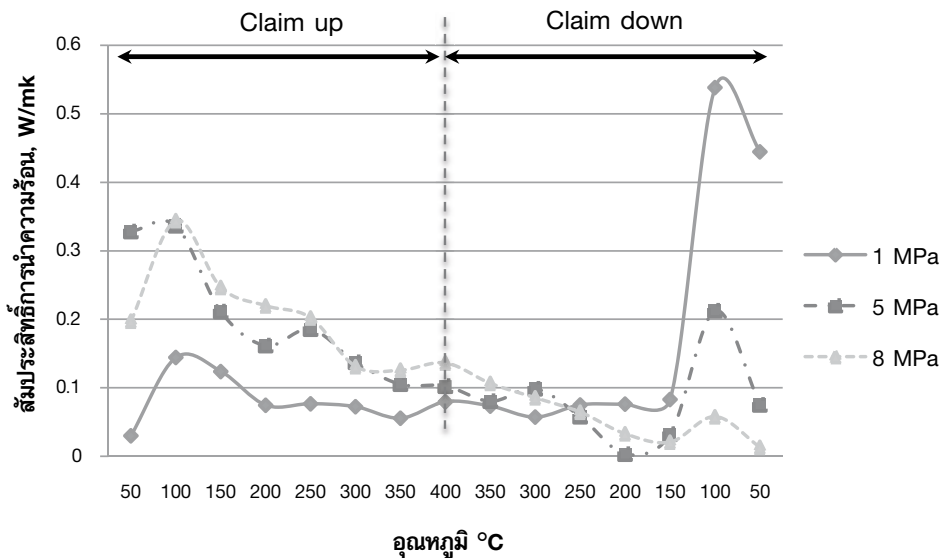
อย่างไรก็ตามในช่วงลดอุณหภูมิ (Claim down) จนกระทั่งอุณหภูมิมิมีค่า 100 °C ค่าการนำความร้อนลดลงต่ำที่สุด ที่ความดันที่ 8 MPa และหลังจากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 100 °C แล้วนั้นค่าการนำความร้อนกลับมีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความดัน 5 MPa ที่มีค่าสูงถึง 0.3917 W/mK เนื่องจากผ้าเบรกชนิดนี้มีส่วนผสมของโลหะน้อยกว่าผ้าเบรกชนิด B และ C

#### 3.2 ผลการทดสอบผ้าเบรกชนิด B

ผลการทดสอบ ของผ้าเบรกชนิด B พบว่าค่าการนำความร้อนสูงสุดในช่วงการให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Claim up) ยังคงเป็นการทดสอบที่ความดัน 8 MPa ที่อุณหภูมิ 100 °C เช่นเดียวกับกับผ้าเบรกชนิด A หากแต่พฤติกรรมของค่าการนำความร้อนที่ความดัน 5 MPa มีค่าใกล้เคียงกับที่ความดัน 8 MPa

ส่วนกรณีในช่วงลดอุณหภูมิ (Claim down) ค่าการนำความร้อนลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 150 °C หลังจากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 150 °C แล้วนั้นค่าการนำความร้อนกลับมีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ยิ่งที่ความดัน 1 MPa ที่อุณหภูมิ 100 °C ที่มีค่าสูงที่สุดถึง 0.5385 W/mK จากนั้นพฤติกรรมค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 ไปจนถึง 50 °C จะมีค่าลดลงต่ำที่สุดที่ความดันที่ 8 MPa ที่อุณหภูมิ 50 °C ดังรูปที่ 6



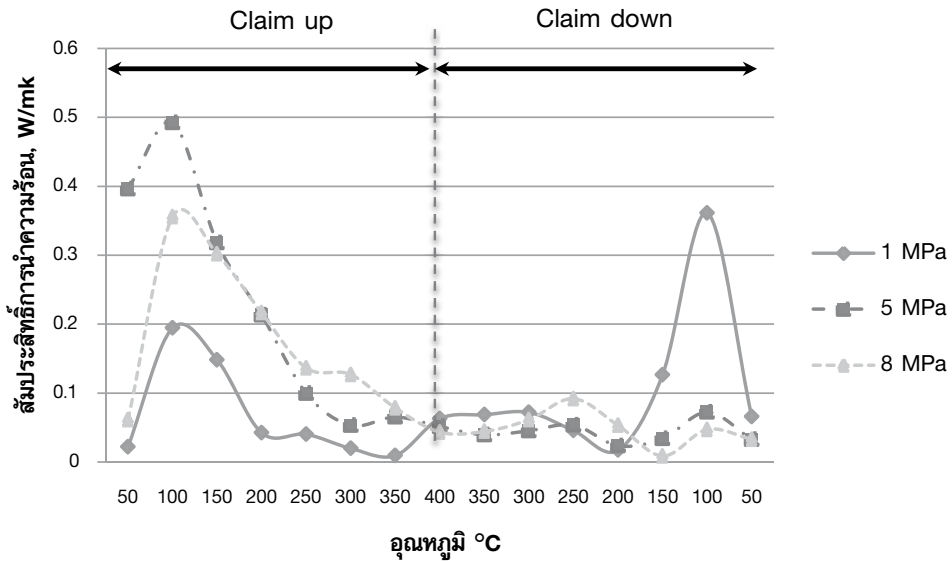
รูปที่ 6 ผลการทดสอบผ้าเบรกชนิด B

3.3 ผลการทดสอบผ้าเบรกชนิด C

ผลการทดสอบ ของผ้าเบรกชนิด C พบว่ามีค่าการนำความร้อนสูงสุดในช่วงการให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Claim up) ถึง 100 °C ภายใต้สภาวะความดันที่ 5 MPa ซึ่งมีค่าสูงถึง 0.4923 W/mK และมีค่าต่ำสุดที่ 350 °C ภายใต้สภาวะความดันที่ 1 MPa โดยลักษณะจะเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบของค่าการนำความร้อนแต่ละสภาวะความดันเกิดจากในผ้าเบรกชนิดนี้มีส่วนผสมของไฟเบอร์สูงถึงร้อยละ 18 ซึ่งมากกว่าผ้าเบรกชนิดอื่นดังตารางที่ 1

เมื่อเทียบกับผ้าเบรกชนิด A และ B จะเห็นได้ว่าร้อยละ ส่วนผสมของไฟเบอร์ที่สูงจะส่งผลต่อความแปรปรวนของค่าการนำความร้อนที่สูงตามไปด้วย ขณะเดียวกันในช่วงลดอุณหภูมิ (Claim down) พบว่าผ้าเบรกชนิด C ค่าการนำความร้อนยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดต่ำสุดที่อุณหภูมิ 200 °C หลังจากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 200 °C ค่าการนำความร้อนกลับมีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นถึงช่วงอุณหภูมิ 100 °C แล้วจึงปรับตัวลดลงอีกครั้งดังรูปที่ 7 แทรกรูปที่ 7



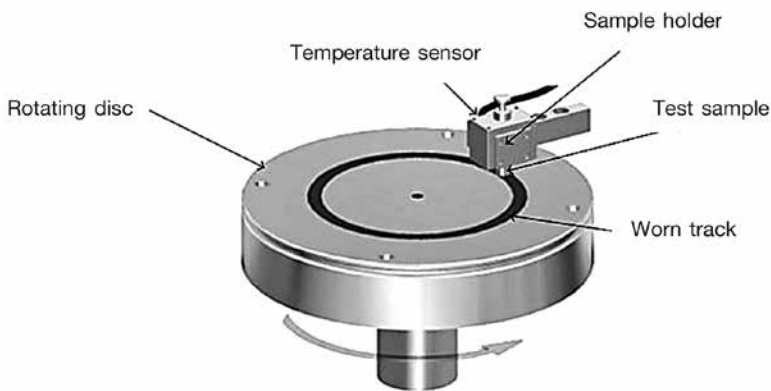


รูปที่ 7 ผลการทดสอบผ้าเบรกชนิด C

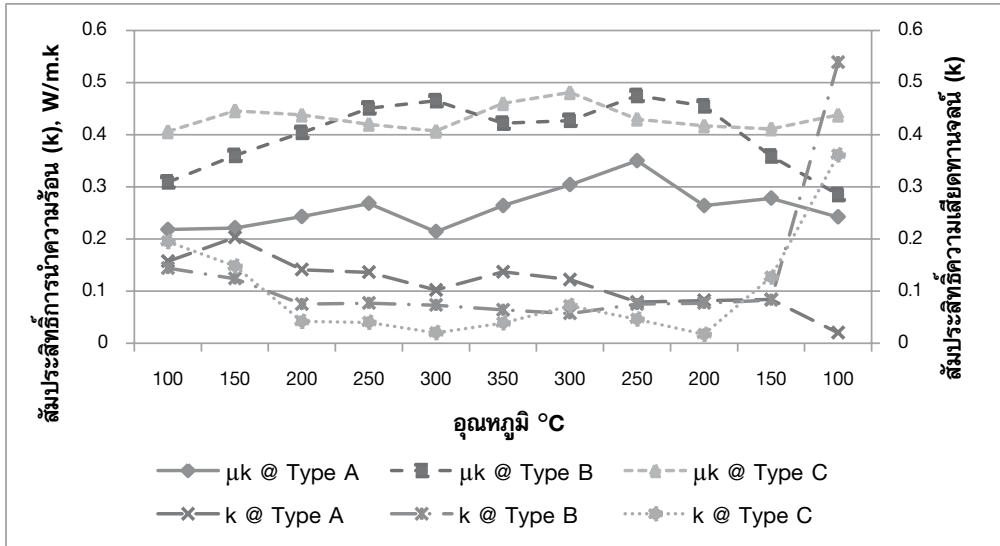
### 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

จากผลการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของผ้าเบรก ได้ถูกนำมาเชื่อมโยงเข้ากับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในสภาวะการใช้งานเดียวกันที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบบ Pin on disk โดยเครื่องทดสอบดังกล่าวอาศัยการหมุนของ Rotating disc เพื่อจำลอง

สภาวะการใช้งาน และใช้ Sample holder ทำการกดผ้าเบรกซึ่งเป็นวัสดุทดสอบ (Test sample) ตามสภาวะความดันที่กำหนด โดยมีตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature sensor) ค่อยตรวจวัดอุณหภูมิการใช้งาน ดังรูปที่ 8 ซึ่งเป็นข้อมูลการทดสอบจาก บริษัท คอมแพ็คอินเตอร์เนชั่นแนล (1994) จำกัด (บริษัทผู้ผลิต) ของผ้าเบรกทั้ง 3 ชนิด คือ A, B และ C ที่ความดัน 1 MPa ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 เครื่องทดสอบแบบ Pin on disk



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกแต่ละชนิด

จากรูปที่ 8 สะท้อนให้เห็นถึงว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น พฤติกรรมค่าการนำความร้อนจะลดลงซึ่งแปรผันตามกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่เพิ่มขึ้น และในขณะที่ในช่วงลดอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าลดลงแปรผันตามกับค่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกชนิด C จะมีค่ามากที่สุด จากนั้น คือ ผ้าเบรกชนิด B และ A ตามลำดับ ซึ่งถ้าพิจารณาจากสัดส่วนผสมของผ้าเบรกที่มีทองแดง ที่มีสัดส่วนผสมร้อยละ 15, 6 และ 5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผ้าเบรกจะมีค่าการนำความร้อนลดลงในช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้นเช่นกันในช่วงอุณหภูมินี้

**4. สรุป**

จากผลการสำรวจพฤติกรรมการนำความร้อนแบบไม่เชิงเส้นของผ้าเบรคนั้นพบว่า ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบมีค่าความแตกต่างระหว่างผ้าเบรกแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสมของผ้าเบรกแต่ละชนิด ซึ่งจากการทดสอบพบว่าค่าการนำความร้อนที่ได้เป็นแบบไม่เชิงเส้น เนื่องจากวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ผลิตผ้าเบรกเป็นวัสดุผสมและยังพบว่าผ้าเบรกที่มีส่วนผสมของเหล็กและทองแดงใน

สัดส่วนที่สูงจะมีค่าการนำความร้อนลดลงเมื่อใช้งานในสภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาผลกระทบของความดันที่มีผลต่อพฤติกรรมค่าการนำความร้อนพบว่า ในช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิขึ้น (Claim up) ค่าการนำความร้อนโดยรวมจะสูงสุดที่ความดัน 8 MPa

นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อุณหภูมิช่วง 100°C มีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นค่อนข้างมากในผ้าเบรกทุกชนิด ผลการทดสอบดังกล่าวถูกตั้งข้อสันนิษฐานว่า เนื่องจากพฤติกรรมค่าการนำความร้อนเป็นค่าที่ไม่คงที่ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นการนำความร้อนจากจุดที่ทำการตรวจวัดทั้ง 2 จุด ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (50 ถึง 150°C) จึงสามารถนำความร้อนได้ดี เนื่องจากอุณหภูมิจุดต้นทาง ( $T_2$ ) ค่อนข้างสูง (100°C) ในขณะที่อุณหภูมิจุดปลายทาง ( $T_3$ ) ยังค่อนข้างต่ำ (30 ถึง 50°C) ซึ่งแตกต่างกับในช่วงอุณหภูมิสูง (200°C ขึ้นไป) การนำความร้อนจากจุดต้นทาง ( $T_2$ ) ไปยังจุดปลายทาง ( $T_3$ ) จะมีค่าความต้านทานมากขึ้น จึงส่งผลต่อค่าการนำความร้อนที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และแตกต่างกันไปในแต่ละส่วนผสมของวัสดุที่นำมาทดสอบ

สำหรับการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากชนิดของผ้าเบรกแต่ละชนิดที่มีส่วนการผสมของสารตั้งต้น

ที่แตกต่างกัน และที่สภาวะความความดันต่างๆ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ผ้าเบรกชนิด C เป็นผ้าเบรกที่มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด เนื่องจากมีสัดส่วนผสมทองแดงมากที่สุดซึ่งจะทำให้การนำความร้อนในช่วงที่เหยียบเบรก (อุณหภูมิผ้าเบรกสูงขึ้น) มีค่าการนำความร้อนต่ำ อีกทั้งยังพบว่า ผ้าเบรกชนิด C ยังมีส่วนผสมของไฟเบอร์ในสัดส่วนที่สูงเช่นกัน ทำให้มีความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทก สัดส่วนทั้งหมดจะมีความสัมพันธ์กับสารหล่อลื่นเพื่อรักษาสมดุลในการเบรก ซึ่งอิทธิพลขององค์ประกอบของผ้าเบรกเหล่านี้ สามารถนำไปใช้ในการออกแบบให้สอดคล้องกับการใช้งานของผ้าเบรกแต่ละชนิดได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การใช้งานที่ทางผู้ผลิตกำหนดอีกด้วย

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท คอมแพ็คอินเตอร์เนชั่นแนล (1994) จำกัด สำหรับการสนับสนุนชิ้นงานทดสอบ และข้อมูลจำเพาะในครั้งนี้ อีกทั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Chutima, S., Kamnerdtong, T. and Siriwatatanapolkul, A. 2007, "Effect of Automotive Speed on The Behaviors of Brake Disc during Braking", *KMUTT Research and Development Journal*, 30 (2), pp. 277-292.
2. Naik, N.K. and Venkateswara, R.K., 2008, "High Strain Rate Behavior of Woven Fabric

Composites under Compressive Loading", *Materials Science and Engineering*, 474 (1-2), pp. 301-311.

3. Mongkonlerdmanee, S., Boonmee, P. and Lakkam, S., 2013, "Influence of Volume Fraction from Brake Linings to the Flexibility Behavior and Internal Energy", *KKU Research Journal*, 18 (2), pp. 297 – 310. (in Thai)

4. Curzio, E.L., Bowers, D. and Ferber, M.K., 1996, "The Interlaminar Tensile and Shear Behavior of a Unidirectional C---C composite", *Journal of Nuclear Materials*, 230 (3), pp. 226-232.

5. Lakkam, S. and Suwantaroj, K., 2012, "A Study of Friction Coefficient of Brake Pads Using Alternative Testing Method", *The Journal of KMUTNB.*, 22 (2), pp. 315 – 324.(in Thai)

6. Scieszka, S.F., 1980, "Tribological Phenomena in Steel-composite Brake Material Friction Pairs", *Wear*, 64 (2), pp. 367-378.

7. Ertan, R. and Yavuz, N., 2010, "An experimental Study on the Effects of Manufacturing Parameters on the Tribological Properties of Brake Lining Materials", *Wear*, 268 (11-12), pp. 1524-1532.

8. Shojaei, A., Fahimian, M. and Derakhshandeh, B., 2007, "Thermally Conductive Rubber-based Composite Friction Materials for Railroad Brakes – Thermal Conduction Characteristics", *Composites Science and Technology*, 67 (3), pp. 2665-2674.

