

การศึกษาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรกรถยนต์ Study of Heat Convection Coefficient in Automotive Brake Disc

สายประสิทธิ์ เกิดนิยม

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร 02-5870026 โทรสาร 025869541 อีเมล saps@kmitnb.ac.th

Saiprasit Koetnuyom

School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok
Tel: 0-25870026, Fax: 0-25869541, E-mail: saps@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ : ความถูกต้องของการวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ เช่น แบบจำลองโมเดล คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เป็นต้น หนึ่งในปัจจัยหลายๆ อย่างในการวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิคือ สภาพแวดล้อมต่างๆ เช่นพลังงานเข้าและออกจากระบบสำหรับจานเบรกรถยนต์ พลังงานออกจากจานเบรกส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของการพาความร้อนซึ่งทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของจานเบรกโดยรวม ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเบรกของรถยนต์ดีขึ้นเป็นต้น ด้วยเหตุนี้เองจุดประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ก็คือตรวจสอบสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของโรเตอร์และช่องระบายความร้อนของจานเบรกต่างๆ ไป อีกทั้งการตรวจสอบผลกระทบของความเร็วลมซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วของจานเบรกหรือของรถยนต์ ด้วยเหตุนี้เองงานวิจัยนี้จะทำการสร้างไดนาโมมิเตอร์ของจานเบรกและทำการทดสอบในอุโมงค์ลม ประกอบกับใช้ตัวทำความร้อนแบบไฟฟ้าบนหน้าสัมผัสของจานเบรกรถยนต์ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนของจานเบรกรถยนต์สามารถตรวจสอบได้โดยใช้หลักการของการทรงพลังงานและการวัดอุณหภูมิบนจานเบรกแทนที่จะใช้ผ้าเบรกขัดสีกับหน้าสัมผัสของจานเบรกเพื่อสร้างความร้อนให้เกิดกับจานเบรก ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรกจะมีค่ามากที่สุดที่โรเตอร์ด้านใน เนื่องจากช่องทางการถ่ายเทความร้อนโดยการนำของโรเตอร์ด้านในมีน้อยกว่าด้านนอก อีกทั้งค่านี้ขึ้นอยู่กับความเร็วรถยนต์หรือความเร็วลมสัมพันธ์กับความเร็วของรถยนต์

Abstract: The accuracy of any thermal model in finite element analysis is primarily dependent on several factors such as model, material properties etc. One of significant factors for temperature analysis is the boundary condition for energy input and output. For automotive brake discs, the energy output by heat convection is a major factor in controlling overall brake disc temperature. This results in greater braking efficiency and etc. For this reason, the objective of this work is to investigate the convective heat transfer coefficients of rotor, hub and vane in a typical vented disc. The influence of air speed that relates to the brake disc revolution or vehicle speed is also investigated. Thus, a compact dynamometer of brake disc was invented and was tested in a wind tunnel. With the application of an electrical heater on the brake disc rotor, the heat convection coefficients on brake disc can be determined from the energy conservation and temperature measurement on the brake disc instead of conventional technique by applying mechanical force against pads of brake disc. As a result, it reveals that the heat transfer coefficients are high at inboard rotor disc due to less heat transfer by conduction. In addition, it is dependent on wind speed that related to the vehicle speed.

Keywords: Brake disc temperature, heat transfer coefficient, heat convection

1. บทนำ

งานเบรกรถยนต์เป็นส่วนใหญ่จะติดตั้งอยู่ที่เพลาหน้าของรถยนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่ขัดสีกับผ้าเบรกส่วนที่เป็นหมวก และส่วนที่เป็นคอ ส่วนที่ขัดสีของงานเบรกจะเป็นตัวที่ทำหน้าที่กำเนิดแรงเสียดทานระหว่างโรเตอร์และผ้าเบรกที่อยู่กับที่เพื่อให้เกิดแรงเบรกกระหว่างยางรถยนต์กับพื้นถนนงานเบรกรถยนต์

ด้วยสาเหตุที่ว่าวัสดุที่ทำงานเบรกจะมีคุณสมบัติเชิงกลลดลงและสูญเสียประสิทธิภาพการเบรกที่อุณหภูมิการทำงานสูงนี้เอง ทำให้มีความจำเป็นต้องนำพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเบรกออกจากงานเบรกรถยนต์ในทางทฤษฎีปริมาณความร้อนจะออกจากระบบได้มากเมื่อมีพื้นที่ที่สัมผัสอากาศมากขึ้นด้วย ทำให้งานเบรกในยุคปัจจุบันนี้จะออกแบบให้มีครีบบ่อยเพื่อช่วยในการระบายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในงานเบรกออกจากระบบในขณะขับขี่ที่ความเร็วสูง โดยปกติแล้วงานเบรกรถยนต์แบบไม่มีครีบบ่อยก็ให้ผลดีในแง่ของการลดอัตราการเกิดความเค้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นด้านในและด้านนอกของโรเตอร์จะเกิดสูงใกล้เคียงกันส่งผลให้ความเค้นไม่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับงานเบรกแบบมีครีบบ่อยซึ่งอุณหภูมิด้านนอกกับด้านในของโรเตอร์แบบมีครีบบ่อยจะแตกต่างกัน แต่อุณหภูมิด้านในของครีบบ่อยจะต่ำส่งผลให้เกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน แต่ถ้างานเบรกทั้งสองแบบ (แบบมีครีบบ่อยและไม่มีครีบบ่อย) ทำงานอย่างต่อเนื่องแล้วงานเบรกของรถยนต์แบบมีครีบบ่อยจะให้ ประสิทธิภาพการเบรกที่ดีกว่า เนื่องจากประสิทธิภาพการระบายความร้อนของงานเบรกแบบมีครีบบ่อยจะดีกว่า [1,2] ด้วยเหตุนี้เองส่งผลให้มีความสำคัญของการพาความร้อนของงานเบรกมีความสำคัญมากในการบอกพฤติกรรมทางด้านอุณหภูมิของงานเบรก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมด้านอุณหภูมิของงานเบรกโดยใช้วิธีการทางด้าน ไฟในทออีลีเมนต์[3,4] ซึ่งต้องการขอบเขตของการถ่ายเทความร้อน-เข้า และออกจากงานเบรก ในทางปฏิบัติแล้วการวิเคราะห์การพาความร้อนของงานเบรกส่วนใหญ่ได้มาจากการปรับแต่งค่าการพาความร้อนของงานเบรกเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของงานเบรก [5] หรือได้มาจากการรวบรวมผลการทดลองที่ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมพาความร้อนของแบบจำลองที่มีรูปร่างต่างๆ เช่น ทรงกระบอก หรือ ทรงรูปจานกลม ในขณะที่มีลมพัดผ่าน [6,7] เพื่อนำมาวิเคราะห์เป็นการพาความร้อนของงานเบรก ดังนั้นจุดประสงค์ของบทความนี้ก็คือ ศึกษาและตรวจสอบสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรกที่ตำแหน่งต่างๆ บนงานเบรก รวมทั้งพฤติกรรมและ

แนวโน้มของการพาความร้อนของงานเบรกที่ความเร็วลมต่างๆ ที่สัมพันธ์กับความเร็วของรถยนต์ ดังนั้นงานเบรกของรถกระบะ ขนาดกลางจะถูกนำมาวิเคราะห์ โดยใช้หลักของการทรงพลังงาน โดยใช้แผ่นความร้อนแบบไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนเข้าสู่งานเบรกแทนที่ จะใช้คาลิเปอร์และผ้าเบรก ทั้งที่เพื่อสามารถที่กำหนดปริมาณ ความร้อนเข้าสู่งานเบรกได้ ส่วนสัมประสิทธิ์การพาความร้อนออก สู่ระบบจะได้มาจากการคำนวณของอุณหภูมิของงานเบรกที่ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้หลักการที่ว่าพลังงานความร้อนไม่มีการสูญหาย

2. อุปกรณ์การทดลองและขั้นตอน

ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรก อุปกรณ์และชุดทดลองต่างๆ จำเป็นที่จะต้องสร้างขึ้นเพื่อทำการเลียนแบบสภาวะการพาความร้อนของงานเบรกในขณะที่มีลมผ่าน โดยชุดทดลองและอุปกรณ์ต่างๆ นี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสี่ชุดใหญ่ๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.1 ชุดขับเคลื่อนงานเบรก จะมีหน้าที่ขับเคลื่อนงานเบรกให้หมุนไปเสมือนสภาวะการขับเคลื่อนจริงในท้องถนนดังแสดงในรูปที่ 1 ในสภาวะจริงบนท้องถนนนั้นรถยนต์ จะมีความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอตลอดการขับเคลื่อน ดังนั้นชุดขับเคลื่อนงานเบรกจึงจำเป็นต้องสามารถปรับเปลี่ยน ความเร็วรอบได้ตามความเหมาะสม ให้เหมือนสภาวะจริงที่เกิดขึ้น ซึ่งชุดขับเคลื่อนงานเบรกประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกันคือ มอเตอร์ สายพาน และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งทั้งสามส่วนนี้จะทำงานสัมพันธ์กันดังนี้ คือ มอเตอร์จะเป็นตัวขับเคลื่อนงานเบรกให้หมุนไปโดยจะมีสายพานเป็นตัวส่งกำลังให้กับเพลา ซึ่งต่อกับงานเบรกอีกส่วนหนึ่ง ส่วนอินเวอร์เตอร์จะมีหน้าที่ปรับความเร็วรอบ ของมอเตอร์ให้มอเตอร์ หมุนไปตามความเร็วที่ต้องการ ซึ่งการทดลองจะทดลองที่ความเร็วระหว่าง 0 ถึง 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

อุปกรณ์ในชุดขับเคลื่อนงานเบรกจะประกอบไปด้วย:

- มอเตอร์ 3 เฟส 0.5 hp
- อินเวอร์เตอร์ 0.5 hp
- สายพานตัววี ความยาว 51 นิ้ว
- พูเลย์ 2 ตัว ขนาด 6 นิ้ว และ 5 นิ้ว



รูปที่ 1 ชุดขับเคลื่อนจานเบรก

2.2 ชุดให้ความร้อนกับจานเบรก หน้าที่ของชุดนี้คือให้ความร้อนกับเบรกในสภาวะทำงานปกติอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับจานเบรกอยู่ระหว่าง 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ อีกหลายอย่าง เช่น ความเร็วของรถก่อนจะทำการเบรก ระยะเวลาที่ใช้ในการเบรก อัตราการถ่ายเทความร้อนของจานเบรก เป็นต้น จากปัจจัยข้างต้นที่ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในจานเบรก เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองจึงเป็นค่าประมาณหรือ ค่ากลางที่เป็นไปได้มากที่สุดคือที่ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส [7] และจะใช้ชุดทำความร้อนให้กับจานเบรกแทนการเบรกด้วยผ้าเบรก เสมือนอย่างในรถยนต์จริง ตัวทำความร้อนของจานเบรกจะถูกสร้างขึ้นมาจากมีวัตุดิบสังเคราะห์ เพื่อจะเป็นต้นกำเนิดความร้อนแก่จานเบรกแทนที่จะใช้ผ้าเบรกขัดกับหน้าสัมผัส ดังนั้นความร้อนที่สร้างขึ้นนี้จะถูกพาออกไปโดยการหมุนของจานเบรกและมีลมไหลผ่าน ในการศึกษาการพาความร้อนที่โรเตอร์ด้านในและด้านนอกของจานเบรกจะทำการติดตั้งตัวทำความร้อน (Heater) ภายในตัวจานเบรกซึ่งจะแทนครีบบระบายความร้อน ดังแสดงดังรูปที่ 2 ขนาดของครีบบระบายความร้อนที่ตัดออกไป และขนาดของตัวทำความร้อนที่นำเข้ามาแทนต้องมีขนาดเท่ากัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการรักษารูปร่างของจานเบรกให้เหมือนเดิม



รูปที่ 2 Heater และ ตำแหน่งของการติดตั้ง Heater

อุปกรณ์ในชุดทำความร้อนจะประกอบไปด้วย:

- แผ่นตัวทำความร้อนขนาด 2200 วัตต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางใน 145 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางนอก 256 มิลลิเมตร มีความหนาเท่ากับ 9 มิลลิเมตร
- ชุดวงจรปรับเปลี่ยนกำลังไฟ 7500 วัตต์

จากสาเหตุที่ว่าตัวทำความร้อนต้องสัมผัสกับจานเบรกอยู่ตลอดเวลาจึงทำให้ตัวทำความร้อนนั้นหมุนไปพร้อมกับจานเบรกด้วยความเร็วรอบที่เท่ากัน ดังนั้นชุดสลีปรिंग (Slip ring) ดังแสดงในรูปที่ 3 จึงมีส่วนช่วยให้สายไฟที่ต่อเข้ากับตัวทำความร้อนไม่ไปพันกับอุปกรณ์อื่นๆในชุดทดลอง โดยสายไฟจากตัวทำความร้อนจะถูกต่อเข้ากับสลีปรिंगและหมุนไปพร้อมกับเพลที่ต่อเข้ากับจานเบรก จากนั้นจะมีชุดแปลงถ่านซึ่งอยู่กับที่มาสัมผัสกับตัวสลีปรिंग โดยกระแสไฟจะส่งเข้าสู่แปลงถ่านแล้วส่งต่อไปยังสลีปรिंगเพื่อเข้าสู่ตัวทำความร้อนต่อไป



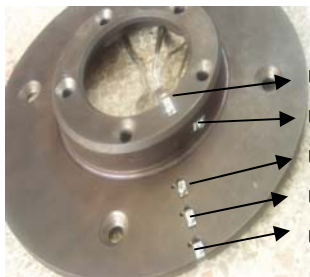
รูปที่ 3 ชุดสลีปรिंगสำหรับส่งกระแสไฟสำหรับชุดทำความร้อนและสัญญาณของเทอร์โมคัปเปิล

2.3 ชุดเก็บข้อมูล (Slip ring unit) ในการทดลองจะเก็บข้อมูลเป็นอุณหภูมิโดยอุณหภูมิที่ได้มาจากการวัดความร้อน ณ ผิวหน้าของจานเบรกโดยจะวัดความร้อนด้วยกันทั้งหมด 8 จุด แต่ละจุดจะมีการแบ่งพื้นที่ตามแนวรัศมีโดยแบ่งเป็นผิวโรเตอร์ด้านบน 3 จุด ผิวโรเตอร์ด้านล่าง 3 จุด และ พื้นผิวของหมวกอีก 2 จุด ดังแสดงรูปที่ 4 และ 5

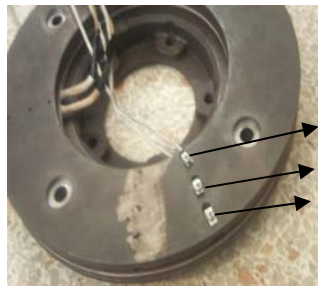
ซึ่งแสดงตำแหน่งของการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล เทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งเข้ากับจานเบรกทั้งหมดจะถูกร้อยสายผ่านในเพลากลวงและไปยึดกับชุด Slip ring ซึ่งทำมาจากแหวนทองแดง จากนั้นจะใช้ลวดทองแดงที่ยึดกับเทอร์มินอลไว้แล้วมาสัมผัสกับแหวนทองแดงเพื่อรับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลดังแสดงในรูปที่ 6

ดังนั้น ค่าอุณหภูมิสามารถตรวจสอบได้โดยการใช้อนุพันธ์เทอร์โมคัปเปิลที่ขั้วของเทอร์มินอล ในการทดลองนี้ อุปกรณ์ในชุดเก็บอุณหภูมิและชุดสลิปริงประกอบไปด้วย:

- เทอร์โมคัปเปิล Type K หัวแบน ทั้งหมด 8 ตัว
- แหวนทองแดง เส้นผ่านศูนย์กลางใน 10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางนอก 16 มิลลิเมตรหนา 7 มิลลิเมตร ทั้งหมด 16 วง



รูปที่ 4 ตำแหน่งของการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลด้านนอกของจานเบรก



รูปที่ 5 ตำแหน่งของการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลด้านในของจานเบรก



รูปที่ 6 การยึดสายเทอร์โมคัปเปิลกับขั้วเทอร์มินอลเพื่อเก็บข้อมูลจากชุดสลิปริง

2.4 ชุดอุโมงค์ลม จากการทดสอบจานเบรกเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับสภาวะการขับขี่จริงมากที่สุด จึงต้องมีการถ่ายเทความร้อนออกจากจานเบรกด้วยการพาความร้อน เนื่องด้วยสภาวะการขับขี่จริงจะมีความเร็วลมไหลผ่านใต้ท้องรถและผ่านจานเบรก พาเอาความร้อนที่อยู่บนจานเบรกออกไป ยิ่งขับขึ้นยานยนต์เร็วเท่าไร อัตราการไหลของอากาศก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น แต่เนื่องด้วยการขับขี่จริงนั้น ไม่ได้ขับด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ดังนั้นในการทดลองนี้ อุโมงค์ลมต้องสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วลมได้ โดยความเร็วลมภายในอุโมงค์ลมนั้นจะถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ต่อเข้ากับมอเตอร์อีกทีหนึ่ง กล่าวคือถ้าความเร็วของลมมาก ความเร็วรอบของใบพัดก็จะมาก แต่ถ้าหากความเร็วลมน้อย ความเร็วรอบของใบพัดก็จะต่ำตามไปด้วย โดยตัวกำหนดความเร็วรอบของใบพัดก็คืออินเวอร์เตอร์นั่นเอง ในสภาวะที่เกิดขึ้นในขณะใช้งานจานเบรกจริงนั้นจะพบว่าความเร็วลมที่ไหลผ่านตัวจานเบรกจะมีต่าง ๆ กันไป แปรเปลี่ยนไปตามความเร็วของยานพาหนะและรูปร่างของซุ้มล้อในขณะนั้น ดังนั้นอุโมงค์ลมจึงทำหน้าที่เลียนแบบสภาวะดังกล่าวนี้โดยกำหนดความเร็วลมที่มีค่าต่าง ๆ กันแก่จานเบรกที่ใช้ในการทดลองโดยไม่นำปัจจัยของรูปร่างซุ้มล้อมาคิด ในการทดลองนี้ ความเร็วลม 30, 50 และ 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเพื่อใช้ในการทดลองหาอุณหภูมิจานเบรกสามารถทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของมอเตอร์กับความเร็วลมที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ลมได้ดังต่อไปนี้

- ความเร็วลม 30 km/h ความเร็วรอบของจานเบรก 241 รอบ/นาที ปรับความถี่อุโมงค์ลมไปที่ 6.8 Hz
- ความเร็วลม 50 km/h ความเร็วรอบของจานเบรก 402 รอบ/นาที ปรับความถี่อุโมงค์ลมไปที่ 14.2 Hz
- ความเร็วลม 70 km/h ความเร็วรอบของจานเบรก 562 รอบ/นาที ปรับความถี่อุโมงค์ลมไปที่ 21.6 Hz

3. ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนของการทดลองหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรกในสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ที่มีลมผ่านจานเบรกต่าง ๆ ดังนี้

3.1 นำจานเบรกเข้าไปภายในอุโมงค์ลม วางตำแหน่งของชุดทดลองให้เหมาะสม โดยให้ทิศทางของกระแสลมไหลขนานไปกับ

พื้นผิวของโรเตอร์และจัดให้ตำแหน่งของจานเบรกอยู่กึ่งกลางอุโมงค์ลมพอดี

3.2 ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ความเร็วรถ 30 km/hr โดยปรับความถี่ inverter ที่ควบคุมอุโมงค์ลมไปที่ 6.8 Hz และปรับความเร็วรอบของจานเบรกให้เท่ากับ 241 rpm โดยใช้ Tachometer ในการวัดความเร็วรอบ และปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าตัวทำความร้อนที่ชุดควบคุมความร้อน ให้มีค่าเท่ากับ 0.5 A

3.3 ปรับมัลติมิเตอร์ให้เป็นโหมดของการวัดอุณหภูมิ นำไปแตะที่เทอร์มินอล สังเกตอุณหภูมิแต่ละจุดเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว ให้จดค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดไว้

3.4 ให้ความร้อนกับจานเบรกเพิ่มอีก 7 ค่าโดยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ดังนี้ คือ 1.1, 2.3, 2.5, 4.5, 6.2, 7.2 และ 8.4 A ตามลำดับ

ในการทดลองจะใช้กระแสไฟอยู่ระหว่าง 0 ถึง 10 แอมแปร์หรือคิดเป็นกำลังไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2200 วัตต์ เนื่องด้วยการสูญเสียทางไฟฟ้า (Power loss) มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นบนจานเบรกเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์ ในการให้ค่ากระแสไฟกับฮีตเตอร์แต่ละครั้งนั้น ก็จะทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนจานเบรกทั้งหมด 8 จุดควบคู่กันไปด้วย ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับอุณหภูมิที่วัดออกมาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_1 &= h_1 A_1 (T_{11} - T_{\infty}) + h_2 A_2 (T_{21} - T_{\infty}) + h_3 A_3 (T_{31} - T_{\infty}) + h_4 A_4 (T_{41} - T_{\infty}) + h_5 A_5 (T_{51} - T_{\infty}) + h_6 A_6 (T_{61} - T_{\infty}) \\ &+ h_7 A_7 (T_{71} - T_{\infty}) + h_8 A_8 (T_{81} - T_{\infty}) \\ Q_2 &= h_1 A_1 (T_{12} - T_{\infty}) + h_2 A_2 (T_{22} - T_{\infty}) + h_3 A_3 (T_{32} - T_{\infty}) + h_4 A_4 (T_{42} - T_{\infty}) + h_5 A_5 (T_{52} - T_{\infty}) + h_6 A_6 (T_{62} - T_{\infty}) \\ &+ h_7 A_7 (T_{72} - T_{\infty}) + h_8 A_8 (T_{82} - T_{\infty}) \\ &\vdots \\ Q_8 &= h_1 A_1 (T_{18} - T_{\infty}) + h_2 A_2 (T_{28} - T_{\infty}) + h_3 A_3 (T_{38} - T_{\infty}) + h_4 A_4 (T_{48} - T_{\infty}) + h_5 A_5 (T_{58} - T_{\infty}) + h_6 A_6 (T_{68} - T_{\infty}) \\ &+ h_7 A_7 (T_{78} - T_{\infty}) + h_8 A_8 (T_{88} - T_{\infty}) \end{aligned} \quad [1]$$

โดยที่ค่า

$T_{11}, T_{21}, \dots, T_{81}$ เป็นค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ บนจานเบรกที่ได้ทำการวัดครั้งที่ i โดย i มีค่าตั้งแต่ 1-8 โดยแต่ละครั้งอุณหภูมิที่วัดได้จะอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state)

$A_1, A_2, \dots, A_8$ เป็นขอบเขตพื้นที่ที่พิจารณาในแต่ละจุด $h_1, h_2, \dots, h_8$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ณ บริเวณพื้นที่ที่พิจารณา

T_{∞} เป็นค่าอุณหภูมิของอากาศ

ส่วน $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8$ เป็นค่าความร้อนให้กับจานเบรกซึ่งได้หาได้จากสมการทางไฟฟ้าคือ

$$P = Q = IV \cdot N \quad [2]$$

โดยที่ P เป็นค่ากำลังทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ Q ซึ่งเป็นค่ากำลังทางความร้อน

I เป็นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์

V เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ที่ตกคร่อมบนฮีตเตอร์ (ในการทดลองใช้ไฟ 220 โวลต์)

N คือประสิทธิภาพการให้ความร้อนของฮีตเตอร์

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับอุณหภูมิที่วัดได้จะเห็นได้ว่ามีเพียงตัวแปรที่ไม่ทราบค่าก็คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($h_1, h_2, \dots, h_8$) ส่วนค่าอื่น ๆ นั้นทราบค่าได้จากการทดลองและการคำนวณ

3.5 เมื่อทำการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนค่าความร้อนให้กับจานเบรกแล้วเสร็จ ก็ทำการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนความเร็วลมที่ไหลผ่านจานเบรกซึ่งในสภาวะการขับซึ่งจริงความเร็วของอากาศจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วของรถหรือความเร็วรอบของจานเบรกนั่นเอง คือ ความเร็วลม 50 km/h ความเร็วรอบของจานเบรก 402 รอบ/นาที ปรับความถี่อุโมงค์ลมไปที่ 14.2 Hz และที่ ความเร็วลม 70 km/h ความเร็วรอบของจานเบรก 562 รอบ/นาที ปรับความถี่อุโมงค์ลมไปที่ 21.6 Hz โดยในแต่ละความเร็วต้องมีการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าให้ตัวทำความร้อนไปจำนวน 8 ค่า ดังแสดงในข้อ 3.4

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องชุดสลิปริง

สืบเนื่องมาจากค่าความคลาดเคลื่อนในการส่งสัญญาณของบริเวณที่สัมผัสกันระหว่างแหวนทองแดงและลวดทองแดงในขณะหมุนอยู่ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดจากปลาย

เทอร์โมคัปเปิลขณะที่หยุดหมุนและค่าที่วัดได้จากชุดสลิปริง ทั้งนี้ เพื่อให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องมากที่สุดโดยใช้สมมุติฐานที่ว่าอุณหภูมิของจานเบรกมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงเวลาสั้นๆ ระหว่างหมุนกับหยุดหมุน ซึ่งในเทอร์โมคัปเปิลแต่ละเส้น จะได้ทดลองอุณหภูมิที่สภาวะอยู่ตัว (Steady State) แตกต่างกัน 3 ค่า โดยกำหนดให้

T หมุน คือค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากการสลิปริง (Slip ring) ขณะจานเบรกหมุนและ

T หยุด คือค่าอุณหภูมิที่วัดทันทีหลังจากหยุดหมุน ที่ปลายข้อของเทอร์โมคัปเปิล

ผลการทดลองเปรียบเทียบความถูกต้องของชุดสลิปริง (Slip ring) ที่ความเร็วรอบของจานเบรกแตกต่างกัน 3 ค่าแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่จานเบรกขณะหมุนกับหยุดหมุนไม่แตกต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 1 สำหรับความเร็วรอบจานเบรก 562 รอบต่อนาทีเทียบกับความเร็วลม 70 km/hr

ตารางที่ 1 ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากการปรับแต่งเครื่องมือวัด (Calibration) ที่ความเร็วรอบจานเบรก 562 rpm

เส้นที่ 1		เส้นที่ 2		เส้นที่ 3		เส้นที่ 4	
T หมุน (°C)	T หยุด (°C)	T หมุน (°C)	T หยุด (°C)	T หมุน (°C)	T หยุด (°C)	T หมุน (°C)	T หยุด (°C)
34	34	40	40	78	78	72	72
45	45	51	51	102	103	97	97
58	58	74	74	133	133	129	130
เส้นที่ 5		เส้นที่ 6		เส้นที่ 7		เส้นที่ 8	
T หมุน (°C)	T หยุด (°C)	T หมุน (°C)	T หยุด (°C)	T หมุน (°C)	T หยุด (°C)	T หมุน (°C)	T หยุด (°C)
64	64	86	86	77	77	65	65
91	91	112	113	92	92	87	87
120	120	135	136	130	130	128	129

4.2 ผลการทดลองการพาความร้อนของจานเบรกที่ความเร็วรอบ 30 km/h ในสภาวะคงตัว (Steady state)

ปรับค่าความเร็วรอบของจานเบรก 241 rpm , ความเร็วลม 30 km/h ผลจากการวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ กึ่งกลางที่พื้นที่ A1 ถึง A8 บนจานเบรกพร้อมกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าชุดทำความร้อนจะแสดงในตารางที่ 2 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับชุดทำความร้อนอุณหภูมิที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นตามกระแสที่เพิ่มขึ้น ทุกค่าจะวัดได้จากพื้นที่ A1-A8 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัสของจานเบรกด้านใน (Inboard rotor, T6-T8) มีค่ามากกว่าผิวสัมผัสของจานเบรกด้านนอก (Outboard, T3-T5) สาเหตุหลักคือความร้อนที่เกิดขึ้นที่จานเบรกด้านนอกสามารถไหลไปสู่ส่วนหมวกของจานเบรก (Hat) โดยการนำ อีกทั้งความร้อนดังกล่าวจะถูกพาโดยลมที่ผ่านจานเบรก ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นที่จานเบรกด้านในไม่สามารถไหลผ่านสู่ส่วนหมวกได้แต่จะถูกพาโดยลมเพียงอย่างเดียว

4.3 ผลการทดลองการพาความร้อนของจานเบรกที่ความเร็วรอบ 50 km/h ในสภาวะคงตัว (Steady state)

ปรับค่าความเร็วรอบของจานเบรก 402 rpm , ความเร็วลม 50 km/h ผลจากการวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ กึ่งกลางที่พื้นที่ A1 ถึง A8 บนจานเบรกพร้อมกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าชุดทำความร้อนจะแสดงในตารางที่ 3 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากการให้ความร้อนกับจานเบรก จะมีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลองที่ความเร็วลม 30 km/hr คือ อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสของจานเบรกด้านในมีอุณหภูมิสูงกว่าผิวสัมผัสจานเบรกด้านนอก และจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจานเบรกได้รับความร้อน(Q) ตามลำดับจนถึงค่า 990 W แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่วัดได้หลังจากการเพิ่มความร้อนให้กับจานเบรกที่ Q เท่ากับ 1364, 1584 และ 1848 W ตามลำดับอุณหภูมิที่วัดได้ (T1-T8) จะลดลงเมื่อเทียบกับค่าเดียวกันเมื่อค่าความร้อนจานเบรกที่ Q เท่ากับ 990 W ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่หน้าสัมผัสของชุดสลิปริงจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเร็วรอบจานเบรกสูง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าชุดทำความร้อนน้อยลงเมื่อเทียบกับผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่ำ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ความเร็วลม 30 km/hr (ตารางที่ 2) ที่ค่าความร้อน Q เท่ากับ 242 W จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าให้กับชุดจานเบรกผ่านหน้าสัมผัสของชุดสลิปริงมีประสิทธิภาพดีกว่า

The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand
18-20 October 2006 , Mandarin Golden Valley Hotel & Resort Khao Yai , Nakhon Ratchasima

AMM009

ตารางที่ 2 แสดงค่าอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆบนจานเบรก ที่ความเร็วลม 30 km/hr

Q(Watt)	I (Amp)	T1(°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)
110	0.5	33	35	41	41	38	45	43	43
242	1.1	36	39	55	54	48	57	55	55
506	2.3	42	46	74	73	68	83	84	84
550	2.5	42	53	76	73	71	89	86	87
990	4.5	50	72	121	111	101	136	125	125
1364	6.2	59	90	153	142	128	173	164	160
1584	7.2	64	101	174	158	145	198	183	180
1848	8.4	69	114	192	180	165	234	215	201

ตารางที่ 3 แสดงค่าอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆบนจานเบรก ที่ความเร็วลม 50 km/hr

Q(watt)	I (Amp)	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)
110	0.5	31	32	33	34	37	39	41	43
242	1.1	35	42	53	55	73	90	80	112
506	2.3	35	39	50	51	67	82	90	100
550	2.5	36	42	57	57	79	97	108	122
990	4.5	44	59	89	93	142	185	211	242
1364	6.2	35	38	48	48	62	77	81	91
1584	7.2	35	41	52	53	72	87	96	108
1848	8.4	36	44	58	60	83	103	115	130

ตารางที่ 4 แสดงค่าอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆบนจานเบรก ที่ความเร็วลม 70 km/hr

Q(Watt)	I(Amp)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)
110	0.5	31	32	34	34	37	40	41	43
242	1.1	34	41	52	53	71	87	96	107
506	2.3	35	40	49	50	66	80	88	98
550	2.5	35	42	54	56	77	95	105	118
990	4.5	44	58	87	92	83	89	94	107
1364	6.2	33	38	46	47	61	72	79	88
1584	7.2	35	40	50	52	69	84	93	104
1848	8.4	36	43	56	58	80	96	110	125

4.4 ผลการทดลองการพาความร้อนของจานเบรกที่ความเร็วลม 70 km/h ในสภาวะอยู่ตัว (Steady state)

ปรับค่าความเร็วรอบของจานเบรก 562 rpm , ความเร็วลม 70 km/h ผลจากการวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ กึ่งกลางที่พื้นที่ A1 ถึง A8 บนจานเบรกพร้อมกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าชุดทำความร้อนจะแสดงในตารางที่ 4 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลจากความต้านทานการไหลกระแสไฟฟ้าที่ สลิปริงขณะให้ค่าความร้อน Q มากกว่า 990 W จะทำให้อุณหภูมิที่วัดได้ลดลงเหมือนกับผลการทดลองของจานเบรกที่ความเร็วลม 50 km/hr ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเร็วของการหมุนจานเบรกมีผล

ต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบชุดสลิปริงที่ให้ความร้อนกับจานเบรกมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อความเร็วของการหมุนสูง

4.5 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรกที่ความเร็วต่างๆในอุโมงค์ลม

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่บริเวณต่างๆของจานเบรกได้สามารถทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการการพาความร้อน และกฎการอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$[Q]=[H][C] \quad [3]$$

$$[H]=[C]-1[Q] \quad [4]$$

โดยที่ [Q] คือเมตริกซ์ของพลังงานความร้อนที่ให้โดยแผ่นความร้อน

[H] คือเมตริกซ์ของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

[C] คือเมตริกซ์ของค่าคงที่จากผลต่างอุณหภูมิกับพื้นที่บนจานเบรก

โดยสมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณคือ

1. ประสิทธิภาพของตัวทำความร้อน(heater) เท่ากับ 0.9
2. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส
3. ไม่มีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี
4. พื้นที่ที่ยอมมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากันตลอด

จากผลการทดลองในตารางที่ 2 ,3 และ 4 ไม่สามารถคำนวณหา ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้เนื่องจาก เมตริกซ์ของค่าคงที่ [C] เป็น Singularity คือค่า $[C]^{-1}$ ไม่ได้ โดยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ทั้งนี้เนื่องจากผลการทดลองไม่ได้สะท้อนค่าความเป็นจริงของ อุณหภูมิของจานเบรกที่ความเร็วลมสูง ได้ ด้วยเหตุนี้เื่องการออกแบบ ชุดให้ความร้อนจะต้องมีการปรับปรุงและทดสอบประสิทธิภาพการทำงานที่ความเร็วรอบสูง ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ไม่สามารถที่จะปรับปรุง ชุดให้ความร้อนกับจานเบรกได้ ทั้งนี้เนื่องชุดให้ความร้อนกับชุดวัดอุณหภูมิของจานเบรกที่ทำขึ้นจะอยู่ในชุดเดียวกับดังแสดงในรูปที่ 3 รูปแบบนี้จะถูกออกแบบมาโดยคำนึงถึงต้นทุนการสร้างชุดสลีปรังเป็นหลักซึ่งประกอบไปด้วยท่อเหล็ก ฉนวนกันความร้อน ท่อทองแดง และ แปร่งถ่าน ในวงการอุตสาหกรรมอุปกรณ์ให้ความร้อนที่ความเร็วรอบ สูงๆและมีประสิทธิภาพสูงด้วยจะมีราคาแพง ซึ่งชุดอุปกรณ์ดังกล่าว ไม่ได้อยู่ในงบประมาณของโครงการวิจัยนี้ แต่อย่างไรก็ตาม ชุดสลีปรัง ที่ทำขึ้นนี้สำหรับให้ความร้อนจานเบรกให้ผลได้ดีเมื่อใช้ความเร็วการ หมุนต่ำเท่านั้น และชุดวัดอุณหภูมิในสลีปรังดังกล่าวสามารถใช้ในการ วัดอุณหภูมิของจานเบรกได้

5. สรุป

1. แนวทางการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรกโดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขประกอบการวัดค่าอุณหภูมิที่ผิวของจานเบรกที่ค่าความเร็วลมไหลผ่านจานเบรกแตกต่างกัน 3 ค่า มีความเป็นไปได้
2. อุณหภูมิที่วัดได้ที่บริเวณผิวสัมผัสของจานเบรกด้านนอก (Outboard rotor) จะต่ำกว่าผิวสัมผัสของของจานเบรกด้านใน (Inboard rotor) ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากหน้าสัมผัสของจานเบรกบริเวณ

ด้านนอกมีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของลมและการนำผ่านไปสู่อ ส่วนหมวกของจานเบรก (Hat)

3. การออกแบบการให้กระแสไฟฟ้ากับชุดจานเบรกของสลีปรังมีข้อจำกัดที่ความเร็วสูงส่งผลให้อุณหภูมิที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน ไม่สะท้อนความเป็นจริงที่ได้ เนื่องจากเกิดความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหน้าสัมผัสของชุดสลีปรัง

4. ในสภาพความเป็นจริงความเร็วลมที่ผ่านจานเบรกจะมีการแปรปรวนมากเนื่องจากเกิดอากาศจะถูกดักโดยซี่ล้อ กันชนหน้าและ ยางรถยนต์ ดังนั้นอุณหภูมิที่ได้จะสูงกว่าผลจากการทดลอง ดังนั้นการออกแบบจานเบรกรถยนต์โดยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขเป็นเพียงการประมาณค่า จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของจานเบรกจากการใช้งานจริงหลังจากการออกแบบดังกล่าว

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sheridan, D. C., Kutchev, J. A. and Samie, F., 'Approaches to the Thermal Modeling of Disc Brakes', Society of Automotive Engineerings , SAE Technical Paper Series: 880256, 1988
- [2] Limpert, R. 'Cooling analysis of disc brake rotors', Society of Automotive Engineerings , SAE Technical Paper Series: 751014, 1975
- [3] Schwartz, H W, Harter, L L, Rhee, S K and Byers, J E. 'Evaluation of Gray Iron Brake Discs for Trucks by Thermal Modeling', SAE Technical Paper Series: 751013, 1975
- [4] Bailey, T P, Buckingham, J T and D'Cruz, A H. 'Optimisation of Brake Disc Design Using Thermal Imaging and Finite Element Techniques', Autotech, 1991
- [5] Grieve, D G, Barton, D C, Crolla, D A and Buckingham, J T. 'Design of a Lightweight Automotive Brake Disc using Finite Element and Taguchi Techniques', Proc. Instn. Mech. Engrs, 212, Part D, 1998
- [6] Cobb, E. C. and Saunders, O. A., 'Heat Transfer from a Rotating Disk', Proc. Royal Society (Series A), Vol. 236, pp. 343-351, 1956
- [7] Dennis, R. W., Newstead, C., Ede, A. J., 'The Heat Transfer From a Rotating Disc in an air crossflow', Proc. 4th, Int. Heat Transfer Conf., 1970