

การศึกษาพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิบนดรัมเบรกของรถยนต์
ภายใต้สภาวะการเบรกแบบต่าง ๆ
A Temperature Distribution Behaviors Study of Automotive Drum Brake
under Various Braking Conditions

สุรเชษฐ์ ชุตินา * ทศนพ กำเนิดทอง ** และ วิสวัท อรรถนกุล ***

ศูนย์ปฏิบัติการคอมพิวเตอร์เพื่องานวิจัยทางวิศวกรรม (COCARE)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 โทร 0-2470-9337 โทรสาร 0-2470-9111

*อีเมล surachate.chu@kmutt.ac.th **อีเมล ithotong@kmutt.ac.th ***อีเมล atjanakul@yahoo.com

Surachate Chutima *, Thoatsanope Kamnerdtong **, and Wisawat Atjanakul ***

Center of Operation for Computer Aided Research Engineering (COCARE)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,
126 Prachauthit Road Bangmod Thung Kharu District Bangkok 10140, Thailand, Tel: 0-2470-3997, Fax: 0-2470-9111,

*E-mail: surachate.chu@kmutt.ac.th **E-mail: ithotong@kmutt.ac.th ***E-mail: atjanakul@yahoo.com

บทคัดย่อ

ดรัมเบรกจะชะลอความเร็วของรถยนต์โดยอาศัยการสัมผัสเสียดสีเพื่อให้เกิดแรงต้านการหมุนระหว่างดรัมเบรกกับผ้าเบรก กระบวนการนี้จะทำให้พลังงานจลน์ของรถยนต์เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนส่งผลให้ชิ้นส่วนของดรัมเบรกมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดความไม่เสถียรภาพเนื่องจากความยืดหยุ่นทางความร้อนทำให้ดรัมเบรกกับผ้าเบรกเกิดความเสียหายและสมรรถนะการเบรกลดลงได้ การประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมพลวัตของการกระจายอุณหภูมิบนดรัมเบรกและผ้าเบรกโดยพิจารณาผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานและภาระทางกลไปพร้อมๆ กันภายใต้สภาวะการเบรก 4 ลักษณะ คือ การเบรกอย่างรุนแรงที่ความเร็วสูงเมื่อไม่มีการบรรทุก การเบรกอย่างไม่รุนแรงที่ความเร็วสูงเมื่อไม่มีการบรรทุก การเบรกอย่างรุนแรงที่ความเร็วปานกลางเมื่อไม่มีการบรรทุก และการเบรกอย่างรุนแรงที่ความเร็วปานกลางเมื่อมีการบรรทุก โดยจากการศึกษาพบว่า การเบรกอย่างรุนแรงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้มีการกระจายของอุณหภูมิแตกต่างกันมากและมีโอกาสเกิดความไม่เสถียรภาพเนื่องจากความยืดหยุ่นทางความร้อนสูง ส่วนความเร็วและน้ำหนักบรรทุกจะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของดรัมเบรกลดน้อยลง

Abstract

During a vehicle deceleration due to friction between the lining and the brake drum, kinetic energy of the vehicle is turned

into thermal energy that raises temperature of the drum brake components. This causes thermal elastic instability that affects the lining and the brake drum failure and poor braking performance. This research is aimed to study the dynamic behaviors of the drum brake under various braking conditions. Three cases of severe braking are considered i.e. high wheel speed with light load, medium wheel speed with light load and medium wheel speed with fully load. Moreover, a case of normal braking of high wheel speed with light load is also included for comparison purpose. Two dimensional finite element technique was adopted to simulate the dynamic temperature distribution. The coupled thermo-mechanical results revealed that severe braking is an important factor that causes high non-uniform temperature distributions and high-risk thermal elastic instability; where as wheel speed and vehicle load have less effects on the brake behaviors.

1. บทนำ

ระบบเบรกถือเป็นระบบความปลอดภัยที่มีความสำคัญสำหรับรถยนต์ เพราะความปลอดภัยของชีวิตผู้ขับขี่และผู้โดยสารขึ้นอยู่กับสมรรถนะของระบบเบรก ปัจจุบันระบบเบรกที่ได้รับความนิยมมีอยู่ 2 ชนิด คือ ดิสเบรก (Disc Brake) และดรัมเบรก (Drum Brake) ซึ่งเบรกทั้งสองชนิดมีลักษณะทางกายภาพ การทำงาน ประสิทธิภาพ และความ

เหมาะสมในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน โดยรถยนต์นั่งส่วนบุคคล มักจะใช้ดิสเบรกทั้งสี่ล้อ แต่สำหรับรถยนต์บรรทุกก็ยังคงนิยมใช้ดรัมเบรกกับล้อหลังของรถยนต์อยู่ ส่วนรถยนต์บรรทุกขนาดใหญ่และรถยนต์โดยสารมักจะใช้ดรัมเบรกกับทุกล้อ ลักษณะเด่นของดรัมเบรกคือ ขณะทำการเบรกการหมุนของล้อจะช่วยเสริมให้แรงในการเบรกมีค่าสูงขึ้นซึ่งเหมาะกับรถยนต์ที่มีภาระมาก

ดรัมเบรกจะชะลอความเร็วของรถยนต์หรือทำให้รถยนต์หยุดการเคลื่อนที่โดยอาศัยการสัมผัสเสียดสีเพื่อให้เกิดแรงต้านการหมุนระหว่างดรัมเบรก (Brake Drum) กับผ้าเบรก (Lining) โดยดรัมเบรกจะยึดติดและหมุนไปพร้อมกับล้อ ส่วนผ้าเบรกจะยึดติดอยู่กับที่ หรือในดรัมเบรกบางประเภทอาจมีการเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย ปัจจุบันรถยนต์ถูกพัฒนาให้มีความสามารถในการเบรกที่เพียงพอต่อการใช้งาน ซึ่งการออกแบบและพัฒนาระบบเบรกจำเป็นที่จะต้องทราบถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการเบรกต่างๆ

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการนำมาพิจารณาพฤติกรรมของดรัมเบรกที่เกิดขึ้นขณะทำการเบรก การทราบถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะทำให้การพัฒนาและออกแบบดรัมเบรกเป็นไปได้อย่างเหมาะสมกับความต้องการมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดต้นทุนในการพัฒนาและการผลิตตลอดจนช่วยให้ประหยัดเวลาในการพัฒนาอีกด้วย จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเบรกพบว่าการศึกษาเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของดิสเบรกได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างมาก [1-7] แตกต่างจากการศึกษาเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของดรัมเบรกซึ่งไม่ค่อยพบการศึกษาเชิงลึกมากนัก [8, 9] ทั้งๆ ที่ดรัมเบรกยังมีการใช้งานกันอยู่โดยทั่วไป นอกจากนี้การศึกษานอกระบบมักจะแยกวิเคราะห์ระหว่างพฤติกรรมจากความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานและพฤติกรรมจากภาระทางกลที่กระทำ งานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของดรัมเบรกแบบพลวัตโดยพิจารณาผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานและภาระทางกลไปพร้อมๆ กัน เพื่อให้เป็นแนวทางในการพิจารณาปัจจัยกำหนดที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบดรัมเบรก

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

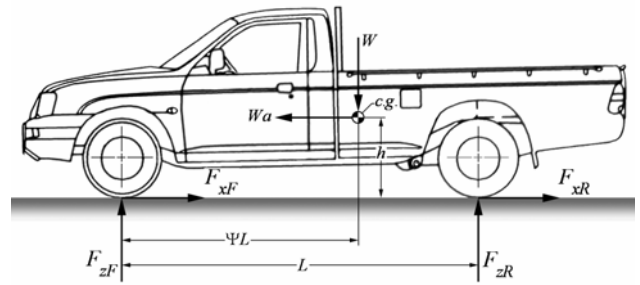
2.1 การกระจายแรงเบรกระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง

เมื่อทำการเบรก รถยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งซึ่งเกิดจากรถยนต์เกิดการเบรกที่ต้านการหมุนของผิวยางรถยนต์ที่สัมผัสกับผิวถนน โดยแรงกระทำซึ่งเกิดขึ้นที่ล้อทั้งสองขณะรถมีความหน่วงแสดงดังรูปที่ 1 อัตราส่วนระหว่างภาระที่กระทำกับล้อหลังกับน้ำหนักรวม, Ψ สามารถเขียนในรูปสมการได้เป็น [10]

$$\Psi = \frac{F_{zR,static}}{W} \quad (1)$$

เมื่อ $F_{zR,static}$ คือ ภาระที่กระทำกับล้อหลังในแนวตั้งฉากในสภาวะสถิต (นิวตัน)

W คือ น้ำหนักรวมของรถยนต์ (นิวตัน)



รูปที่ 1 แรงกระทำกับรถยนต์ขณะมีความหน่วง

ในการออกแบบการกระจายแรงเบรกสำหรับยานพาหนะที่มีเพลาล้อหน้าและล้อหลังอย่างละหนึ่งชุด (Two-Axle Vehicle) จะกำหนดค่าการกระจายแรงเบรก (Φ) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรงในการเบรกของล้อหลังต่อแรงในการเบรกของล้อหน้าสำหรับสภาวะพลวัตเป็นช่วงค่า ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น [10]

$$\left(1 - \mu\chi - \frac{(1 - \Psi)}{E_{min}} \right) \leq \Phi \leq \left(\frac{\Psi}{E_{min}} - \mu\chi \right) \quad (2)$$

เมื่อ E_{min} คือ ค่าประสิทธิภาพการเบรกต่ำสุด

χ คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงจากจุดศูนย์กลางมวลรถยนต์และพื้นถนน (h) กับระยะฐานล้อ (L)

μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับพื้นถนน

สภาวะที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับพื้นถนน (μ) มีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 ค่าประสิทธิภาพการเบรกต่ำสุด (E_{min}) มีค่าประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์และทำการวิเคราะห์ขณะที่รถยนต์ไม่มีการบรรทุกและมีการบรรทุกซึ่งส่งผลต่อค่า Ψ และ χ เมื่อทำการการคำนวณค่า Φ แล้ว ค่าที่ได้จากการคำนวณนี้จะถูกใช้ในการประเมินผลทางการออกแบบซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการใช้งานของรถยนต์

2.2 โมเมนต์ความเฉื่อยสมมูล

เมื่อทำการเบรกขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ จะต้องพิจารณาความเฉื่อยเนื่องจากน้ำหนักของรถยนต์กระทำรอบแกนหมุนของระบบเบรก ซึ่งเรียกว่า โมเมนต์ความเฉื่อยสมมูล (Equivalent Moment of Inertia) ด้วย การคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยสมมูลจะใช้หลักการสมมูลกันระหว่างพลังงานจลน์เนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถยนต์และพลังงานจลน์เนื่องจากการหมุนรอบแกนการหมุนของจานเบรกดังสมการ [10]

$$I_{eq} = mr^2 = \frac{W_T r^2}{g} \quad (3)$$

โดยที่

$$W_T = \frac{\Phi W}{2} \quad (4)$$

เมื่อ m คือ มวลรวมของรถยนต์ (กิโลกรัม)

r คือ รัศมีของล้อรถยนต์ (เมตร)

W_T คือ น้ำหนักทดสอบของรถยนต์ (นิวตัน)

g คือ ความเร่งโน้มถ่วงเนื่องจากแรงดึงดูดโลก (เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง)

2.3 การกระจายความร้อนจากการเบรกสู่ดุมเบรกและผ้าเบรก

ความร้อนที่เกิดจากเสียดสีกันระหว่างผ้าเบรกกับผิวสัมผัสของดุมเบรกขณะทำการเบรกจะถูกถ่ายเทเข้าสู่ดุมเบรกและผ้าเบรกในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยพิจารณาความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการเบรกมีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่เข้าสู่ผ้าเบรกและดุมเบรก ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ดุมเบรกต่อความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในรูปของสมบัติของวัสดุจะได้ว่า [10]

$$\gamma = \frac{q_R''}{q_R'' + q_P''} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_P c_P k_P}{\rho_R c_R k_R} \right)^{1/2}} \quad (5)$$

เมื่อ γ คือ อัตราส่วนของความร้อนในการเบรกที่ดุมเบรก

q_P'' คือ ค่าความร้อนที่เข้าสู่ผ้าเบรก

q_R'' คือ ค่าความร้อนที่เข้าสู่ดุมเบรก

c_P คือ ค่าความร้อนจำเพาะของผ้าเบรก

c_R คือ ค่าความร้อนจำเพาะของดุมเบรก

k_P คือ ค่าการนำความร้อนของผ้าเบรก

k_R คือ ค่าการนำความร้อนของดุมเบรก

ρ_P คือ ความหนาแน่นของผ้าเบรก

ρ_R คือ ความหนาแน่นของดุมเบรก

2.4 การระบายความร้อนออกจากดุมเบรก

เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของดรัมเบรกที่ขึ้นส่วนกลไกต่างๆ ถูกประกอบอยู่ในดุมเบรกทำให้โอกาสที่ชิ้นส่วนภายในจะสัมผัสกับอากาศที่ไหลผ่านโดยตรงเป็นไปได้ยาก มีเพียงผิวภายนอกของดุมเบรกเท่านั้นที่สัมผัสกับอากาศที่ไหลผ่าน ดังนั้นจึงพิจารณาการระบายความร้อนด้วยการพาที่เฉพาะผิวนอกของดุมเบรกเท่านั้น ข้อมูลที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับดรัมเบรกซึ่งอากาศไหลผ่านเต็มที่ สามารถหาได้โดยพิจารณาในลักษณะอากาศไหลผ่านทรงกระบอกตัน [10]

$$h_R = 0.1 \left(\frac{k_a}{D} \right) Re^{2/3} \quad (6)$$

โดย

$$Re = \frac{\rho_a V_a D}{\mu_a} \quad (7)$$

เมื่อ h_R คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของดุมเบรก

k_a คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ

Re คือ เลขเรย์โนลด์

V_a คือ ความเร็วอากาศ

ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ

μ_a คือ ค่าความหนืดคินแมติกของอากาศ

3. การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

เพื่อให้ได้ผลการคำนวณแสดงถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของดรัมเบรก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการสัมผัสอย่างรวดเร็วตลอดเวลา หรือกล่าวได้ว่าเป็นปัญหาที่มีลักษณะการตอบสนองต่อระบบแบบพลวัตในสภาวะชั่วคราว (Transient Dynamic Response) จึงใช้การประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลวัตสองมิติเพื่อวิเคราะห์และศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของดรัมเบรก โดยพิจารณาผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานและภาระทางกลไปพร้อมๆ กันด้วยวิธี Explicit Direct Integration โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติสำหรับวิเคราะห์ระบบดรัมเบรกซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วน 2 ชิ้นได้แก่ ดุมเบรกและชุดก้ามเบรกที่ประกอบกับผ้าเบรก โดยทำการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกันตามตำแหน่งการประกอบดังแสดงในรูปที่ 2

3.2 การกำหนดสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้น

สภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ประกอบไปด้วยอุณหภูมิเริ่มต้นของผ้าเบรกและดุมเบรก ความเร็วการหมุนเริ่มต้น ค่าความดันน้ำมันและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งแตกต่างกันตามสภาวะการเบรกดังแสดงไว้แล้วในตารางที่ 1 โดยอ้างอิงข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐานความปลอดภัย Japanese Automobile Standard C404 [11]

ตารางที่ 1 รายละเอียดของสภาวะการเบรกที่ใช้ในการศึกษา

สภาวะการเบรก	รุนแรง ความเร็วสูง ไม่มีน้ำหนักบรรทุก	รุนแรง ความเร็วปานกลาง ไม่มีน้ำหนักบรรทุก	ไม่รุนแรง ความเร็วสูง ไม่มีน้ำหนักบรรทุก	รุนแรง ความเร็วปานกลาง มีน้ำหนักบรรทุก
ความเร็วเริ่มต้น (km/h)	160	100	160	100
น้ำหนักสุทธิ (kg)	1605	1605	1605	2605
ความดันน้ำมัน (MPa)	5.77	5.77	2.885	5.77
อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	90	90	90	90

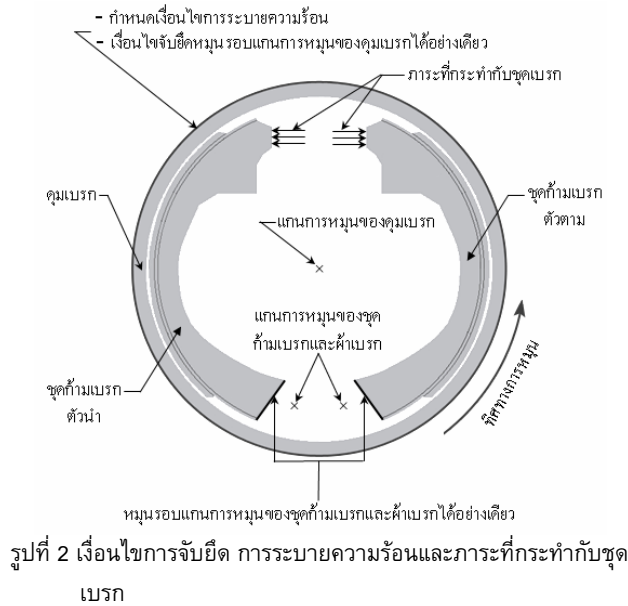
3.3 การกำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบ

สภาวะเงื่อนไขขอบสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วย

3.3.1 เงื่อนไขการยึดจับ

เงื่อนไขการยึดจับของดุมเบรกตามลักษณะทางกายภาพคือดุมเบรกจะถูกยึดเข้ากับดุมล้อ โดยบริเวณผิวด้านในของขอบจานจะประกบเข้ากับหน้าแปลนของดุมล้อและบริเวณผิวด้านนอกของขอบจานจะถูกขึ้นแน่นด้วยสลักเกลียว แต่เนื่องจากแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์เป็นแบบสองมิติซึ่งพิจารณาเฉพาะบริเวณที่มีการสัมผัสกับผ้าเบรกจึงต้องยึดจับบริเวณผิวขอบนอกของดุมเบรกแทนโดยกำหนดให้สามารถหมุนรอบแกนหมุนของดุมเบรกเท่านั้น

งานวิจัยนี้เลือกใช้ดรัมเบรกประเภทซึมเพล็กซ์ในการวิเคราะห์ ดังนั้นเงื่อนไขการยึดจับของก้ามเบรกคือ ปลายส่วนล่างของก้ามเบรกทั้ง 2 ข้างสามารถหมุนรอบแกนหมุนเท่านั้นตามลักษณะทางกายภาพ



3.3.2 การที่กระทำกับก้ามเบรก

คัมเบรกมีภาระกระทำที่ปลายส่วนบนของก้ามเบรกทั้งสองข้าง ด้วยขนาดที่เท่ากัน จึงกำหนดตำแหน่งที่ภาระกระทำกับก้ามเบรกตามลักษณะทางกายภาพ โดยขนาดของภาระจะขึ้นอยู่กับค่าความดันน้ำมันเบรก

3.3.3 เงื่อนไขการระบายความร้อน

งานวิจัยนี้อ้างอิงข้อกำหนดในการทดสอบจากมาตรฐานความปลอดภัย Japanese Automobile Standard C404 [11] ซึ่งกำหนดให้อากาศที่สัมผัสกับผิวนอกของคัมเบรกมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

3.4 สมบัติของวัสดุ

สมบัติวัสดุที่กำหนดให้กับแต่ละชิ้นส่วนเป็นไปตาม Materials Handbook [12] โดยแสดงสมบัติของวัสดุสำหรับแต่ละชิ้นส่วนอยู่ในตารางที่ 3

3.5 การกำหนดสมบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างแบบจำลองของชิ้นส่วน

ผิวสัมผัสระหว่างแบบจำลองของคัมเบรกและผ้าเบรกมีการกำหนดสมบัติดังต่อไปนี้

3.5.1 สมบัติการเสียดทาน

สมบัติการเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุสองชิ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 2 [13]

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติการเสียดทานกับอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	100	200	300	400
ค่าสมบัติการเสียดทาน	0.38	0.41	0.39	0.24

3.5.2 การกำเนิดความร้อน

ขณะทำการเบรกผ้าเบรกจะสัมผัสกับคัมเบรกทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทาน ในการวิเคราะห์กำหนดให้พลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมด ซึ่งจากการคำนวณตามสมการที่ 5 พบว่าความร้อนถ่ายเทเข้าสู่คัมเบรก 90 เปอร์เซ็นต์ และถ่ายเทเข้าสู่ผ้าเบรก 10 เปอร์เซ็นต์

3.5.3 การนำความร้อนสัมผัส

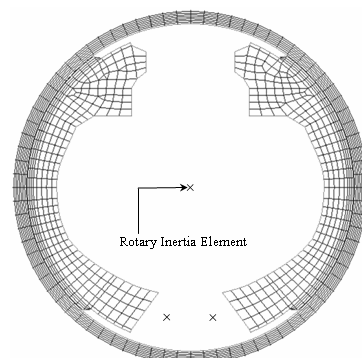
ความร้อนจากการเบรกจะถ่ายเทเข้าสู่ผ้าเบรกและคัมเบรกได้เพียงใดขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานความร้อนสัมผัส ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าการนำความร้อนสัมผัส (Thermal Contact Conductance) ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความดันสัมผัสระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง แต่ในการวิเคราะห์จะสมมติให้มีค่าคงที่เท่ากับ 30,000 วัตต์ต่อตารางเมตรเซลเซียส [14]

ตารางที่ 3 สมบัติวัสดุสำหรับแต่ละชิ้นส่วน

สมบัติ (หน่วย)	คัมเบรก	ก้ามเบรก	
	เหล็กหล่อสีเทา Class 35	ผ้าเบรก	แผ่นรองผ้าเบรกและเส้น
มอดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	101	34.3	210
ความหนาแน่นมวล (kg/m^3)	7250	2450	7860
อัตราส่วนปัวซอง	0.22	0.25	0.3
ค่าการนำความร้อน (W/m)	46.2	0.95	48
ความร้อนจำเพาะ (J/kg K)	512	825	452
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($1/^\circ\text{C}$)	1.1 E-05	1.1 E-05	1.1 E-05

3.6 การแบ่งเอลิเมนต์

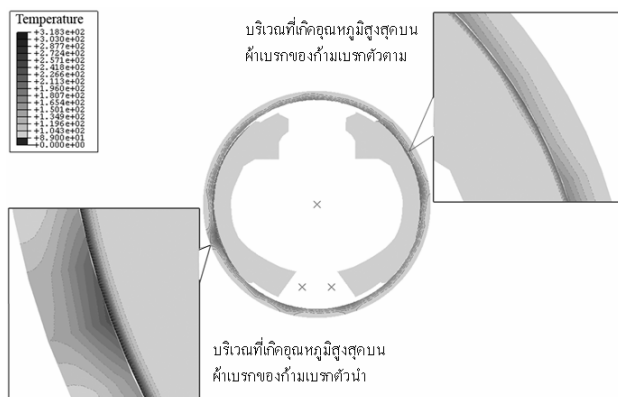
แบบจำลองถูกแบ่งให้เป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ เพื่อการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เอลิเมนต์สองมิติมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมเชิงเส้น ไม่มีโหนดที่กึ่งกลางของด้านแบบ Plane Strain (4-node bilinear Quadrilateral Coupled temperature-displacement plane strain element) สำหรับบริเวณคัมเบรก ผ้าเบรกและแผ่นรองผ้าเบรก ส่วนบริเวณเส้นก้ามเบรกเป็นเอลิเมนต์สองมิติซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมเชิงเส้นไม่มีโหนดที่กึ่งกลางของด้านแบบ Plane Stress (4-node bilinear Quadrilateral Coupled temperature-displacement plane stress element) โดยแต่ละโหนดจะมี 3 องศาอิสระ (Degree of Freedom) ประกอบด้วย 2 องศาอิสระสำหรับการเคลื่อนที่ และ 1 องศาอิสระสำหรับอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงผลของความเฉื่อยอันเนื่องมาจากน้ำหนักปริมาตรและน้ำหนักบรรทุกของรถยนต์ขณะทำการเบรก ซึ่งถูกถ่ายทอดสู่จุดศูนย์กลางการหมุนของแบบจำลองคัมเบรกในรูปแบบของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสมมูล โดยคำนวณได้ตามสมการที่ 8 และกำหนดด้วย Rotary Inertia Element ซึ่งเป็นเอลิเมนต์แบบจุดที่วางตัวอยู่บนแกนหมุน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4. ผลการวิเคราะห์

จากการประมวลผลพบว่าการกระจายอุณหภูมิบนดุมเบรกจะเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอโดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งและเวลาที่ใช้ในการเบรก ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4 ในช่วงเริ่มต้นการเบรก อุณหภูมิตรงตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดบนดุมเบรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วสำหรับทุกกรณี เนื่องจากภาระที่กระทำกับดุมเบรกจะทำให้ผ้าเบรกเคลื่อนที่กดเข้ากับผิวสัมผัสของดุมเบรกและเกิดความดันสัมผัสสูง ปริมาณความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานในการเบรกจึงสูงกว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุ สำหรับกรณีเบรกอย่างรุนแรงที่ความเร็วสูงขณะไม่มีการบรรทุกจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงกว่าและช่วงเวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะนานกว่า เนื่องจากภาระที่กระทำกับดุมเบรกและความเร็วรถยนต์มีค่าสูงผ้าเบรกจึงเคลื่อนที่กดเข้ากับผิวสัมผัสของดุมเบรกอย่างรุนแรงและเกิดแรงเสียดทานมาก อุณหภูมิจึงเพิ่มสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ เมื่อเบรกไปได้ระยะหนึ่งความเร็วเชิงมุมของดุมเบรกจะลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือจำนวนครั้งในการสัมผัสกันระหว่างผ้าเบรกกับตำแหน่งใด ๆ บนดุมเบรกในแต่ละรอบการหมุนจะมีค่าลดลง การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุจะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรม的增加ของอุณหภูมิมากขึ้น อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่ จากนั้นอุณหภูมิก็จะมีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานมีค่าน้อยกว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำจากบริเวณที่มีการสัมผัสเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุของดุมเบรก ดังแสดงในรูปที่ 5

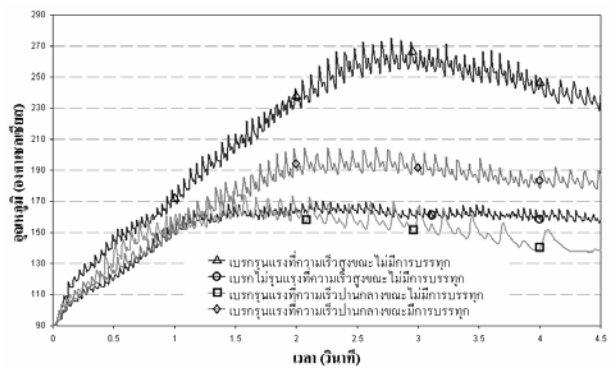


รูปที่ 4 การกระจายของอุณหภูมิบนดุมเบรกเบรกที่เวลา 3 วินาที สำหรับกรณีเบรกรุนแรงที่ความเร็วสูงเมื่อไม่มีการบรรทุก

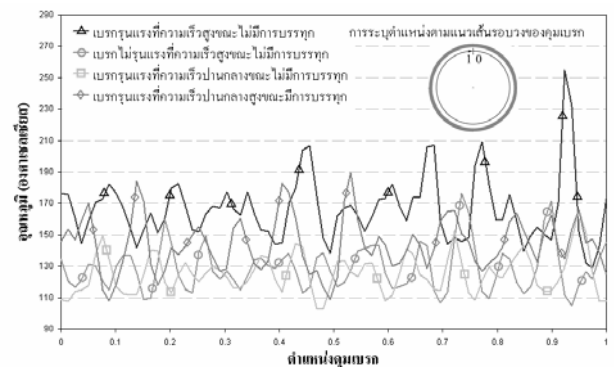
จากรูปที่ 6 พบว่าลักษณะการกระจายอุณหภูมิบนผิวสัมผัสของดุมเบรกด้านในสำหรับกรณีการเบรกอย่างรุนแรงที่ความเร็วสูงขณะไม่มีการบรรทุกจะมีค่าสูงกว่ากรณีอื่นที่ศึกษา เนื่องจากเกิดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีการกระจายไม่สม่ำเสมอเนื่องจากขณะทำการเบรกผ้าเบรกและดุมเบรกจะมีความดันสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและตำแหน่งมากกว่าซึ่งส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิมีความเปลี่ยนแปลงสูงและเกิดความไม่เสถียรภาพเนื่องจากความยืดหยุ่นทางความร้อนเพราะมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่จุดใด ๆ กับบริเวณข้างเคียงสูง

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตรงตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดบนผ้าเบรกตัวนำและตัวตามเทียบกับกับเวลา มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8

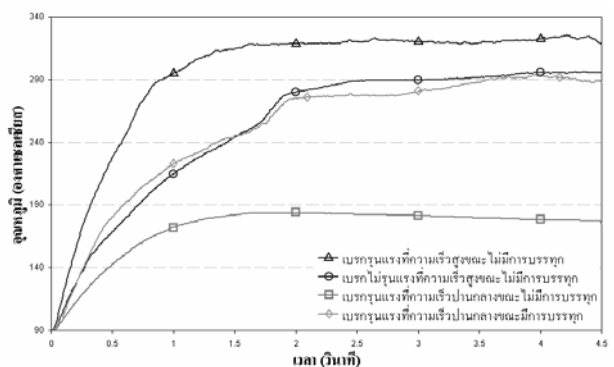
โดยอุณหภูมิที่ตำแหน่งใด ๆ สำหรับกรณีเบรกอย่างรุนแรงที่ความเร็วสูงขณะไม่มีการบรรทุกจะมีค่าสูงกว่ากรณีอื่นเนื่องจากใช้แรงในการเบรกมากจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานมาก ส่วนอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผ้าเบรกตัวนำที่มีค่าสูงกว่าบนผ้าเบรกตัวตามสำหรับทุกกรณี เนื่องจากผ้าเบรกตัวนำมีแรงเสียดทานช่วยเสริมให้ผ้าเบรกกดเข้ากับดุมเบรกได้แรงขึ้น รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตรงตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดบนผ้าเบรกตัวนำและตัวตามจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดบนดุมเบรก เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเบรกบนดุมเบรกและผ้าเบรกจะมีการถ่ายเทซึ่งกันและกันอยู่ตลอดเวลาที่มีการสัมผัสกัน



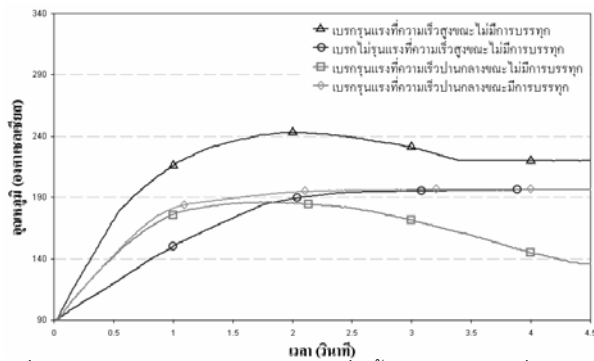
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดกับเวลาบนดุมเบรก



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะตามแนวเส้นรอบวงของดุมเบรกสำหรับสภาวะการเบรกแบบต่างๆที่เวลา 3 วินาที



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดบนผ้าเบรกตัวนำกับเวลา



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดบนผ้าเบรกตัวตามกับเวลา

5. บทสรุป

ดรัมเบรกทำงานโดยการเสียดสีกันระหว่างผ้าเบรกกับผิวสัมผัสของดรัมเบรกภายใต้ภาระที่กระทำบริเวณก้ามเบรกทำให้เกิดพลังงานความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานและถ่ายเทเข้าสู่ชิ้นส่วนผ่านทางผิวสัมผัสของชิ้นส่วนทั้งสอง โดยความเร็วของรถยนต์ขณะทำการเบรกและแรงที่ใช้ในการเบรกเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดพลังงานความร้อนซึ่งส่งผลให้ผิวสัมผัสของดรัมเบรกและผ้าเบรกเกิดการขยายตัวและเสียรูป การกระจายแรงกดและพื้นที่สัมผัสที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะไม่สม่ำเสมอและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างยังส่งผลให้ลักษณะการกระจายพลังงานความร้อนและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปด้วย โดยพลังงานความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานและอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสจะมีค่าสูงขึ้นมากในบริเวณที่ได้รับแรงกดสูงขึ้น ถ้าหากภาระและความเร็วรถยนต์ขณะทำการเบรกมีค่าสูงเกินไปจะทำให้ผิวดรัมเบรกบางบริเวณมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเป็น "Hot Spot" ขึ้น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าความไม่เสถียรของการยึดหยุ่นทางความร้อน ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือน และเสียง อีกทั้งยังทำให้สมรรถนะในการเบรกลดลง และอาจทำให้ชุดเบรกเกิดความเสียหายได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hohmann, C., Schiffner, K., Oerter, K. and Reese, H., 1999, "Contact Analysis for Drum Brakes and Disk Brakes Using ADINA", Computers & Structures, Vol. 72, pp. 185-198.
- [2] Valvano, T. and Lee, K., 2000, "An Analytical Method to Predict Thermal Distortion of a Brake Rotor", SAE Technical Paper, No. 000445.
- [3] Zagrodzki, P., Lam, K.B., Al Bahkali, E. and Barber, J.R., 2001, "Nonlinear Transient Behavior of a Sliding System with Frictionally Excited Thermoelastic Instability", ASME Journal of Tribology, Vol. 123, pp. 699-707.
- [4] Gao, C.H. and Lin, X.Z., 2002, "Transient Temperature Field Analysis of a Brake in a Non-Axisymmetric Three-Dimensional Model", Journal of Material Processing Technology, Vol. 129, pp. 513-517.
- [5] Choi, J.H. and Lee, I., 2003, "Finite Element Analysis of Transient Thermoelastic Behaviors in Disk Brakes", WEAR, Vol. 257, pp. 47-58.
- [6] สุรเชษฐ์ ชูติมา, กรุณา ดันวิสุทธิ, วีระชัย วิวัฒนพงศ์พันธ์ และ เบญจรัตน์ หงส์คำมี, 2547, "ข้อพิจารณาในการออกแบบจานเบรกสำหรับรถยนต์ 1", วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 27, ฉบับที่ 2, หน้า 191-193.
- [7] อำนาจ สิริวัฒนผลกุล, 2547, การศึกษาพฤติกรรมของจานเบรกรถยนต์ภายใต้สภาวะการเบรกแบบต่างๆ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 65-67.
- [8] Iombriller, S.F. and Canale, A.C., 2001, "Analysis of Emergency Braking Performance with Particular Consideration of Temperature Effects on Brakes", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 23 n.1.
- [9] Huang, Y.M. and Shyr, J.S., 2002, "On Pressure Distributions of Drum Brakes", ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 124, pp. 115-120.
- [10] Limpert, R., 1999, Brake Design and Safety, Society of Automotive Engineer, United States of America, 525 p.
- [11] Japanese Automobile Standard JASO C404, "Truck and Bus-Service Brake Road Test Procedures", 1999, pp. 1-23.
- [12] F.Cardarelli, Materials Handbook, Springer, Great Britain, 2000, p. 9.
- [13] A.J. Day and T.J. Newcomb, "The Dissipation of Friction Energy from the Interface of an Annular Disc Brake", Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 198D, No.11, 1984, pp. 201-209.
- [14] Lee, K., 1999, "Numerical Prediction of Brake Fluid Temperature Rise during Braking and Heat Soaking", SAE Technical Paper, No. 990483.