

ผลกระทบของความเร็วยนต์ต่อพฤติกรรมของงานเบรกในขณะเบรก

สุรเชษฐ์ ชูติมา¹ ทศนพ กำเนิดทอง² และ อำนาจ สิริวัฒนผลกุล³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

ระบบเบรกของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในปัจจุบันมักนิยมใช้ดิสเบรกเป็นส่วนประกอบหลักเนื่องจากมีสมรรถนะในการเบรกสูง สำหรับการขับขี่โดยทั่วไปดิสเบรกจะถูกใช้เพื่อปรับเปลี่ยนความเร็วของรถยนต์ให้เหมาะสมกับสภาพการจราจร โดยงานเบรกจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะของการเบรกซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะในการเบรก ความเร็วของรถยนต์ น้ำหนักบรรทุก และปัจจัยอื่นๆ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วยนต์ในขณะเบรกต่อพฤติกรรมของงานเบรกโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลวัตพิจารณาผลกระทบทางกลและความร้อนควบคู่กัน โดยวิเคราะห์ความร้อนเนื่องจากความเสียดทานพร้อมๆ กับการชะลอการหมุนของงานเบรก มีประเด็นที่พิจารณาคือ ความร้อน อุณหภูมิ และการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการเบรกที่ความเร็วยนต์แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่า การเบรกขณะที่รถยนต์มีความเร็วสูงจะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งบนผิวของงานเบรกทั้งสองด้านมาก จึงมีการโก่งตัวของงานเบรกสูง เนื่องจากความร้อนส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนมาก ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนโดยมีปัจจัยหลักที่เกี่ยวพันคือความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุซึ่งควรคำนึงถึงเป็นลำดับต้นๆ เมื่อต้องการออกแบบระบบเบรกให้มีสมรรถนะในการทำงานที่ดี นอกจากนั้นเทคนิคที่ใช้ในการวิจัยยังเหมาะสมที่จะประยุกต์เพื่อจำลองพฤติกรรมของงานเบรกและปรับปรุงคุณลักษณะต่างๆ ก่อนการผลิต

คำสำคัญ : งานเบรก / วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลวัต

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

³ นักวิจัย ศูนย์ปฏิบัติการคอมพิวเตอร์เพื่องานวิจัยทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

Effect of Automotive Speed on the Behaviors of Brake Disc during Braking

Surachate Chutima¹, Thoatsanope Kamnerdtong², and Amnart Siriwattanapolkul³
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

Modern passenger cars are using disc brakes in the braking system for their high performance. In general, brake is used to adjust the speed of the vehicle to suit varieties of traffic conditions. Brake disc should behave differently according to the applied forces, the vehicle speed, the total weight and etc. This work aims to study the effect of the vehicle speed during braking on the behaviors of the brake disc using coupled thermo-mechanical field in a dynamic finite element analysis. Both brake disc deceleration and frictional heat generated are considered simultaneously. The monitoring parameters are generated heat, temperature and vibration occurred under various vehicle speeds. The results showed that braking at high vehicle speed gave highly non-uniform temperature field on both rubbing surfaces of the brake disc due to the excessive frictional heat generated. Consequently, high thermoelastic distortion that leads to severe brake disc vibration is arisen. These analytical results are clearly indicating the importance of material capability for heat transfer on braking performance which is a previous factor to improve the design consideration of the braking system. Moreover, the methodology applied is suitable to adopt for studying and improving the brake disc behaviors prior to production.

Keywords : Brake Disc / Dynamic Finite Element Analysis

¹ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering.

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering.

³ Researcher, Center of Operation for Computer Aided Research Engineering, Department of Mechanical Engineering.

1. บทนำ

เบรกเป็นอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยที่มีความสำคัญและจำเป็นมากที่สุดประเภทหนึ่งสำหรับรถยนต์ นอกจากนี้จะต้องทำหน้าที่เช่นการทำให้รถยนต์หยุด การลดความเร็วหรือรักษาความเร็วของรถยนต์ให้คงที่ และการช่วยให้รถยนต์ไม่เคลื่อนที่เมื่อต้องการจอดบนทางลาดเอียงแล้ว เมื่อใช้งานจะต้องไม่เกิดการสั่นสะเทือนหรือมีเสียงซึ่งส่งผลต่อความรู้สึกสะดวกสบายและความเชื่อมั่น

ความสามารถในการเบรกของรถยนต์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่นพฤติกรรมของผู้ขับขี่ สภาพวะในการขับขี่ (ความเร็วและสภาพของถนน) สมบัติของยางรถยนต์ และการออกแบบระบบเบรก ในส่วนของการออกแบบระบบเบรก สิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานได้แก่คุณสมบัติของชิ้นส่วนต่างๆ ในระบบเบรก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการเบรกขณะที่รถยนต์มีความเร็วสูง ชิ้นส่วนต่างๆ จะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และอาจส่งผลให้เกิดอาการเบรกไม่จับ (Brake fade) การโก่งตัวหรือการแตกร้าวของจานเบรกเนื่องจากภาวะทางความร้อนตลอดจนอาจมีการสั่นสะเทือนและเสียงดังเกิดขึ้นในขณะที่เบรกได้ด้วย การเข้าใจหรือทำนายพฤติกรรมดังกล่าวในระหว่างที่ยังอยู่ในขั้นตอนของการออกแบบจึงเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาระบบเบรกให้มีสมรรถนะในการเบรกที่ดีขึ้น

วิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการศึกษาพฤติกรรมของจานเบรกระหว่างการเบรกได้แก่การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งสามารถช่วยให้การออกแบบและพัฒนา ระบบเบรกทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การศึกษาพฤติกรรมของจานเบรกโดยใช้แบบจำลองที่ผ่าน มาจะแยกวิเคราะห์ระหว่างภาวะทางความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานและภาวะทางกลโดยที่ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติ [1-7]

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงพลวัตโดยพิจารณา ผลจากภาวะทางความร้อนและภาวะทางกลไปพร้อมๆ กัน ซึ่งจะทำให้เห็นถึงพฤติกรรมของแบบจำลองที่เปลี่ยนไปตาม เวลาได้ชัดเจนขึ้น โดยปัจจัยหลักที่คำนึงถึงคือผลของ ความเร็วรถยนต์ที่มีต่อพฤติกรรมในขณะที่เบรกของจานเบรก อันได้แก่ ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการสั่นสะเทือนของจานเบรก ระบบเบรกที่พิจารณาประกอบด้วย

จานเบรกแบบแผ่นเหล็กตันและคาลิเปอร์แบบลอยซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กับรถยนต์ต่างๆ ไป โดยในการพิจารณานี้ จะกระทำภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐานความปลอดภัย Japanese Automobile Standard C402 [8]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกระจายความร้อนเนื่องจากการเบรกสู่จานเบรกและผ้าเบรก

พลังงานความร้อนในขณะที่เบรกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทานระหว่างผ้าเบรกและจานเบรกจะถ่ายเทเข้าสู่ผ้าเบรกและจานเบรกด้วยปริมาณที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์อุณหภูมิในชิ้นส่วนที่เกิดขึ้นเนื่องการเบรคนั้น จำเป็นต้องทราบอัตราส่วนการกระจายความร้อนระหว่างผ้าเบรกและจานเบรกซึ่งขึ้นอยู่กับความต้านทานความร้อน (Thermal resistance) ของชิ้นส่วนทั้งสองก่อน Limpert [9] ได้เสนอวิธีการคำนวณหาอัตราส่วนการกระจายความร้อนดังกล่าวโดยสำหรับการเบรกช่วงสั้นๆ สามารถที่จะพิจารณาจานเบรกและผ้าเบรกให้เป็นวัตถุถึงไม่จำกัดขนาด (Semi-infinite body) และไม่มีการระบายความร้อน จากเงื่อนไขซึ่งอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสของชิ้นส่วนทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน และความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเบรกมีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่เข้าสู่จานเบรกและผ้าเบรกจะได้ว่า

$$\frac{q''_R}{q''_P} = \left(\frac{\rho_R c_R k_R}{\rho_P c_P k_P} \right)^{1/2} \quad (1)$$

เมื่อ q''_P คือ ความร้อนที่เข้าสู่ผ้าเบรก

q''_R คือ ความร้อนที่เข้าสู่จานเบรก

c_P คือ ความร้อนจำเพาะของผ้าเบรก

c_R คือ ความร้อนจำเพาะของจานเบรก

k_P คือ การนำความร้อนของผ้าเบรก

k_R คือ การนำความร้อนของจานเบรก

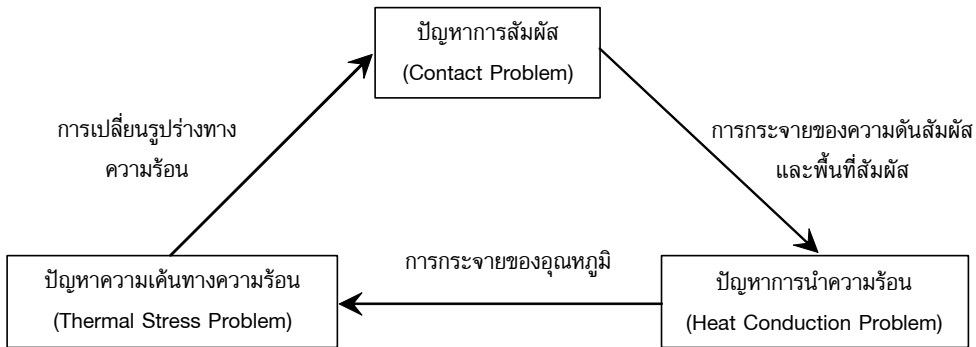
ρ_P คือ ความหนาแน่นของผ้าเบรก

ρ_R คือ ความหนาแน่นของจานเบรก

2.2 การสัมผัสแบบยึดหยุ่นทางความร้อน (Thermoelastic Contact)

จากลักษณะการทำงานของดิสเบรกซึ่งต้องมีการเสียดสีกันระหว่างผ้าเบรกกับจานเบรกภายใต้แรงกดที่ผ้าเบรกกระทำ จะเกิดพลังงานความร้อนจากเนื่องจากความเสียดทาน (Frictional Heat Generation) และถ่ายเทเข้าสู่ชิ้นส่วนผ่านทางผิวสัมผัสของชิ้นส่วนทั้งสอง พลังงานความร้อนดังกล่าวนี้ทำให้ชิ้นส่วนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางความร้อนและส่งผลให้สภาพการสัมผัสเปลี่ยนแปลงซึ่งได้แก่ ลักษณะการกระจายของความดันสัมผัสและพื้นที่สัมผัส จึงทำให้การกระจายพลังงานความร้อนและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงด้วย บริเวณใดที่มีความดันสัมผัสมากก็จะมีปริมาณพลังงานความร้อนมากส่งผลให้อุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าจาน

เบรกหมุนด้วยความเร็วสูงมากปริมาณพลังงานความร้อนจะยิ่งมีค่ามากจนทำให้ผิวจานเบรกในบางบริเวณมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดเป็น “Hot Spot” หรือ “Hot Band” ขึ้น และอาจส่งผลให้จานเบรกเกิดการแตกร้าหรือนำไปสู่ปัญหาการสั่นสะเทือนในระบบเบรกได้ ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า ความไม่เสถียรของการยึดหยุ่นทางความร้อน (Thermoelastic Instability) หรือ TEI [10-12] ลักษณะการสัมผัสซึ่งมีผลของความร้อนมาเกี่ยวข้องนี้เป็นการสัมผัสแบบยึดหยุ่นทางความร้อนซึ่งมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน (Coupling) ระหว่างปัญหาทางกลและทางความร้อนเป็นวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วัฏจักรความสัมพันธ์ระหว่างปัญหาทางกลและทางความร้อนในการสัมผัสแบบยึดหยุ่นทางความร้อน

2.3 การระบายความร้อนออกจากจานเบรก

เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนจานเบรกและผ้าเบรกเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อสมรรถนะของการเบรก ดังนั้นในการออกแบบจึงมีความพยายามที่จะทำให้อุณหภูมิมีค่าไม่สูงมากจนเกินไปด้วยการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ ความร้อนที่เกิดขึ้นบนจานเบรกส่วนใหญ่จะถูกระบายออกโดยการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาจากอากาศโดยรอบซึ่งเคลื่อนที่ผ่านจานเบรก สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้จานเบรกแบบแผ่นเหล็กตันซึ่งสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จากสูตรที่ได้จากการทดลอง [9, 13] โดยสำหรับกรณีที่ $Re > 2.4 \times 10^5$ ซึ่งเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

$$h_R = 0.04 \left(\frac{k_a}{D} \right) Re^{0.8} \tag{2}$$

- เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของจานเบรก (เมตร)
- k_a คือ การนำความร้อนของอากาศ (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
- Re คือ Reynolds Number [14]

2.4 การถ่ายเทการระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง

การถ่ายเทการระหว่างล้อหน้ากับล้อหลังเกิดขึ้นในขณะที่ความเร็วของรถยนต์ลดลงเนื่องจากโมเมนตัมของรถยนต์ยังคงกระทำไปข้างหน้าส่งผลให้เกิดการถ่ายเทการจากล้อหลังไปยังล้อหน้า โดยรถยนต์แต่ละรุ่นจะมีอัตรา

ส่วนการถ่ายเทภาระ (ϕ) ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง (Center of gravity) ของรถยนต์รุ่นนั้นๆ ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณค่าอัตราส่วนการถ่ายเทภาระสามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิง [9]

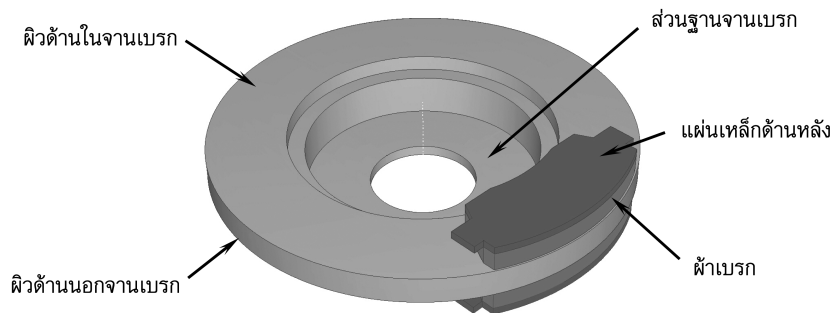
3. การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

จากลักษณะการทำงานของดิสเบรกซึ่งมีการกดชุดผ้าเบรกเพื่อสร้างแรงเสียดทานด้านการหมุนของจานเบรกนั้น งานเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างจานเบรกกับผ้าเบรก

จะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนและถ่ายเทสู่จานเบรกและผ้าเบรก ความร้อนนี้จะส่งผลให้ชิ้นส่วนเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง จึงทำการวิเคราะห์แบบพลวัต พิจารณาผลกระทบจากภาระทางกลและความร้อนไปพร้อมๆ กันโดยใช้แบบจำลองที่มีรายละเอียดดังนี้

3.1 แบบจำลองทรงตัน

แบบจำลองทรงตันประกอบด้วยชิ้นส่วนของจานเบรกแบบแผ่นเหล็กตันและผ้าเบรกสองชั้น ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองทรงตันของจานเบรกและผ้าเบรก

3.2 สมบัติของวัสดุ

ค่าสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสมบูรณหล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม

ซึ่งเป็นไปตาม Materials Handbook [15] โดยมีสมบัติสำหรับวัสดุจานเบรก (เหล็กหล่อสีเทา Class 35) และผ้าเบรกดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุจานเบรกและผ้าเบรก

สมบัติ (หน่วย)	จานเบรก	ผ้าเบรก	
	เหล็กหล่อสีเทา class 35	วัสดุความเสียดทาน	แผ่นเหล็กด้านหลัง
โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	100	34.3	209
ความหนาแน่นมวล (กก/ม. ³)	7350	2450	7800
อัตราส่วนปัวซอง	0.22	0.25	0.3
การนำความร้อน (W/m)	46.2	0.95	48
ความร้อนจำเพาะ (J/kg K)	512	825	452
ส.ป.ส.การขยายตัวทางความร้อน (1/°ซ)	1.1 E-5	1.1 E-5	1.1 E-5

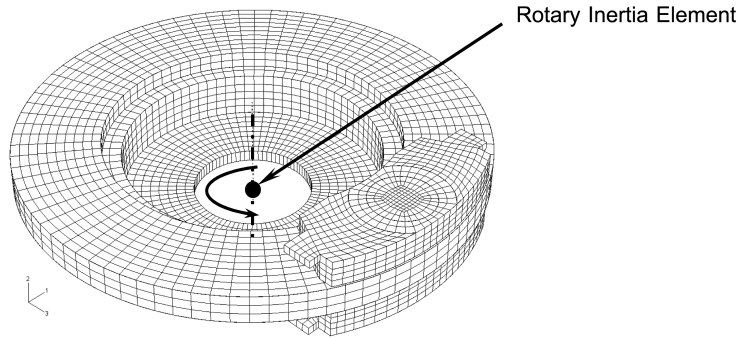
3.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองทรงตันจะถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบทรงเหลี่ยมหกหน้าเชิงเส้น (Linear hexahedral) โดยแต่ละโหนดของเอลิเมนต์มี 4 d.o.f. (Degree of Freedom) คือ 3 d.o.f. สำหรับการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Translation) ในทิศ x y และ z และ 1 d.o.f. สำหรับอุณหภูมิ นอกจากนี้ในการวิเคราะห์แบบพลวัตจะพิจารณาถึงผลของความเฉื่อยเนื่องจากมวลของรถยนต์ในแบบจำลองด้วยโดยใช้ Rotary Inertia Element เพื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสมมูล (Equiva-

lent Moment of Inertia) เนื่องจากมวลของรถยนต์รอบแกนการหมุนของจานเบรกเข้าไปในแบบจำลองดังสมการ [16]

$$I_{eq} = \frac{\phi W r^2}{2} \tag{3}$$

เมื่อ I_{eq} คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสมมูล (กก. ม.²)
 W คือ น้ำหนักของรถยนต์ (กก.)
 r คือ รัศมีของยางรถยนต์ (ม.)
 ϕ คือ อัตราส่วนการถ่ายเทภาระ



รูปที่ 3 การแบ่งเอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.4 สมบัติที่ผิวสัมผัส

ผิวสัมผัสระหว่างแบบจำลองของจานเบรกและผ้าเบรกกำหนดสมบัติดังนี้

3.4.1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ในการวิเคราะห์ที่กำหนดให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผ้าเบรกและจานเบรกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 2 [17]

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผ้าเบรกและจานเบรก

อุณหภูมิ (°ซ)	100	200	300	400
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	0.38	0.41	0.39	0.24

3.4.2 การกระจายความร้อนจากการเบรกสู่จานเบรกและผ้าเบรก

เนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างผ้าเบรกและจานเบรกจะเสียดสีกันในขณะที่เบรก ก่อให้เกิดความร้อนจากแรงเสียด

ทานขึ้นและถ่ายเทเข้าสู่ชิ้นส่วนทั้งสองในอัตราส่วนที่ไม่เท่ากันดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 จากสมการ (1) พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทสู่จานเบรกร้อยละ 90 และที่เหลือจะถ่ายเทสู่ผ้าเบรก

3.5 สภาวะเงื่อนไขเริ่มต้น

สภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นที่กำหนดในแบบจำลองได้แก่อุณหภูมิเริ่มต้นของจานเบรกและผ้าเบรกมีค่าเท่ากับ 80°C และความเร็วเชิงมุมในการหมุนของจานเบรกในขณะเริ่มเบรกซึ่งคำนวณได้จากความเร็วรถยนต์

3.6 สภาวะเงื่อนไขขอบ

สภาวะเงื่อนไขขอบที่กำหนดในแบบจำลองประกอบด้วย

3.6.1 เงื่อนไขการจับยึด

เนื่องจากจานเบรกจะถูกยึดเข้ากับดุมล้อในบริเวณส่วนฐานของจานเบรก ดังนั้นในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จึงกำหนดเงื่อนไขการจับยึดสำหรับพื้นผิวด้านในและด้านนอกในส่วนฐานของจานเบรกให้สามารถหมุนได้รอบแกนการหมุนของจานเบรกเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4

ผ้าเบรกจะถูกติดตั้งอยู่ในคาลิปเปอร์ โดยแผ่นเหล็กซึ่งอยู่ด้านหลังของผ้าเบรกจะบังคับผ้าเบรกให้เคลื่อนที่เข้า

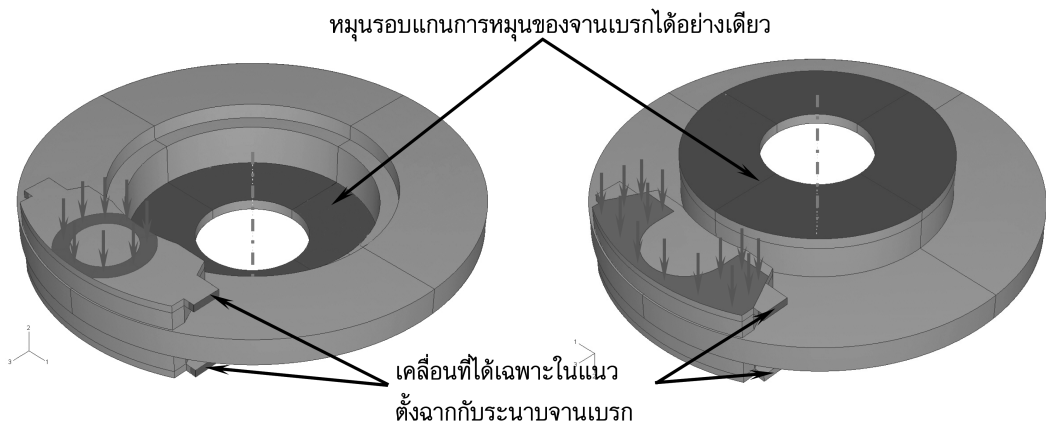
ออกตามรางของคาลิปเปอร์เท่านั้น พื้นผิวด้านข้างของแผ่นเหล็กจึงถูกกำหนดให้เคลื่อนที่เข้าหรือออกได้เฉพาะในแนวตั้งฉากกับระนาบของจานเบรกเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4

3.6.2 ภาวะที่กระทำกับผ้าเบรก

สำหรับคาลิปเปอร์แบบลอยซึ่งมีลักษณะการทำงานคือผ้าเบรกที่อยู่ด้านในของจานเบรกจะถูกดันด้วยลูกสูบ ส่วนผ้าเบรกด้านนอกจะถูกดันด้วยส่วนของคาลิปเปอร์ที่มีลักษณะคล้ายง่ามนิ้ว (Finger) จะมีแรงที่กระทำกับผ้าเบรกทั้งสองด้านของจานเบรกเท่ากัน โดยแรงนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความดันน้ำมันเบรกซึ่งในการวิเคราะห์ที่กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 6 เมกกะปาสคาล แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการกระจายของแรงจะแตกต่างกัน ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4

3.6.3 เงื่อนไขการระบายความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาของอากาศรอบๆ จานเบรกสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) ดังในหัวข้อ 2.3 และกำหนดให้อากาศภายนอกที่ไหลผ่านจานเบรกมีอุณหภูมิบรรยากาศคือ 25°C



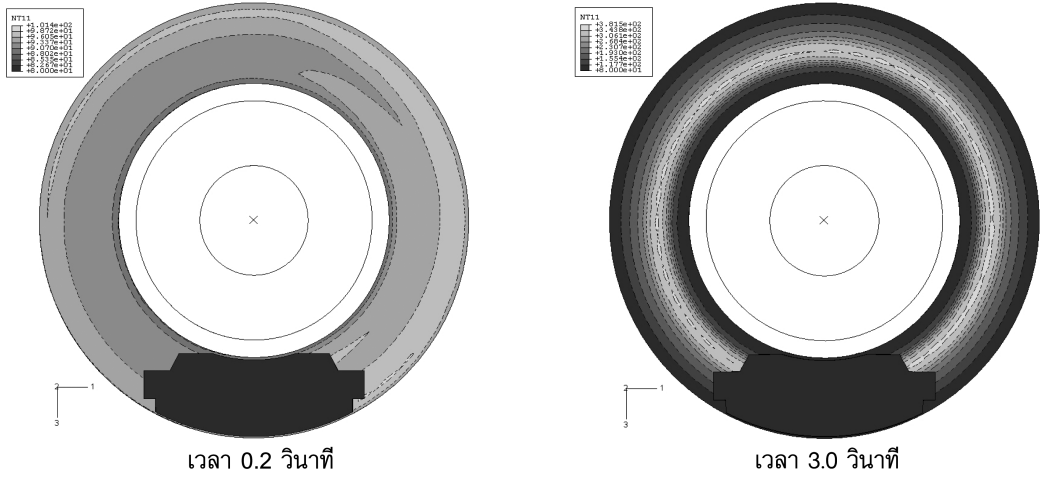
รูปที่ 4 เงื่อนไขการจับยึดและภาวะที่กระทำกับชุดเบรก

4. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล

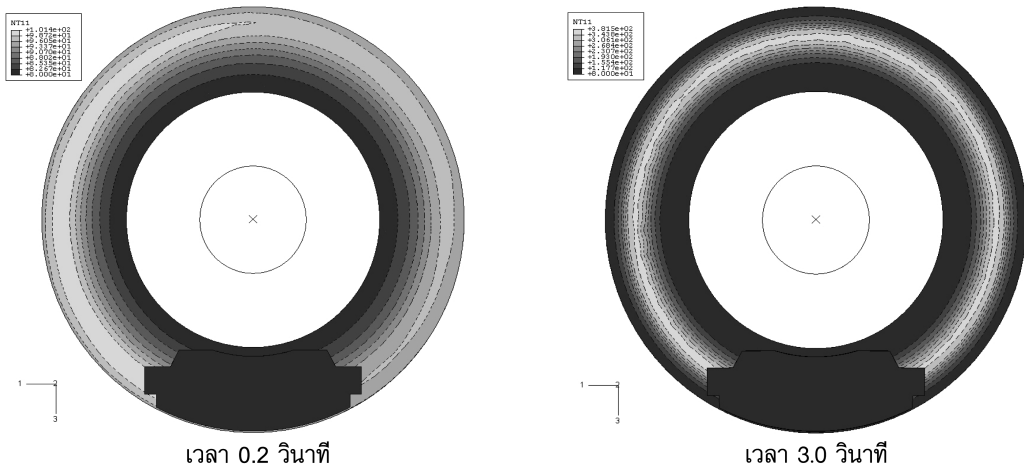
เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วรถยนต์ในขณะเบรกต่อพฤติกรรมของจานเบรก จึงทำการเปรียบเทียบการเบรกขณะที่รถยนต์มีความเร็ว 160 และ 100 กม./ชม. โดยส่วนที่ทำการศึกษาคือ การกระจายของอุณหภูมิและการสั่นสะเทือนของจานเบรกซึ่งมีผลดังนี้

4.1 การกระจายของอุณหภูมิบนจานเบรก

จากการคำนวณพบว่าเมื่อทำการเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม. อุณหภูมิบนผิวด้านในและด้านนอกของจานเบรกจะมีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน โดยที่ผิวแต่ละด้านจะมีลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของการเบรก ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



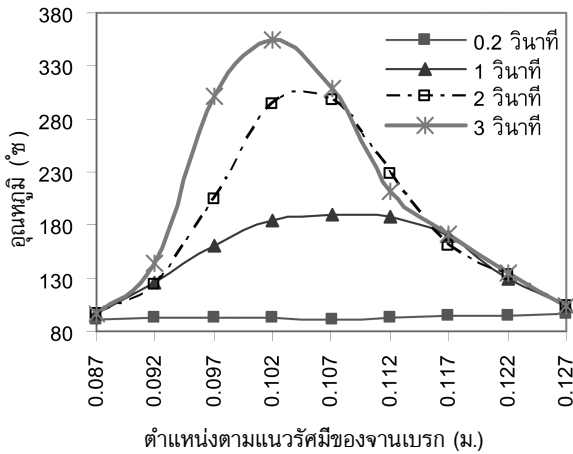
รูปที่ 5 การกระจายของอนุภาคมินิวัดด้านในจานเบรกที่เวลาต่างๆ สำหรับเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม.



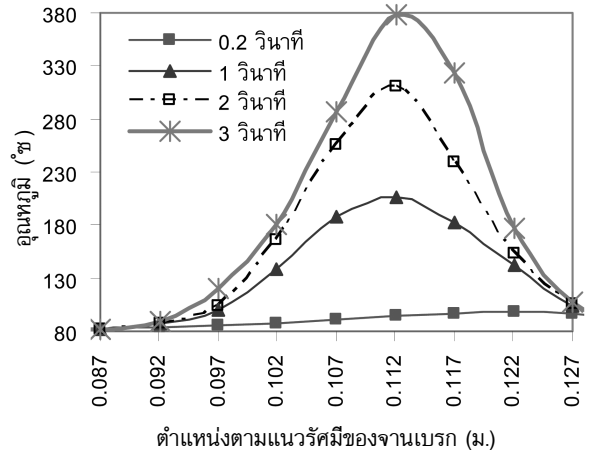
รูปที่ 6 การกระจายของอนุภาคมินิวัดด้านนอกจานเบรกที่เวลาต่างๆ สำหรับเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม.

ส่วนลักษณะการกระจายของอนุภาคมินิวัดด้าน
เบรกที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีบนผิวด้านในและด้าน

นอกของจานเบรกสำหรับเวลาที่ใช้ในการเบรกแตกต่างกัน
สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7(ก) และ 7(ข) ตามลำดับ



(ก) ผิวด้านใน

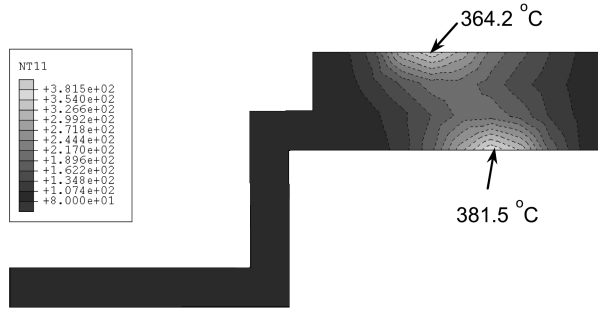


(ข) ผิวด้านนอก

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและตำแหน่งตามแนวรัศมีบนผิวจานเบรกที่เวลาต่างๆ สำหรับการเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม.

จากรูปที่ 7(ก) ที่ผิวด้านในของจานเบรกพบว่าในช่วงแรกของการเบรก (เวลา 0.2 วินาที) อุณหภูมิบริเวณขอบด้านใน (รัศมี 0.087 ม.) และขอบด้านนอก (รัศมี 0.127 ม.) จะสูงกว่าบริเวณที่อยู่ภายในเล็กน้อยเนื่องจากภาวะที่ลูกสูบกระทำกับผ้าเบรกมีความดันสัมผัสสูงที่บริเวณขอบจาน โดยขอบนอกจะมีอุณหภูมิสูงกว่าเนื่องจากมีความเร็วเชิงเส้นในการเคลื่อนที่สูงกว่าขอบด้านใน เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นบริเวณผิวส่วนกลางของจานเบรกจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากเนื่องจากการสะสมของความร้อน แต่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอเนื่องจากผลของภาวะทางความร้อนทำให้ชิ้นส่วนขยายตัวและเปลี่ยนรูปร่างส่งผลให้พื้นที่สัมผัสและความดันสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป บริเวณที่มีความดันสัมผัสสูงก็จะมีอุณหภูมิสูง ลักษณะของการกระจายอุณหภูมิตามผิวด้านในของจานเบรกจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยภายหลังจากการเบรก 3 วินาที จะมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 364.2 °C ที่ตำแหน่ง 0.102 ม. ตามแนวรัศมี

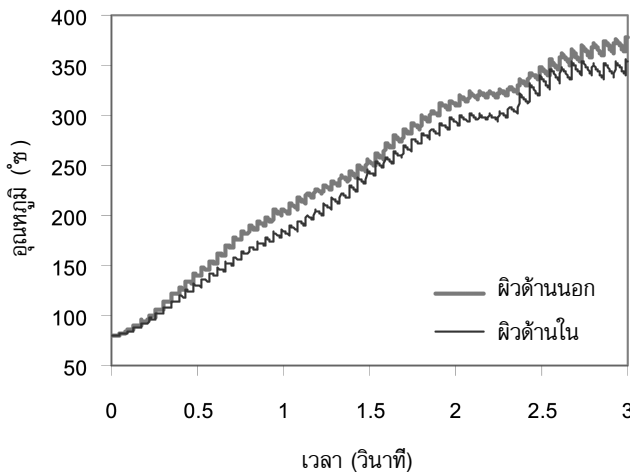
ส่วนลักษณะการกระจายอุณหภูมิตามผิวด้านนอกของจานเบรกซึ่งแสดงในรูปที่ 7(ข) พบว่าในช่วงแรกของการเบรกจะมีอุณหภูมิสูงที่บริเวณขอบด้านนอกเนื่องจากภาวะที่คาลิปเปอร์กระทำกับผ้าเบรก ส่งผลให้มีปริมาณความร้อนเกิดขึ้นสูงในบริเวณดังกล่าว เมื่อเวลาในการเบรกเพิ่มขึ้นพฤติกรรมเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะคล้ายกันกับผิวด้านในของจานเบรก แต่มีลักษณะของการกระจายอุณหภูมิต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากได้รับภาวะทางกลที่มีลักษณะต่างกัน โดยภายหลังจากการเบรก 3 วินาที จะมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 381.5 °C ที่ตำแหน่ง 0.112 ม. ตามแนวรัศมี ซึ่งสูงกว่าผิวด้านในเล็กน้อยเนื่องจากตำแหน่งสัมผัสที่ผิวด้านนอกอยู่ห่างจากแกนการหมุนของจานเบรกมากกว่าความเร็วเชิงเส้นในการเคลื่อนที่จึงสูงกว่าและเกิดปริมาณความร้อนขึ้นมากกว่า โดยได้แสดงการกระจายของอุณหภูมิตามภาพตัดขวางของจานเบรกในวินาทีที่ 3 ไว้ในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การกระจายของอุณหภูมิบนภาพตัดขวางของจานเบรกในวินาทีที่ 3 ของการเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม.

รูปที่ 9 แสดงลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสำหรับตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดบนผิวจานเบรกทั้งสองด้านที่เวลาต่างๆ เมื่อเบรกขณะที่รถยนต์มีความเร็ว 160 กม./ชม. เส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเป็นฟันปลา โดยแนวโน้มมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอจนถึงปลายวินาทีที่ 2.5 ความชันของค่าเฉลี่ยจึงเริ่มลดลง ช่วงที่ความชันมีค่าเป็นบวกแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื่องจากตำแหน่งที่ทำการวัดมีการเสียดสีกับ

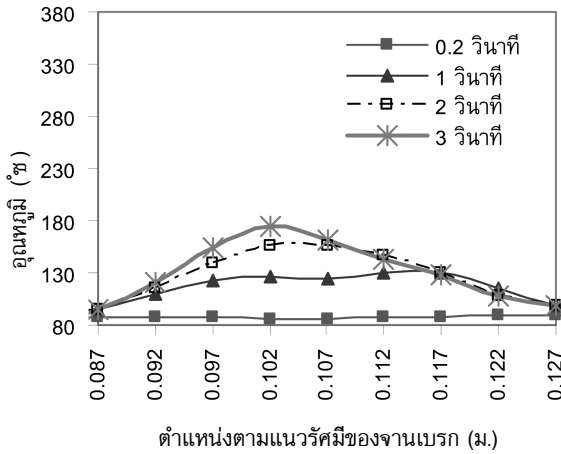
ผ้าเบรก ในขณะที่ช่วงที่มีความชันลดลงแสดงถึงอุณหภูมิมีการลดลงเนื่องจากการระบายความร้อนโดยการพาจากอากาศ เหตุที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมิมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการเบรกเพิ่มขึ้นเพราะความร้อนจากแรงเสียดทานเกิดขึ้นน้อยลง ซึ่งเป็นผลจากการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความเร็วรอบในการหมุน



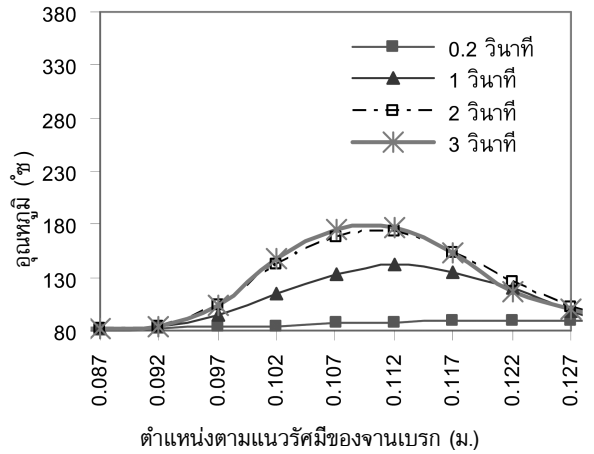
รูปที่ 9 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดบนผิวจานเบรกทั้งสองด้านที่เวลาต่างๆ สำหรับการเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม.

ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิตั้งสองด้านของจานเบรกเมื่อเบรกขณะที่รถยนต์มีความเร็ว 100 กม./ชม. จะคล้ายกับกรณีเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม.

ดังแสดงในรูปที่ 10 แต่ความแตกต่างกันคือค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแต่ละด้านของจานเบรกและผลต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง



(ก) ผิวด้านใน

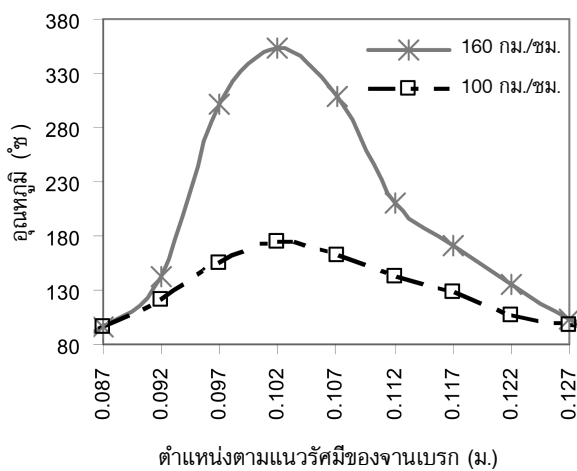


(ข) ผิวด้านนอก

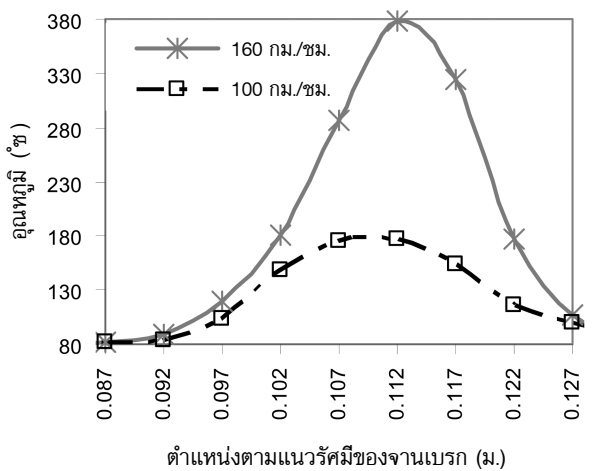
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและตำแหน่งตามแนวรัศมีบนผิวจานเบรกที่เวลาต่างๆ สำหรับการเบรกที่ความเร็ว 100 กม./ชม.

เมื่อใช้ช่วงเวลากการเบรกเท่ากัน อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิวจานเบรกทั้งสองด้านสำหรับการเบรกที่ความเร็ว 100 กม./ชม. จะต่ำกว่าการเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม. เนื่องจากความเร็วรอบในการหมุนของจานเบรก

น้อยกว่า ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นและถ่ายเทสู่จานเบรกกับผ้าเบรกน้อยกว่า ตลอดจนมีเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนน้อย ส่งผลให้อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งมีความแตกต่างกันน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 11

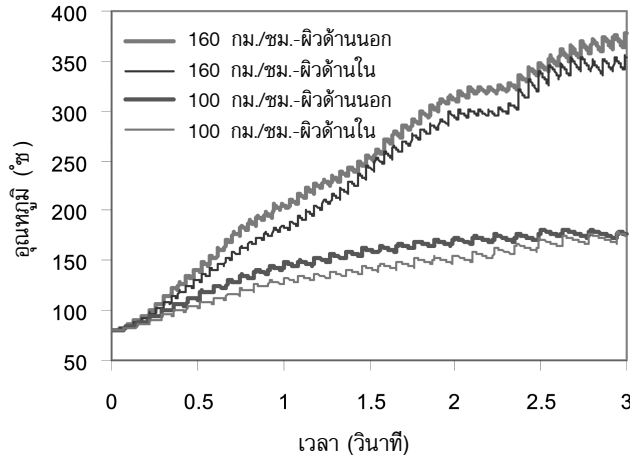


(ก) ผิวด้านใน



(ข) ผิวด้านนอก

รูปที่ 11 เปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมีบนผิวจานเบรกในวินาทีที่ 3 ของการเบรกที่ความเร็ว 160 และ 100 กม./ชม.



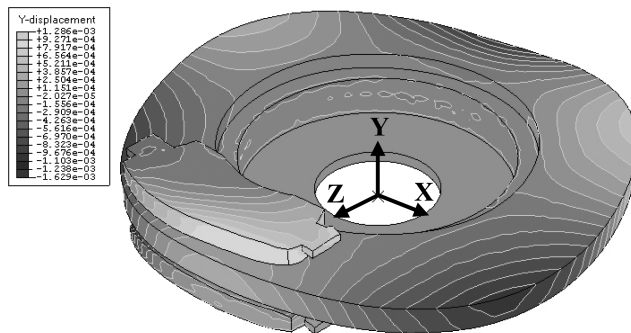
รูปที่ 12 เปรียบเทียบลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมุมที่ตำแหน่งอุณหภูมิมุมสูงสุดบนผิวจานเบรกทั้งสองด้าน สำหรับการเบรกที่ความเร็ว 160 และ 100 กม./ชม.

จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งที่มีอุณหภูมิมุมสูงสุดบนผิวจานเบรกทั้งสองด้านสำหรับการเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม. จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมุมสูงกว่าการเบรกที่ความเร็ว 100 กม./ชม. เพราะปริมาณความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างผ้าเบรกกับจานเบรกและถ่ายเทสู่จานเบรกของการเบรกที่ความเร็วสูงกว่าจะมีค่าสูงกว่า

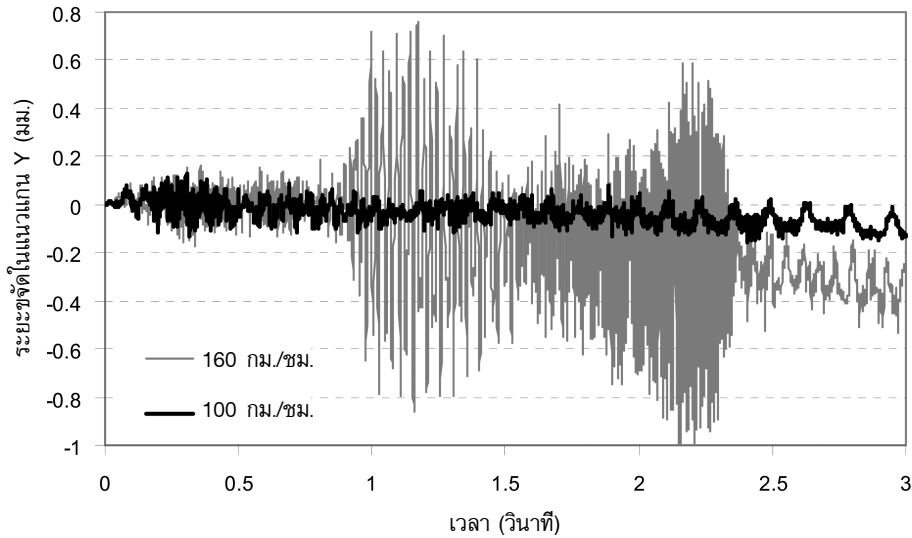
4.2 การสั่นสะเทือนของจานเบรก

จากการวิเคราะห์แบบพลวัตด้วยวิธีไฟไนต์

เอลิเมนต์ จะได้ค่าระยะขจัดของจุดต่างๆ บนจานเบรกที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในระหว่างการเบรก ทำให้สามารถเห็นพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของจานเบรกในขณะเบรกได้ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 13 ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นสะเทือนของจานเบรกที่เวลา 2.3 วินาที สำหรับการเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม. และเพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะการสั่นสะเทือนที่ชัดเจนขึ้น จึงแสดงค่าระยะขจัดตามแนวแกนการหมุน (แกน Y ในรูปที่ 13) ที่ตำแหน่งหนึ่งบนขอบด้านนอกของจานเบรกสำหรับเวลาต่างๆ เมื่อเบรกที่ความเร็ว 160 และ 100 กม./ชม. ในรูปที่ 14



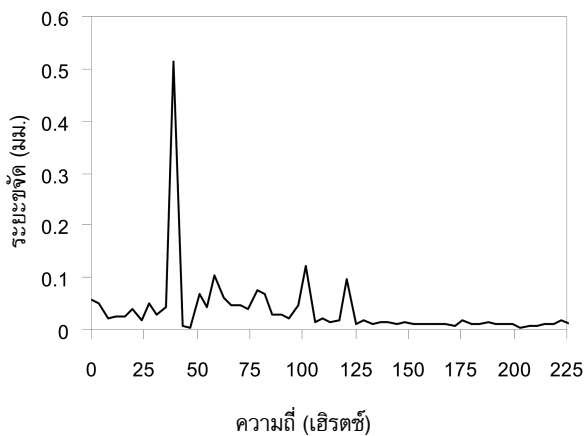
รูปที่ 13 รูปร่างการสั่นสะเทือนของจานเบรกสำหรับการเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม. ณ เวลา 2.3 วินาที



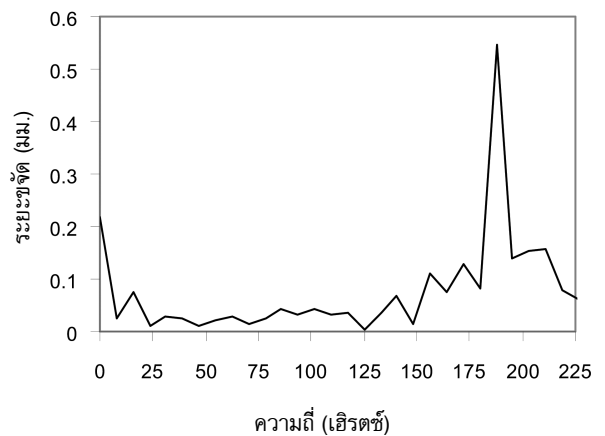
รูปที่ 14 เปรียบเทียบระยะขจัดตามแกน Y ของตำแหน่งหนึ่งบนขอบด้านนอกจานเบรกที่เวลาต่างๆ สำหรับการเบรกที่ความเร็ว 160 และ 100 กม./ชม.

จากรูปที่ 14 พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม. จะมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อทำการเบรกต่อไปจนกระทั่งถึงช่วงเวลา 1-1.25 วินาที แอมพลิจูด (Amplitude) ของการสั่นสะเทือนจะเพิ่มขึ้นโดยมีความถี่ประมาณ 40 เฮิร์ตซ์ ดังรูปที่ 15(ก) และในช่วงเวลา 2.2-2.33 วินาที ความถี่จะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 190 เฮิร์ตซ์ ดังในรูปที่ 15(ข) เมื่อเวลาประมาณ

2.4 วินาที แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนจึงจะลดลง ส่วนการเบรกที่ความเร็ว 100 กม./ชม. มีลักษณะของการสั่นสะเทือนที่แตกต่างไปโดยในช่วงเริ่มต้นจะมีลักษณะการสั่นสะเทือนคล้ายกันแต่มีแอมพลิจูดน้อยกว่าโดยความถี่ของการสั่นสะเทือนจะลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงเวลา 2-2.5 วินาที ความถี่ของการสั่นสะเทือนจะอยู่ที่ประมาณ 8 เฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 16

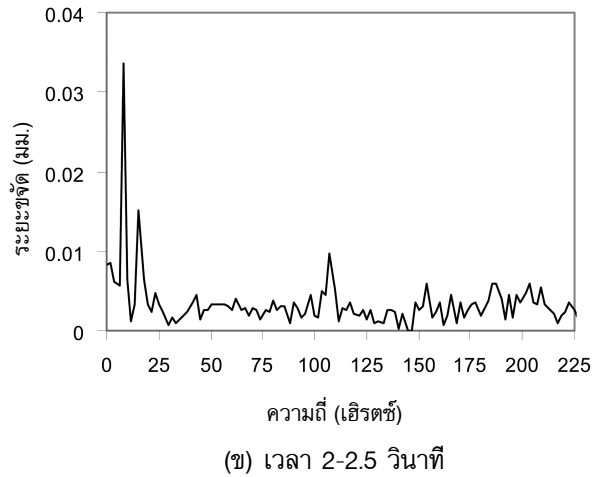
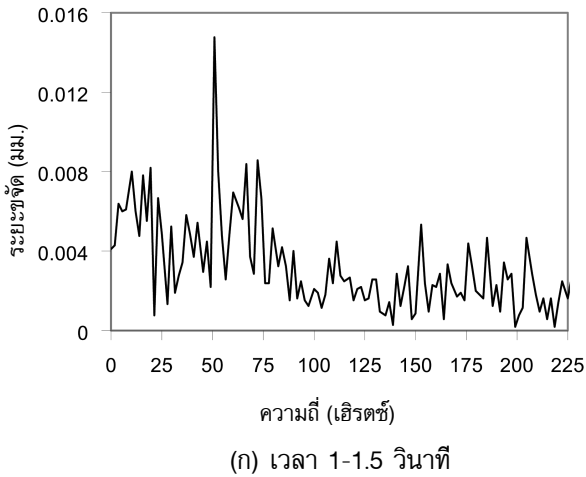


(ก) เวลา 1-1.25 วินาที



(ข) เวลา 2.2-2.33 วินาที

รูปที่ 15 สเปกตรัมความถี่ในการสั่นสะเทือนของตำแหน่งหนึ่งบนขอบด้านนอกจานเบรก เมื่อเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม.



รูปที่ 16 สเปกตรัมความถี่ในการสั่นสะเทือนของตำแหน่งหนึ่งบนขอบด้านนอกจานเบรก
เมื่อเบรกที่ความเร็ว 100 กม./ชม.

พฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ในช่วงเริ่มต้นของการเบรก การสั่นสะเทือนจะเกิดจากภาระที่กระทำเพื่อดันผ้าเบรกให้เสียดสีกับจานเบรก กระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น เมื่อเบรกทำงานต่อไปปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างผ้าเบรกและจานเบรกจะเป็นปัจจัยหลักต่อพฤติกรรมสั่นสะเทือน สำหรับการเบรกที่ความเร็ว 160 กม./ชม. อัตราการเกิดปริมาณความร้อนและถ่ายเทสู่ชิ้นส่วนจะสูงทำให้ชิ้นส่วนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางความร้อนมาก ส่งผลให้เกิดการสัมผัสที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างจานเบรกกับผ้าเบรกในแต่ละองศาของการหมุนจึงมีความผันแปรของแรงบิดในการเบรก (Brake Torque Variation) [18-19] ซึ่งกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ส่วนการเบรกที่ความเร็ว 100 กม./ชม. จะไม่เกิดพฤติกรรมดังกล่าวขึ้นเนื่องจากความเร็วรอบในการหมุนของจานเบรกไม่สูงพอ ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณไม่มากพอที่จะทำให้เกิดพฤติกรรมดังกล่าว

5. สรุป

จากการศึกษาสามารถสรุปผลของความเร็วรถยนต์ในขณะเบรกต่อพฤติกรรมของจานเบรกได้ดังนี้

5.1 การกระจายของอุณหภูมิบนจานเบรก

การเบรกขณะที่รถยนต์มีความเร็วสูงจะทำให้

อุณหภูมิที่ผิวของจานเบรกทั้งสองด้านเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งบนผิวจานเบรกมาก เนื่องจากปริมาณความร้อนจากแรงเสียดทานถ่ายเทสู่จานเบรกและผ้าเบรกในอัตราสูง ทำให้ชิ้นส่วนขยายตัวและเปลี่ยนรูปมาก ส่งผลให้เกิดการสัมผัสที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างจานเบรกกับผ้าเบรก นอกจากนี้ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิมบนผิวแต่ละด้านของจานเบรกยังแตกต่างกันด้วยเนื่องจากการกระจายของแรงที่กระทำจากผ้าเบรกแต่ละด้านแตกต่างกัน

5.2 การสั่นสะเทือนบนจานเบรก

จากลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอและแตกต่างกันบนผิวของจานเบรกและผ้าเบรกทั้งสองด้าน ทำให้แต่ละบริเวณบนชิ้นส่วนทั้งสองเกิดการขยายตัวที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดการสัมผัสที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างจานเบรกกับผ้าเบรกในแต่ละองศาของการหมุน จึงมีความผันแปรของแรงบิดในการเบรกที่กระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น โดยขนาดของการสั่นสะเทือนจะแปรผันกับความเร็วของรถยนต์ในขณะเบรก

6. ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพฤติกรรมของจานเบรกภายใต้สภาวะการเบรกทั้งสองแบบพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อ

พฤติกรรมต่างๆ ของจานเบรกและสมรรถนะในการเบรก ได้แก่การระทางความร้อนที่เกิดขึ้นบนผิวจานเบรก และความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของจานเบรก ซึ่งส่งผลต่อลักษณะ การกระจายอุณหภูมิและอาจนำไปสู่ปัญหาการสั่นสะเทือนตลอดจนการแตกร้าวของจานเบรกได้ จึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาอย่างยิ่งในการออกแบบและปรับปรุงพฤติกรรมของจานเบรกให้ดีขึ้น การปรับปรุงการระทางความร้อนที่ถ่ายเทสู่จานเบรกและผ้าเบรกให้มีลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากที่สุดอาจทำได้โดย ในส่วนของจานเบรก ควรจะปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำจานเบรก เช่น เลือกวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนสูง หรือมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ หรือทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหารูปลักษณะที่สามารถลดการโก่งงอของจานเบรกโดยยังคงไว้ซึ่งความแข็งแรงและมีมิติตามเงื่อนไขของการใช้งาน สำหรับในส่วนของผ้าเบรกควรเลือกวัสดุความเสียดทานที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยยังคงไว้ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงต้นทุนทางด้านวัตถุดิบด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) คณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณ มา ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

1. Lee, K., 1999, "Numerical Prediction of Brake Fluid Temperature Rise during Braking and Heat Soaking", *SAE Technical Paper No. 990483*.
2. Valvano, T. and Lee, K., 2000, "An Analytical Method to Predict Thermal Distortion of a Brake Rotor", *SAE Technical Paper No. 000445*.
3. Koetniyom, S., Brooks, P.C., and Barton, D.C., 2002, "The Development of a Material Model for Cast Iron that can be used for Brake System Analysis", *Proceeding of the Institution of*

Mechanical Engineers, Vol. 216, Part D, pp. 349-362.

4. Choi, J.H. and Lee, I., 2003, "Finite Element Analysis of Transient Thermoelastic Behaviors in Disk Brakes", *Wear*, Vol. 257, pp. 47-58.

5. Voller, G.P., Tirovic, M., Morris, R., and Gibbens, P., 2003, "Analysis of Automotive Disc Brake Cooling Characteristics", *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 217, Part D, pp. 657-666.

6. สายประสิทธิ์ เกิดนิยม, 2544, "การวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิของจานเบรกรถยนต์ต่างๆ", *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15*, หน้า 115-124.

7. สุรเชษฐ์ ชูติมา กรรณา ตันวิสุทธิ วีระชัย วิวัฒน์ พงศ์พันธ์ และ เบญจรัตน์ หงษ์คำมี, 2547, "ข้อพิจารณาในการออกแบบจานเบรกสำหรับรถยนต์ 1", *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 2, หน้า 191-193.

8. Japanese Automobile Standard JASO C402, 1999, "Passenger Cars-Service Brake Road Test Procedures", pp. 1-32.

9. Limpert, R., 1999, *Brake Design and Safety*, Society of Automotive Engineer, United States of America, 525 p.

10. Yi, Y.B., Barber, J.R., and Hartsock, D.L., 2001, "Thermoelastic Instabilities in Automotive Disk Brakes-Finite Element Analysis and Experimental Verification", *Online Available: <http://www-personal.engin.umich.edu/~jbarber/cmispdf> [2004, November 12]*.

11. 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", *Journal of Tribology*, Vol. 123, pp. 699-708.

12. Cho, C. and Ahn, S., 2002, "Transient Thermoelastic Analysis of Disk Brake Using the

Fast Fourier Transform and Finite Element Method”, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 25, pp. 215-243.

13. Grieve, D.G., Barton, D.C., Crolla, D.A., and Buckingham, J.T., 1998, “Design of a Lightweight Automotive Brake Disc Using Finite Element and Taguchi Techniques”, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, Part D, Vol. 212, pp. 245-254.

14. อำนาจ สิริวัฒนผลกุล, 2547, “การศึกษาพฤติกรรมของจานเบรกรถยนต์ภายใต้สภาวะการเบรกแบบต่างๆ”, วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี.

15. Cardarelli, F., 2000, *Materials Handbook*, Springer, Great Britain, p. 9.

16. Japanese Industrial Standard JIS D 0210, 1995, “General Rules of Brake Test Method of

Automobiles and Motor Cycles”, pp. 1-9.

17. Day, A.J. and Newcomb, T.J., 1984, “The Dissipation of Friction Energy from the Interface of an Annular Disc Brake”, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 198D, No.11, pp. 201-209.

18. Jacobsson, H., 2003, “Disc Brake Judder Considering Instantaneous Disc Thickness and Spatial Friction Variation”, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 217, Part D, pp. 325-342.

19. Jacobsson, H., 2003, “Aspects of Disc Brake Judder”, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 217, Part D, pp. 419-430.