



การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของจานเบรกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study of Heat Transfer on Disc Brake Using Finite Element Method

นายราวิน วิวัฒน์วิทยา
นายวสันต์ จินนะ
นายเอกชัย ทิลาว

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2554

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของจานเบรกด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
โดย	นายราวิน วิวัฒน์วิทยา นายวสันต์ จินนะ และ นายเอกชัย ทิลาวัณ
ปีการศึกษา	2554
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สมจินต์ พ่วงเจริญชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ศุภชัย หล้าคำ

บทคัดย่อ

จานเบรกเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีบทบาทในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยโดยตรง ดังนั้นจึงมีการออกแบบจานเบรกกันอย่างแพร่หลายเพื่อพัฒนาความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 2 แบบคือ จานเบรกแบบตรงและจานเบรกแบบกลับ

จากลักษณะความแตกต่างทางกายภาพดังกล่าว ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งของประสิทธิภาพการเบรก ดังนั้นคณะผู้จัดทำโครงการจึงได้เล็งเห็นความสำคัญและจัดสร้างชุดทดสอบการกระจายอุณหภูมิของจานเบรกเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของจานเบรกทั้ง 2 แบบภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับในช่วงสภาวะคงตัวและไม่พิจารณาการนำและการแผ่รังสีความร้อนคงที่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยอาศัยมาตรฐาน JASO C406 : 2000 เป็นแนวทางในการทดสอบแล้วนำค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้มาใช้เป็นข้อมูลในการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิและพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของจานเบรกทั้ง 2 แบบ ในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ

จากการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรกทั้งสองแบบมีลักษณะพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนไปในทิศทางเดียวกัน โดยจานเบรกแบบตรงมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากกว่าจานเบรกแบบกลับเฉลี่ย 4.4 % ในขณะที่การจำลองแสดงให้เห็นว่าจานเบรกแบบตรงมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนมากกว่าจานเบรกแบบกลับเฉลี่ย 3.02 % ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าจานเบรกแบบตรงมีความต่างอุณหภูมิมากกว่าจานเบรกแบบกลับ ดังนั้นจึงมีโอกาสเกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิมากกว่าและอาจเกิดการเสียดสีระหว่างการใช้งานได้มากกว่าจานเบรกแบบกลับ

Thesis Title Study on the Heat Ventilation of Disc Brake via the Finite Element Method (FEM)

Author Mr.Rawin Wiwatwittaya, Mr.Wasan Jinna, and Mr.Eakachai Tilao

Academic Year 2011

Major Mechanical Engineering

Advisor Mr.Somjin Paungcharoenchai and Mr.Supachai Lukkam

Abstract

Admittedly, a disc brake plays an important role in the auto part industry since it concerns directly with safety. Therefore, the wide range of disc brake has been designed in order to develop its heat ventilation. There are two physical kinds of brakes: front-vented disc brake and back-vented disc brake.

As a result such difference affects directly to the heat ventilation which is a vital factor of the brake's capability. The project team recognizes its importance and tries to create the test to find out the temperature diffusion of the disc brake with the hope to evaluate the coefficient of the heat convection varied by the temperature changing in both kinds of brakes under the forced heat convection in the steady condition. However, the steady heat conduction and radiation value will not be counted because it is insignificant. The JASO C406: 2000 Standard is adopted as a guideline in the test. The outcome coefficient of heat conduction will be used in the simulation via the Finite Element Method (FEM) in order to study the temperature diffusion and heat ventilation of both kinds of brakes at each temperature level.

Consequently the experimental work reveals then the heat convection coefficients of both kinds are unidirectional. The heat convection coefficient of the front-vented disc brake is 4.40 % in average higher than that of the back-vented disc brake. From the simulation, the front-vented disc brake can ventilate the heat better than the back-vented disc brake at 3.02 % in average. It can be summarized that the front-vented disc brake has more temperature difference than the back-vented disc brake. Hence, the front-vented disc brake likely gets more stress from the temperature than the back-vented disc brake and might be damaged during the operation more than the another type.

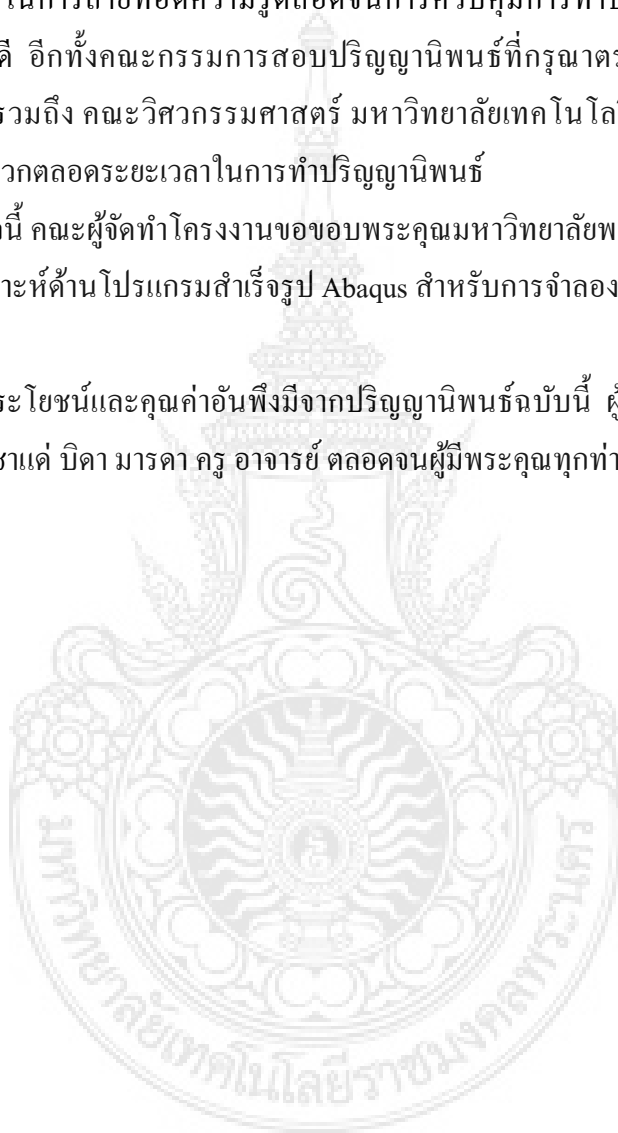
กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์สมจินต์ พ่วงเจริญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ และ อาจารย์ศุภชัย หลีกคำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมปริญญาานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำในการถ่ายทอดความรู้ตลอดจนการควบคุมการทำปริญญาานิพนธ์จนประสบความสำเร็จด้วยดี อีกทั้งคณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ที่กรุณาตรวจสอบความถูกต้องของปริญญาานิพนธ์ รวมถึง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้อำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาในการทำปริญญาานิพนธ์

นอกจากนี้ คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้าน โปรแกรมสำเร็จรูป Abaqus สำหรับการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อีกทั้งประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำโครงการขอมอบให้เป็น กตัญญูตราบูชาแต่ บิดา มารดา ครู อาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวมา ณ ที่นี้

ราวิน วิวัฒน์วิทยา
วสันต์ จินนะ
เอกชัย ทิลาว



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฏ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	3
2. ทฤษฎี	
2.1 ลักษณะทั่วไปสำหรับการไหลในท่อ	4
2.1.1 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน	5
2.1.2 เลขเรย์โนลด์ส์กำหนดแบบการไหล	5
2.1.3 การกระจายความเร็วสำหรับการไหลเต็มท่อ	6
2.2 การถ่ายเทความร้อน	8
2.2.1 การนำความร้อน	8
2.2.2 การพาความร้อน	9
2.3 หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	15
2.3.1 ชนิดของเอลิเมนต์	16
2.3.2 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์	18

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ	21
3.2 สร้างชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	22
3.2.1 ชุดอุโมงค์ลม	23
3.2.2 ชุดอุปกรณ์จับงานเบรก	25
3.2.3 ชุดให้ความร้อนให้กับงานเบรก	26
3.2.4 ชุดเก็บข้อมูล	28
3.3 ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรกทั้งสองแบบ	29
3.3.1 อุปกรณ์และเครื่องทดสอบ	30
3.3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ	31
3.4 สร้างแบบจำลองงานเบรก 2 แบบ	38
3.4.1 แบบจำลองงานเบรกแบบตรง	38
3.4.2 แบบจำลองงานเบรกแบบกลับ	39
3.5 จำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	39
3.5.1 กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการจำลอง	40
3.5.2 ขั้นตอนในการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus	40
4. การทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล	
4.1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	41
4.1.1 งานเบรกแบบตรง	42
4.1.2 งานเบรกแบบกลับ	44
4.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	45
4.2 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	47
4.2.1 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสถานะการทดสอบ	48
4.2.2 การจำลองพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน	50
4.2.3 การเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิ	54
4.2.4 การเปรียบเทียบความสามารถการถ่ายเทความร้อน	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดสอบ	56
5.2 สรุปผลการจำลอง	57
5.3 ปัญหาและอุปสรรค	57
5.4 ข้อเสนอแนะ	57

บรรณานุกรม

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งาน

ภาคผนวก ข แบบชุดจับงานเบรก

ประวัติผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบระหว่างการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับการไหลเต็มท่อ	8
2.2 ค่า b และ n จาก Reynolds No.	13
2.3 ค่า a และ m จาก Rayleigh Number สำหรับของไหลไหลผ่านพื้นผิวที่วางในแนวตั้ง	14
2.4 ค่า a และ m จาก Rayleigh No. สำหรับของไหลไหลผ่านผิวทรงกระบอกแนวตั้ง	15
2.5 ค่า a และ m จาก Rayleigh No. สำหรับของไหลไหลผ่านผิวน้ำแผ่นเรียบ ในแนวนอน	15
3.1 กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการจำลอง	40
4.1 รูปแบบแสดงผลการทดสอบ	42
4.2 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 100°C งานเบรกแบบตรง	43
4.3 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 200°C งานเบรกแบบตรง	43
4.4 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 300°C งานเบรกแบบตรง	43
4.5 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 100°C งานเบรกแบบกลับ	44
4.6 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 200°C งานเบรกแบบกลับ	45
4.7 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 300°C งานเบรกแบบกลับ	45
4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรกแบบตรง	46
4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรกแบบกลับ	46
4.10 เปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลอง	49
4.11 รูปแบบการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	50
4.12 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆและเปอร์เซ็นต์การถ่ายเทความร้อน	51
4.13 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆและเปอร์เซ็นต์การถ่ายเทความร้อน	52
4.14 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆและเปอร์เซ็นต์การถ่ายเทความร้อน	53
4.15 ผลต่างของอุณหภูมิ	54
4.16 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในอุณหภูมิต่างๆ	55

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การแตกตัวของงานเบรกเนื่องจากความเค้นและความล้าทางความร้อน	2
2.1 บริเวณปากทางเข้าและบริเวณการไหลเต็มท่อสำหรับการไหลภายในท่อ	5
2.2 การกระจายความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนเต็มท่อ	6
2.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วย่อยในแนวแกนกับเวลาสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน	7
2.4 เอลิเมนต์มิติเดียว	16
2.5 เอลิเมนต์สองมิติ (ก) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม	17
2.6 เอลิเมนต์สามมิติ (ก) ชนิดปริซึม หรือ ชนิดทรงหกหน้า (ข) ชนิดกรวยสามเหลี่ยม หรือชนิดทรงสี่เหลี่ยม	17
3.1 ภาพขั้นตอนการดำเนินโครงการ	22
3.2 ออกแบบชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	23
3.3 ออกแบบอุโมงค์ลม	24
3.4 โครงอุโมงค์ลม	24
3.5 สร้างชุดอุโมงค์ลม	24
3.6 ชุดมอเตอร์	25
3.7 ชุดอินเวอร์เตอร์	25
3.8 ออกแบบชุดอุปกรณ์ทำความร้อน	26
3.9 อุปกรณ์ทำความร้อน	26
3.10 ชุดปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า	27
3.11 อุปกรณ์ปรับกระแสไฟฟ้า	27
3.12 ชุดแปลงถ่าน	28
3.13 ตัวตรวจจับอุณหภูมิ	28
3.14 ตำแหน่งตัวตรวจจับอุณหภูมิงานเบรกแบบตรง	29
3.15 ตำแหน่งตัวตรวจจับอุณหภูมิงานเบรกแบบกลับ	29
3.16 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด	30
3.17 มัลติมิเตอร์	30
3.18 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า	30
3.19 เครื่องวัดรอบ	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 เครื่องวัดความเร็วลม	31
3.21 ขั้วงานเบรก	32
3.22 ติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิ	32
3.23 ประกอบงานเบรกแบบตรง	32
3.24 ประกอบงานเบรกแบบกลับ	33
3.25 ประกอบงานเบรกกับเฟลา	33
3.26 ติดตั้งอุโมงค์	33
3.27 ประกอบงานเบรกเข้ากับเฟลาและอุโมงค์	34
3.28 วัดความเร็วรอบของเฟลา	34
3.29 วัดความเร็วลม	34
3.30 จุดปรับกระแสไฟให้กับชุดอุปกรณ์ทำความร้อน	35
3.31 วัดกระแสไฟระหว่างการปรับความร้อน	35
3.32 ตำแหน่งตรวจจับอุณหภูมิ	36
3.33 ผลอุณหภูมิแต่ละตำแหน่ง	36
3.34 ตำแหน่งตรวจจับอุณหภูมิด้วยอินฟาเรด	36
3.35 ตำแหน่งตรวจจับอุณหภูมิด้วยอินฟาเรดงานเบรกด้านนอก	37
3.36 ตำแหน่งตรวจจับอุณหภูมิด้วยอินฟาเรดงานเบรกด้านใน	37
3.37 ภาพสามมิติแบบจำลองงานเบรกแบบตรง	38
3.38 ภาพตัดแบบจำลองงานเบรกแบบตรง	38
3.39 ภาพสามมิติแบบจำลองงานเบรกแบบกลับ	39
3.40 ภาพตัดแบบจำลองงานเบรกแบบกลับ	39
4.1 ตำแหน่งอุณหภูมิบนงานเบรกแบบตรง	42
4.2 ตำแหน่งอุณหภูมิบนงานเบรกแบบกลับ	44
4.3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนงานเบรกทั้ง 2 แบบ	47
4.4 งานเบรกขนาด 12 องศาและการแบ่ง Mesh ในการจำลอง	48
4.5 การให้ความร้อนกับงานเบรก	48
4.6 การถ่ายเทความร้อนงานเบรก	49

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ตำแหน่งอุณหภูมิของงานเบรกแบบกลับและงานเบรกแบบตรง	50
4.8 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน 100 °C ของงานเบรกแบบกลับและงานเบรกแบบตรง	51
4.9 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน 200 °C ของงานเบรกแบบกลับและงานเบรกแบบตรง	52
4.10 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน 300 °C ของงานเบรกแบบกลับและงานเบรกแบบตรง	53
5.1 การถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน	56



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	m^2
C_p	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่	$J/kg \cdot K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ	m
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางของจานเบรกนอก	m
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางของจานเบรกใน	m
f	สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน	-
Gr	อัตราส่วนของแรงลอยตัว	-
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \cdot K$
h_{in}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวจานเบรกด้านใน	$W/m^2 \cdot K$
h_{out}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวจานเบรกด้านนอก	$W/m^2 \cdot K$
h_{ave}	ส่วนค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \cdot K$
$h_{ave,total}$	ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั้งสามความเร็วรอบ	$W/m^2 \cdot K$
k	ค่าการนำความร้อน	$W/m \cdot K$
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
Nu	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนไร้มิติที่สำคัญ	-
Pr	อัตราส่วนของโมเมนต์ตัมกับค่าการแพร่ความร้อน	-
Q	ปริมาณความร้อน	W
Q_{cond}	ปริมาณความร้อนโดยการนำ	W
Q_{conv}	ปริมาณความร้อนโดยการพา	W
Φ	การนำความร้อน	-
q	ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา	W
Ra	ใช้ในปัญหาการพาความร้อน	-
Re	อัตราส่วนแรงจากความเฉื่อยกับแรงจากความหนืด	-
St	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถูกพาไปโดยของไหล	-
T_{heater}	อุณหภูมิตัวทำความร้อน	$^{\circ}C$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T_{∞}	อุณหภูมิห้อง	$^{\circ}\text{C}$
T_{neck}	อุณหภูมิคอจานเบรก	$^{\circ}\text{C}$
T_{out}	อุณหภูมิผิวงานเบรกด้านนอก	$^{\circ}\text{C}$
T_{in}	อุณหภูมิผิวงานเบรกด้านใน	$^{\circ}\text{C}$
T_{ave}	อุณหภูมิเฉลี่ย	$^{\circ}\text{C}$
$T_{Initial}$	อุณหภูมิเริ่มต้น	$^{\circ}\text{C}$
T_{Final}	และอุณหภูมิสุดท้าย	$^{\circ}\text{C}$
V	ความเร็วเฉลี่ยของการไหล	m/s
v	ความหนืดจลน์ของของไหล	m^2/s
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3
μ	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
$\frac{\partial T}{\partial n}$	ผลต่างของอุณหภูมิเทียบกับความยาว	-
ΔT	ผลต่างของอุณหภูมิ	$^{\circ}\text{C}$ หรือ K
μ	ความหนืดไดนามิกหรือความหนืดสัมบูรณ์	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวของอากาศ	1/K

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์ได้มีการเติบโตและเข้ามามีบทบาทอย่างมากในประเทศไทย งานเบรกเป็นอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีบทบาทในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งมีทั้งการนำเข้าและผลิตภายในประเทศ โดยมีการออกแบบเพื่อแข่งขันและพัฒนาเชิงประสิทธิภาพกันอย่างกว้างขวาง ทั้งการออกแบบที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างออกไป เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย และเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นทั้งด้านลักษณะทางกายภาพในการออกแบบ จึงจำเป็นต้องมีการค้นคว้าในด้านการตรวจสอบผลกระทบต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการออกแบบและผลิตออกมา แต่เครื่องทดสอบนี้มีราคาสูงมาก ส่งผลให้เกิดความขาดแคลนด้านเครื่องมือทดสอบการเบรก

นอกจากนี้แล้ว ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานยังคงพบเห็นอยู่ทั่วไป เนื่องจากหลักการทำงานของระบบเบรกโดยทั่วไปเป็นการหน่วงรถหรือการทำให้ชะลอความเร็วตามที่ผู้ขับขี่ต้องการ ซึ่งมีหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ซึ่งหมายถึงความเร็วของล้อรถ เมื่อผ้าเบรกสัมผัสจานเบรกทำให้เกิดทอร์คส่งไปยังที่ล้อรถในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ทำให้ความเร็วรถลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดอุณหภูมิความร้อนที่จานเบรกในที่นี้คือการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิของจานเบรกในขณะที่เบรคนั้นเองปัจจัยดังกล่าวทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังชิ้นส่วนต่างๆที่เกี่ยวข้องกับระบบเบรกเช่น การกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอภายในจานเบรกซึ่งส่งผลต่อการเสีรูปร่างของจานเบรก การสูญเสียแรงเสียดทานจนทำให้เกิดอาการลิ้นไถลของผ้าเบรกการสึกหรอของอุปกรณ์ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานที่สั้นลงการแตกตัวของวัสดุเนื่องจากความเค้นทางความร้อนซึ่งขอขยายความว่าในการเบรกแต่ละครั้งจะเกิดความร้อนที่จานเบรกทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในตัวจานเบรกซึ่งส่วนที่จานเบรกสัมผัสกับผ้าเบรกจะเกิดอุณหภูมิสูงและส่วนที่ไม่สัมผัสผ้าเบรกจะอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิเกิดขึ้นในจานเบรก ทำให้เกิดเป็นความล้าทางความร้อนเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งขึ้นอยู่กับผลต่างอุณหภูมิและจำนวนการเบรกจะเกิดการแตกตัวของจานเบรกดังรูปที่ 1 และยังเป็นปัจจัยกระตุ้นทำให้เกิดการสันตะเทียนอีกด้วยดังนั้นจานเบรกจึงจำเป็นต้องมี

คุณสมบัติในการสะสมและระบายความร้อนให้เพียงพอและเหมาะสมต่อทุกสภาวะการใช้งาน จากผลกระทบที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ส่วนเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาให้เกิดขึ้นในระบบเบรก อย่างไรก็ตาม ปัญหาดังกล่าวเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับการใช้งานในชีวิตประจำวัน ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการสะสมความร้อนของจานเบรกจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะนำไปสู่การแก้ไขปัญหาดังกล่าวและใช้เป็นแนวทางในการออกแบบจานเบรกให้เหมาะสมกับลักษณะของการใช้งานในกรณีต่างๆ



รูปที่ 1.1 การแตกร้าวของจานเบรกเนื่องจากความเค้นและความล้าทางความร้อน [6]

จากปัญหาข้างต้นจึงทำให้เกิดการคิดค้นและออกแบบพัฒนาจานเบรกที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันออกไป 2 แบบเพื่อนำมาศึกษาการกระจายตัวและการถ่ายเทความร้อนบนจานเบรกทั้ง 2 แบบนี้ซึ่งลักษณะที่ต่างกันทางกายภาพถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเบรก และเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยโดยตรง แต่เนื่องจากเครื่องทดสอบมีราคาสูงมาก ฉะนั้นคณะผู้จัดทำจึงใช้การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แทน ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่หาใช้ได้สะดวก ราคาถูก ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลที่จะนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสะสมและถ่ายเทความร้อนของจานเบรกทั้งสองแบบเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ออกแบบสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะทางกายภาพที่คล้ายกันได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของงานเบรกแบบตรงและงานเบรกแบบกลับ
2. เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิของงานเบรก
3. เพื่อหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรก

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ใช้งานเบรกในการจำลอง 2 แบบ คือ งานเบรกแบบตรงและงานเบรกแบบกลับ
2. ทาการกระจายของอุณหภูมิในงานเบรกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. สภาวะการจำลองอ้างอิงจากมาตรฐาน JASO C406 : 2000 [7]
4. ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการทดสอบเป็นข้อมูลในการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4 ประโยชน์ที่ได้จากโครงการ

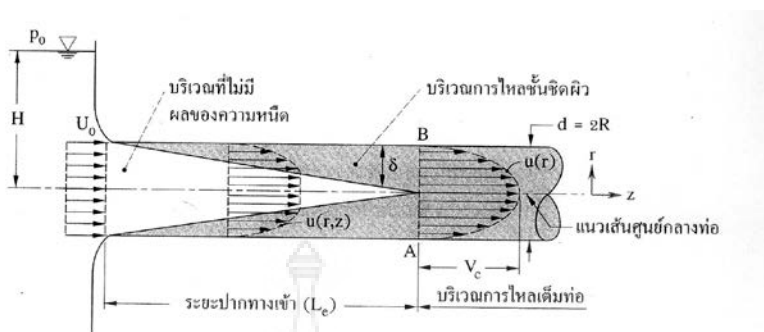
1. ทราบความสามารถการถ่ายเทความร้อนของงานเบรกแบบตรงและงานเบรกแบบกลับ
2. ทราบการกระจายอุณหภูมิของงานเบรก
3. ทราบสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรก
4. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการจำลองไปพัฒนาและปรับปรุงงานเบรกได้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ลักษณะทั่วไปสำหรับการไหลในท่อ [3]

การไหลภายในท่อจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้นั้นจะต้องมีความดันแตกต่างกันระหว่างจุดทั้งสองของไหลจึงสามารถไหลผ่านท่อไปได้ ในรูปที่ 2.1 เป็นการไหลเข้าท่อด้วยความเร็วคงตัว U_0 ผลของความหนืดบริเวณใกล้กับผนังท่อจะเกิดความต้านทานต่อการไหล ทำให้เกิดขึ้นชั้นขีดผิวในบริเวณใกล้กับผนังท่อนั้นภายใต้ข้อสมมุติฐานว่าไม่มีการลื่นไถลที่ผนังท่อ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งตามความยาวท่อในบริเวณใกล้ๆทางเข้าท่อนั้นพบว่าความเร็วเปลี่ยนแปลงกับระยะทางที่วัดได้ในแนวตั้งฉากกับผนังท่อ และเกิดความเค้นเฉือนกระทำต่อของไหลในทิศตรงกันข้ามกับการไหล และบริเวณที่ยังพบว่าโปรไฟล์ความเร็วเปลี่ยนแปลงในทิศทางการไหลอีกด้วย บริเวณดังกล่าวเรียกว่า บริเวณปากทางเข้า (Entrance region) เมื่อของไหลไหลผ่านท่อในช่วงต่อไป ชั้นขีดผิวจะพัฒนาจนความหนาชั้นขีดผิว (δ) เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงแนวเส้นศูนย์กลางท่อ (หน้าตัด AB) สำหรับบริเวณที่อยู่ภายนอกบริเวณการไหลชั้นขีดผิวจะเป็นบริเวณที่ไม่มีผลของความหนืด (Inviscid core) ในบริเวณปากทางเข้านั้นการกระจายความเร็วจะเปลี่ยนแปลงกับระยะตามพิกัด r และระยะในทิศการไหล $z = (u = u(r, z))$ เมื่อของไหลไหลผ่านบริเวณปากทางเข้าความเร็วจะไม่ขึ้นกับระยะทางในทิศการไหล แต่ความเร็วจะขึ้นกับพิกัด r เท่านั้น การไหลบริเวณนี้เรียกว่า บริเวณการไหลเต็มท่อ (Fully developed region) และพบว่าการกระจายความเร็วที่หน้าตัดของท่อที่ตำแหน่งใดๆตามความยาวท่อนั้นจะเป็นฟังก์ชันของระยะตามพิกัด r เท่านั้น $u = u(r)$ ทำให้โปรไฟล์ความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงตามทิศทางการไหลในบริเวณการไหลเต็มท่อนี้



รูปที่ 2.1 บริเวณปากทางเข้าและบริเวณการไหลเต็มท่อสำหรับการไหลภายในท่อ

2.1.1 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลภายในท่อสามารถจำแนกตามระดับความเร็วของการไหลเป็น 2 แบบได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) การไหลแบบราบเรียบจะพบว่าอนุภาคของไหลในชั้นของไหลหนึ่งๆ (Layer) จะยังคงอยู่ในชั้นของไหลนั้นตลอดการไหล เมื่อเกิดการไหลของชั้นของไหลหนึ่งบนอีกชั้นของไหลหนึ่งนั้นจะไม่เกิดการหมุนวน (Swirl) ตรงกันข้ามการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งการไหลจะมีอัตราการไหลที่สูง มีการไหลวน หมุนตัว และเวียนวนไปมาตลอดหน้าตัดท่อขณะที่ของไหลไหลผ่าน

2.1.2 เลขเรย์โนลด์ส์กำหนดแบบการไหล

โดยทั่วไปแล้วของไหลที่ไหลอยู่ได้ต่อเนื่องนั้น เนื่องจากมีแรงเฉื่อย กระทำในทิศการไหล และในขณะเดียวกันจะมีแรงเนื่องจากความหนืดกระทำในทิศตรงข้ามกับทิศการไหล ของไหลดังกล่าวจะไหลเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด ถ้าอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืดมีค่าสูงของไหลจะไหลเร็วมาก ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าต่ำของไหลจะไหลช้าลง อัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด ก็คือเลขเรย์โนลด์ส์ เลขเรย์โนลด์ส์นี้ใช้เป็นเลขแบบกำหนดแบบการไหลสำหรับการไหลแบบในท่อ จะเขียนความสัมพันธ์และสมการของเลขเรย์โนลด์ส์ได้ดังนี้

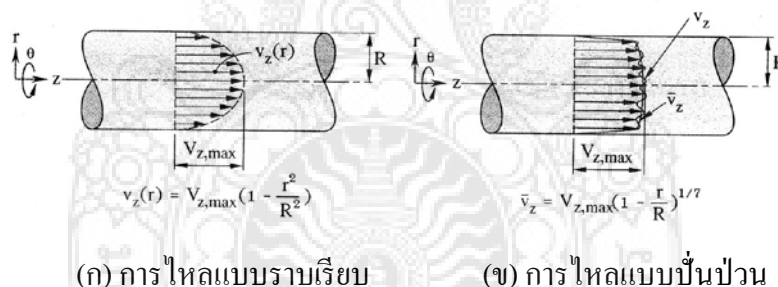
$$\text{Re} = \frac{\rho V^2 D^2}{\mu V L} \quad (2.1)$$

ดังนั้น
$$\text{Re} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (2.2)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล มีหน่วยเป็น (m/s)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ มีหน่วยเป็น (m)
 μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล มีหน่วยเป็น (N·s/m²)
 ν คือ ความหนืดจลน์ของของไหล มีหน่วยเป็น (m²/s)

สำหรับการไหลภายในท่อกลมแนวตรง การไหลจะเป็นการไหลแบบราบเรียบก็ต่อเมื่อ $\text{Re} < 2100$ และการไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้นเมื่อ $\text{Re} > 4000$ สำหรับบริเวณการเปลี่ยนแปลง (Transition region) การไหลอาจเป็นได้ทั้งแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน สำหรับการใช้นั้นจะกำหนดให้บริเวณการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อ $\text{Re} = 2100$ สำหรับการไหลภายในท่อ

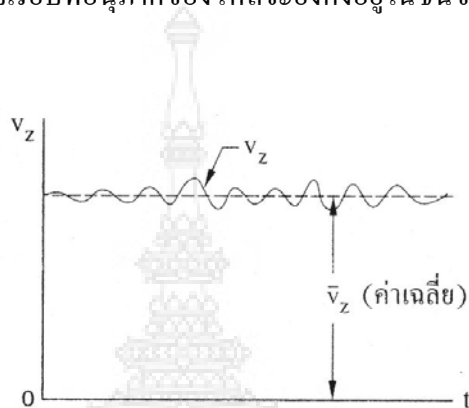
2.1.3 การกระจายความเร็วสำหรับการไหลเต็มท่อ



รูปที่ 2.2 การกระจายความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนเต็มท่อ

พิจารณาองค์ประกอบของความเร็วใน 3 มิติพิกัด $r-\theta-z$ สำหรับการไหลในท่อในสถานะไม่คงตัว ดังนั้นความเร็วย่อยในแต่ละทิศทางจะกำหนดเป็น $V_r = V_r(r, \theta, z, t)$, $V_\theta = V_\theta(r, \theta, z, t)$ และ $V_z = V_z(r, \theta, z, t)$ สำหรับการไหลแบบราบเรียบเต็มท่อนั้นพบว่าความเร็วขณะใดขณะหนึ่งของของไหลขึ้นอยู่กับทิศทางตามแนวแกนท่อ (V_z) เท่านั้น โดยที่ $V_\theta = V_r = 0$ และพบว่า V_z นี้เป็นฟังก์ชันของพิกัด r เท่านั้น นั่นคือ $V_z = V_z(r)$ และการกระจายความเร็วอยู่ในรูปพาราโบลา ดังรูปที่ 2.2 (ก) การไหลแบบราบเรียบหรือปั่นป่วนเต็มท่อนั้นจะให้การกระจายความเร็วที่แตกต่างกัน สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนพบว่าความเร็วย่อย (V_r, V_θ, V_z) ทุกตัวไม่เป็นศูนย์ และความเร็วยังขึ้นกับเวลาด้วย การพิจารณาความเร็วย่อยแต่ละตัวจะอาศัยข้อมูล

จากผลการทดลอง ในรูปที่ 2.2 (ข) แสดงความเร็วย่อยในแกน (V_z) ความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง V_z จะมีการแกว่งไปมารอบค่าความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน (\bar{V}_z) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ผลการแกว่งไปมานี้ทำให้อนุภาคของไหลซึ่งเคลื่อนที่ช้าที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนหน้าตัดท่อหนึ่งๆจะแลกเปลี่ยนตำแหน่งกับอนุภาคของไหลที่เคลื่อนที่เร็วกว่าซึ่งเคลื่อนที่มาจากตำแหน่งอื่นจุดนี้จะแตกต่างจากการไหลแบบราบเรียบที่อนุภาคของไหลจะยังคงอยู่ในชั้นของไหลเดิมตลอดเวลา



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วย่อยในแนวแกนกับเวลาสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

ในตาราง 2.1 สรุปการเปรียบเทียบระหว่างการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วน

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับการไหลเต็มท่อ

รายละเอียด	การไหลแบบราบเรียบ	การไหลแบบปั่นป่วน
ความเร็ว	$V_z = V_z(r)$ เท่านั้น โดยที่ $V_r = V_\theta = 0$	V_r, V_θ, V_z ไม่เป็นศูนย์และ $V_r = V_r(r, \theta, z, t)$ $V_\theta = V_\theta(r, \theta, z, t)$ $V_z = V_z(r, \theta, z, t)$
การกระจายความเร็ว	รูปพาราโบลา โดยหาผลเฉลยจากสมการการเคลื่อนที่ในรูปแบบของ $\frac{V_z}{V_{z,\max}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2$	พิจารณาโปรไฟล์ความเร็วจากข้อมูลการทดลอง $\frac{\bar{V}_z}{V_{z,\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7}$
ความเร็วเฉลี่ย	$\frac{\bar{V}_z}{V_{z,\max}} = \frac{1}{2}$	$\frac{\bar{V}_z}{V_{z,\max}} = \frac{4}{5}$
เลขเรย์โนลด์ส์	$Re \leq 2100$	$5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^7$

2.2 การถ่ายเทความร้อน [2]

การถ่ายเทความร้อนในงานเบรกมี 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน (Conduction heat transfer) การพาความร้อน (Convection heat transfer) และการแผ่รังสี (Radiation heat transfer)

2.2.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลผ่านของแข็งหรือผ่านของไหลอยู่กับที่อันเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน การนำความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาในสภาวะคงตัวคำนวณได้จากกฎฟูเรียร์ (Fourier's law)

$$\Phi = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.3)$$

โดย k = สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity)

$\frac{\partial T}{\partial n}$ = ผลต่างของอุณหภูมิเทียบกับความยาว (Gradian temperature)

2.2.2 การพาความร้อน [1]

กระบวนการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อนเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของพลังงานจากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่โมเลกุลตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปด้วย ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของลมที่ผ่านหน้าขดลวดความร้อน ลมดังกล่าวก็จะมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วย นอกจากนี้การถ่ายโอนความร้อนแบบพายังมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตอาหารหลายชนิด ไม่ว่าจะโดยตรง หรือ ในด้านการใช้ลมหรือน้ำเป็นตัวกลางในกระบวนการ การพาความร้อนสามารถจำแนกได้ออกเป็น 2 แบบดังนี้

1) การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection)

อุปกรณ์ช่วย ตัวอย่างเช่น โบลเวอร์ พัดลม การพาความร้อนแบบบังคับนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบธรรมชาติเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่พร้อมๆ กับทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อน มักจะอาศัย

2) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection)

กลไกการเกิดการถ่ายโอนความร้อนมักเกิดเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นในระบบ ตัวอย่างเช่น การถ่ายโอนความร้อนของอาหารภายในกระป๋องที่ผ่านการทำเย็นหลังจากการฆ่าเชื้อ ภายในกระป๋องจะมีการเคลื่อนที่ที่ความร้อนเนื่องจากความหนาแน่น การถ่ายโอนในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า

ไม่ว่าจะเป็นการถ่ายโอนความร้อนแบบพาในลักษณะใดก็ตามแต่มีสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนเหมือนกันคือ

$$q = hA\Delta T \quad (2.4)$$

ในสมการที่ 2.4 เรียกว่า กฎการเย็นตัวของนิวตัน "Newton's cooling law"

เมื่อ q = ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา (W)

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2 \text{K}$)

A = พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$ หรือ K)

ในการหาความต้านทานของการไหลของความร้อนแสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$R = \frac{1}{hA} \quad (2.5)$$

บ่อยครั้งที่การพาความร้อนจะสร้างความต้านทานให้กับการถ่ายโอนความร้อนเมื่อเกิดการไหลของความร้อนในลักษณะลามินาร์ โดยที่เกิเกิดขึ้นของของไหลร้อนเสมือนว่าเป็นชั้นที่ผิวหน้า ทำหน้าที่เป็นฉนวนในการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งการจะขจัดทำได้ยาก จนกว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลเป็นแบบเทอร์บิวเลนต์

โดยทั่วไปพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ในสมการที่ 2.4 ของการพาความร้อนแบบบังคับ จะมีค่าสูงกว่าการพาแบบธรรมชาติ ค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน (h) ขึ้นอยู่กับ

- ลักษณะการไหล (ลามินาร์ หรือ เทอร์บิวเลนต์)
- ลักษณะของสภาวะการไหล (ไหลผ่านวัสดุใด หรือ ไหลในท่อ เป็นต้น)

มีการศึกษาทดลองเพื่อหาค่า h ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันไปโดยอาศัยการวิเคราะห์มิติ (Dimension analysis) หาความสัมพันธ์ทางตัวเลขต่างๆ ที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องกับสถานการณ์ในการทดลอง และตรวจสอบอัตราการถ่ายโอนความร้อนย้อนกลับเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของค่า h ที่ได้

Reynolds Number

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} = \frac{Dv}{\nu} = \frac{4\dot{m}}{\mu\pi D} \quad (2.6)$$

Prandtl Number

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2.7)$$

Nusselt Number

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.8)$$

Grashof Number

$$Gr = \frac{D^3 \cdot L^2 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu^2} \quad (2.9)$$

Stanton Number

$$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} \quad (2.10)$$

Rayleigh Number

$$Ra = (Gr)(Pr) \quad (2.11)$$

3) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับ

ค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนแบบบังคับนั้นมีสมการที่ได้จากการทดลองหลายสมการ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับสภาวะการไหลของตัวกลาง โดยหาค่า h ได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2.12)$$

ในสมการที่ 2.12 หมายความว่าค่า Nusselt Number เป็นฟังก์ชันของ Reynolds Number และ Prandtl Number ในโอกาสต่อไปนี้จะนำเสนอสมการที่ใช้ในการหาค่า h ตามสภาวะต่างๆต่อไปนี้

- สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับของของไหลในท่อของไหลที่ไหลแบบลามินาร์ ($Re < 2100$) ภายในท่อตามแนวนอน สมการที่ใช้คือ

ในกรณี $\left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} \right) < 100$ จะได้ว่า

$$Nu = \frac{hD}{k} = 3.66 + \frac{0.085 \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} \right)}{1 + 0.045 \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} \right)^{0.66}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (2.13)$$

ในกรณี $\left(\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{D}{L}\right) > 100$ จะได้ว่า

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k} = 1.86 \left(\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{D}{L}\right) \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (2.14)$$

คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ให้ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิขาเข้ากับขาออก ยกเว้น μ_w ให้ใช้อุณหภูมิของผนังท่อ

ของไหลที่ไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ ($\text{Re} > 2100$) ภายในท่อตามแนวนอน Sieder และ Tate ได้เสนอสมการดังนี้

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (2.15)$$

นอกจากสมการที่ 2.15 แล้ว Dittus และ Boelter ยังได้สร้างสมการที่ใช้หาค่า h โดยไม่คิดอิทธิพลของค่าความหนืดของไหล ดังสมการที่ 2.16

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (2.16)$$

ค่า n มีค่า 0.4 ในกรณีเพิ่มอุณหภูมิของไหล และ 0.3 ในกรณีลดอุณหภูมิของไหล ตามลำดับ โดยสมการของ Dittus และ Boelter นี้ ต้องมี Reynold Numbers มากกว่า 10,000 ขึ้นไป และสมบัติทางกายภาพต้องคิดจากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิขาเข้าและขาออก ยังมีสมการที่คิดค้นโดย Colburn คือ

$$\text{St} = 0.023 \text{Re}^{-0.2} \text{Pr}^{\frac{2}{3}} \quad (2.17)$$

สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (2.18)$$

- สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับของของไหลภายในพื้นที่วงแหวนในการหาค่า h ของสภาวะนี้จำเป็นต้องใช้ D_H (Hydraulic radius) ตามแต่รูปทรงทางเรขาคณิตของท่อ ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ตั้งฉากการไหลต่อเส้นรอบรูปที่เปียกของการไหล สมการที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาของชั้นของไหลที่ติดกับผนังด้านในของท่อชั้นนอก (h_o) คือ

$$\text{Nu} = \frac{h_o D_H}{k} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (2.19)$$

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การพาของชั้นของไหลที่ติดกับผนังท่อชั้นใน (h_i) คือ

$$\text{Nu} = \frac{h_i D_H}{k} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \left(\frac{D_o}{D_i} \right)^{0.45} \quad (2.20)$$

- สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับของไหลที่ไหลตั้งฉากกับวัตถุทรงกระบอกในกรณีของไหลเป็นแก๊ส สมการที่ใช้ทั่วไปอยู่ในรูป

$$\text{Nu} = b \text{Re}^n \quad (2.21)$$

สำหรับ b และ n เป็นค่าคงตัวที่ขึ้นกับ Reynolds No.

ตารางที่ 2.2 ค่า b และ n จาก Reynolds No.

Re	b	n
1 - 4	0.891	0.330
4 - 40	0.821	0.385
40 - 4,000	0.615	0.466
4,000 - 40,000	0.714	0.618
40,000 - 250,000	0.0329	0.805

ส่วนในกรณีที่ของไหลเป็นของเหลวต้องดัดแปลงที่ 18 เสียก่อน จะได้

$$Nu = b Re^n \quad (2.22)$$

ค่า b และ n เป็นค่าคงตัวที่ขึ้นกับ Reynolds No. ซึ่งใช้ค่าจากตารางที่ 2.2 ได้เหมือนเดิม - สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับของไหลผ่านวัตถุทรงกลมสมการที่ใช้คือ

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.2 + 0.60 Re^{0.5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2.23)$$

โดยที่ค่า Reynolds Number มีค่าอยู่ระหว่าง 1 แต่ไม่เกิน 70,000 และค่า Prandtl Number มีค่าระหว่าง 0.6 แต่ไม่เกิน 400 โดยใช้สมบัติทางกายภาพจากอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างผนังกับตัวกลาง

4) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ รูปแบบทั่วไปของสมการคือ

$$Nu = a (Ra)^m \quad (2.24)$$

โดย Rayleigh No. คือ ผลคูณของ Grashof Number กับ Prandtl Number ส่วน a และ m เป็นค่าคงตัวใดๆ กรณีของไหลไหลผ่านพื้นผิวที่วางในแนวตั้ง และค่า D คือ vertical dimension มีค่าไม่เกิน 1 m หาค่า a และ m ไปแทนในสมการที่ 2.24 ได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ค่า a และ m จาก Rayleigh Number สำหรับของไหลไหลผ่านพื้นผิวที่วางในแนวตั้ง

$Ra = Gr \times Pr$	a	m
$< 10^4$	1.36	0.2
$10^4 - 10^9$	0.59	0.25
$> 10^9$	0.13	0.3

ส่วนกรณีของไหลไหลผ่านผิวทรงกระบอกแนวตั้ง สามารถหาค่า a และ m ได้จาก ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่า a และ m จาก Rayleigh No. สำหรับของไหลไหลผ่านผิวทรงกระบอกแนวตั้ง

$Ra = Gr \times Pr$	a	m
$10^{-5} - 10^{-3}$	0.17	1/25
$10^{-3} - 1$	1.09	0.1
$1 - 10^4$	1.09	0.2
$10^4 - 10^9$	0.53	0.25
$> 10^9$	0.13	0.33

และในกรณีของไหลไหลผ่านผิวน้ำแผ่นเรียบในแนวนอน หาค่า a และ m ได้จาก ตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่า a และ m จาก Rayleigh No. สำหรับของไหลไหลผ่านผิวน้ำแผ่นเรียบในแนวนอน

$Ra = Gr \times Pr$	a	m
$10^5 - 2 \times 10^7$ (Flow upward)	0.71	1/25
$2 \times 10^7 - 3 \times 10^{10}$ (Flow upward)	1.09	0.1
$3 \times 10^5 - 3 \times 10^{10}$ (Flow downward)	1.09	0.2

2.3 หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [4]

ก่อนที่จะศึกษาในรายละเอียดของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เราจำเป็นต้องเข้าใจหลักการเบื้องต้นทั่วไปเกี่ยวกับชนิดต่างๆ ของเอลิเมนต์ วิธีการแบ่งเอลิเมนต์ การกำหนดตำแหน่งต่างๆ ของเอลิเมนต์ ลักษณะของฟังก์ชันการกระจัด และการจำลองแบบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์รวมทั้งจะต้องมีความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดและการกระจัด รวมทั้งควรทราบหลักการของงานและพลังงาน เพื่อใช้ประกอบในการสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ และควรทราบการประยุกต์ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ ส่วนหลักการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาที่ซับซ้อนอย่างพิศวานนั้น สามารถจะศึกษาได้จากตำราไฟไนต์เอลิเมนต์ขั้นสูงทั่วไป

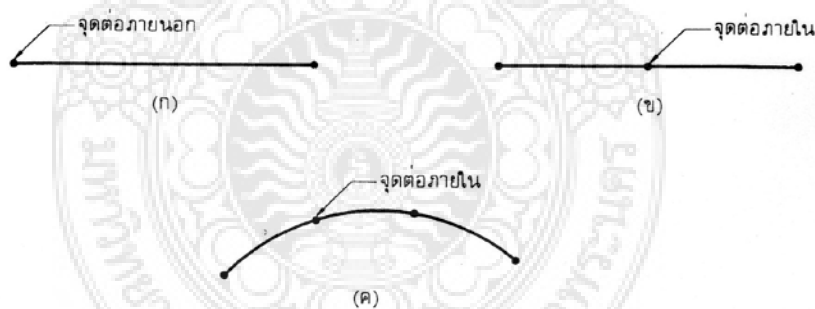
2.3.1. ชนิดของเอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องแบ่งโครงสร้างหรือชิ้นส่วนออกเป็นส่วนเล็กๆ และเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของงานและการกระทำของโหลด ชนิดของเอลิเมนต์อาจจะแบ่งได้ 3 ประเภทตามมิติคือ เอลิเมนต์สำหรับปัญหามิติเดียว สองมิติ และสามมิติ

1) เอลิเมนต์มิติเดียว

เอลิเมนต์มิติเดียวเป็นเอลิเมนต์ที่นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน การนำความร้อนในทิศทางเดียว เป็นต้น

รูป 2.4 (ก) คือ เอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้านของแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งเรียกว่า จุดต่อภายนอก ส่วนรูป 2.4 (ข) เป็นเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยสามจุดต่อคือ จุดต่อภายนอกสองจุดต่อ และจุดต่อภายในหนึ่งจุดต่อ และรูป 2.4 (ค) คือ เอลิเมนต์มิติเดียวที่เป็นเส้นโค้งประกอบด้วยสี่จุดต่อ คือ สองจุดต่อภายนอก และสองจุดต่อภายในซึ่งเหมาะสำหรับใช้วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างหรือชิ้นงานที่มีการยึดตัวไม่เป็นเส้นตรง เช่น การยึดตัวของท่อโลหะ อันเนื่องมาจากมวลของท่อโลหะเอง เป็นต้น

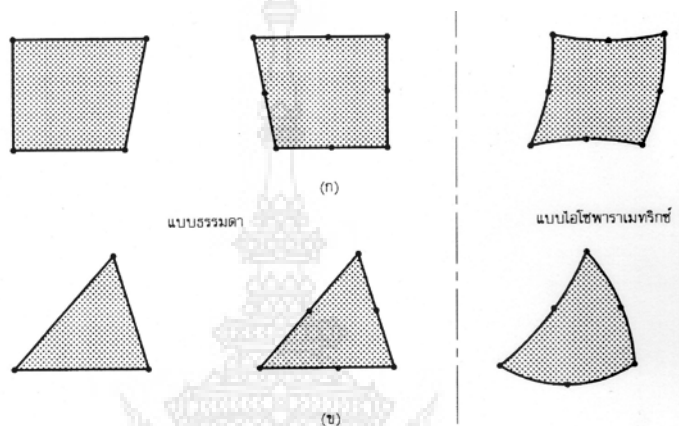


รูปที่ 2.4 เอลิเมนต์มิติเดียว

2) เอลิเมนต์สองมิติ

เอลิเมนต์สองมิติมักใช้กับการวิเคราะห์ความเค้น-ความเครียดระนาบ โดยทั่วไปเอลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง เช่น รูปใน 2.5 (ก) เป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ได้รับความนิยมมากกว่าเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ทั้งนี้เพราะในกรณีที่ระดับชั้นความถี่เท่ากันเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำกว่า

ส่วนจะเลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านตรงหรือด้านโค้งขอมขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงานจริง และโดยทั่วไปจะสมมุติให้ความหนาของเอลิเมนต์มีค่าคงตัว แต่อาจจะกำหนดให้ความหมายเป็น ฟังก์ชันกับพิกัดก็ได้ประกอบด้วยสี่จุดต่อและ 8 จุดต่อชนิดด้านตรงและด้าน โค้งแบบไอโซพาราเมตริกซ์ ส่วนรูป 2.5 (ข) เป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อและ 6 จุดต่อด้านตรง และด้าน โค้งแบบไอโซพาราเมตริกซ์

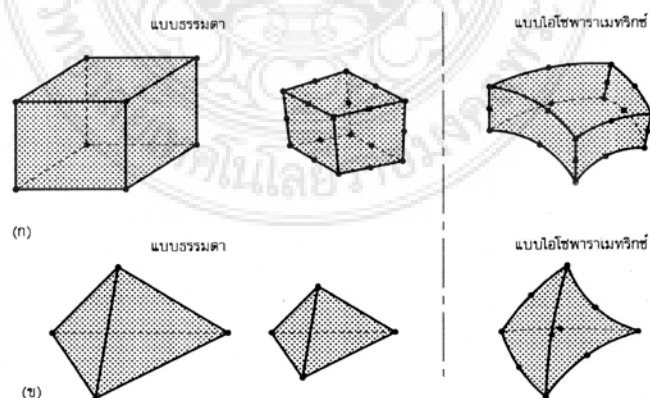


(ก) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม

รูปที่ 2.5 เอลิเมนต์สองมิติ

3) เอลิเมนต์สามมิติ

เอลิเมนต์สามมิติจะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติต่างๆ ไป ลักษณะของเอลิเมนต์ จะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึมและรูปกรวยสามเหลี่ยม เช่นในรูป 2.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) ชนิดปริซึม หรือ ชนิดทรงหกหน้า (ข) ชนิดกรวยสามเหลี่ยม หรือชนิดทรงสี่เหลี่ยม

รูป 2.6 เอลิเมนต์สามมิติ

รูป 2.6 (ก) เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรง 6 หน้า (hexahedron) ชนิดด้านตรง (linear) 8 จุดต่อ, ชนิดเส้นตรงกำลังสอง (straight – line quadratic) 20 จุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง (quadratic with curved faces) 20 จุดต่อ ส่วนรูป 2.6 (ข) เป็นเอลิเมนต์สามมิติ ทรง 4 หน้า (tetrahedra) ชนิดด้านตรง 4 จุดต่อ ชนิดเส้นตรงกำลังสอง 10 จุดต่อ , และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง 10 จุดต่อตามลำดับ

2.3.2 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) เป็นการใช้ระเบียบวิธีทางตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่กำหนดมาให้โดยแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมต่อกันที่จุด โหนด (Node) ซึ่งเราจะจำลองปัญหากับทุกเอลิเมนต์แล้วนำแต่ละเอลิเมนต์มารวมประกอบขึ้นเป็นรูปร่างที่เราต้องการแก้ปัญหานั้นขึ้นตอนโดยทั่วไปของวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะประกอบด้วย 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1

การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการที่จะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆกัน เช่น ปัญหาการยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity problem) ปัญหาทางด้านอุณหภูมิและความร้อน (Thermal problem) ปัญหาของการไหล (Fluid problem)

ขั้นตอนที่ 2

การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในซึ่งมีความสำคัญต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ของปัญหาที่เราทำการวิเคราะห์ ฟังก์ชันประมาณภายในจะมีหลายรูปแบบให้เราได้เลือกแต่ขึ้นอยู่กับปัญหาของเราจะตรงกับเงื่อนไขใด ปัญหาที่เราวิเคราะห์นี้อาจจะเป็นปัญหา 1 มิติ หรือ 2 มิติรูปแบบฟังก์ชันประมาณภายในก็จะแตกต่างกันออกไปเราจะมาคิดว่าฟังก์ชันประมาณภายในหาได้อย่างไร ยกตัวอย่าง เช่น เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมมีสาม โหนดต่อหนึ่งเอลิเมนต์ เราจะเริ่มจากสมมุติลักษณะการกระจายตัวของผลเฉลยโดยประมาณ

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element equation)

ขั้นตอนนี้จะเป็นส่วนสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งจะมีหลายวิธีในการหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในแต่ละวิธีจะมีความยากง่ายแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัญหาที่เราวิเคราะห์ สุดท้ายจะมีรูปสมการที่คล้ายๆกัน

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \emptyset_1 \\ \emptyset_2 \\ \emptyset_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (2.25)$$

เราเรียกเมตริกซ์ K ว่า element stiffness matrix เมตริกซ์ ϕ เป็นตัวแปรที่เราไม่ทราบค่าและเป็นค่าที่เราต้องการหา เช่นถ้าเป็นปัญหาทางด้านการยืดหยุ่นของของแข็งค่า ϕ คือค่าการยืดตัวหดรตัวของวัสดุ (displacement) ถ้าวิเคราะห์ทางด้านความร้อนค่า ϕ คืออุณหภูมิ (temperature) เมตริกซ์ F เป็นตัวแปรของโหลดที่กระทำต่อเอลิเมนต์ โดยทั่วไปการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นตอนี่สามารถกระทำได้ 3 วิธี

1. วิธีโดยตรง (Direct Formulation)
2. วิธีการแปรผัน (Variational Method)
3. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method Of Weighted Residuals)

ขั้นตอนที่ 4

การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดสมการพร้อมกัน(System of simultaneous equation) ในรูปแบบดังรูป

$$\Sigma (\text{Element - equation}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.26)$$

ขั้นตอนที่ 5

ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ลงในสมการเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ $\{\phi\}$ ซึ่งอาจจะเป็นค่าการเคลื่อนตัวของวัสดุยืดหยุ่นหรือค่าของอุณหภูมิของวัสดุก็ได้ ขึ้นอยู่กับขอบเขตปัญหาที่เราสนใจ

ขั้นตอนที่ 6

เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อออกมาแล้วอาจจะเป็นปัญหาทางด้านโครงสร้างก็จะทราบค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ที่ตำแหน่งต่างๆเราก็สามารถนำค่าที่ได้ไปหาความเครียดในที่สุดก็สามารถหาค่าของความเค้นได้ แต่ถ้าเป็นปัญหาทางด้านอุณหภูมิเมื่อรู้อุณหภูมิที่จุดต่างๆก็สามารถคำนวณปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้จากขั้นตอนการสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์สังเกตได้ว่าการสร้างสมการจะมีระเบียบแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยหัวใจการสร้างสมการอยู่ที่ขั้นตอนที่ 3 ซึ่งกระทำได้ 3 วิธี ดังนี้

1. การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์วิธีโดยตรง

เป็นวิธีสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ง่ายแก่ความเข้าใจจึงเหมาะกับผู้เริ่มต้นสมการของเอลิเมนต์ดังกล่าวขึ้นตรงอยู่กับลักษณะของปัญหาที่เราแก้ เช่น ปัญหาทางด้านของแข็ง การถ่ายเทความร้อน การไหล เมื่อได้สมการของแต่ละเอลิเมนต์แล้วจึงนำสมการของทุกเอลิเมนต์มาประกอบ

รวมกันก่อให้เกิดสมการรวมใหญ่ จากนั้นจึงทำการกำหนดขอบเขตแล้วจึงแก้ระบบสมการใหญ่นั้นออกมาเพื่อผลลัพธ์ที่ต้องการ

2. การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีการแปรผัน (Variational formulation)

วิธีการแปรผันจะอาศัยการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากการหาพลังงานซึ่งในช่วงแรกการสร้างสมการจะใช้วิธีนี้เพราะง่ายแก่การทำความเข้าใจ

3. การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสร้างขึ้นมาได้ง่ายหากเรารู้ฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับปัญหาที่เราจะแก้ แต่สำหรับบางปัญหาต่างๆ เราจะไม่รู้เพียงสมการเชิงอนุพันธ์และไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันได้ การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างไม่จำเป็นต้องรู้ฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันเพียงแต่รู้สมการเชิงอนุพันธ์ก็สามารถสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถพิจารณาได้ทั้งปัญหาทางด้าน โครงสร้าง การถ่ายเทความร้อนและการไหลกระบวนการสร้างสมการจะต้องทำในขั้นตอนที่ 1 และ 2 มาก่อนคือแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยและสมมติฟังก์ชันการประมาณภายในที่เหมาะสมกับรูปร่างและความถูกต้องที่เราต้องการหลังจากนั้นจะทำการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นแรกเราจะต้องทราบสมการเชิงอนุพันธ์ก่อนแล้วเราจะสมมุติค่าของผลเฉลยแน่นอนตรงก่อน

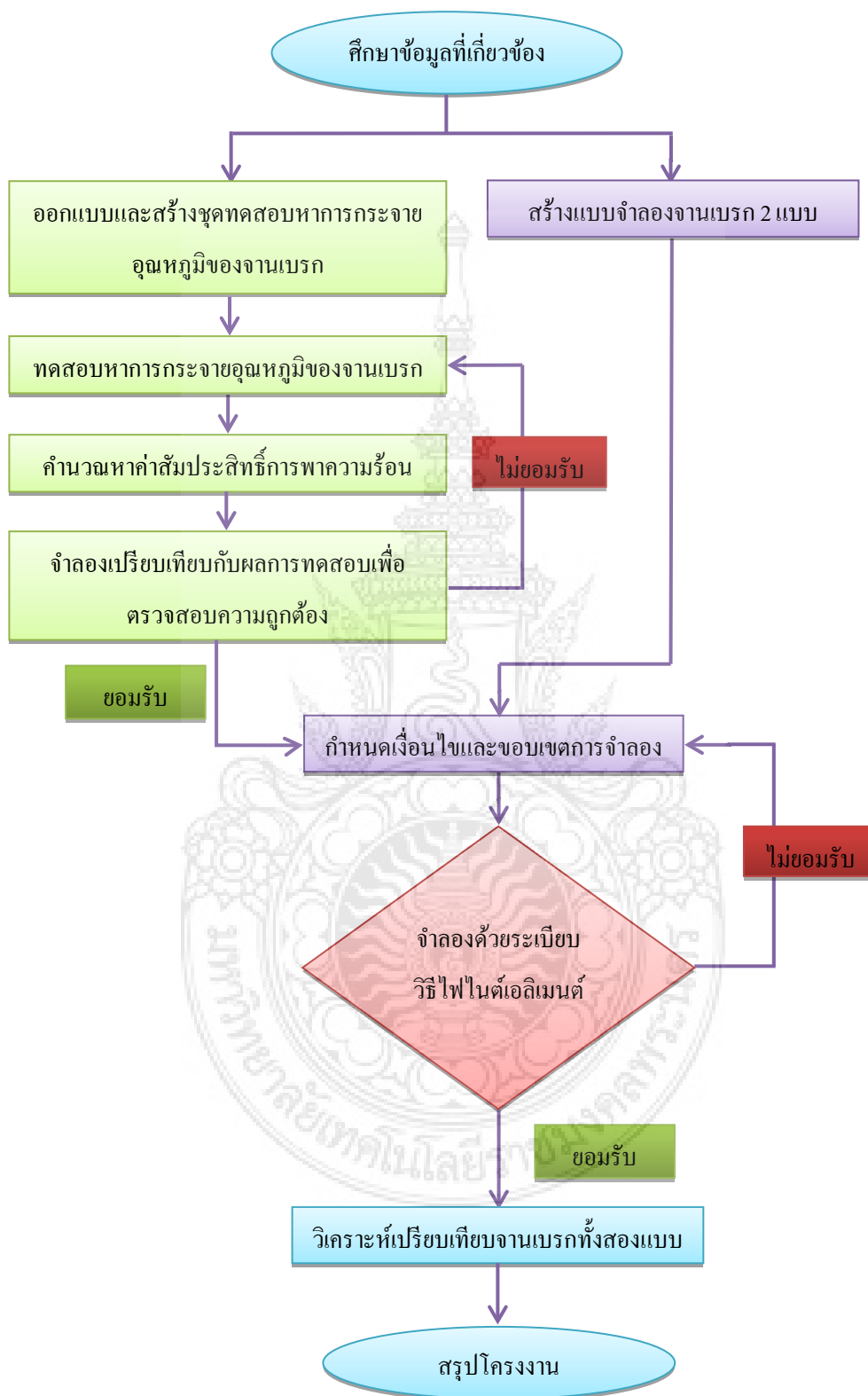


บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

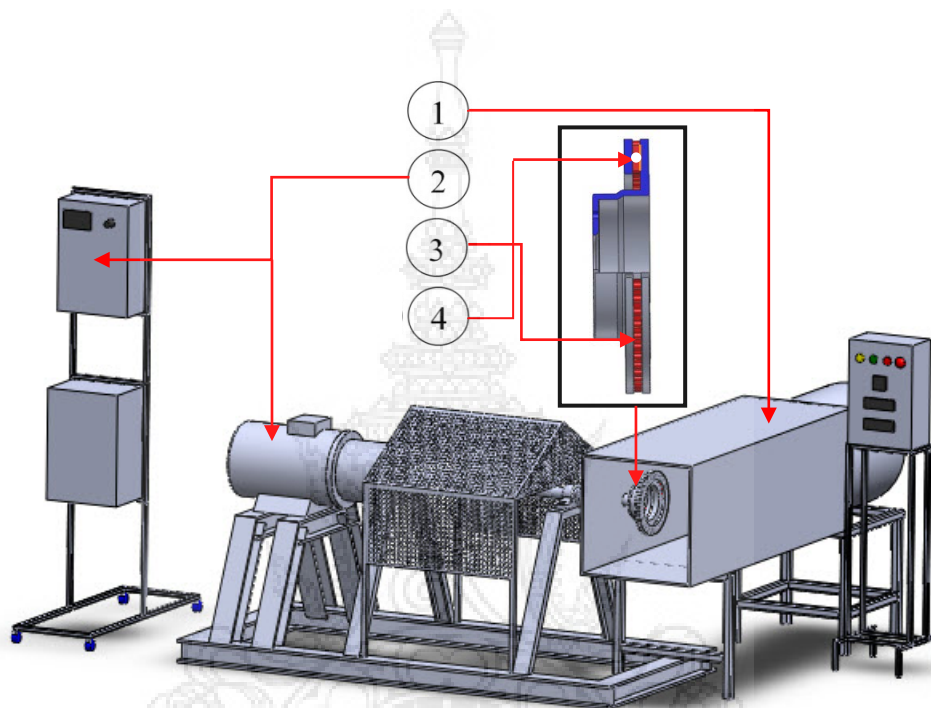
- 3.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทางความร้อนของจานเบรก
- 3.1.2 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและรายละเอียดต่างๆของจานเบรกทั้งสองแบบที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันระหว่าง จานเบรกแบบตรง และจานเบรกแบบกลับ รวมถึงศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 3.1.3 สร้างชุดทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิของชุดจานเบรกทั้งสองแบบ คือ จานเบรกแบบตรง และจานเบรกแบบกลับ จากจานเบรกรถยนต์ ที่มีใช้อยู่ในท้องตลาด และ สร้างชุดอุโมงค์ลมเพื่อจำลองสภาวะการทดสอบให้เสมือนการขับขี่จริง และชุดขับจานเบรกเพื่อให้จานเบรกสามารถหมุนไปตามความเร็วรอบที่ต้องการ
- 3.1.4 ทำการทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิของจานเบรกในแต่ละอุณหภูมิ แล้วหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการทดสอบนี้ใช้เป็นข้อมูลในการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 3.1.5 สร้างแบบจำลองของจานเบรกทั้งสองแบบคือ จานเบรกแบบตรง และจานเบรกแบบกลับด้วยโปรแกรม Solidworks
- 3.1.6 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของจานเบรกทั้งสองแบบ ได้เลือกใช้โปรแกรม Abaqus
- 3.1.7 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วทำการสรุปผลและเปรียบเทียบความสามารถการถ่ายเทความร้อนของจานเบรกทั้งสองแบบ เพื่อจัดทำปฏิญานิพนธ์



รูปที่ 3.1 ภาพขั้นตอนการดำเนินโครงการ

3.2 สร้างชุดทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิของจานเบรก

ในการทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิของจานเบรก อุปกรณ์และชุดทดสอบต่างๆ จำเป็นที่จะต้องสร้างขึ้นเพื่อทำการจำลองสภาวะการพาความร้อนของจานเบรกในขณะที่มีลมผ่าน โดยชุดทดสอบและอุปกรณ์ต่างๆ นี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชุดใหญ่ๆ ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 ออกแบบชุดทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิของจานเบรก

หมายเลข 1 ชุดมอเตอร์

หมายเลข 2 ชุดอุปกรณ์จับจานเบรก

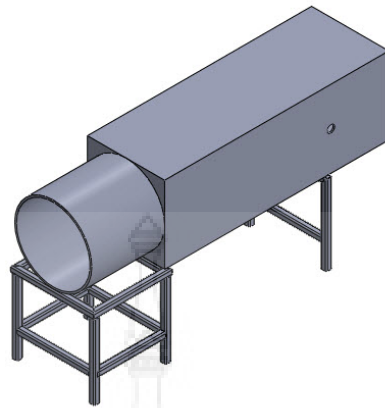
หมายเลข 3 ชุดให้ความร้อนให้กับจานเบรก

หมายเลข 4 ชุดตรวจจับอุณหภูมิ

3.2.1 ชุดมอเตอร์

จากการทดสอบจานเบรกเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ใกล้เคียงกับสภาวะการขับขี่จริงมากที่สุดจึงต้องมีการสร้างชุดมอเตอร์เพื่อทำหน้าที่การพาความร้อนแบบบังคับ อย่างไรก็ตาม ในสภาวะการขับขี่จริงพบว่าความเร็วลมที่ไหลผ่านตัวจานเบรกจะแตกต่างกันไป ซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามความเร็วของยานพาหนะ ดังนั้นการสร้างชุดทดสอบนี้จึงอ้างอิงความเร็วลมคงที่

11 m/s ตามมาตรฐาน JASO C406:2000



รูปที่ 3.3 ออกแบบอุโมงค์ลม



รูปที่ 3.4 โครงอุโมงค์ลม



รูปที่ 3.5 สร้างชุดอุโมงค์ทดสอบ

3.2.2 ชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนเบรก

อุปกรณ์ชุดนี้จะมีหน้าที่ขับเคลื่อนเบรกให้หมุนไปเสมือนสถานะขับเคลื่อนจริงที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้ ซึ่งอุปกรณ์ชุดนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆด้วยกันคือ มอเตอร์ และ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ (Inverter) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะทำงานสัมพันธ์กันคือ มอเตอร์จะเป็นตัวขับเคลื่อนเบรกให้หมุนไปโดยจะส่งกำลังให้กับเพลาคู่กับงานเบรก ส่วนชุดอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบนั้นจะมีหน้าที่ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มอเตอร์หมุนไปตามความเร็วที่ต้องการจะทดสอบซึ่งการทดสอบจะทดสอบที่ความเร็วรถยนต์จาก 90 ถึง 140 km/hr

อุปกรณ์ชุดขับเคลื่อนเบรกจะประกอบไปด้วย:

- มอเตอร์ 3 เฟส 20 hp แสดงรูปที่ 3.6
- ชุดอุปกรณ์ปรับความเร็ว 20 hp แสดงรูปที่ 3.7



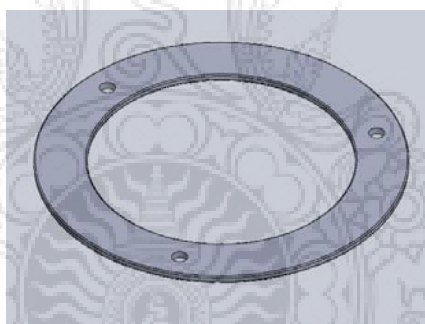
รูปที่ 3.6 ชุดมอเตอร์



รูปที่ 3.7 ชุดอินเวอร์เตอร์

3.2.3 ชุดให้ความร้อนให้กับจานเบรก

อุปกรณ์ชุดนี้ทำหน้าที่ให้ความร้อนกับจานเบรก ในสภาวะทำงานปกติอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับจานเบรกตั้งแต่ 80 ถึง 300 °C ซึ่งอาจจะมากหรือน้อยกว่านี้ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเร็วของรถก่อนจะทำการเบรก ระยะเวลาที่ใช้ในการเบรก อัตราการถ่ายเทความร้อนของจานเบรก เป็นต้น จากปัจจัยข้างต้นที่ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในจานเบรกเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบจึงเป็นค่าประมาณหรือค่ากลางที่เป็นไปได้มากที่สุดคือที่ 100 ถึง 300 °C และจะใช้ชุดชุดอุปกรณ์ทำความร้อนเป็นตัวทำความร้อนให้กับจานเบรกแทนการเบรกด้วยผ้าเบรก ซึ่งความร้อนที่สร้างขึ้นมานี้จะถูกพาออกไปโดยการหมุนของจานเบรก การศึกษาการพาความร้อนที่จานเบรกจะศึกษาทั้งด้านในและด้านนอกของจานเบรกจะมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทำความร้อน (Heater) ภายในตัวจานเบรกแทนที่ครีบบระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ซึ่งขนาดของครีบบระบายความร้อนที่ตัดออกไปและขนาดของตัวทำความร้อนที่นำเข้ามาแทนต้องมิตขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการรักษารูปร่างของจานเบรกให้เหมือนเดิมมากที่สุด



รูปที่ 3.8 ออกแบบชุดอุปกรณ์ทำความร้อน

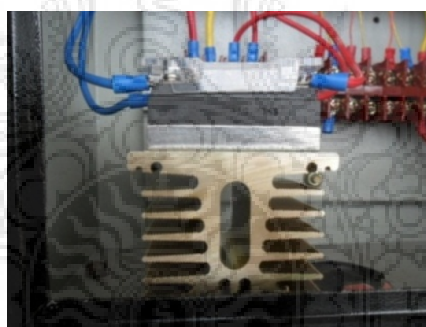


รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ทำความร้อน

ชุดอุปกรณ์ทำความร้อนให้กับงานเบรกจะประกอบด้วยตัวทำความร้อน (Heater) และตัวปรับเปลี่ยนกำลังไฟเพื่อควบคุมความร้อน โดยอาศัยหลักการการให้กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดความร้อนที่อยู่ภายในตัวทำความร้อนทำให้ตัวทำความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเนื่องจากตัวทำความร้อนนี้จะต้องสัมผัสกับงานเบรกอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นงานเบรกก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยอาศัยการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสามารถปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับตัวทำความร้อนในปริมาณต่าง ๆ กัน ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่งานเบรกจึงสามารถควบคุมได้โดยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟดังกล่าว

อุปกรณ์ในชุดอุปกรณ์ทำความร้อนจะประกอบไปด้วย

- แผ่นตัวทำความร้อนขนาด 1800 W มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 19.7 cm เส้นผ่านศูนย์กลางนอก 27.5 cm มีความหนาเท่ากับ 0.4 cm แสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9
- ชุดปรับเปลี่ยนกำลังไฟ 4000 W แสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.10 ชุดปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ปรับกระแสไฟฟ้า

เนื่องจากอุปกรณ์ทำความร้อนจำเป็นต้องสัมผัสกับงานเบรกอยู่ตลอดเวลาจึงทำให้ตัวทำความร้อนนั้นหมุนไปพร้อมกับงานเบรกด้วยความเร็วรอบที่เท่ากัน ดังนั้นชุดแปลงถ่าน (Slipring) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 มีหน้าที่เป็นชุดเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับตัวอุปกรณ์ทำความร้อน และรับสัญญาณอุณหภูมิจากตัวตรวจจับอุณหภูมิมาแสดงผลที่ผู้ควบคุม



รูปที่ 3.12 ชุดแปลงถ่าน (Slipring)

3.2.4 ชุดเก็บข้อมูล

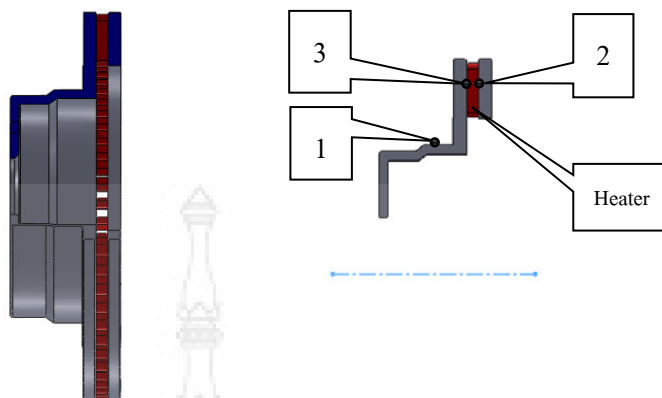
ในการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลทางด้านอุณหภูมิที่ได้มาจากการวัดความร้อนที่ผิวของงานเบรกด้านในที่ติดกับชุดอุปกรณ์ทำความร้อน โดยจะวัดอุณหภูมิทั้งหมด 3 จุด จุดแรกติดที่ส่วนคอของงานเบรกหรือที่ตำแหน่งที่ 1 ดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 และอีกสองจุดติดระหว่างอุปกรณ์ทำความร้อน กับผิวงานเบรกด้านในที่ตำแหน่ง 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และ 3.15 นอกจากนี้ที่ตำแหน่งตัวตรวจจับอุณหภูมิที่ติดเข้ากับงานเบรกจะถูกร้อยสายผ่านขนานกับเพลาลูกแล้วเชื่อมต่อกับชุดแปลงถ่านเพื่อรับสัญญาณจากตัวตรวจจับอุณหภูมิไปแสดงยังจอแสดงผลที่กล่องควบคุม

อุปกรณ์ชุดเก็บอุณหภูมิประกอบด้วย

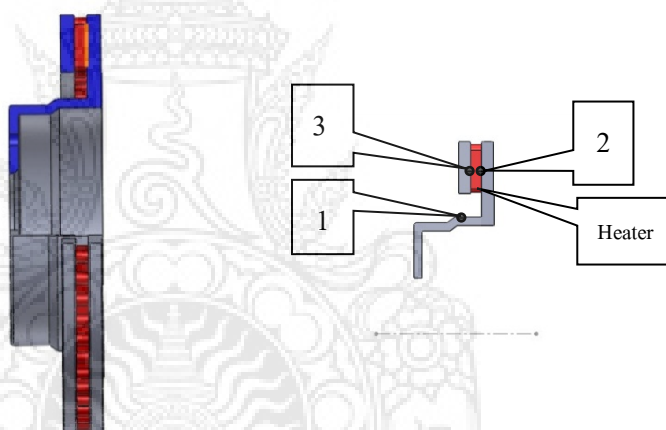
- ตัวตรวจจับอุณหภูมิ Type K ทั้งหมด 3 ตัว ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตัวตรวจจับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งตัวตรวจจับอุณหภูมิงานเบรคแบบตรง



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งตัวตรวจจับอุณหภูมิงานเบรคแบบกลับ

หมายเลข 1 ตำแหน่งตรวจจับที่คอจานเบรค

หมายเลข 2 ตำแหน่งตรวจจับที่จุดทำความร้อน

หมายเลข 3 ตำแหน่งตรวจจับที่จุดทำความร้อน

3.3 ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรคทั้งสองแบบ

ทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ความเร็วรถ 90, 110 และ 140 km/hr หรือที่ความเร็วรอบของงานเบรคเท่ากับ 724, 885 และ 1,127 rpm ตามลำดับ โดยความเร็วลมในอุโมงค์อยู่ที่ 11 m/s และปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าตัวทำความร้อนที่ชุดควบคุมความร้อนให้มีความ

ร้อนเข้าระบบเพิ่มมากขึ้นตามลำดับของอุณหภูมิในการทดสอบ ซึ่งเครื่องทดสอบและขั้นตอนในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

3.3.1 อุปกรณ์และเครื่องทดสอบ



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด



รูปที่ 3.17 มัลติมิเตอร์



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.19 เครื่องวัดรอบ



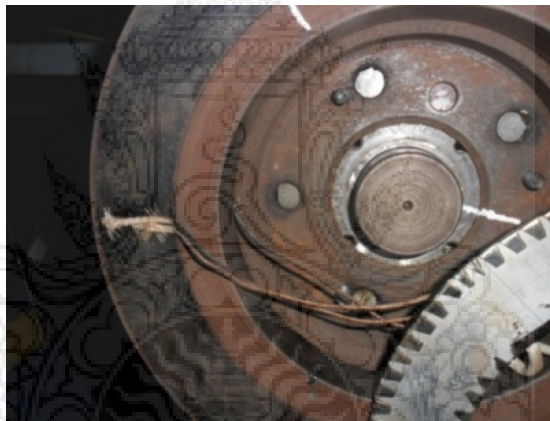
รูปที่ 3.20 เครื่องวัดความเร็วลม

3.3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

1) นำงานเบรกมาขัดด้วยกระดาษทรายขัดสนิมออกที่ผิวงานเบรกเพื่อให้การวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดได้ค่าอย่างแม่นยำถูกต้อง ติดตัวตรวจจับอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของงานเบรกแล้วนำงานเบรกมาประกบชุดอุปกรณ์ทำความร้อนทั้งสองข้าง แล้วยึดสลักให้แน่น



รูปที่ 3.21 ซักจานเบรก



รูปที่ 3.22 ติดตั้งตัวตรวจจับอนุหภูมิ



รูปที่ 3.23 ประกอบจานเบรกแบบตรง



รูปที่ 3.24 ประกอบจานเบรกแบบกลับ

2) นำจานเบรกเข้าไปติดตั้งภายในอุโมงค์ลม วางตำแหน่งของชุดทดสอบให้เหมาะสมโดยให้ทิศทางของกระแสลมไหลขนานไปกับพื้นผิวของโรเตอร์และจัดให้ตำแหน่งของจานเบรกอยู่ที่กึ่งกลางหน้าตัดของส่วนที่ทำการทดสอบในอุโมงค์ลม



รูปที่ 3.25 ประกอบจานเบรกกับเพลา



รูปที่ 3.26 ติดตั้งอุโมงค์



รูปที่ 3.27 ประกอบงานเบรกเข้ากับเพลาลมและอุโมงค์

3) ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ความเร็วรถ 90, 110 และ 140 km/hr หรือที่ความเร็วรอบของงานเบรกเท่ากับ 724, 885 และ 1,127 rpm โดยความเร็วลมในอุโมงค์อยู่ที่ 11 m/s และปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าตัวทำความร้อนที่ชุดควบคุมความร้อนให้มีความร้อนเข้าระบบเพิ่มมากขึ้นตามลำดับของอุณหภูมิในการทดสอบ



รูปที่ 3.28 วัดความเร็วรอบของเพลาลม



รูปที่ 3.29 วัดความเร็วลม

4) ปรับอุณหภูมิให้กับงานเบรกเพิ่มอีก 4 ระดับในแต่ละความเร็วรอบ โดยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟให้กับชุดอุปกรณ์ทำความร้อนเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกงานเบรกดังนี้คือ 100, 200 และ 300 °C ตามลำดับ



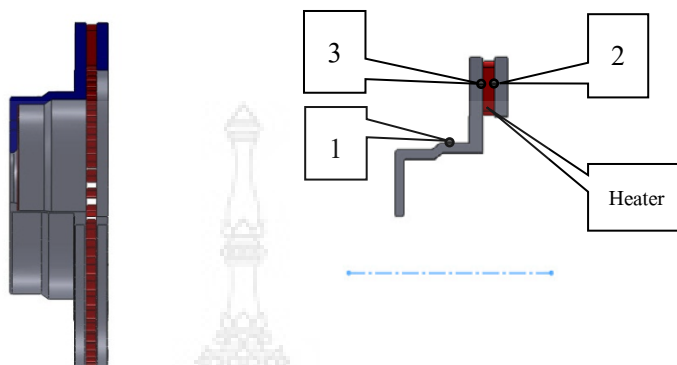
รูปที่ 3.30 จุดปรับกระแสไฟให้กับชุดอุปกรณ์ทำความร้อน

ในการทดสอบจะใช้กระแสไฟอยู่ตั้งแต่ 0 ถึง 10 A หรือคิดเป็นกำลังไฟฟ้าจาก 0 ถึง 2,200 W

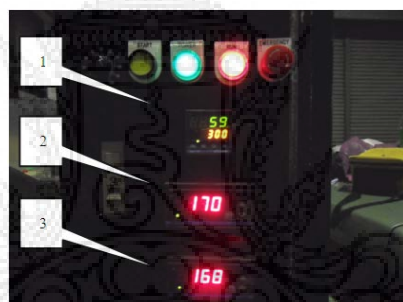


รูปที่ 3.31 วัดกระแสไฟระหว่างการปรับความร้อน

5) สัญญาณตรวจจับอุณหภูมิ 3 จุดที่ผิวของงานเบรกขณะที่งานเบรกหมุนอยู่ถูกส่งผ่านโดยชุดแปลงถ่านไปยังจอแสดงผล เพื่อบันทึกผล

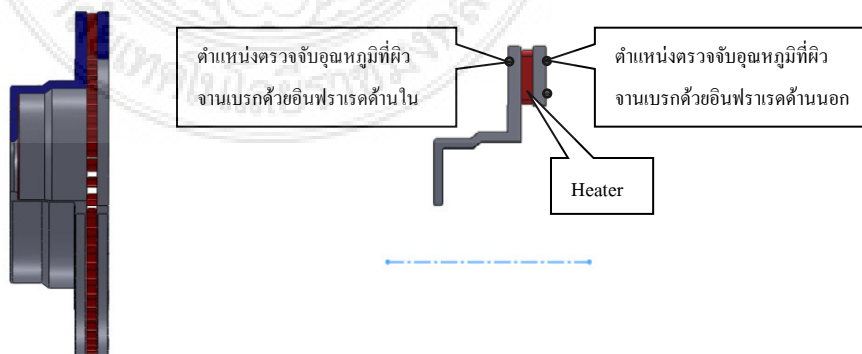


รูปที่ 3.32 ตำแหน่งตรวจจับอุณหภูมิ

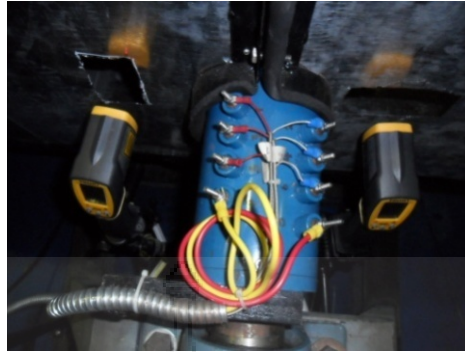


รูปที่ 3.33 ผลอุณหภูมิแต่ละตำแหน่ง

6) อุณหภูมิที่ผิวโรเตอร์ทั้งสองด้านของงานเบรกสามารถตรวจวัดได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด ณ ตำแหน่งผิวโรเตอร์ทั้งสองด้านของงานเบรกทั้งสองแบบแล้วบันทึกผล



รูปที่ 3.34 ตำแหน่งตรวจจับอุณหภูมิด้วยอินฟราเรด



รูปที่ 3.35 ตำแหน่งตรวจจับอุณหภูมิด้วยอินฟราเรดจانبเรกด้านนอก



รูปที่ 3.36 ตำแหน่งตรวจจับอุณหภูมิด้วยอินฟราเรดจانبเรกด้านใน

7) การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผลการทดสอบ

จากสมการการนำความร้อน
$$Q_{cond} = \frac{-kA\Delta T}{L}$$

โดยที่
$$Q_{cond} = Q_{conv}$$

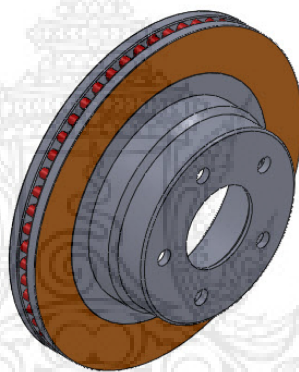
จากสมการการพาความร้อน
$$Q_{conv} = hA\Delta T$$

$$h = \frac{Q_{conv}}{A\Delta T}$$

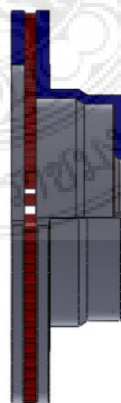
3.4 สร้างแบบจำลองจานเบรก 2 แบบ

ในการจำลองนี้จะจำลองกับจานเบรกที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ จานเบรกแบบตรง และจานเบรกแบบกลับ โดยแบบจำลองจานเบรกที่ได้จากการสร้างในโปรแกรม Solidwork จะสามารถนำไปจำลองในโปรแกรม Abaqus ได้ ซึ่งลักษณะแบบจำลองของจานเบรกได้คัดลอกแบบจากของจริง เพื่อสร้างลักษณะทางกายภาพให้ใกล้เคียงกับชิ้นงานจริงมากที่สุด ดังรูปที่ 3.37 และ 3.38

3.4.1 แบบจำลองจานเบรกแบบตรง

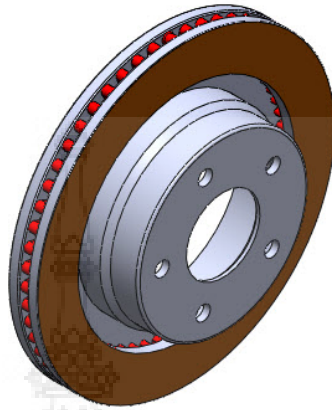


รูปที่ 3.37 ภาพสามมิติแบบจำลองจานเบรกแบบตรง



รูปที่ 3.38 ภาพตัดแบบจำลองจานเบรกแบบตรง

3.4.2 แบบจำลองงานเบรกแบบกลับ



รูปที่ 3.39 ภาพสามมิติแบบจำลองงานเบรกแบบกลับ



รูปที่ 3.40 ภาพตัดแบบจำลองงานเบรกแบบกลับ

3.5 จำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์ปัญหาของงานเบรกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีที่สะดวกและลดต้นทุนการทดสอบจึงเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ในการวิเคราะห์จะมีค่าถูกต้องแม่นยำ จำเป็นต้องทราบข้อมูลของปัญหาอย่างชัดเจนไม่ว่าจะเป็นแบบจำลอง คุณสมบัติของวัสดุของงานเบรก สภาวะแวดล้อมของปัญหาและอื่นๆ โดยในการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมีลักษณะขั้นตอนดังนี้

3.5.1 กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการจำลอง

ในการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Abaqus ต้องกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการจำลองให้เป็นไปตามสภาวะความเป็นจริง โดยส่วนที่สำคัญในการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แก่คุณสมบัติของวัสดุของงานเบรกประกอบด้วย ค่าการนำความร้อน, ค่าความร้อนจำเพาะและ ค่าความหนาแน่น ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของโลหะงานเบรกตามตารางที่ 3.1 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบจริงในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.1 กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการจำลอง [5]

	คุณสมบัติเชิงกลวัสดุเหล็กหล่อ			
อุณหภูมิ °C	ค่าการนำความร้อน (W/mm.°C)	ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg.°C)	ความหนาแน่น kg/m ³	ค่าการพาความร้อน W/m ² .K
100	0.0525	247	6,950	ค่าจากการทดสอบ
200	0.0515	427	6,950	ค่าจากการทดสอบ
300	0.0505	607	6,950	ค่าจากการทดสอบ

3.5.2 ขั้นตอนในการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus

1. Part : เลือกหรือสร้างแบบจำลอง
2. Property : กำหนดคุณสมบัติของแบบจำลอง
3. Assembly : รวมโครงสร้างของแบบจำลองเป็นชิ้นเดียวกัน
4. Step : กำหนดรูปแบบในการวิเคราะห์
5. Interaction : กำหนดความสัมพันธ์
6. Load : กำหนดรูปแบบของภาระ
7. Mech : แบ่งและกำหนดรูปแบบของ Mech
8. Job : ช่วงของการประมวลผล
9. Visualization : แสดงผล

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษา โดยแบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและผลการจำลองด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบ่งเป็นสองส่วน คือ ทดสอบกับจานเบรกแบบตรงและจานเบรกแบบกลับ โดยแต่ละส่วนมีเงื่อนไขในการทดสอบที่เหมือนกัน คือ ที่อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อนตั้งแต่ 100, 200 และ 300 °C และจานเบรกสามารถหมุนเทียบกับความเร็วรถยนต์เป็น 90, 110 และ 140 km/hr มีลมผ่านความเร็วคงที่ 11 m/s ซึ่งมีเงื่อนไขและรูปแบบการทดสอบดังตารางที่ 4.1

การแปลงความเร็วรถยนต์เป็นความเร็วรอบเพลา

กำหนดให้	n	=	ความเร็วรอบเพลา (rpm)
	v	=	ความเร็วรถยนต์ (m/min)
	A	=	เส้นรอบวงล้อ (m)
	r	=	รัศมียางรถ = 0.3 (m)

- หาเส้นรอบวงล้อรถ

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad A &= 2\pi r \\ &= 2\pi(0.3) \\ &= 1.89 \text{ m} \end{aligned}$$

- หาคความเร็วรอบเพลา

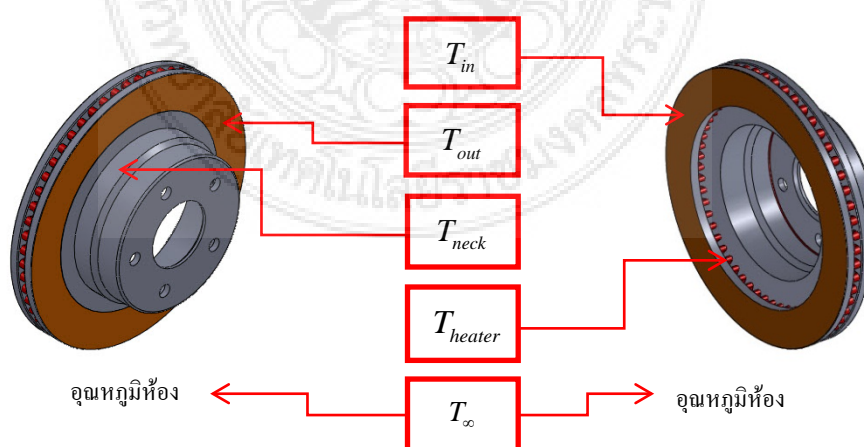
$$\text{จากสมการ} \quad n = \frac{v}{A}$$

ตารางที่ 4.1 รูปแบบแสดงผลการทดสอบ

งานเบรก	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรถยนต์ (km/hr)	ความเร็วลม (m/s)
แบบตรง	100	90 , 110 , 140	11
	200		
	300		
แบบกลับ	100	90 , 110 , 140	11
	200		
	300		

4.1.1 งานเบรกแบบตรง

การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรกแบบตรงจะต้องทราบค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิตัวทำความร้อน (T_{heater}), อุณหภูมิห้อง (T_{∞}), อุณหภูมิคอกงานเบรก (T_{neck}), อุณหภูมิผิวงานเบรกด้านนอก (T_{out}), อุณหภูมิผิวงานเบรกด้านใน (T_{in}), อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวงานเบรกด้านในและผิวงานเบรกด้านนอก (T_{ave}) ดังรูปที่ 4.1 เพื่อจะนำไปคำนวณหาปริมาณความร้อน (Q) แล้วจึงสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งอุณหภูมิต่างๆบนงานเบรกแบบตรง

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 100 °C งานเบรกแบบตรง

ความเร็ว รถยนต์ km/hr	อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆของงานเบรก °C						Q (Watt)
	T_{heater}	T_{∞}	T_{neck}	T_{out}	T_{in}	T_{ave}	
90	138.0	30.0	41.0	100.5	97.5	99.0	730.0
110	139.0	31.0	41.0	100.5	96.5	98.5	758.0
140	135.5	30.0	39.0	100.5	98.0	99.3	678.5
เฉลี่ย	137.5	30.3	40.3	100.5	97.3	99.0	722.2

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 200 °C งานเบรกแบบตรง

ความเร็ว รถยนต์ km/hr	อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆของงานเบรก °C						Q (Watt)
	T_{heater}	T_{∞}	T_{neck}	T_{out}	T_{in}	T_{ave}	
90	248.5	32.0	88.0	201.0	193.0	197.0	964.0
110	249.0	33.0	89.0	201.5	193.5	197.5	964.0
140	249.0	32.0	78.0	199.5	193.0	196.3	964.0
เฉลี่ย	248.8	32.3	85.0	200.6	193.3	197.2	946.0

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 300 °C งานเบรกแบบตรง

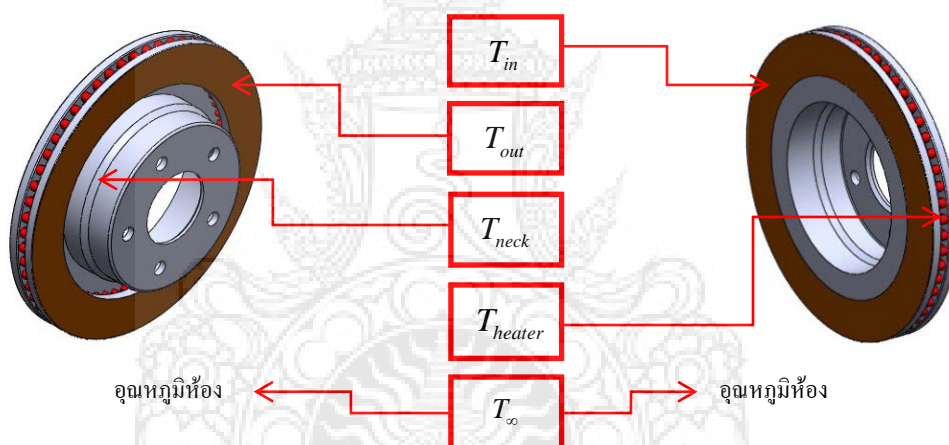
ความเร็ว รถยนต์ km/hr	อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆของงานเบรก °C						Q (Watt)
	T_{heater}	T_{∞}	T_{neck}	T_{out}	T_{in}	T_{ave}	
90	357.0	31.0	144.0	302.0	300.0	301.0	1048.0
110	354.0	32.0	134.0	300.0	296.0	298.0	1,048.0
140	359.0	31.0	117.0	301.0	299.0	300.0	1,104.5
เฉลี่ย	356.6	31.3	131.6	301.0	298.3	299.7	1,066.6

จากตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ที่อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 100, 200 และ 300 °C ที่ความเร็วรถยนต์รอบต่างๆพบว่าค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเดียวกันของงานเบรกจะมี

ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบต่างๆของจานเบรกมีผลกระทบน้อยมากต่อการถ่ายเทความร้อนของจานเบรก เพราะฉะนั้นข้อมูลที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรก จึงเลือกใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งของทั้งสามความเร็วรถยนต์รวมกัน

4.1.2 จานเบรกแบบกลับ

การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรกแบบกลับจะต้องทราบค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิตัวทำความร้อน (T_{heater}), อุณหภูมิห้อง (T_{∞}), อุณหภูมิคอจานเบรก (T_{neck}), อุณหภูมิผิวจานเบรกด้านนอก (T_{out}), อุณหภูมิผิวจานเบรกด้านใน (T_{in}), อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวจานเบรกด้านในและผิวจานเบรกด้านนอก (T_{ave}) ดังรูปที่ 4.2 เพื่อจะนำไปคำนวณหาปริมาณความร้อน (Q) แล้วจึงสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งอุณหภูมิต่างๆบนจานเบรกแบบกลับ

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิผิวจานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 100°C จานเบรกแบบกลับ

ความเร็วรถยนต์ km/hr	อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆของจานเบรก °C						Q (Watt)
	T_{heater}	T_{∞}	T_{neck}	T_{out}	T_{in}	T_{ave}	
90	140.5	27.0	41.0	100.5	100.5	100.5	749.0
110	142.0	25.0	40.0	104.5	100.5	102.5	739.5
140	138.0	30.0	42.0	99.5	101.0	100.3	706.5
เฉลี่ย	140.2	27.3	41.0	101.5	100.6	101.0	735.0

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 200 °C งานเบรกแบบกลับ

ความเร็ว รถยนต์ km/hr	อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆของงานเบรก °C						Q (Watt)
	T_{heater}	T_{∞}	T_{neck}	T_{out}	T_{in}	T_{ave}	
90	251.0	26.0	81.0	202.5	201.0	201.8	931.0
110	254.5	25.0	81.0	210.5	200.0	205.3	921.0
140	256.0	31.0	80.0	209.5	197.5	203.5	982.0
เฉลี่ย	254.0	27.3	80.6	207.5	199.5	203.5	944.6

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 300 °C งานเบรกแบบกลับ

ความเร็ว รถยนต์ km/hr	อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆของงานเบรก °C						Q (Watt)
	T_{heater}	T_{∞}	T_{neck}	T_{out}	T_{in}	T_{ave}	
90	353.0	26.0	126.0	300.5	298.0	299.3	1,006.0
110	357.0	25.0	118.0	305.0	301.0	303.0	1,011.0
140	358.0	30.0	115.0	300.5	299.0	299.8	1,090.5
เฉลี่ย	356.0	27.0	119.7	302.0	299.3	300.7	1,035.8

จากตารางที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ที่อุณหภูมิผิวงานเบรกเริ่มต้นในการถ่ายเทความร้อน 100, 200 และ 300 °C ที่ความเร็วรถยนต์รอบต่างๆ พบว่าค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเดียวกันของงานเบรกจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบต่างๆของงานเบรกมีผลกระทบน้อยมากต่อการถ่ายเทความร้อนของงานเบรก เพราะฉะนั้นข้อมูลที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรก จึงเลือกใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งของทั้งสามความเร็วรถยนต์

4.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

นำค่าปริมาณความร้อน (Q) ของระบบ คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆดังนี้ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวงานเบรกด้านใน (h_m), สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวงานเบรกด้านนอก (h_{out}), ส่วนค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั้งสองด้านของงานเบรก (h_{ave}) แต่เนื่องจากความเร็วรอบของงานเบรกที่เทียบเป็นความเร็วรถยนต์ไม่มีกระทบต่อ

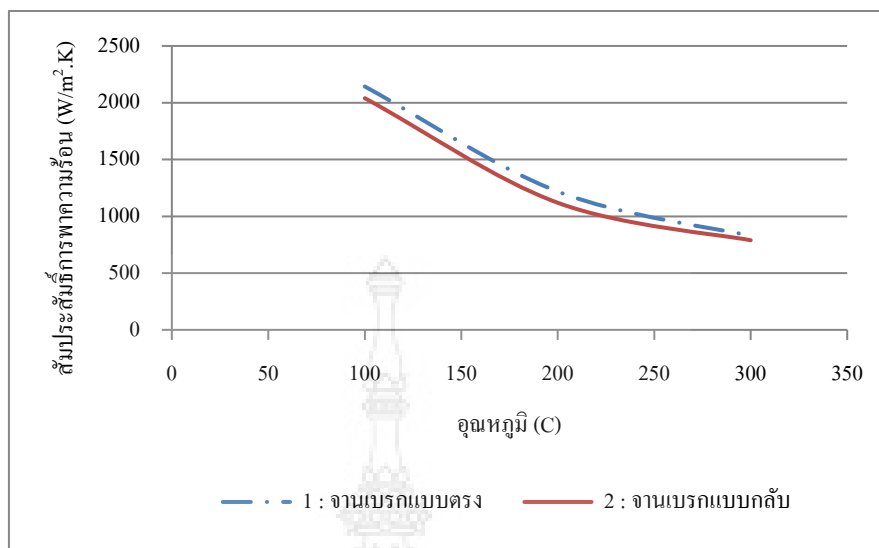
การถ่ายเทความร้อน จึงเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั้งสามความเร็วรอบเป็นค่าเดียว ($h_{ave,total}$) ดังตารางที่ 4.8, 4.9

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรกแบบตรง

อุณหภูมิผิว จานเบรก เริ่มต้น	h (W/m ² .K)									$h_{ave,total}$
	90 km/hr			110 km/hr			140 km/hr			
	h_{in}	h_{out}	h_{ave}	h_{in}	h_{out}	h_{ave}	h_{in}	h_{out}	h_{ave}	
100	2,220	2,127	2,173	2,340	2,209	2,274	2,019	1,950	1,984	2,143
200	1,247	1,188	1,217	1,251	1,191	1,221	1,241	1,193	1,217	1,218
300	811	805	808	827	814	821	858	852	855	828

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรกแบบกลับ

อุณหภูมิผิว จานเบรก เริ่มต้น	h (W/m ² .K)									$h_{ave,total}$
	90 km/hr			110 km/hr			140 km/hr			
	h_{in}	h_{out}	h_{ave}	h_{in}	h_{out}	h_{ave}	h_{in}	h_{out}	h_{ave}	
100	2,066	2,066	2,066	2,040	1,937	1,989	2,044	2,088	2,066	2,040
200	1,108	1,099	1,104	1,097	1,035	1,066	1,229	1,147	1,188	1,119
300	770	763	767	763	752	757	844	839	842	789

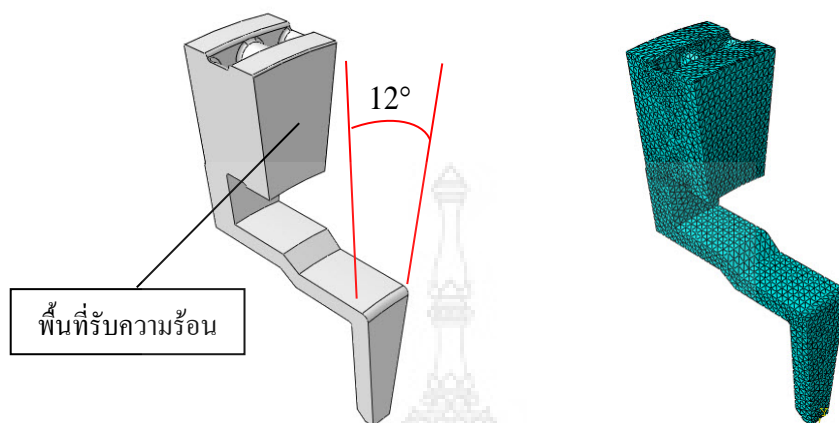


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนงานเบรกทั้ง 2 แบบ

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรกทั้งสองแบบมีลักษณะพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรกแบบตรงช่วงอุณหภูมิ 300 °C มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน 825 W/m².K ขณะเดียวกันที่งานเบรกแบบกลับมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน 789 W/m².K ซึ่งมีผลต่างของทั้งสองแบบมีค่าเท่ากับ 4.4% แต่โดยรวมแล้วงานเบรกทั้งสองแบบมีแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไปในทิศทางเดียวกันคือ ที่อุณหภูมิสูงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะต่ำ ในขณะที่อุณหภูมิต่ำค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ

4.2 ผลการจำลองด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

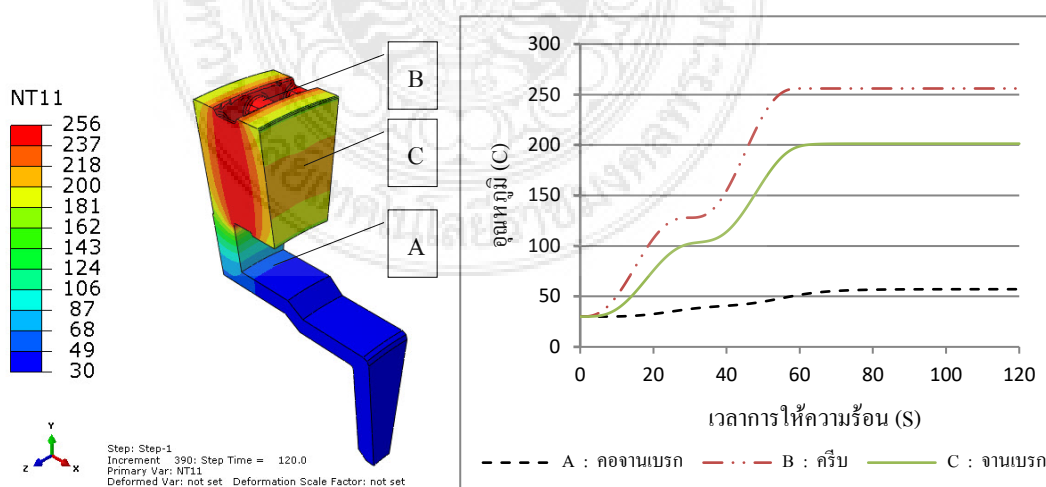
เพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้านอุณหภูมิของงานเบรกแบบตรงและงานเบรกแบบกลับ ขนาดและมิติของงานเบรกมีความซ้ำและคล้ายกัน โดยงานเบรกทั้งหมด 360 ongsami โหนดทั้งหมด 728,469 โหนดและมี 346,890 เอลิเมนต์ ในขณะที่งานเบรก 12 ongsami โหนดทั้งหมด 33,879 โหนด และมี 14,730 เอลิเมนต์ เพื่อลดขั้นตอนในการคำนวณ แบบจำลองจึงถูกสร้างเพียงแค่ส่วนเดียวซึ่งมีขนาดเท่ากับ 12 ongsami จากรูปเต็มของงานเบรก ดังรูปที่ 4.4 โดยการจำลองด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ได้จัดลำดับการจำลองดังนี้ ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสภาวะการทดสอบแล้วจำลองหาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะเปรียบเทียบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของงานเบรก ระหว่างงานเบรกแบบตรงกับงานเบรกกลับ ที่อุณหภูมิเริ่มต้นการถ่ายเทความร้อน 100, 200 และ 300 °C โดยใช้เวลาการถ่ายเทความร้อน 120 วินาที



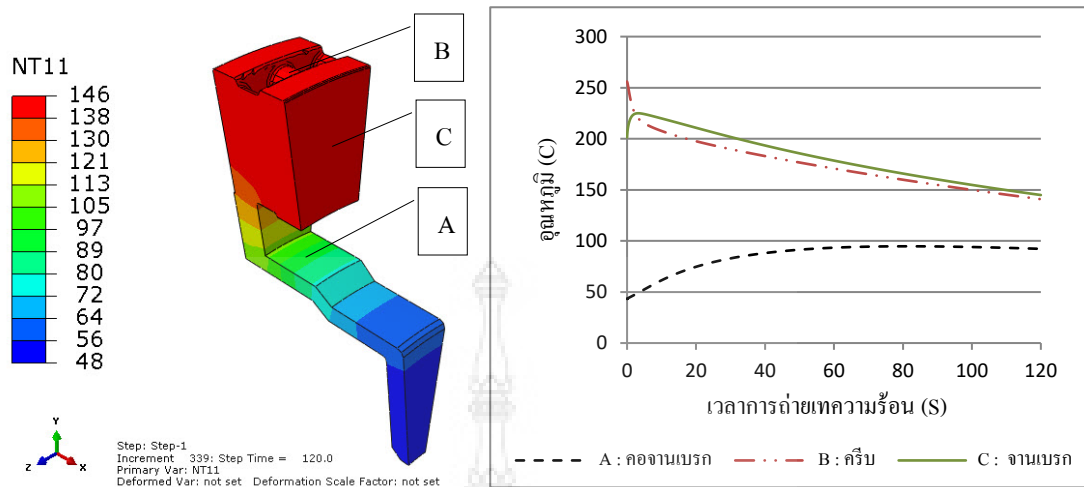
รูปที่ 4.4 งานเบรกขนาด 12 องศาและการแบ่ง Mesh ในการจำลอง

4.2.1 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสภาวะการทดสอบ

การตรวจสอบ โดยการให้ความร้อนกับงานเบรกในปริมาณที่เท่ากันในสภาวะการทดสอบและการจำลอง โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, ขอบเขตและเงื่อนไขที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 4.5 แล้วทำการตรวจสอบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนหลังจากเวลาผ่านไป 120 วินาที ดังรูปที่ 4.6 แล้วเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนระหว่างการทดสอบและการจำลองซึ่งมีตัวแปรดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{Initial}$) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_{Final}) ดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.5 การให้ความร้อนกับงานเบรก



รูปที่ 4.6 การถ่ายเทความร้อนงานเบรก

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลอง

รูปแบบ	ช่วงการให้ความร้อนกับงานเบรก			ช่วงการถ่ายเทความร้อนงานเบรก			การถ่ายเทความร้อน (%)
	เวลา S	อุณหภูมิผิวงานเบรก °C		เวลา S	อุณหภูมิผิวงานเบรก °C		
		$T_{Initial}$	T_{Final}		$T_{Initial}$	T_{Final}	
ทดสอบ	NA	30.0	203.5	120	203.5	134.0	34.0
จำลอง	NA	30.0	201.5	120	201.5	146.0	27.5

จากการตรวจสอบความน่าเชื่อถือภายใต้เงื่อนไขและขอบเขตเดียวกันพบว่าพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนหลังจากเวลาผ่านไป 120 วินาทีในกรณีการทดสอบอุณหภูมิลดลงจาก 203.5°C เหลือ 134.0°C ซึ่งเทียบเท่าเป็นการถ่ายเทความร้อน 34.0 % ในขณะที่ช่วงกันกรณีการจำลองอุณหภูมิลดลงจาก 201.5°C เหลือ 146.0°C ซึ่งเทียบเท่าเป็นการถ่ายเทความร้อน 27.5 % โดยมีความแตกต่างกันระหว่างการทดสอบและการจำลองเท่ากับ 7 % ดังตารางที่ 4.10ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งผลที่แตกต่างข้างต้นนี้อาจมีผลมาจากเงื่อนไขและขอบเขตในการจำลองหรือเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดสอบไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร จึงทำให้เกิดผลต่างดังกล่าว

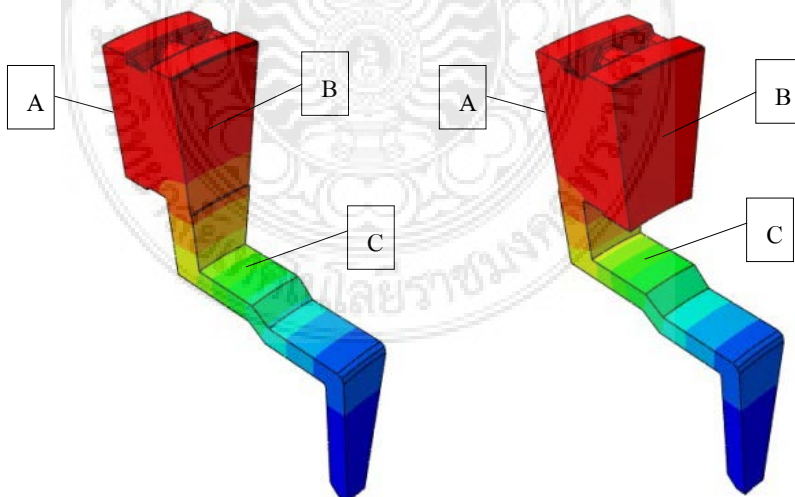
4.2.2 การจำลองพฤติกรรมถ่ายเทความร้อน

การจำลองหาพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของจานเบรกทั้ง 2 แบบ จะจำลองที่อุณหภูมิเริ่มต้นการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดสามอุณหภูมิดังนี้ 100, 200 และ 300 °C โดยใช้เวลาการถ่ายเทความร้อนที่เท่ากันทั้งหมด 120 วินาที ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 รูปแบบการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิเริ่มต้น °C	จานเบรก	เวลาที่ใช้ถ่ายเทความร้อน S
100	แบบตรง	120
	แบบกลับ	
200	แบบตรง	120
	แบบกลับ	
300	แบบตรง	120
	แบบกลับ	

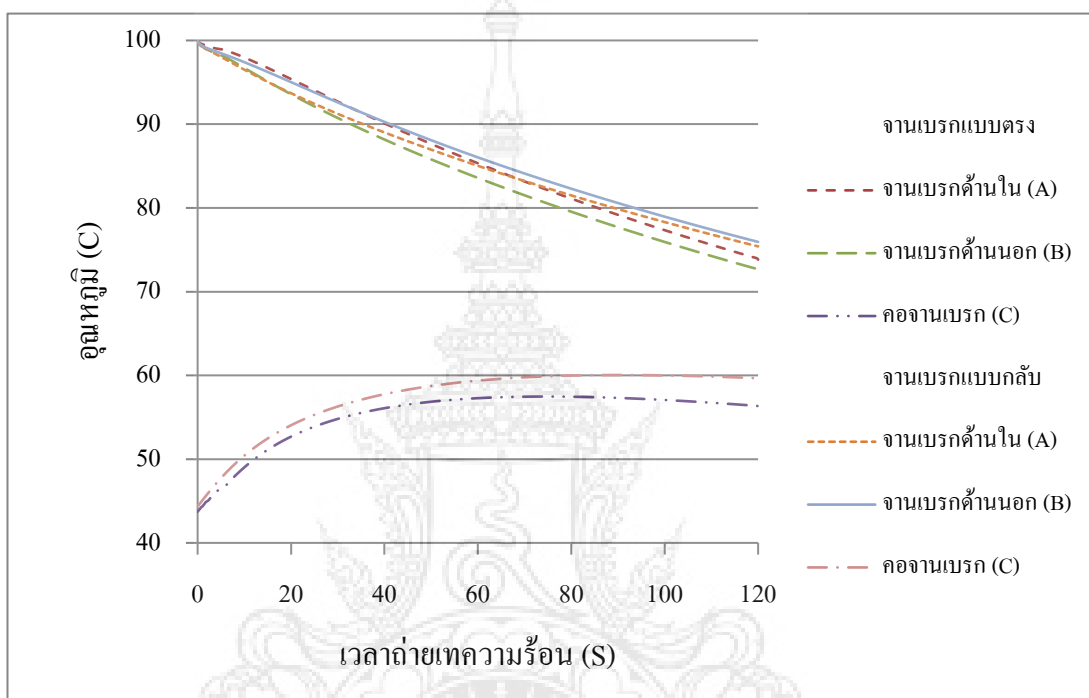
ตำแหน่งอุณหภูมิต่างๆบนจานเบรกที่จะศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนระหว่างจานเบรกแบบตรงและจานเบรกแบบกลับมีทั้งหมดสามจุด คือผิวจานเบรกด้านใน (A), ผิวจานเบรกด้านนอก (B), และส่วนคอจานเบรก (C) ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งอุณหภูมิของจานเบรกแบบกลับและจานเบรกแบบตรง

1. การจำลองที่อุณหภูมิเริ่มต้นการถ่ายเทความร้อน 100 °C

การจำลองโดยการให้ความร้อน 100 °C บริเวณผิวงานเบรกทั้งสองด้านของจานเบรกทั้งสองแบบ จนอุณหภูมิคงที่ แล้วหยุดให้ความร้อน จึงทำการถ่ายเทความร้อน ใช้เวลา 120 วินาที ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในการจำลองใช้ค่าจากการทดสอบ



รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน 100 °C ของจานเบรกแบบกลับและจานเบรกแบบตรง

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆและเปอร์เซ็นต์การถ่ายเทความร้อน

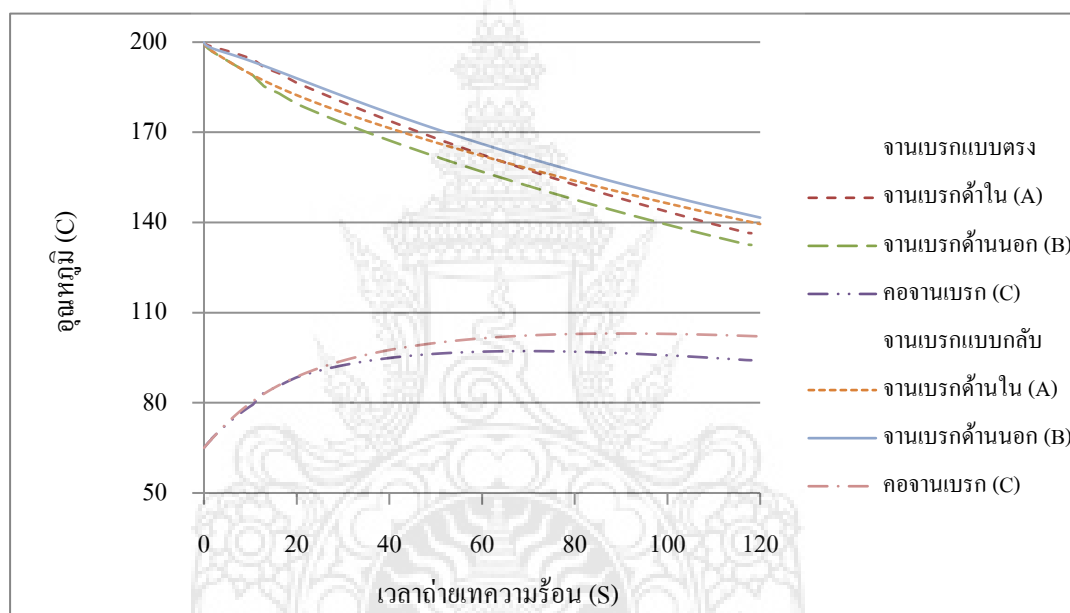
จานเบรก	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ °C				ปริมาณการถ่ายเทความร้อน (%)
	T_A	T_B	T_C	$T_{aver,A-B}$	
แบบตรง	73.7	72.2	56.3	73.0	27.1
แบบกลับ	75.0	76.0	60.8	75.5	24.5

จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.12 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าจานเบรกแบบตรงมีการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิ 100 °C เหลือ 73.0 °C ซึ่งเทียบเท่าเป็นการถ่ายเทความร้อน 27.1 % ในขณะเดียวกันจานเบรกแบบกลับมีการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิ 100 °C เหลือ 75.5 °C ซึ่งเทียบเท่าเป็นการถ่ายเทความร้อน 24.5 % โดยมีความแตกต่างกันระหว่างจานเบรกแบบ

ตรงและจานเบรกแบบกลับเท่ากับ 2.6 % ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าจานเบรกแบบตรงมีความสามารถการพาความร้อนดีกว่าจานเบรกแบบกลับ

2. ผลการจำลองที่อุณหภูมิเริ่มต้นการถ่ายเทความร้อน 200 °C

การจำลองโดยการให้ความร้อน 200 °C บริเวณผิวจานเบรกทั้งสองด้านของจานเบรกทั้งสองแบบ จนอุณหภูมิคงที่ แล้วหยุดให้ความร้อน จึงทำการถ่ายเทความร้อน ใช้เวลา 120 วินาที ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในการจำลองใช้ค่าจากการทดสอบ



รูปที่ 4.9 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน 200 °C ของจานเบรกแบบกลับและจานเบรกแบบตรง

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆและเปอร์เซ็นต์การถ่ายเทความร้อน

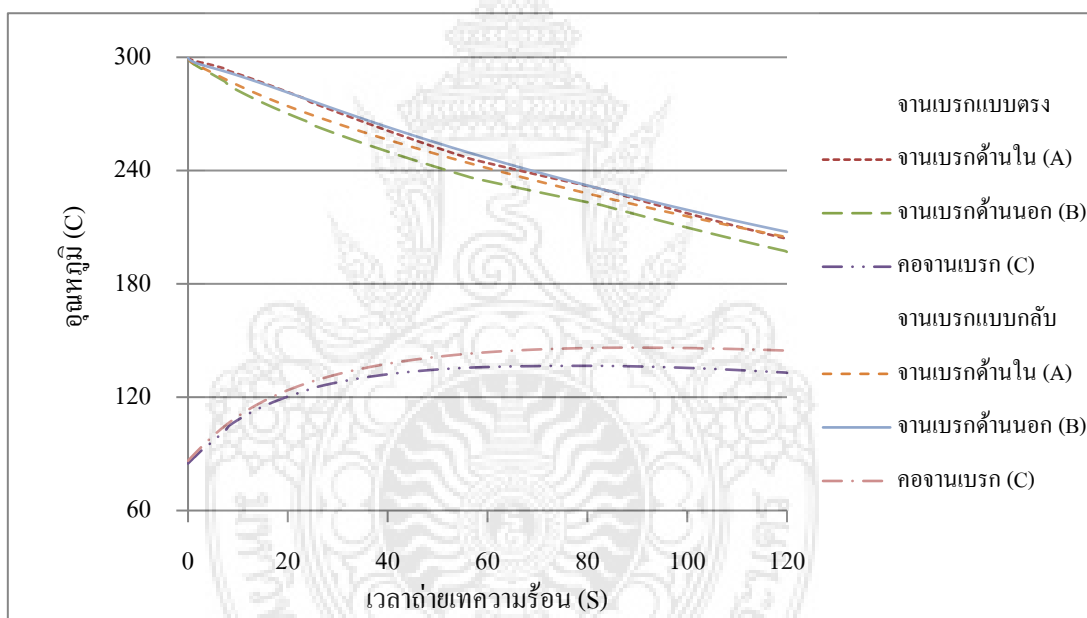
จานเบรก	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ °C				ปริมาณการถ่ายเทความร้อน (%)
	T_A	T_B	T_C	$T_{aver,A-B}$	
แบบตรง	136.5	132.5	97	134.5	33.0
แบบกลับ	140.0	141.5	102.2	141.0	29.6

จากรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.13 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าจานเบรกแบบตรงมีการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิ 200 °C เหลือ 134.5 °C ซึ่งเทียบเท่าเป็นการถ่ายเทความ

ร้อน 33.0 % ในขณะที่เดียวกันจานเบรกแบบกลับมีการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิ 200 °C เหลือ 141.0 °C ซึ่งเทียบเท่าเป็นการถ่ายเทความร้อน 29.6 % โดยมีความแตกต่างกันระหว่างจานเบรกแบบตรงและจานเบรกแบบกลับเท่ากับ 3.4 % ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าจานเบรกแบบตรงมีความสามารถการพาความร้อนดีกว่าจานเบรกแบบกลับ

3. ผลการจำลองที่อุณหภูมิเริ่มต้นการถ่ายเทความร้อน 300 °C

การจำลองโดยการให้ความร้อน 300 °C บริเวณผิวจานเบรกทั้งสองด้านของจานเบรกทั้งสองแบบ จนอุณหภูมิคงที่ แล้วหยุดให้ความร้อน จึงทำการถ่ายเทความร้อน ใช้เวลา 120 วินาที ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในการจำลองใช้ค่าจากการทดสอบ



รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน 300 °C ของจานเบรกแบบกลับและจานเบรกแบบตรง

ตารางที่ 4.14 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆและเปอร์เซ็นต์การถ่ายเทความร้อน

จานเบรก	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ °C				ปริมาณการถ่ายเทความร้อน (%)
	T_A	T_B	T_C	$T_{aver,A-B}$	
แบบตรง	198.9	192.7	131.8	195.8	34.7
แบบกลับ	204.7	207.2	144.7	205.9	31.4

จากรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.14 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่างานเบรกแบบตรงมีการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิ 300 °C เหลือ 195.8 °C ซึ่งเทียบเท่าเป็นการถ่ายเทความร้อน 34.7 % ในขณะที่เดียวกันงานเบรกแบบกลับมีการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิ 300 °C เหลือ 205.9 °C ซึ่งเทียบเท่าเป็นการถ่ายเทความร้อน 31.4 % โดยมีความแตกต่างกันระหว่างงานเบรกแบบตรงและงานเบรกแบบกลับเท่ากับ 3.3 % ดังนั้นแสดงให้เห็นว่างานเบรกแบบตรงมีความสามารถการพาความร้อนดีกว่างานเบรกแบบกลับ

4.2.3 การเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิ

การเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิจะพิจารณาจากสองด้านของงานเบรกทั้งสองแบบที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.15 หากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่างกันมากก็จะส่งผลให้เกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิภายในงานเบรกได้

ตารางที่ 4.15 ผลต่างของอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิงานเบรกแบบตรง (°C)			อุณหภูมิงานเบรกแบบกลับ(°C)		
	ด้านใน	ด้านนอก	ผลต่าง	ด้านใน	ด้านนอก	ผลต่าง
100	73.7	72.2	1.5	75.0	76.0	1.0
200	136.5	132.5	4.0	140.0	141.0	1.0
300	198.9	192.7	6.2	204.7	207.2	2.5
เฉลี่ย	136.4	132.5	3.9	139.9	141.4	1.5

จากตารางที่ 4.15 พบว่างานเบรกแบบตรงมีผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านในและด้านนอกเฉลี่ย 3.9 °C ในขณะที่งานเบรกแบบกลับมีผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านในและด้านนอกเฉลี่ย 1.5 °C ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่างานเบรกแบบตรงมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงกว่างานเบรกแบบกลับ ดังนั้นจึงมีโอกาสเกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิมากกว่า ซึ่งจะส่งผลต่อการเสีรูประหว่างการใช้งานได้

4.2.4 การเปรียบเทียบความสามารถการถ่ายเทความร้อน

นำผลการถ่ายเทความร้อนจากการจำลองของงานเบรกทั้งสองแบบ ที่อุณหภูมิเริ่มต้นการถ่ายเทความร้อน 100, 200 และ 300 °C มาเปรียบเทียบความสามารถการถ่ายเทความร้อน เพื่อศึกษาความสามารถการถ่ายเทความร้อนในอุณหภูมิต่างๆดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในอุณหภูมิต่างๆ

ความสามารถการถ่ายเทความร้อน (%)								
อุณหภูมิ 100 °C			อุณหภูมิ 200 °C			อุณหภูมิ 300 °C		
แบบตรง	แบบกลับ	เฉลี่ย	แบบตรง	แบบกลับ	เฉลี่ย	แบบตรง	แบบกลับ	เฉลี่ย
27.1	24.5	25.8	32.8	29.6	31.2	34.7	31.4	33.0

จากตารางที่ 4.16 พบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้นการถ่ายเทความร้อน 100, 200 และ 300 °C ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 25.8 %, 31.2 % และ 33 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิต่ำ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะลดลง



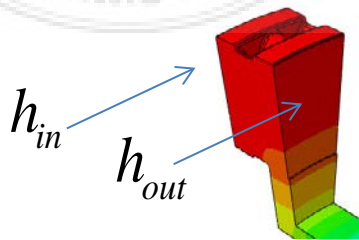
บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลศึกษา การทดสอบ การจำลอง ปัญหาอุปสรรค และข้อเสนอแนะซึ่งจะสะท้อนให้เห็นถึงระดับผลสำเร็จของการดำเนินงาน โดยผลสรุปของโครงการแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักดังนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรกแบบตรงและงานเบรกแบบกลับ โดยอ้างอิงสภาวะการทดสอบตามมาตรฐาน JASO C406 : 2000 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบอุปกรณ์การเบรกของรถยนต์ ด้วยการใช้เครื่องทดสอบแบบไดนาโมมิเตอร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยสามารถทำอุณหภูมิที่ผิวงานเบรกสูงสุดได้เพียง 200°C เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพของชุดทดสอบที่ไม่สามารถสร้างอุณหภูมิที่ผิวงานเบรกให้มากกว่า 200°C ณ ที่ความเร็วรอบของการทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงตัว นอกจากนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานเบรกทั้งสองแบบมีลักษณะพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนไปในทิศทางเดียวกัน จะเห็นว่างานเบรกแบบตรงที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300°C มีค่าเท่ากับ 2,143, 1,218 และ $828\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ตามลำดับ และงานเบรกแบบกลับที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300°C มีค่าเท่ากับ 2,040, 1,119 และ $789\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ตามลำดับ โดยเมื่องานเบรกถูกใช้งานอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูงจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะต่ำ ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิงานเบรกลดต่ำลงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้น โดยงานเบรกแบบตรงมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากกว่างานเบรกแบบกลับโดยเฉลี่ย 4.4 %



รูปที่ 5.1 การถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน

5.2 สรุปผลการจำลอง

จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่างานเบรกแบบตรงมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนมากกว่างานเบรกแบบกลับ จากอุณหภูมิเริ่มต้น 100, 200 และ 300 °C ภายในระยะเวลา 120 วินาที มีค่าเท่ากับ 2.55, 3.15 และ 3.37 % ตามลำดับ ซึ่งงานเบรกแบบตรงมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนมากกว่างานเบรกแบบกลับเฉลี่ย 3.02 % โดยงานเบรกทั้งสองแบบมีพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่ต่างกัน คืองานเบรกแบบตรงที่ผิวงานเบรกด้านในมีอุณหภูมิสูงกว่าผิวงานเบรกด้านนอก เนื่องจากผิวงานเบรกด้านนอกมีการถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อนสู่คอจานเบรกและการพาความร้อนสู่บรรยากาศ ในขณะที่ผิวงานเบรกด้านในมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนออกสู่บรรยากาศเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จึงส่งผลให้มีผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวด้านในและผิวด้านนอก เฉลี่ย 3.9 °C ส่วนงานเบรกแบบกลับที่ผิวด้านนอกของจานเบรกมีอุณหภูมิสูงกว่าผิวงานเบรกด้านใน เนื่องจากผิวงานเบรกด้านในมีการถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อนสู่คอจานเบรกและการพาความร้อนสู่บรรยากาศ ในขณะที่ผิวงานเบรกด้านนอกมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จึงส่งผลให้มีผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวด้านในและผิวด้านนอก เฉลี่ย 1.5 °C ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่างานเบรกแบบตรงมีความต่างอุณหภูมิที่มากกว่างานเบรกแบบกลับ จากการกระจายของอุณหภูมิผลต่างดังกล่าวงานเบรกแบบตรงจึงมีโอกาสเกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิมากกว่างานเบรกแบบกลับ จึงทำให้งานเบรกแบบตรงมีโอกาสเกิดการการเสียดสีระหว่างการใช้งานมากกว่างานเบรกแบบกลับ

5.3 ปัญหาและอุปสรรค

5.3.1 อุปกรณ์ทำความร้อนที่ใช้ในการทดสอบมีข้อจำกัดในการสร้างอุณหภูมิ ณ ที่ความเร็วรอบของการทดสอบ

5.3.2 เนื่องจากมีความจำเป็นต้องวัดอุณหภูมิหลายจุดในเวลาเดียวกัน ความแม่นยำของเครื่องมือวัดจึงผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองสูง

5.3.3 การจำลองด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณแบบจำลอง

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ควรคำนึงถึงสภาพอากาศก่อนการทดสอบ เช่น กลางวัน กลางคืน และสภาพอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำของค่าที่ได้จากการทดสอบ

5.4.2 ควรใช้อุปกรณ์ทำความร้อนที่สามารถสร้างอุณหภูมิสูงได้ ณ ที่ความเร็วรอบของการทดสอบ

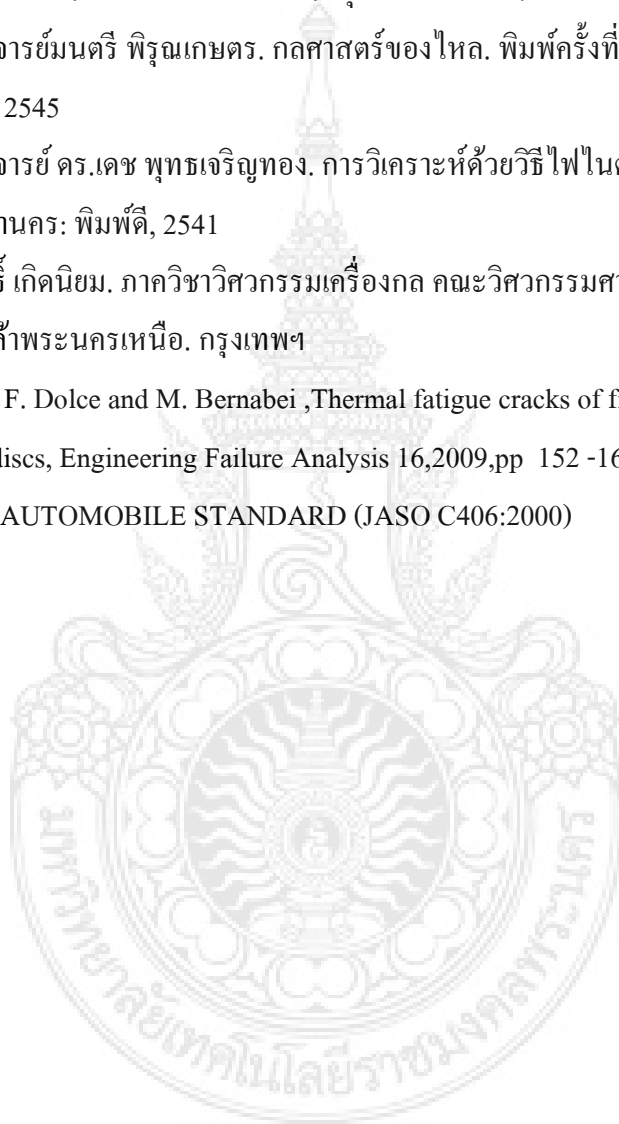
5.4.3 ควรใช้เครื่องมือวัดที่มีหลักการทำงานแบบเดียวกัน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากการทดสอบ

5.4.4 เนื่องจากอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่รัศมีเดียวกันของจานเบรก มีค่าเท่ากันในการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ จึงเสนอแนะให้ทำการจำลองด้วยแบบจำลองสองมิติ เพื่อลดทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ให้สามารถทำการคำนวณได้



บรรณานุกรม

- [1] การพาความร้อน. http://pirun.ku.ac.th/~g4765306/heat_transfer/convection.htm. ค้นเมื่อ วันที่ 5 พฤศจิกายน, 2554.
- [2] นักสิทธิ์ คุ้มพัฒนาชัย. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพมหานคร: พิสิทธ์เซ็นเตอร์, 2533
- [3] รองศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษตร. กลศาสตร์ของไหล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: วิทยาพัฒน์, 2545
- [4] รองศาสตราจารย์ ดร.เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพมหานคร: พิมพ์ดี, 2541
- [5] สายประสิทธิ์ เกิดนิยม. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ
- [6] F. Bagnoli , F. Dolce and M. Bernabei ,Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs, Engineering Failure Analysis 16,2009,pp 152 -163
- [7] JAPANESE AUTOMOBILE STANDARD (JASO C406:2000)



ภาคผนวก

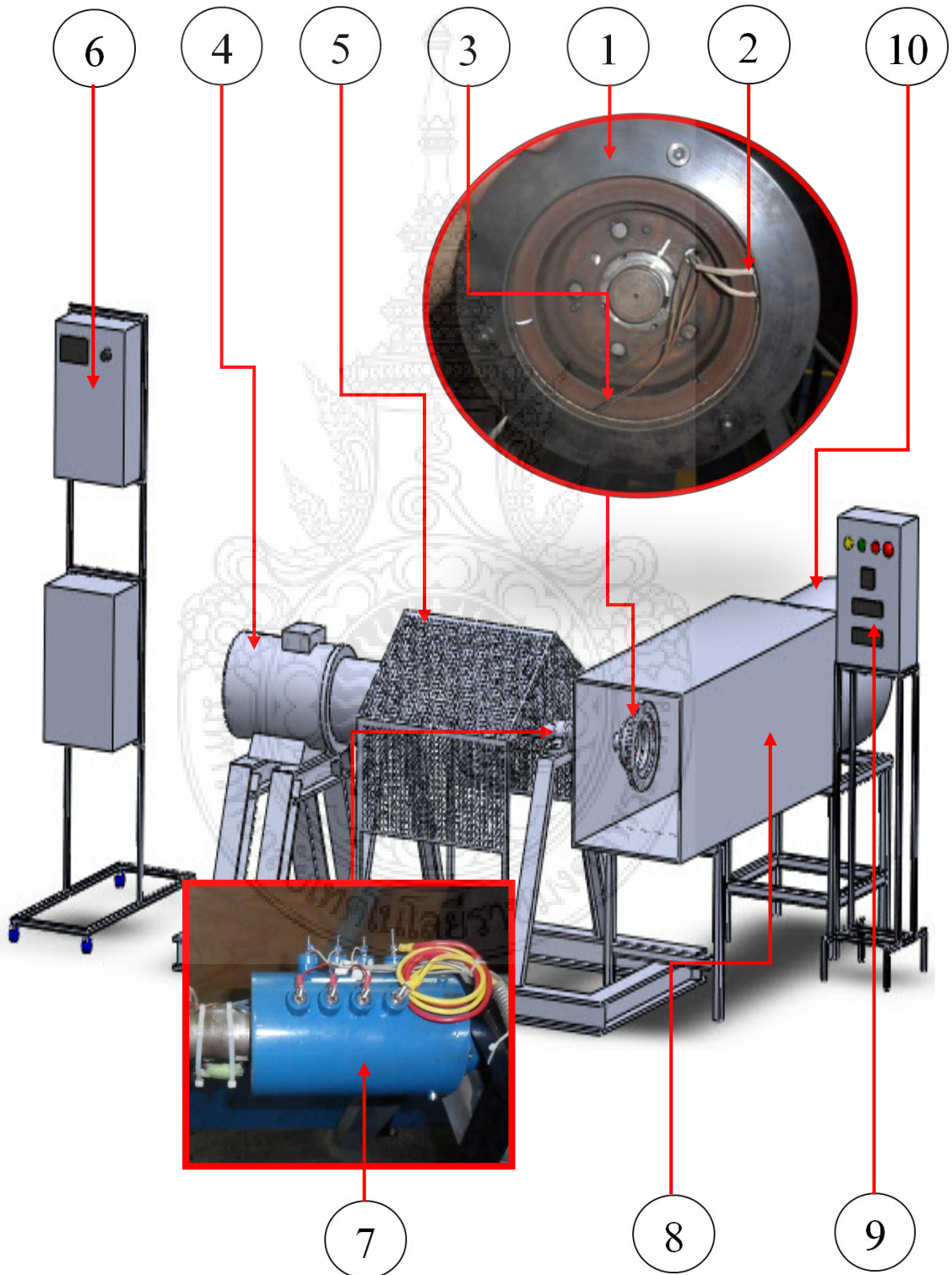


ภาคผนวก ก
คู่มือการใช้งาน



คู่มือการใช้งานเครื่อง

ส่วนประกอบ



อธิบายตำแหน่งต่างๆ ของชุดทดสอบ

หมายเลข	ส่วนประกอบ
1	จานเบรก
2	อุปกรณ์ทำความร้อน
3	ตัวตรวจจับอุณหภูมิ
4	มอเตอร์จับจานเบรก
5	ฝาครอบล้อช่วยแรง
6	ผู้ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์จับ จานเบรกและมอเตอร์พัดลม
7	ชุดแปลงถ่าน
8	อุโมงค์ลม
9	ผู้ควบคุมอุปกรณ์ทำความร้อน
10	ชุดมอเตอร์พัดลม



วิธีการใช้งาน

1. ติดตั้งชุดแปลงถ่านเข้ากับเพลลาแล้วยึดโครงแปลงถ่านให้ติดกับชุดโครงของเพลลาเพื่อไม่ให้โครงของแปลงถ่านหมุนไปตามเพลลาและยึดลูกปืนแปลงถ่านให้ติดกับเพลลา
2. ติดตั้งตัวทำความร้อนและตัวตรวจจับอุณหภูมิเข้ากับงานเบรกตามแบบที่เรากำหนด
3. นำชุดงานเบรกมาติดตั้งกับเพลลาแล้วสลักให้แน่น
4. ต่อสายสัญญาณและสายไปจากชุดงานเบรกเข้ากับชุดแปลงถ่านแล้วออกจากชุดแปลงถ่านเข้ากับกล่องควบคุม
5. นำชุดอุโมงค์ลมมาประกอบสวมเข้ากับชุดงานเบรกแล้วยึดสลักให้แน่น
6. ติดตั้งเครื่องวัดรอบกับขาตั้งแล้วยังสัญญาณไปที่เพลลา
7. ติดตั้งเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า
8. ติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดเข้ากับขาตั้งแล้วยังสัญญาณไปที่งานเบรก

หลักการทำงาน

การทำงานของชุดทดสอบการกระจายอุณหภูมิของงานเบรกแบ่งหลักการทำงานเป็นสามส่วนดังนี้

1. การทำงานชุดสร้างอุณหภูมิที่งานเบรก

ผู้ควบคุม (9) ทำหน้าที่ตัดต่อและปรับกระแสไฟฟ้าตามความต้องการ ส่งไปที่ชุดแปลงถ่าน (7) เพื่อสั่งให้อุปกรณ์ทำความร้อน (2) ทำงาน ขณะเดียวกันตัวตรวจจับอุณหภูมิ (3) ที่งานเบรก (1) จะส่งสัญญาณค่าอุณหภูมิที่วัดได้ผ่านชุดแปลงถ่านกลับไปแสดงที่จอแสดงผลในผู้ควบคุม (9)

2. การทำงานชุดขับงานเบรก

ผู้ควบคุม (6) ทำหน้าที่ เปิด ปิด และควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (4) เพื่อส่งกำลังผ่านเพลลาขับไปขับงานเบรกตามความเร็วรอบที่กำหนด

3. การทำงานชุดอุโมงค์ลม

ผู้ควบคุม (6) ทำหน้าที่ เปิด ปิด การทำงานของมอเตอร์พัดลม (10) เพื่อสร้างกระแสลมระบายความร้อนเข้าสู่อุโมงค์ลม (8) แล้วพัดผ่านชุดงานเบรก (1)

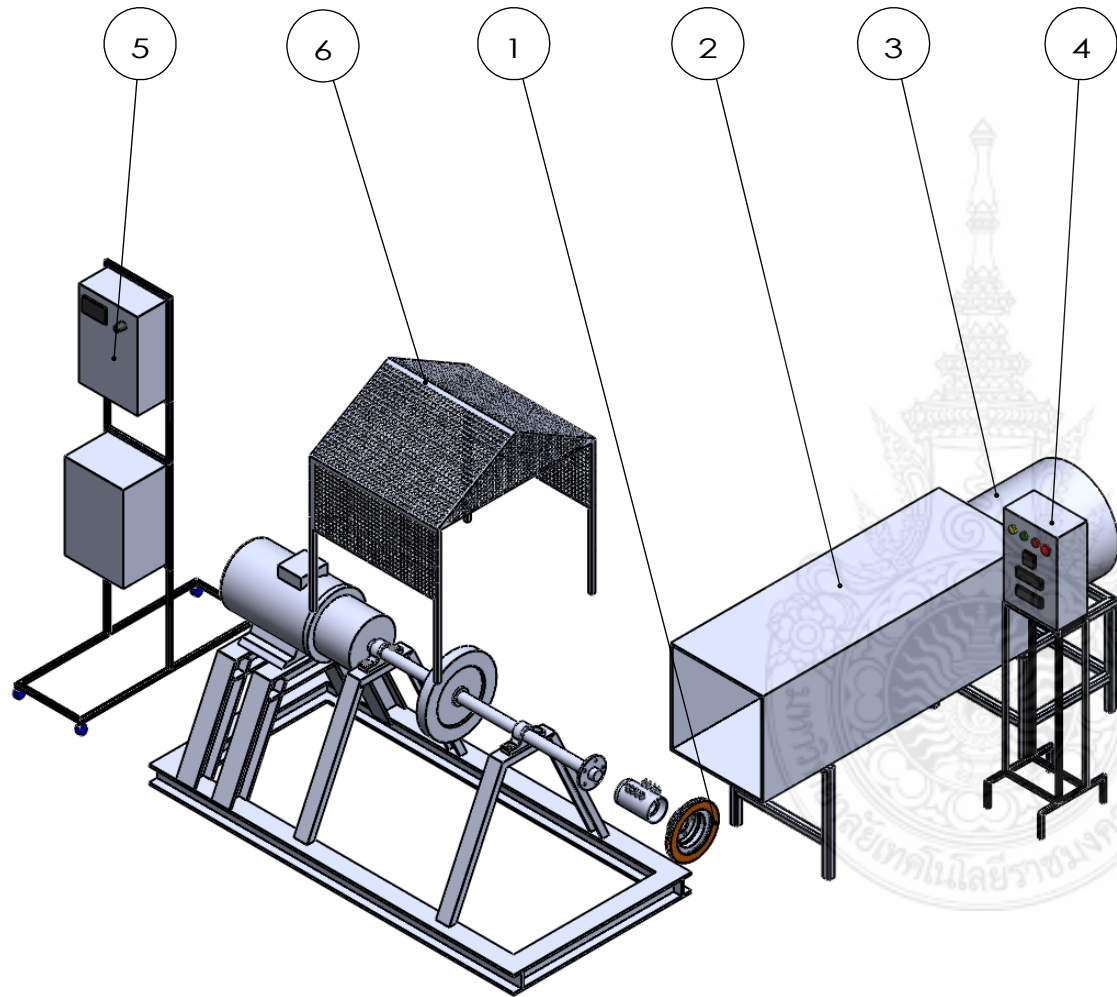
ข้อควรระวัง

1. ห้ามเล่นกันระหว่างการทดสอบเพราะอาจทำให้เกิดอันตรายได้
2. เมื่อเดินเครื่องทดสอบควรอยู่ใกล้สวิตช์ควบคุม เพราะเมื่อเกิดปัญหาสามารถกดปุ่มหยุดฉุกเฉิน (Emergency stop) การทำงานได้โดยทันที
3. ห้ามตรวจสอบไฟรั่วด้วยไขควงลองไฟเสมอ
4. งานเบรกมีความร้อนและอาจเกิดไฟไหม้ได้ให้รีบปิดเครื่องแล้วถอดปลั๊ก
5. ตรวจสอบสภาพของสายอ่อนที่ใช้อยู่เสมอ ซึ่งฉนวนมักจะชำรุดได้ง่าย
6. อย่าพยายามเปิดพัดลม เพื่อระบายอากาศในบริเวณที่มีสารระเหยที่ไวไฟ เช่น ก๊าซหุงต้ม ทินเนอร์ หรือไอน้ำมันเชื้อเพลิง
7. ดูข้อควรปฏิบัติในการใช้ไฟฟ้า หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าอย่างปลอดภัย




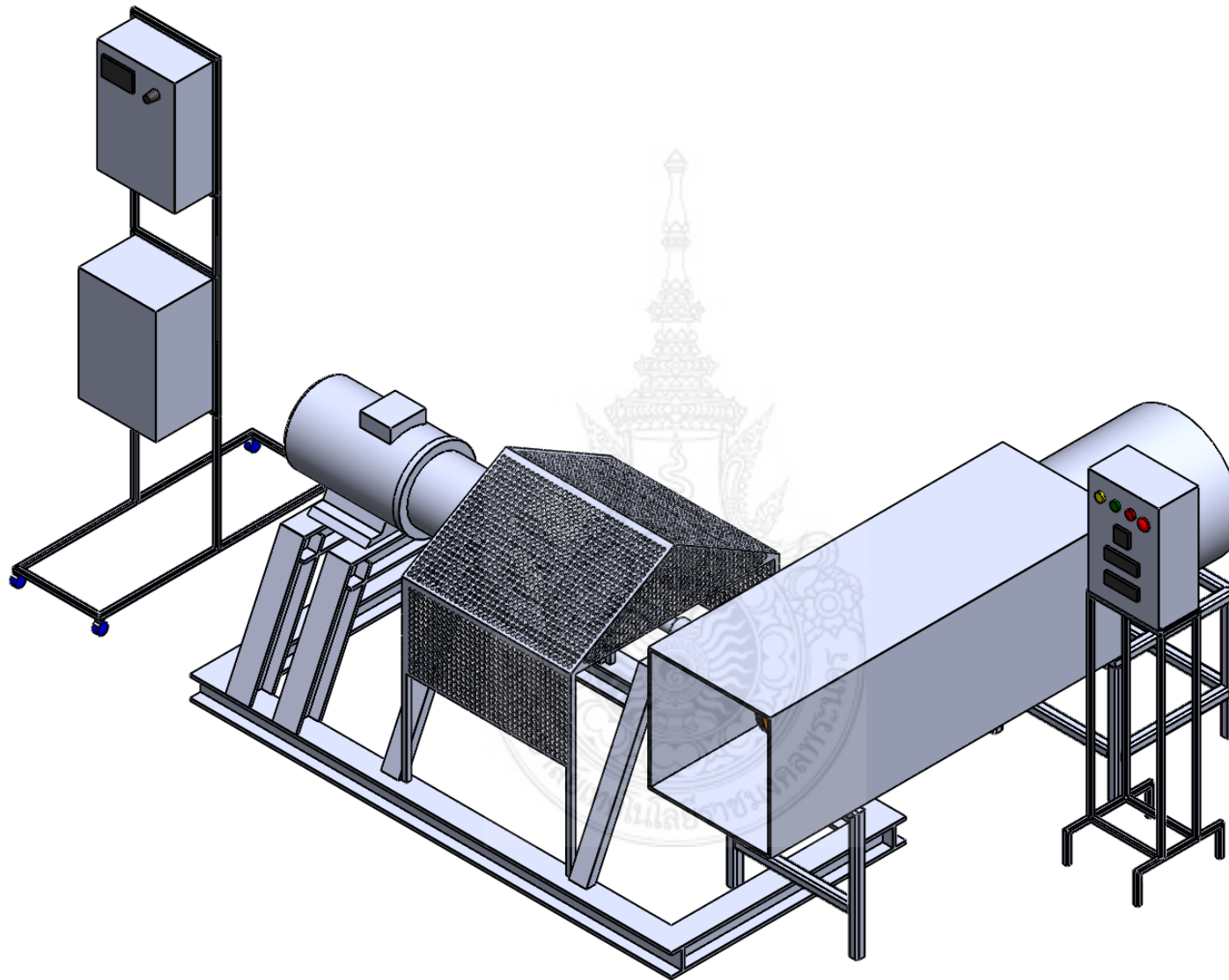
ภาคผนวก ข
แบบชุดชั้นงานเบรก




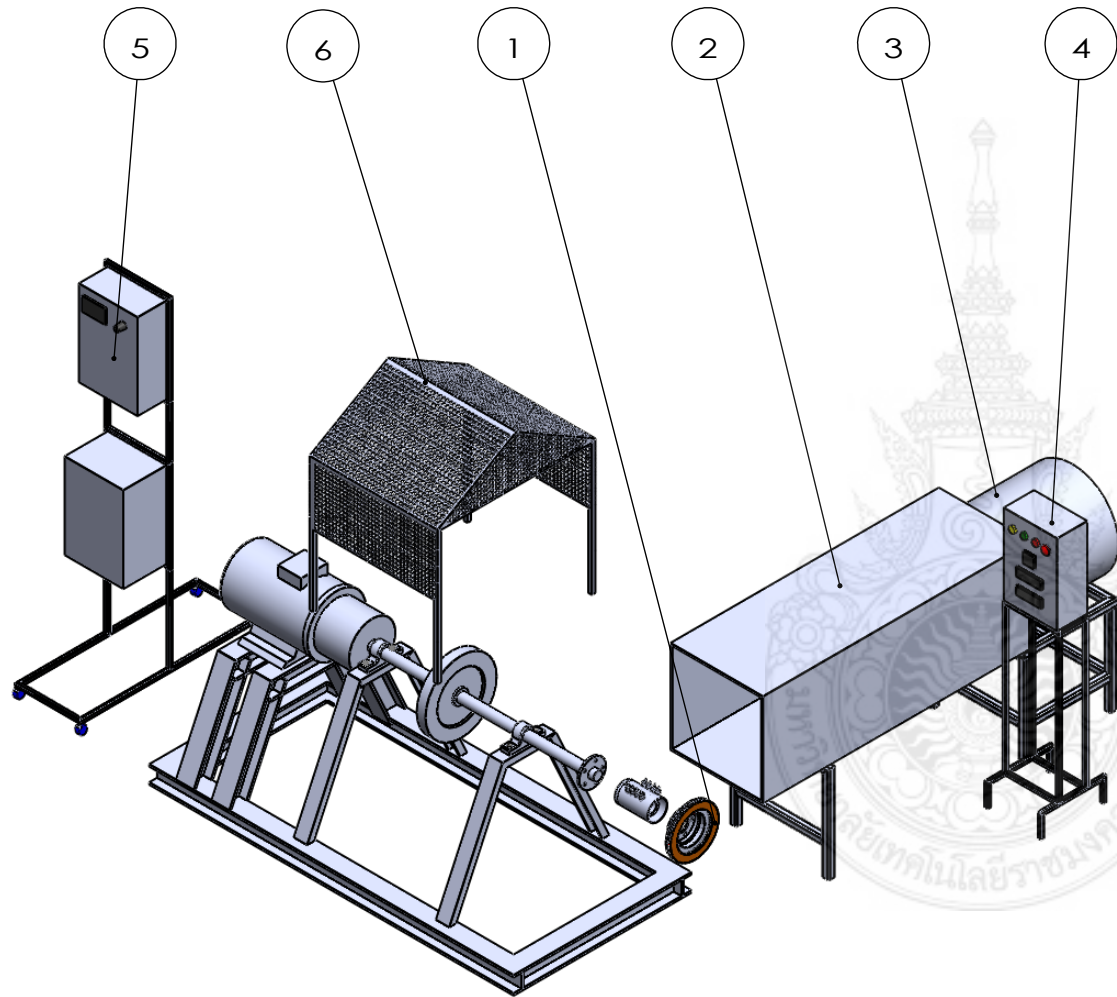


Components			
Sequence	List	Material	Amount
1	Disc brake	Cast iron	1
2	Wind tunnel	Carbon steel square tube	1
3	Blower	Steel	1
4	Control tiral	-	1
5	Driver brake control	-	1
6	Cover	Steel	1


DESIGNER	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON		
DRAW	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012			
APPROVED	SOMJIN PAUNGCHAROENCHAI	16 Feb 2012	TITLE :	ASSEMBLY :	 Third Angle Projection
DIMENSION : mm	NAME	WEDNASDAY	STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	

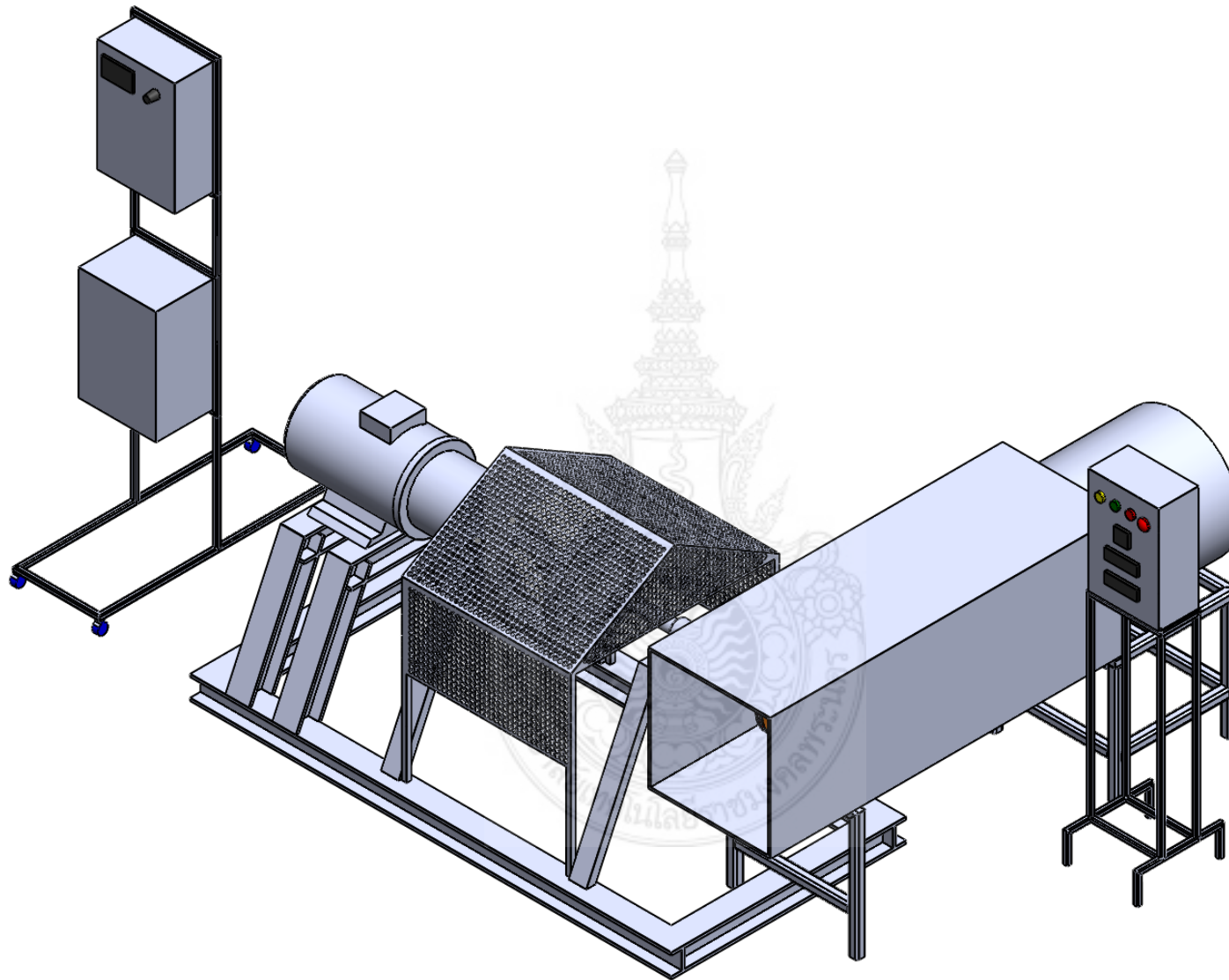



DESIGNER	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING		
DRAW	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON		
APPROVED	SOMJIN PAUNGCHAROENCHAI	16 Feb 2012	TITLE :	ASSEMBLY :	 Third Angle Projection
DIMENSION : mm	NAME	WEDNASDAY	STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	
					SHEET : 1 OF 7

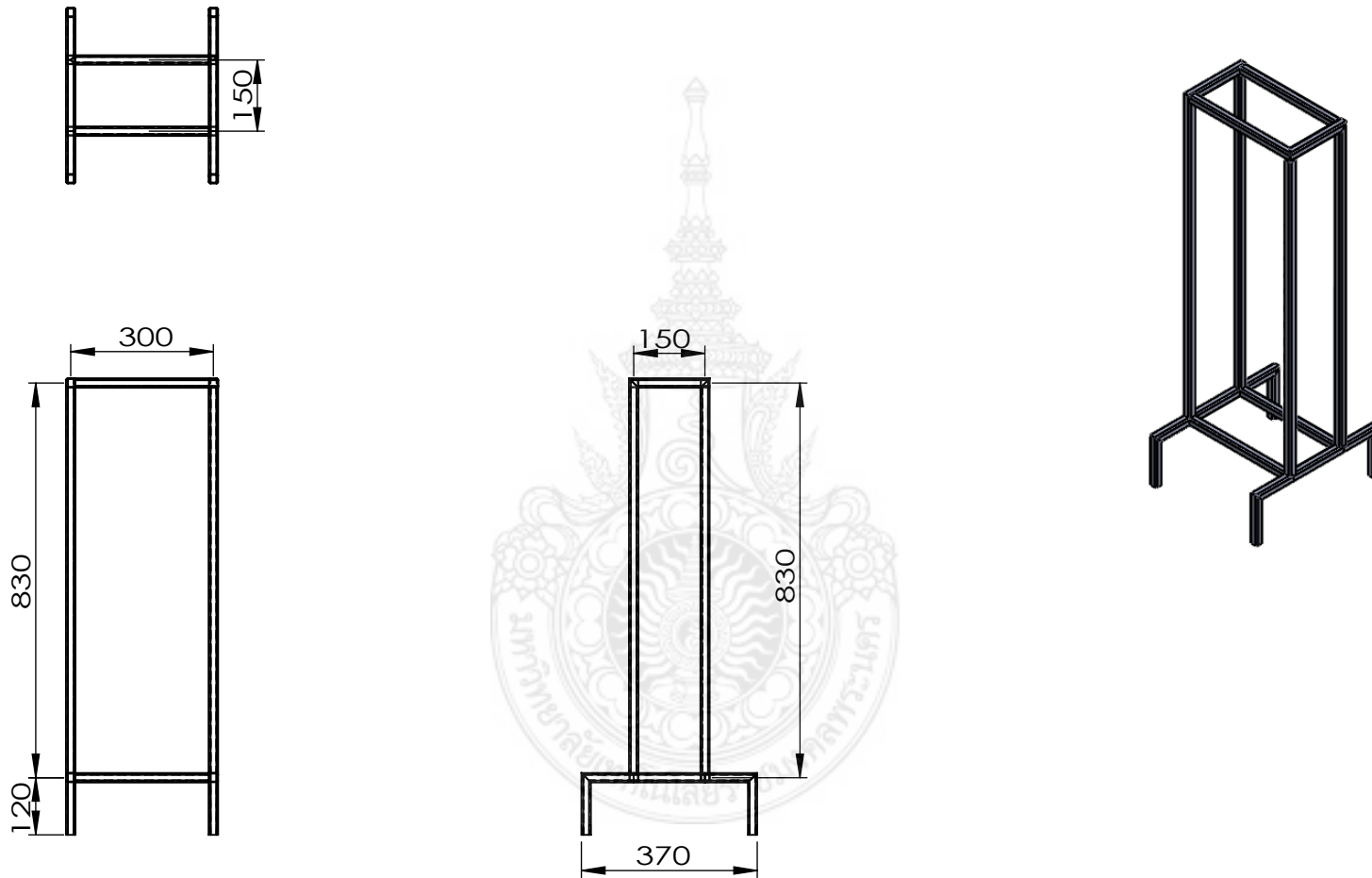



Components			
Sequence	List	Material	Amount
1	Disc brake	Cast iron	1
2	Wind tunnel	Carbon steel square tube	1
3	Blower	Steel	1
4	Control tiral	-	1
5	Driver brake control	-	1
6	Cover	Steel	1

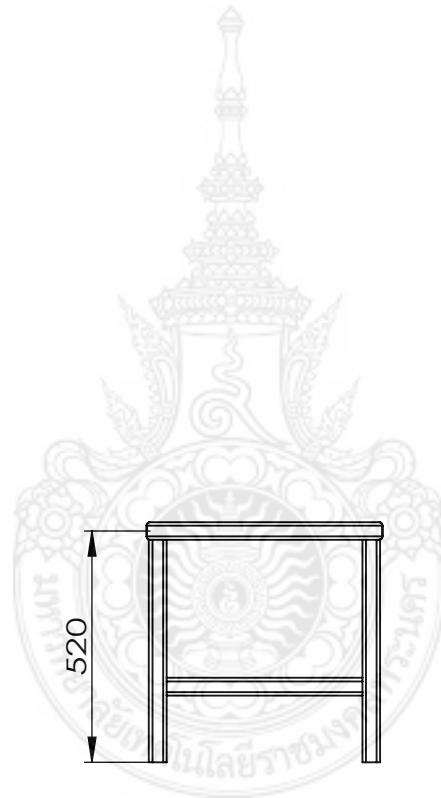
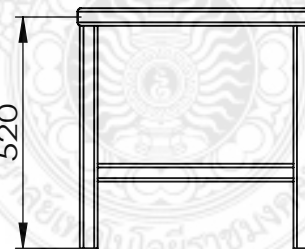
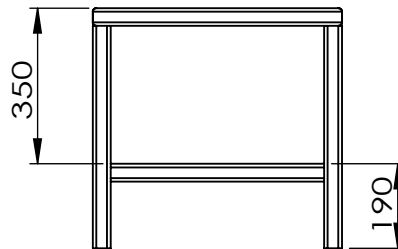
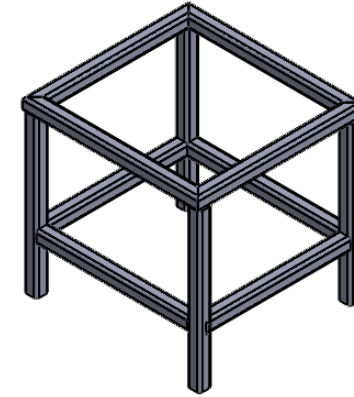
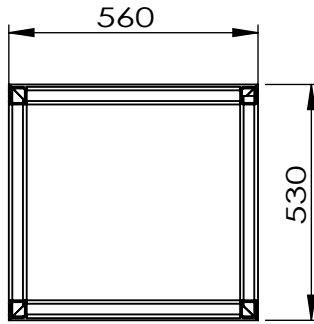
DESIGNER	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING		
DRAW	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON		
APPROVED	SOMJIN PAUNGCHAROENCHAI	16 Feb 2012	TITLE :	ASSEMBLY :	 Third Angle Projection
DIMENSION : mm	NAME	WEDNASDAY	STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	
					SCALE : 1:30
					SHEET : 2 OF 7




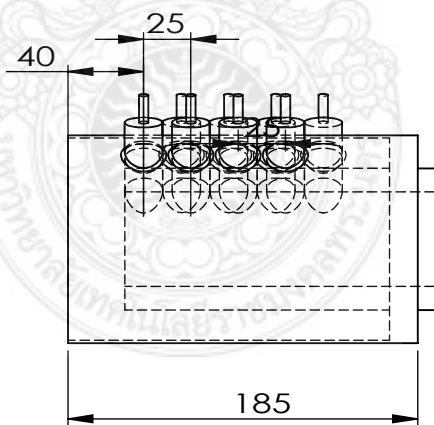
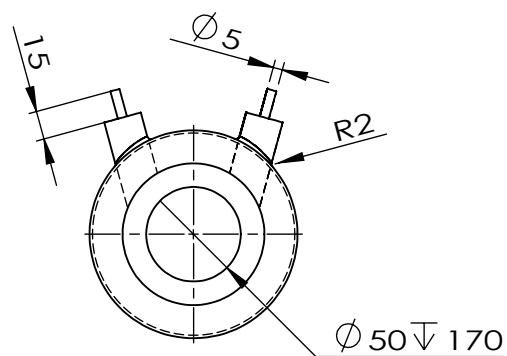
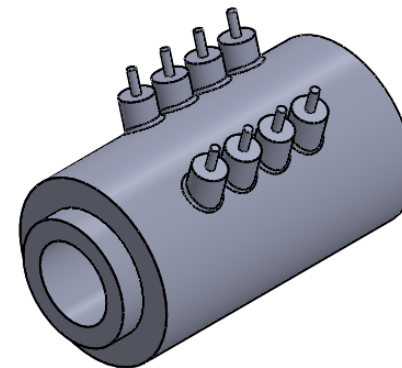
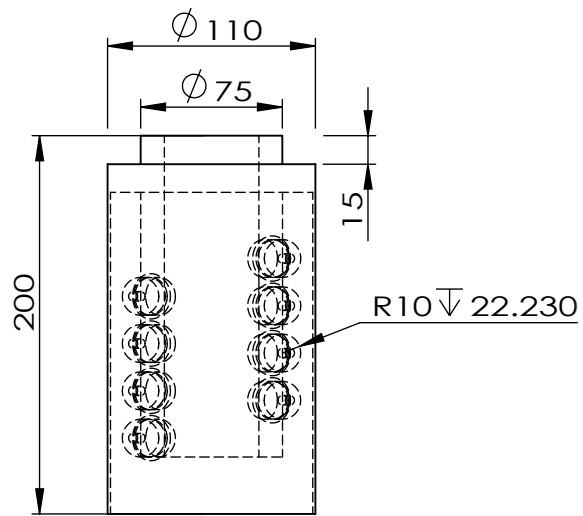
DESIGNER	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING		
DRAW	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON		
APPROVED	SOMJIN PAUNGCHAROENCHAI	16 Feb 2012	TITLE :	ASSEMBLY :	 Third Angle Projection
DIMENSION : mm	NAME	WEDNASDAY	STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	




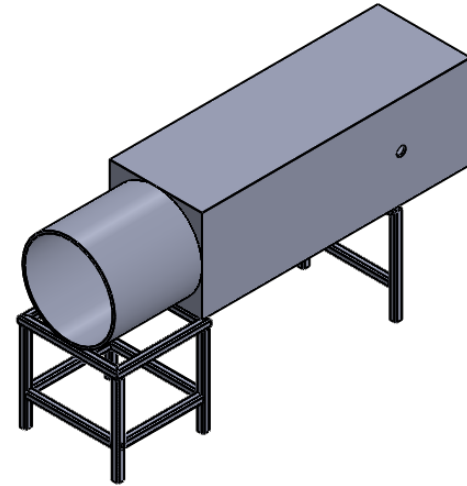
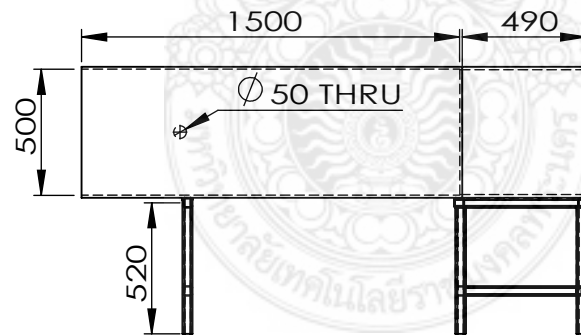
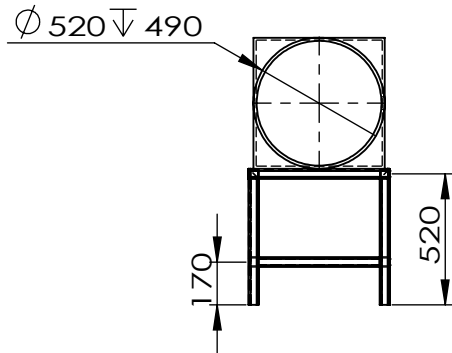
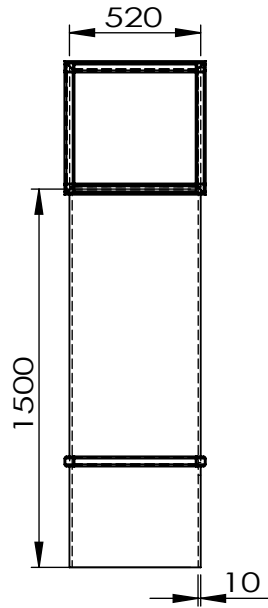
DESIGNER	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING	
DRAW	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON	
APPROVED	SOMJIN PAUNGCHAROENCHAI	16 Feb 2012	TITLE : STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	ASSEMBLY : RECK
DIMENSION : mm	NAME	WEDNASDAY	 Third Angle Projection	
			SCALE : 1:15	
			SHEET : 5 OF 7	

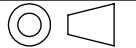


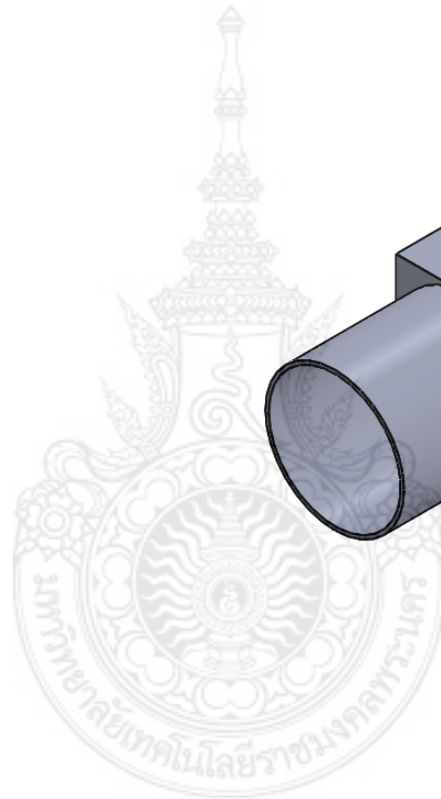
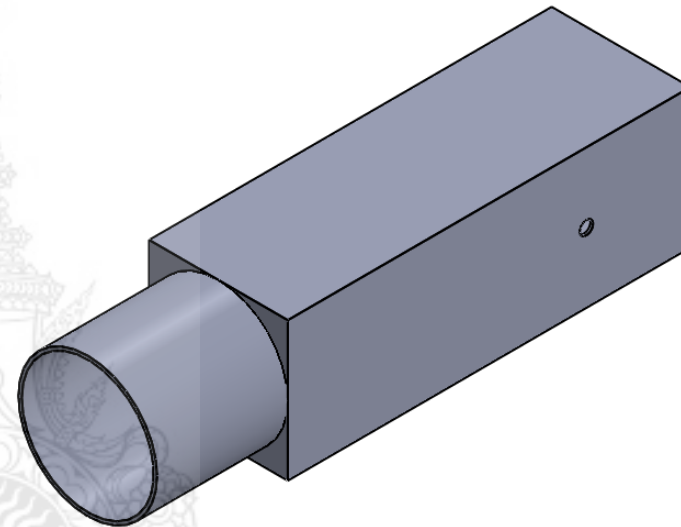
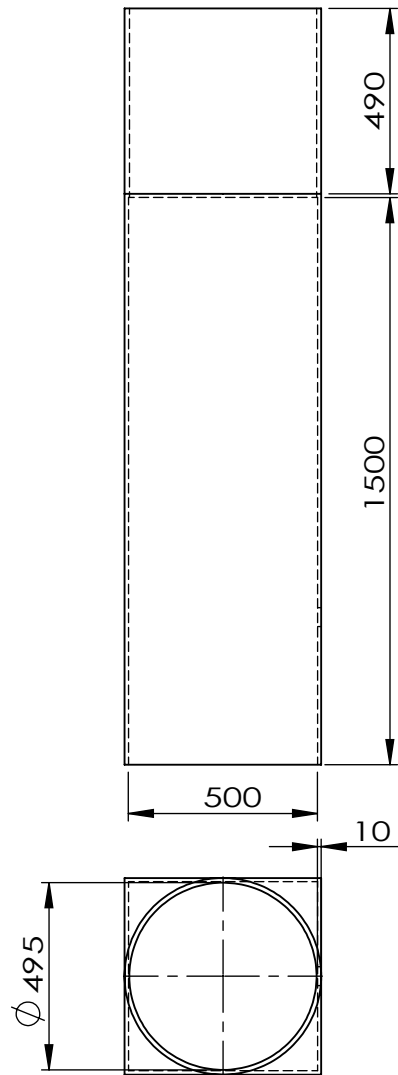
DESIGNER	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING	
DRAW	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON	
APPROVED	SOMJIN PAUNGCHAROENCHAI	16 Feb 2012	TITLE : STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	ASSEMBLY : REG
DIMENSION : mm	NAME	WEDNASDAY	 Third Angle Projection	
			SCALE : 1:17	
			SHEET : 6 OF 7	



DESIGNER	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING	
DRAW	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON	
APPROVED	SOMJIN PAUNGCHAROENCHAI	16 Feb 2012	TITLE : STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	ASSEMBLY : SLIPRING
DIMENSION : mm	NAME	WEDNASDAY	 SCALE : 1:4 SHEET : 4 OF 7	



DESIGNER	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING		
DRAW	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON		
APPROVED	SOMJIN PAUNGCHAROENCHAI	16 Feb 2012	TITLE : STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	ASSEMBLY : WIND TUNNEL	 Third Angle Projection
DIMENSION : mm	NAME	WEDNASDAY			SCALE : 1:30 SHEET : 7 OF 7



DESIGNER	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING		 Third Angle Projection	SCALE : 1:20
DRAW	EAKACHAI TILAO	16 Feb 2012	RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON			SHEET : 1 OF 1
APPROVED	SOMJIN PAUNGCHAROENCHAI	16 Feb 2012	TITLE : STUDY OF HEAT TRANSFER ON DISC BRAKE USING FINITE ELEMENT METHOD	ASSEMBLY : WIND TUNNEL		
DIMENSION : mm	mm.	WEDNASDAY				

ประวัติผู้จัดทำโครงการ



ประวัติผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ-สกุล	เอกชัย ทิลาว
วัน-เดือน-ปีเกิด	24 กรกฎาคม 2531
ที่อยู่	223 หมู่ 1 ต. ป่าคา อ.ท่าม่วง จ. น่าน 55140
ประวัติการศึกษา	
ปวช.	สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคน่าน พ.ศ. 2549
ปวส.	สาขาช่างยนต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพิษณุโลก พ.ศ. 2551
วศบ.	สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร พ.ศ. 2554
โทรศัพท์	08-4913-5235
E-mail address	nack_eakchai@hotmail.com



ประวัติผู้จัดทำโครงการ



ชื่อ-สกุล

ราวิน วิวัฒน์วิทยา

วัน-เดือน-ปีเกิด

22 สิงหาคม 2530

ที่อยู่

3/123 หมู่ 7 ต. รวมไทยพัฒนา

อ.พบบพระ จ. ตาก 63160

ประวัติการศึกษา

ม. 6

สายศิลป์

โรงเรียนศึกษาสงเคราะห์ชัยนาท พ.ศ. 2549

ปวส.

สาขาช่างยนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพิษณุโลก พ.ศ. 2551

วศบ.

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร พ.ศ. 2554

โทรศัพท์

08-4814-0323

E-mail address

xywiwat@hotmail.com



ประวัติผู้จัดทำโครงการ



ชื่อ-สกุล	วสันต์ จินนะ
วัน-เดือน-ปีเกิด	7 กรกฎาคม 2531
ที่อยู่	34/3 หมู่ 2 ต. ป่ากาย อ.ทองแสนขัน จ. อุตรดิตถ์ 53230
ประวัติการศึกษา	
ปวช.	สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคอุตรดิตถ์ พ.ศ. 2549
ปวส.	สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคอุตรดิตถ์ พ.ศ. 2551
วศบ.	สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร พ.ศ. 2554
โทรศัพท์	08-5603-7082
E-mail address	j_wasan555@hotmail.com

