

การออกแบบและสร้างชุดทดลองตรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทาน
จับจากด้านนอก
DESIGN AND FABRICATION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENTAL KIT

ณัฏฐนิชา อุดุลย์ศักดิ์
วรพันธ์ บุญมี
ศิริพงศ์ สนชะเอม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การออกแบบและสร้างชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทาน
จับจากด้านนอก

DESIGN AND FABRICATION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENTAL KIT

โดย

นางสาว ญัณนิชา อุดลย์ศักดิ์
นาย วรพันธ์ บุญมี
นาย ศิริพงษ์ สนชะเอม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

DESIGN AND FABRICATION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENTAL KIT

NATNICHA ADULSAK

WORAPAN BUNMI

SIRIPONG SONCHAAEM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก
DESIGN AND FABRICATION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENTAL KIT

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|-------------------|--------------|--------------|----------|
| 1. นางสาว ณัฐนิชา | อดุลย์ศักดิ์ | รหัสประจำตัว | 57010404 |
| 2. นาย วรพันธ์ | บุญมี | รหัสประจำตัว | 57011106 |
| 3. นาย ศิริพงศ์ | สนชะเอม | รหัสประจำตัว | 57011242 |



(ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

การออกแบบและสร้างชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นแรงเสียดทานจับจากด้านนอก

นางสาว ณิชฌิษา	อดุลย์ศักดิ์	57010404
นาย วรพันธ์	บุญมี	57011106
นาย ศิริพงศ์	สนชเชม	57011242
ผศ.ดร.เอกพจน์	ตันตราภิวัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบและสร้างชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก ใช้เป็นอุปกรณ์การเรียนในวิชา Mechanical Engineering Laboratory การออกแบบใช้ทฤษฎีความเสียดทานแห้งหรือความเสียดทานคูลอมบ์และการวิเคราะห์เบรกแบบสถิตเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด โมเมนต์บิดที่ส่ง แรงดัน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และรูปทรงทางเรขาคณิตของเบรก จากหลักการพื้นฐานจะได้ว่าค่าของโมเมนต์บิดที่แท่งเบรกส่งไปยังดรัมเบรกต้องเท่ากับแรงบิดของล้อขับ จึงทำให้ล้อขับเริ่มหยุดหมุน

สร้างชุดทดลองตามขอบเขตของปริญญานิพนธ์ ซึ่งชุดทดลองนี้จะสามารถปรับขนาดรัศมีของดรัมเบรกได้ 3 ขนาด คือ 4, 5 และ 6 เซนติเมตร ล้อขับรัศมีจะมีขนาดคงที่ คือ 5 เซนติเมตร ผ้าเบรกสามารถปรับมุมได้ 3 ขนาด คือ $20^\circ - 60^\circ$, $30^\circ - 70^\circ$ และ $40^\circ - 80^\circ$ มวลที่ใช้ถ่วงล้อขับมีขนาด 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 และ 2 กิโลกรัม จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อน้ำหนักที่ถ่วงล้อขับและมุมในการเบรกมากขึ้น แรงดันที่ใช้ในการเบรกก็จะมากขึ้น และเมื่อรัศมีของดรัมเบรกมีขนาดมากขึ้นแรงดันที่ใช้ในการเบรก จะมีขนาดลดลงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี การวิเคราะห์เบรกแบบสถิตทำให้ผู้ทดลองเข้าใจทฤษฎีมากขึ้น และสังเกตเห็นแนวโน้มเปลี่ยนแปลงของแรงดันกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้ชัดเจนมากขึ้น

DESIGN AND FABRICATION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENTAL KIT

Miss. Natnicha Adulsak	57010404
Mr. Worapan Bunmi	57011106
Mr. Siripong Sonchaaem	57011242
Asst.Prof.Dr. Akapot Tantrapiwat	Project Advisor
Year 2017	

Abstract

The objectives of this thesis were to design and fabricate a drum brake experimental kit which can be used to study in the mechanical engineering laboratory class. This drum brake kit was designed by using dry friction theory or coulomb friction and static analysis of brake was used to determine the relationship between torque, torsional moment, actuating force, coefficient of friction and geometric shape of brake. According to the principle, drum brake torque must be equal to driving wheel torque to make the driving wheel stop spinning.

The drum brake experimental kit was built according to the scope of this study. The radius of this drum brake kit could be adjusted at 3 values which were 4, 5 and 6 cm. The radius of driving wheel was fixed at 5 cm. The angle of brake lining could be adjusted at 3 values which were 20° - 60°, 30° - 70° and 40° - 80°. The weights applied to the driving wheel were 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 and 2kg. The results showed that actuating force was higher when the weight applied to the driving wheel and angle of brake linking increased. Actuating force was lower when the radius of drum brake increased. These results were in accordance with the static analysis of brake and made the students having better understanding in theories. The student could also observe the change of thrust forces with the relevant variables.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทเล่มนี้ สำเร็จลงด้วยดี ด้วยความร่วมมือจากหลายฝ่ายด้วยกัน บุคคลท่านแรกคือ ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ท่านให้ความเอาใจใส่ แนะนำแนวทาง และช่วยเหลือมาโดยตลอด ทำให้ปริญญาโทเล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ซึ่งต้องขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และผู้ปกครอง ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล รวมทั้งรุ่นพี่ปริญญาโท ที่คอยให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอบขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้คำแนะนำ ติชม ความช่วยเหลือ และกำลังใจให้ผู้จัดทำมาโดยตลอดในการทำปริญญาโทฉบับนี้ ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นางสาวณัฐนิชา อุดลย์ศักดิ์
นายวรพันธ์ บุญมี
นายศิริพงศ์ สนชะเอม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความเสียดทาน (Friction)	4
2.2 แรงเสียดทาน (Frictional force)	5
2.3 ชนิดของความเสียดทาน	5
2.4 ทฤษฎีของความเสียดทานแห้ง (Theory of dry friction)	6
2.5 การวิเคราะห์เบรกแบบสถิต (Static Analysis of Breaks)	9
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	18
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	18
3.2 การออกแบบ	19
3.3 การคำนวณ	24
3.4 การเลือกเครื่องมือวัดขนาดแรงและวัสดุ	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การออกแบบการทดลองและชุดการทดลอง	28
4.1 วัตถุประสงค์ของชุดทดลอง	28
4.2 ชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก	28
4.3 ลำดับขั้นการทดลอง	29
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	35
5.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	35
5.2 ผลการทดลองที่ 1	39
5.3 ผลการทดลองที่ 2	44
5.4 ผลการทดลองที่ 3	48
ภาคผนวก ก เอกสารประกอบการเรียนวิชา Mechanical Engineering Laboratory	53
ภาคผนวก ข ตารางเก็บค่าการทดลอง	66
ภาคผนวก ค แบบชิ้นงานชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก	70
บรรณานุกรม	82

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แรงที่กระทำต่อวัตถุ	4
รูปที่ 2.2 แรงปฏิกิริยาของพื้นกระทำต่อวัตถุ	6
รูปที่ 2.3 พฤติกรรมของวัตถุแข็งที่สัมผัสกับพื้นราบ	9
รูปที่ 2.4 รูปทรงเรขาคณิตของจานผ้าเบรกภายนอก	10
รูปที่ 2.5 ผังวัตถุอิสระแสดงแรงกระทำ ณ จุดใด ๆ บนแผ่นรับแรงเสียดทาน	10
รูปที่ 2.6 (a)แท่งเบรกสั้น (b)แท่งเบรกยาว	11
รูปที่ 2.7 แรงกระทำบนก้ามเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก	12
รูปที่ 3 แสดงชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก	19
รูปที่ 3.1 ดรัมเบรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร หน้า 1.5 เซนติเมตร	20
รูปที่ 3.2 ดรัมเบรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หน้า 1.5 เซนติเมตร	20
รูปที่ 3.3 ดรัมเบรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร หน้า 1.5 เซนติเมตร	20
รูปที่ 3.4 ล้อขับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หน้า 2 เซนติเมตร	21
รูปที่ 3.5 ก้านเบรกสามารถปรับองศาของผ้าเบรกได้ 3 ค่า คือ $20^\circ - 60^\circ$, $30^\circ - 70^\circ$ และ $40^\circ - 80^\circ$	21
รูปที่ 3.6 ผ้าเบรกสำหรับดรัมเบรกเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร มีความหนา 0.38 เซนติเมตร	21
รูปที่ 3.7 ผ้าเบรกสำหรับดรัมเบรกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร มีความหนา 0.35 เซนติเมตร	22
รูปที่ 3.8 ผ้าเบรกสำหรับดรัมเบรกเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร มีความหนา 0.29 เซนติเมตร	22

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.9 เพลลาของล้อขับ	22
รูปที่ 3.10 เพลลาของก้านเบรก	22
รูปที่ 3.11 เหล็กแผ่นขนาด 35×35 เซนติเมตรหนา 0.4 เซนติเมตร	22
รูปที่ 3.12 เครื่องวัดแรงดึง สำหรับวัดแรงดัน	23
รูปที่ 3.13 ชุดปรับแรงดัน	23
รูปที่ 3.14 ชุดลูกตุ้มถ่วงน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัม	23
รูปที่ 3.15 แสดงชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอกโดยแยก ส่วนประกอบ	24
รูปที่ 3.16 เครื่องวัดแรงดึงที่ใช้ในชุดการทดลอง	26
รูปที่ 4.1 ตู้ชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก	28
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) กับมวล m (kg)	43
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) กับ $\theta_1 - \theta_2$ ($^{\circ}$)	47
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) กับรัศมีล้อ r (m)	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เบรกเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญของยานพาหนะเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะรถยนต์ ทำหน้าที่ชะลอความเร็ว หรือทำให้รถหยุดเคลื่อนที่ ในรถยนต์ส่วนใหญ่จะใช้ระบบเบรกแบบแรงเสียดทานโดยการถ่ายทอดแรงเหยียบที่แป้นเบรกไปถึงชุดอุปกรณ์หยุดล้อด้วยระบบไฮดรอลิก ในขณะที่เหยียบเบรกลงที่แป้นเบรก แรงเหยียบจะถูกส่งไปบีมน้ำมันเบรก เพื่อทำหน้าที่อัดแรงดันน้ำมันเบรก ไปดันผ้าเบรกให้เสียดทานกับชุดจานเบรก ทำให้เกิดแรงเสียดทานต้านการหมุนของล้อรถยนต์ ส่งผลให้รถยนต์ชะลอความเร็วหรือหยุดเคลื่อนที่ในที่สุด ซึ่งในทางทฤษฎีนักศึกษาจะได้ศึกษาในวิชาการออกแบบเครื่องจักรกล (Mechanical Engineering Design) แต่เพื่อให้ นักศึกษามีความรู้ และเข้าใจพื้นฐานการทำงานของระบบเบรกแบบแรงเสียดทานมากยิ่งขึ้น นอกจากความรู้ทางทฤษฎี นักศึกษาควรมีความรู้ในภาคปฏิบัติ เพื่อจะได้มีความรู้พื้นฐานการทำงานของระบบเบรกแบบแรงเสียดทานใช้ต่อยอดในอนาคต แต่ในขณะที่อุปกรณ์การเรียนเกี่ยวกับระบบเบรกแบบแรงเสียดทานที่มีอยู่ยังไม่สมบูรณ์เพียงพอ และถ้าสั่งซื้ออุปกรณ์สำเร็จรูปอาจมีข้อจำกัดในการทดลองและมีราคาค่อนข้างสูง คณะผู้จัดทำจึงได้ศึกษาออกแบบและสร้างชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก (External Drum Brake) โดยศึกษาเนื้อหาทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอ้างอิงจากหนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์การเรียนในวิชา Mechanical Engineering Laboratory คณะผู้จัดทำได้ออกแบบและสร้างชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก (External Drum Brake) ขึ้นมา 1 ชุด นักศึกษาจะสามารถเรียนรู้การทำงานของเบรกแบบดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก โดยสามารถวิเคราะห์เบรกแบบสถิต (Static Analysis of Brakes) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด โมเมนต์บิดที่ส่ง แรงดันสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และรูปทรงทางเรขาคณิตของเบรก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- 1.2.1 ออกแบบและสร้างชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก
- 1.2.2 เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ทดลองในวิชา Mechanical Engineering Laboratory
- 1.2.3 ชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก สามารถใช้เพิ่มทักษะความรู้เกี่ยวกับระบบเบรกแบบแรงเสียดทานสำหรับนักศึกษาและผู้สนใจ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 สร้างชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก โดยวิเคราะห์แรงเบรกแบบสถิต
- 1.3.2 แรงบิดที่ใช้ทดลองอยู่ในช่วง 0.125 นิวตันเมตร ถึง 1 นิวตันเมตร
- 1.3.3 แผ่นรับแรงเสียดทานสามารถปรับมุมได้ 3 ค่า คือ $20^\circ - 60^\circ$, $30^\circ - 70^\circ$ และ $40^\circ - 80^\circ$
- 1.3.4 ดรัมเบรกที่ใช้ทดลองมีรัศมีขนาด 4, 5 และ 6 เซนติเมตร

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เบรกแบบสถิต โดยทำการศึกษาใน 2 เรื่องหลัก คือ
 - (1) ทฤษฎีของความเสียดทาน
 - (2) การวิเคราะห์เบรกแบบสถิต
- 1.4.2 ออกแบบชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก
- 1.4.3 สร้างชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก
- 1.4.4 ทดสอบชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก
- 1.4.5 จัดทำเอกสารประกอบการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ชุดทดลองสามารถทำงานได้ตามขอบเขตของโครงการ

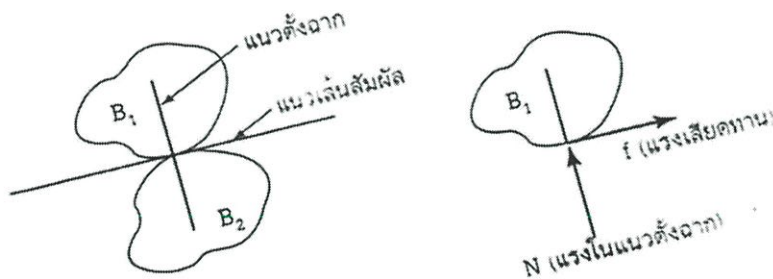
1.5.2 นักศึกษาได้เรียนรู้และเข้าใจถึงหลักการทำงานของเบรกแบบดรัมเบรก
ชนิดแผ่นแรงเสียดทานจับจากด้านนอก

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเสียดทาน (Friction)

ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุสามารถพิจารณาให้เป็นผิวเรียบ แรงที่วัตถุกระทำต่อกันมีทิศทางตั้งฉากกับผิวสัมผัส วัตถุจะสามารถเคลื่อนจากกันได้โดยอิสระ แต่ในความเป็นจริงผิวสัมผัสทั่วไปเป็นผิวขรุขระ ความขรุขระอาจมีมากน้อยต่างกัน เพราะฉะนั้นแรงที่กระทำต่อวัตถุ 2 ชนิด จะมีทั้งแรงในแนวตั้งฉาก (Normal) และแรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential) สภาวะเช่นนี้ คือการเกิดความเสียดทาน (Friction) ระหว่างวัตถุทั้งสองและแรงในแนวสัมผัสนี้ ทำหน้าที่ต้านหรือลดการเคลื่อนที่ไปจากกันในแนวเส้นสัมผัส เรียกว่า แรงเสียดทาน (Frictional force) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แรงที่กระทำต่อวัตถุ

(ภาพจาก การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความเสียดทานสถิต, ครรชิต และคณะ, 2557. [1])

ความเสียดทานที่เกิดขึ้นมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ข้อดี เช่น การเดิน การวิ่ง เบรกรถ คลัตช์ ลี้ม สกรู บันได ล้วนต้องอาศัยความเสียดทานทั้งสิ้น ส่วนข้อเสีย เช่น ทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรสึกหรอและสิ้นเปลืองพลังงาน เป็นต้น ในทางปฏิบัติผิวสัมผัสทั้งหลายต้องมีความเสียดทานทั้งสิ้น

2.2 แรงเสียดทาน (Frictional force)

แรงเสียดทานเป็นแรงที่เกิดขึ้นตามแนวสัมผัสระหว่างผิวที่สัมผัสกัน แรงเสียดทานเกิดขึ้นต่อเมื่อผิวสัมผัสหนึ่งพยายามจะเคลื่อนที่หรือเลื่อนไถลต่ออีกผิวสัมผัสหนึ่ง และทิศทางของแรงเสียดทานจะตรงข้ามกับทิศทางของแนวโน้มของการเคลื่อนที่นั้น ในทางเครื่องกลและขบวนการปฏิบัติงานส่วนใหญ่ มักต้องการลดผลการหน่วงเนื่องจากแรงเสียดทาน เช่น ระบบตลับลูกปืน ระบบเกียร์ ระบบการไหลของของไหลในท่อ ระบบขับเคลื่อนของเครื่องบินและซีปนาอวกาศผ่านบรรยากาศ ในบางสถานการณ์ก็ต้องการเพิ่มแรงเสียดทาน เช่น ระบบห้ามล้อรถยนต์ ระบบคลัตช์ ระบบสายพานขับเคลื่อน และระบบลิ้ม สำหรับการเคลื่อนที่ของล้อยานพาหนะจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานทั้งการออกตัววิ่งและการหยุดวิ่ง การเดินตามปกติก็ขึ้นอยู่กับความเสียดทานระหว่างรองเท้ากับพื้น ในทางเครื่องกลหรือขบวนการที่เกิดความเสียดทานน้อยมากจนสามารถยกเว้นได้จะถือว่าเป็น กรณี อุดมคติ (Ideal) แต่สำหรับกรณีที่ต้องนำความเสียดทานมาพิจารณาด้วยจะถือว่าเป็นกรณีจริง (Real) ในกรณีจริงเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัส แรงเสียดทานจะมีผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน โดยเปลี่ยนไปในรูปของพลังงานความร้อนและการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับผิวสัมผัสนั้น

2.3 ชนิดของความเสียดทาน ความเสียดทานแบ่งออกเป็น 4 ชนิด

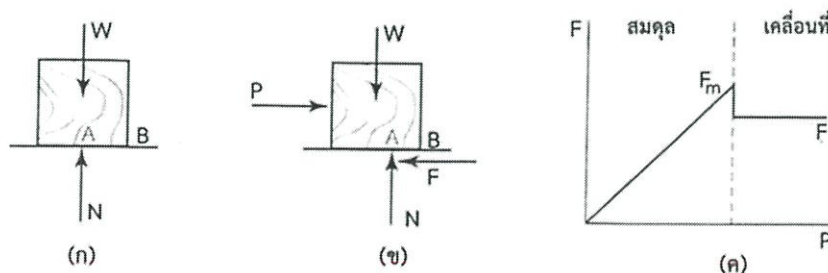
- 2.3.1 ความเสียดทานแห้งหรือความเสียดทานคูลอมบ์ (Dry friction or Coulomb friction) เป็นความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุที่เป็นของแข็ง 2 ก้อน ที่ลื่นไถลหรือพยายามจะเลื่อนออกจากกันโดยที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุไม่มีสารหล่อลื่น
- 2.3.2 ความเสียดทานของไหล (Fluid friction) เป็นความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลกับแผ่นหรือชิ้นของของไหลที่เคลื่อนด้วยความเร็วต่างกัน แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสัมพัทธ์ระหว่างชั้นของของไหลและความหนืด (Viscosity) ของของไหล
- 2.3.3 ความต้านทานต่อการกลิ้ง (Rolling resistance) เป็นความต้านทานการกลิ้งของวัตถุกลม

2.3.4 ความเสียดทานภายใน (Internal friction) เป็นความเสียดทานที่เกิดขึ้นในของแข็งที่รับแรงแบบซ้ำรอบ (Cyclical load) เมื่อของแข็งที่มีความยืดหยุ่นต่ำหรือเมื่อรับแรงเฉยช่วงยืดหยุ่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างคือยืดตัวหรือหดตัวและการคืนรูปของวัตถุจะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากความเสียดทานภายในซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานขณะรับแรง

2.4 ทฤษฎีของความเสียดทานแห้ง (Theory of dry friction)

ทฤษฎีของความเสียดทานแห้งได้จากการทดลองของ ซี.เอ.คูลอมบ์ (C.A. Coulomb) ในปีค.ศ. 1781 ใช้กับวัตถุแข็งที่ไม่มีสารหล่อลื่น ดังนั้นจึงอาจเรียกความเสียดทานนี้เป็นความเสียดทานคูลอมบ์อีกชื่อหนึ่ง เพื่อความชัดเจนในการทำความเข้าใจทฤษฎีนี้ พิจารณาวัตถุหนัก W วางอยู่บนพื้น ดังรูปที่ 2.2 (ก) จะมีแรงปฏิกิริยาของพื้น $N = W$ กระทำต่อวัตถุ วัตถุที่ไม่เคลื่อนที่และไม่มีแรงเสียดทานเกิดขึ้น แต่ถ้าใส่แรง P ในแนวราบบนวัตถุดังรูปที่ 2.2 (ข) แรง P จะพยายามทำให้วัตถุเคลื่อนที่ไปในแนวราบ ขณะที่แรง P มีปริมาณน้อยวัตถุยังไม่เคลื่อนที่จะมีแรงต้านการเคลื่อนที่ในแนวราบ F เรียกว่าแรงเสียดทานสถิต (Static-friction force) แรงเสียดทานนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะหรือสภาพของผิวสัมผัส (Nature of contacting surfaces) ว่าขรุขระมากน้อยเพียงใด ขณะที่วัตถุยังไม่เคลื่อนที่ซึ่งหมายความว่าระบบแรงอยู่ในสภาวะสมดุล

ดังนั้นแรง $F = P$ เมื่อเพิ่มแรง P มากขึ้น แรงเสียดทานจะเพิ่มตามเมื่อแรง P เพิ่มจนถึงค่าๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นค่าสูงสุด แรงเสียดทานจะมีค่าสูงสุด $F = f_m$ ถ้าแรง P (หรือสิ้นไกล) เรียกสภาวะที่ค่าแรงเสียดทานสูงสุดนี้ว่าวัตถุกำลังจะเคลื่อนที่ (Impending motion) หรือเริ่มเคลื่อนที่พอดี



รูปที่ 2.2 แรงปฏิกิริยาของพื้นกระทำต่อวัตถุ

(ภาพจาก การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความเสียดทานสถิต, ครรชิต และคณะ, 2557. [1])

ถ้าแรง P เพิ่มมากขึ้น แรงเสียดทานจะไม่สามารถต้านการเคลื่อนที่ วัตถุจะเคลื่อนที่หรือลื่นไถล แรงเสียดทานที่พื้นยังมีอยู่และมีขนาดลดลงเป็นค่า f_k ซึ่งเรียกว่า แรงเสียดทานจลน์ (Kinetic friction) แรงเสียดทานนี้จะมีขนาดคงที่เมื่อวัตถุเคลื่อนที่เร็วขึ้น ดังรูปที่ 2.2 (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับแรง P

จากการทดลองพบว่าความเสียดทานสถิตสูงสุด f_m แปรผันตามขนาดของแรงปฏิกิริยาตั้งฉาก N

$$f_m = \mu_s N \quad (2.1)$$

เมื่อ f_m คือ ความเสียดทานสถิตสูงสุด (N)

μ_s คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

N คือ ขนาดของแรงปฏิกิริยา (N)

ในลักษณะเดียวกันแรงเสียดทานจลน์จะแปรผันตามขนาดของแรงปฏิกิริยา N ด้วย

$$f_k = \mu_k N \quad (2.2)$$

เมื่อ f_k คือ ความเสียดทานจลน์สูงสุด (N)

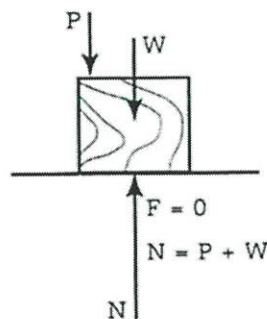
μ_k คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์

N คือ ขนาดของแรงปฏิกิริยา (N)

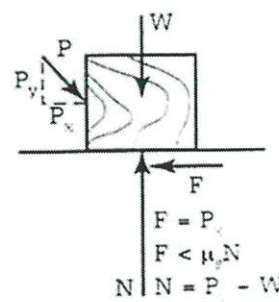
ค่า μ_s และ μ_k ไม่ขึ้นกับขนาดพื้นที่ของผิวสัมผัส แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะหรือสภาพของผิวสัมผัส ซึ่งแตกต่างกันตามวัสดุ

จากทฤษฎีของความเสียดทานแห้งข้างต้น สามารถสรุปพฤติกรรมของวัตถุแข็งที่สัมผัสกับพื้นราบ โดยพิจารณาจาก รูปที่ 2.3 ดังนี้

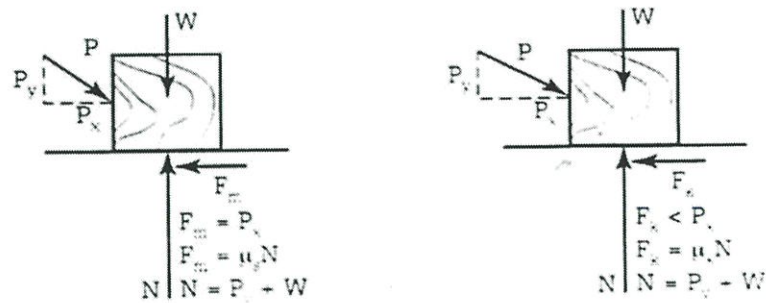
- ไม่มีแรงเสียดทาน (No friction) จากรูปที่ 2.3 (ก) เนื่องจากแรงเสียดทานภายนอก P และน้ำหนัก W เป็นแรงในแนวตั้งไม่มีแรงที่พยายามทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบ $P_x = 0$ ดังนั้นจึงไม่มีแรงเสียดทานเกิดขึ้น
- ไม่มีการเคลื่อนที่ (No motion) แรงภายนอก P ที่แตกในแนวราบ ($F = P_x \neq 0$) พยายามทำให้วัตถุเคลื่อนที่ แต่ขนาดยังน้อยกว่าแรงเสียดทานสูงสุด ($P_x < f_m$) แต่แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะต้านการเคลื่อนที่ที่วัตถุอยู่ในสภาวะสมดุล ดังรูปที่ 2.3 (ข) แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉาก $N = P_y + W$
- เริ่มเคลื่อนที่ (Motion impending) เมื่อแรงภายนอก P มีขนาดเพิ่มขึ้นจนค่าของแรงย่อยในแนวราบ P_x มีขนาดเท่ากับแรงเสียดทานสูงสุด f ระหว่างวัตถุกับพื้นพอดี คือ $P_x = f_m = \mu_s N$ วัตถุจะเริ่มเคลื่อนที่พอดี และถือว่าวัตถุยังอยู่ในสภาวะสมดุลแรง $N = P_y + W$ ดังรูปที่ 2.3 (ค)
- เคลื่อนที่แล้ว (Motion) เมื่อวัตถุเคลื่อนที่แล้ว เนื่องจากแรง P_x เอาชนะแรงเสียดทานสูงสุด f_m ($P_x > f_m$) ดังนั้น วัตถุไม่อยู่ในสภาวะสมดุลแต่แรงเสียดทานจะเป็นแรงเสียดทานจลน์ $f_k = \mu_k N$ ดังรูปที่ 2.3 (ง)



(ก) ไม่มีแรงเสียดทาน ($P_x = 0$)



(ข) ไม่มีการเคลื่อนที่ ($P_x < f_m$)



(ค) เริ่มเคลื่อนที่ไปทางขวา $\rightarrow (P_x = f_m)$ (ง) เคลื่อนที่ไปทางขวา $\rightarrow (P_x > f_m)$

รูปที่ 2.3 พฤติกรรมของวัตถุแข็งที่สัมผัสกับพื้นราบ

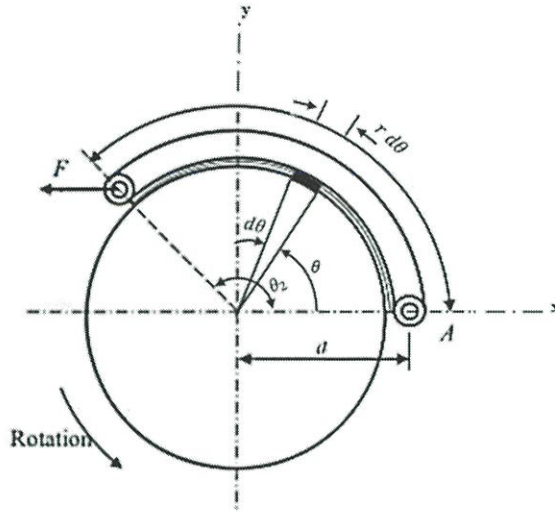
(ภาพจาก การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความเสียดทานสถิต, ครรชิต และคณะ, 2557. [1])

2.5 การวิเคราะห์เบรกแบบสถิต (Static Analysis of Brakes)

สามารถวิเคราะห์เบรกประเภทต่างๆได้ด้วยกระบวนการดังต่อไปนี้

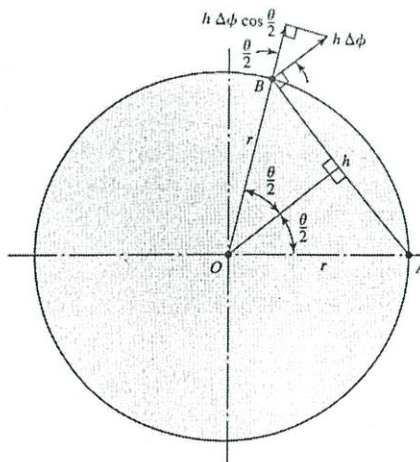
- คำนวณ สร้างแบบจำลอง หรือวัดการกระจายของความดันบนพื้นผิวที่รับแรงเสียดทาน
- หาความสัมพันธ์ของความดันสูงสุดกับความดันที่จุดใดๆ
- ใช้เงื่อนไขสภาวะสมดุลแบบสถิตในการหาแรงที่ทำให้หยุด หรือโมเมนต์บิดและแรงปฏิกิริยารองรับ

ในระบบเบรก การเบรกประเภทที่ผ้าเบรกขยายตัวจากภายในหรือหดตัวจากภายนอกมาสัมผัสกับพื้นผิวของดรัม มีชื่อเรียกว่า "ดรัมเบรก (drum brake)" ดรัมเบรกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอกและดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านใน ดรัมเบรกทั้ง 2 ชนิด นิยมใช้ในระบบเบรกของรถยนต์ ในการวิเคราะห์ดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก สามารถพิจารณาได้ตามรูปที่ 2.4 ซึ่งจะแสดงให้เห็นจานผ้าเบรกที่มีจุดหมุนอยู่ที่จุด A และมีแรงดัน F กระทำที่ปลายอีกด้านหนึ่ง เนื่องจากจานผ้าเบรกมีความยาวจึงไม่สามารถตั้งสมมติฐานให้ความดันมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอได้แต่สามารถทำกลไกให้ไม่มีแรงดันเกิดขึ้นที่จุดหมุนได้ ดังนั้นจึงสมมติฐานว่าความดัน ณ จุดหมุนนี้มีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.4 รูปทรงเรขาคณิตของงานผ้าเบรกภายนอก

ปกติจะไม่พิจารณาว่าวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นรับแรงเสียดทานอยู่ห่างจากจุด A เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนซึ่งกันและกันในการออกแบบ บางกรณีจะพิจารณาใช้สลักยึดส่วนที่เป็นบานพับให้สามารถเลื่อนไปมาได้ เพื่อเพิ่มความดันให้กับแผ่นรับแรงเสียดทานที่จุดหมุน พิจารณาความดัน p ที่กระทำบนแผ่นวัสดุรับแรงเสียดทานในตำแหน่งที่ทำมุม θ กับจุดหมุนและกำหนดให้ความดันสูงสุด p_0 จะเกิดขึ้นในตำแหน่งที่ทำมุม θ_a กับจุดหมุน จากนั้นเขียนผังวัตถุอิสระ ดังแสดงตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผังวัตถุอิสระแสดงแรงกระทำ ณ จุดใด ๆ บนแผ่นรับแรงเสียดทาน
(ภาพจาก การออกแบบเครื่องจักรกล2, ภาณุฤทธิ์, 2554. [2])

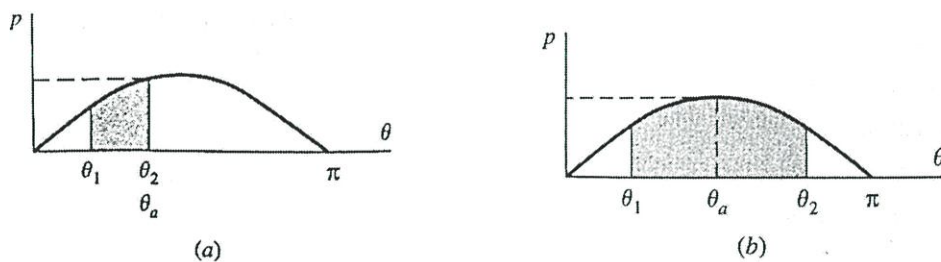
พิจารณาที่จุด B ในรูปที่ 2.5 ถ้าแผ่นรับแรงเสียดทานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อเกิดการหมุนไปเป็นมุม $\Delta\theta$ ระยะการทรุดตัวในแนวตั้งฉากกับแนวเส้นตรง AB คือ $h\Delta\theta$ จากสามเหลี่ยม AOB จะได้ $h \approx 2r \sin(\theta/2)$ ดังนั้น $h\Delta\theta \approx 2r\Delta\theta \sin(\theta/2)$ และระยะการทรุดตัวในแนวตั้งฉากกับขอบดรัมคือ $h\Delta\theta \cos(\theta/2) \approx r\Delta\theta \sin \theta$ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นรับแรงเสียดทาน รวมทั้งความดันจะแปรผันกับค่า $\sin \theta$ ซึ่งในรูปแบบของความดันที่จุด B เป็นจุดที่ความดันมีค่าสูงสุด ดังนั้น จะได้ว่า

$$\frac{p}{\sin \theta} = \frac{p_a}{\sin \theta_a}$$

$$\text{ดังนั้น } p = \frac{p_a}{\sin \theta_a} \sin \theta \quad (2.3)$$

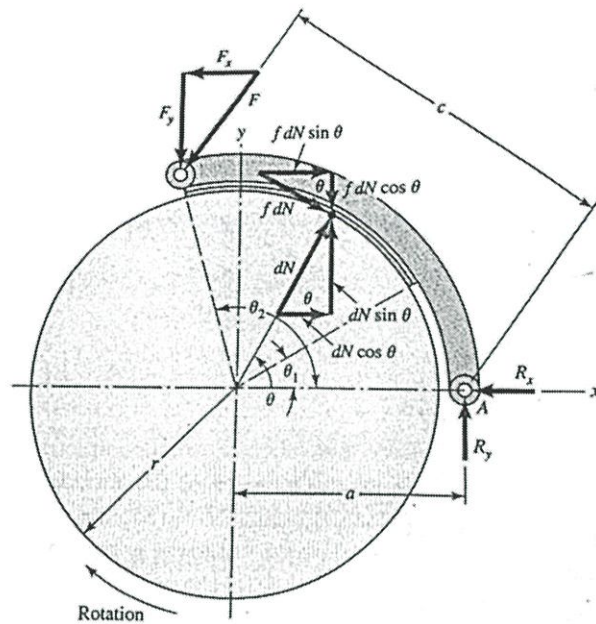
การกระจายของความดันนี้มีความสำคัญและมีคุณลักษณะเฉพาะที่มีประโยชน์ ดังนี้

- การกระจายของความดันเป็นฟังก์ชันของ Sine เมื่อเทียบกับมุม θ
- ถ้าแท่งเบรกสั้น ความดันสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ปลายแท่งเบรก θ_2 ดังแสดงตาม รูปที่ 2.6 (a)
- ถ้าแท่งเบรกยาว ความดันสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ $\theta_a = 90^\circ$ ดังแสดงตาม รูปที่ 2.6 (b)



รูปที่ 2.6 (a) แท่งเบรกสั้น (b) แท่งเบรกยาว

(ภาพจาก การออกแบบเครื่องจักรกล2, ภาณุฤทธิ์, 2554. [2])



รูปที่ 2.7 แรงกระทำบนก้ามเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก
(ภาพจาก Machine Design II, Gopinath and Mayuram. [3])

เมื่อ $\theta = 0$ สมการที่ (2.3) แสดงให้เห็นว่าความดันมีค่าเป็นศูนย์ วัสดุที่ใช้รับแรงเสียดทานจึงไม่กดลงบนดรัม การออกแบบที่ดีจึงควรจะวางตำแหน่งของแผ่นรับแรงเสียดทานไว้บริเวณที่ความดันมีค่าสูงสุด ดังแสดงตามรูปที่ 2.6 ในรูปจะเห็นได้ว่าเริ่มต้นมีแผ่นรับแรงเสียดทานที่มุม θ_1 และสิ้นสุดที่มุม θ_2

ถ้าแรงปฏิกิริยาที่สลักยึดก้ามเบรกคือ R_x และ R_y แรงดัน F มีองค์ประกอบในพิกัดโคออร์ดิเนตคือ F_x และ F_y และกระทำห่างจากสลักยึดก้ามเบรกเป็นระยะ c ดังนั้นจะมีแรงในแนวตั้งฉากซึ่งกระทำต่อแท่งเบรกที่มุม θ คือ

$$dN = pbr d\theta \quad (2.4)$$

เมื่อ b คือ ความกว้างหน้าสัมผัสของแผ่นรับแรงเสียดทาน แทนค่าความดันจากสมการที่ (2.3) ลงไปจะได้

$$dN = \frac{p_a b r \sin \theta d\theta}{\sin \theta_a} \quad (2.5)$$

แรงกระทำในแนวตั้งฉาก dN มีองค์ประกอบในพิกัดโคออร์ดิเนตคือ $dN \cos \theta$ และ $dN \sin \theta$ ดังรูป สำหรับแรงเสียดทาน $f dN$ จะมีองค์ประกอบในพิกัดโคออร์ดิเนตคือ $f dN \sin \theta$ และ $f dN \cos \theta$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงและโมเมนต์แบบสถิต จะสามารถหาค่าของแรงดัน F โมเมนต์บิด T และแรงปฏิกิริยาที่สลักยึดก้ามเบรกได้

หาแรงดัน F จากเงื่อนไขโมเมนต์ลัพธ์รอบจุด A เท่ากับศูนย์ เริ่มจากแกนโมเมนต์ของแรงเสียดทาน คือ $r - a \cos \theta$ ดังนั้น โมเมนต์ที่เกิดจากแรงเสียดทานรอบจุด A คือ

$$M_f = \int f dN (r - a \cos \theta) = \frac{f p_a b r}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta (r - a \cos \theta) d\theta \quad (2.6)$$

ซึ่งสามารถหาค่าได้ เมื่อแทนค่า dN จากสมการ (2.5) จะมีความสะดวกขึ้นถ้าทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.6) สำหรับปัญหาแต่ละอย่าง ดังนั้น จะคงไว้ในรูปนี้แกนโมเมนต์ของแรงตั้งฉากรอบจุด A คือ $a \sin \theta$ ดังนั้นโมเมนต์ที่เกิดจากแรงตั้งฉาก dN รอบจุด A คือ

$$M_N = \int dN (a \sin \theta) = \frac{p_a b r a}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta \quad (2.7)$$

แรงดันที่กระทำจะต้องทำให้โมเมนต์เหล่านี้อยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้น

$$F = \frac{M_N - M_f}{c} \quad (2.8)$$

พบว่าเงื่อนไขที่แรงดันเท่ากับศูนย์มีจริง ซึ่งอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่าถ้าทำให้ $M_N = M_f$ เบรกจะเกิดการล็อกด้วยตัวเอง (self-locking) โดยไม่ต้องการแรงดันมากกระทำ เงื่อนไขเหล่านี้จะทำให้สามารถหาขนาดสำหรับการกระตุ้นให้เบรกทำงานโดยใช้พลังงานในตัวเอง ดังนั้น ระยะ a ในรูปที่ 2.7 จะต้องมามีค่าที่ทำให้

$$M_N > M_f$$

ดังนั้น โมเมนต์บิดที่แท่งเบรกส่งไปยังดรัมคือ ผลรวมของแรงเสียดทาน $f dN$ คูณด้วยรัศมีของดรัม

$$T = \int f r dN = \frac{f p_a b r^2}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta \quad \left. \vphantom{\int_{\theta_1}^{\theta_2}} \right\} (2.9)$$

นั่นคือ $T = \frac{f p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a}$

แรงปฏิกิริยาที่สลักยึดก้ามเบรกสามารถหาได้จากผลรวมของแรงในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง ดังนั้น

$$R_x = \int dN \cos \theta - \int f dN \sin \theta - F_x \quad \left. \vphantom{\int_{\theta_1}^{\theta_2}} \right\} (2.10)$$

$$R_x = \frac{p_a b r}{\sin \theta_a} \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta \cos \theta d\theta - f \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta \right] - F_x$$

แรงปฏิกิริยาในแนวแกนตั้ง คือ

$$R_y = \int dN \sin \theta + \int f dN \cos \theta - F_y$$

$$R_y = \frac{p_a b r}{\sin \theta_a} \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta + f \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta \cos \theta d\theta \right] - F_y$$
(2.11)

แรงเสียดทานจะมีทิศทางไปในทางตรงข้ามถ้าการหมุนเปลี่ยนทิศทาง ดังนั้นสำหรับการหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แรงดันคือ

$$F = \frac{M_N + M_f}{c}$$
(2.12)

เนื่องจากโมเมนต์ทั้งคู่เสริมซึ่งกันละกัน เบรกจะสูญเสียความสามารถในการกระตุ้นให้ทำงานโดยใช้พลังงานในตัวเอง (self-energizing) นอกจากนี้การหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกายังทำให้เครื่องหมายของแรงเสียดทานในสมการสำหรับหาแรงปฏิกิริยาที่จุดหมุนเปลี่ยนไปเป็นตรงกันข้ามแล้วสมการ (2.10) และ (2.11) จะกลายเป็น

$$R_x = \frac{p_a b r}{\sin \theta_a} \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta \cos \theta d\theta + f \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta \right] - F_x$$
(2.13)

$$R_y = \frac{p_a b r}{\sin \theta_a} \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta - f \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta \cos \theta d\theta \right] - F_y$$
(2.14)

สามารถทำให้สมการ (2.10), (2.11), (2.13) และ (2.14) อยู่ในรูปอย่างง่ายเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณ โดยกำหนดให้

$$\left. \begin{aligned} A &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta \cos \theta \, d\theta = \left(\frac{1}{2} \sin^2 \theta\right)_{\theta_1}^{\theta_2} \\ B &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta \, d\theta = \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} \sin^2 \theta\right)_{\theta_1}^{\theta_2} \end{aligned} \right\} (2.15)$$

ดังนั้น สำหรับดรัมที่หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงตามรูปที่ 2.7 แรงปฏิกิริยาที่สลักยึดก้ามเบรกคือ

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{p_a b r}{\sin \theta_a} (A - fB) - F_x \\ R_y &= \frac{p_a b r}{\sin \theta_a} (B + fA) - F_y \end{aligned} \right\} (2.16)$$

สำหรับดรัมที่หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แรงปฏิกิริยาที่สลักยึดก้ามเบรก คือ

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{p_a b r}{\sin \theta_a} (A + fB) - F_x \\ R_y &= \frac{p_a b r}{\sin \theta_a} (B - fA) - F_y \end{aligned} \right\} (2.17)$$

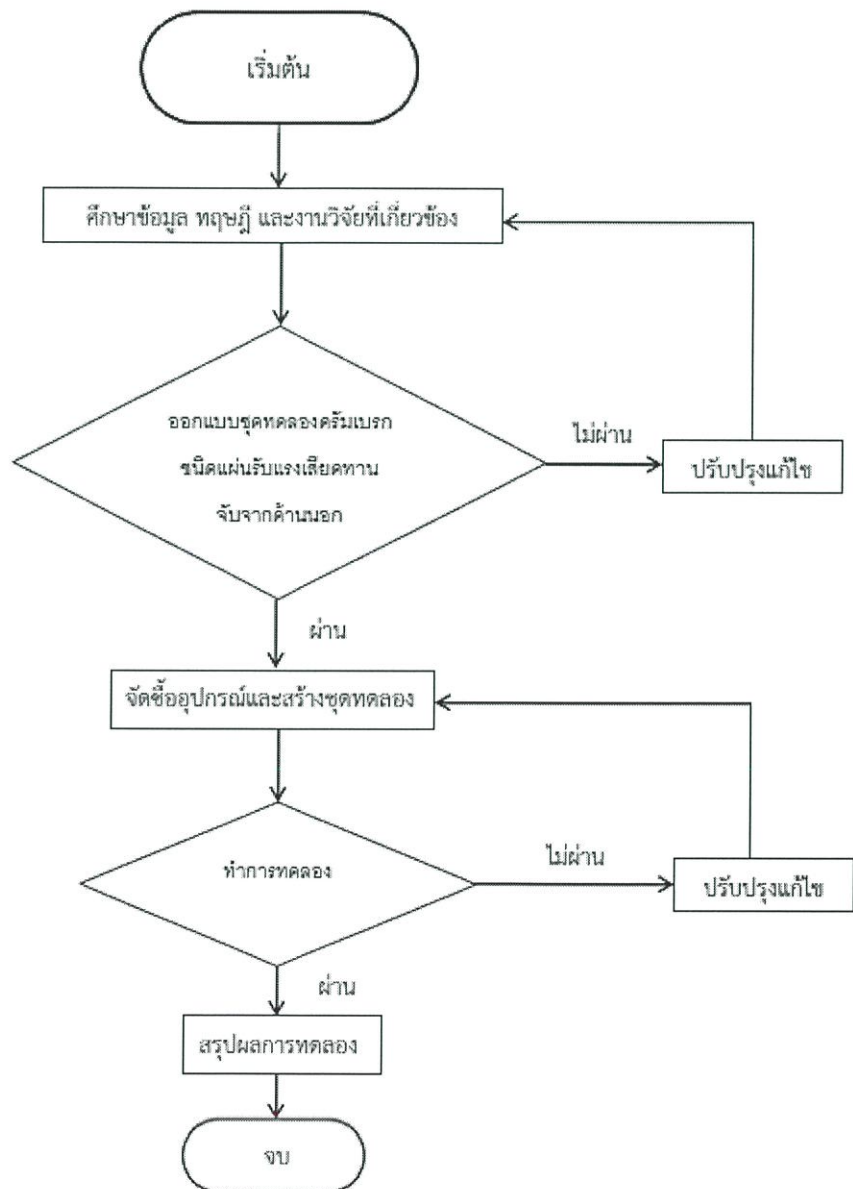
ในการใช้สมการเหล่านี้ ระบบแกนอ้างอิงจะมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดศูนย์กลางของดรัม แกน $+x$ จะลากผ่านสลักยึดก้ามเบรกที่เป็นจุดหมุน และแกน $+y$ จะมีทิศทางการเข้าหาแท่งเบรกเสมอ นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

- ความดันที่จุดใด ๆ บนก้ามเบรกจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างจากจุดหมุนของก้ามเบรกและมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดหมุนของก้ามเบรก
- ในกรณีของเบรก แท่งเบรกจะไม่เกิดการหมุนจึงไม่เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ผลที่เกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะไม่นำมาคิด ส่วนในกรณีของการออกแบบคลัตช์จะนำแรงนี้มาคิดในสมการสมดุลของแรงแบบสถิต
- ให้สันนิษฐานว่าก้ามเบรกมีความแข็งแรง แต่เนื่องจากไม่เป็นความจริงจึงเกิดการหลุดตัวไปบ้างทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโหลด ความดัน และความแรงแรงของก้ามเบรก ดังนั้นผลลัพธ์ที่เกิดจากการกระจายของความดันอาจจะแตกต่างไปจากสมมติฐานที่ตั้งไว้
- การวิเคราะห์ทั้งหมดจะตั้งอยู่บนพื้นฐานของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีค่าไม่ขึ้นอยู่กับความดัน ในความเป็นจริงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะผันแปรไปตามเงื่อนไขต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิ การสึกหรอและสภาพแวดล้อม

บทที่ 3

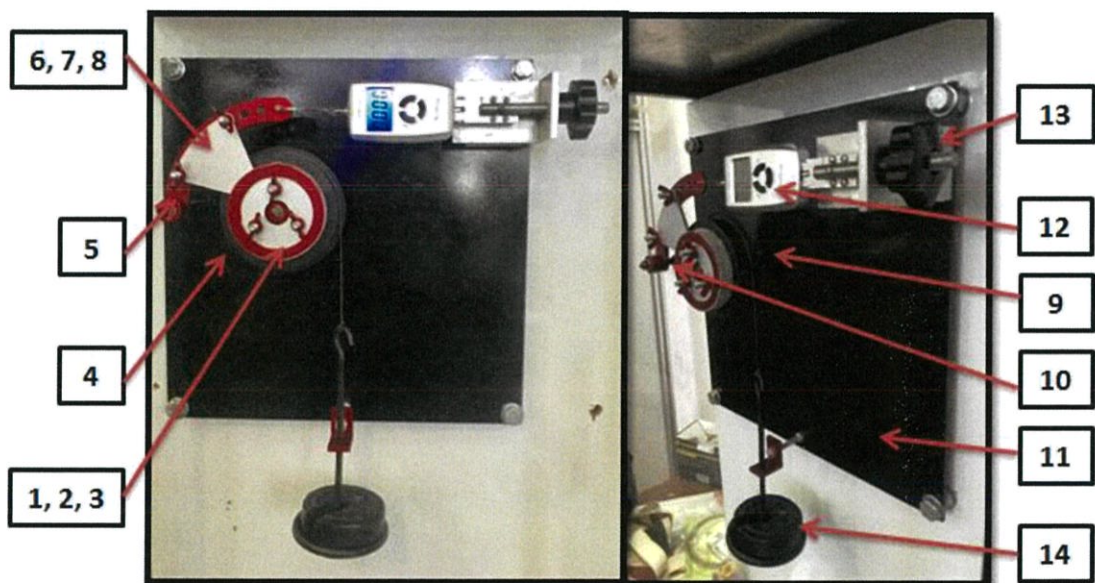
วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



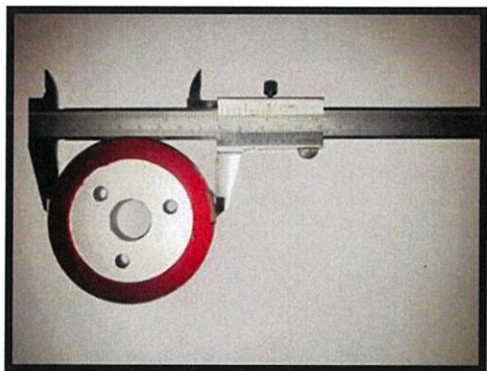
3.2 การออกแบบ

ชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก สามารถวิเคราะห์เบรกแบบสถิต (Static Analysis of Brakes) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด โมเมนต์บิดที่ส่ง แรงดัน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และรูปทรงทางเรขาคณิตของเบรก โดยชุดทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3

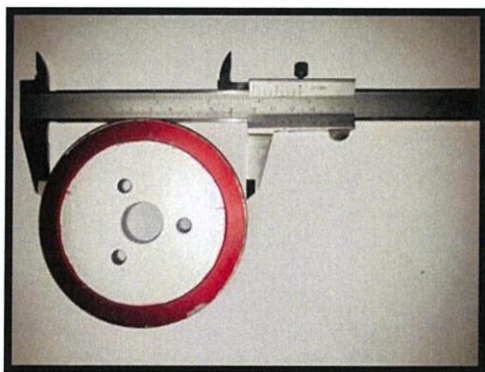


รูปที่ 3 แสดงชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก

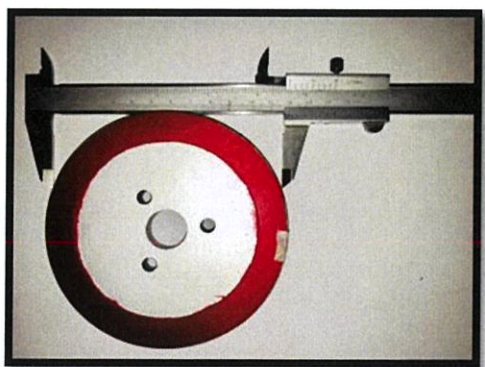
รายละเอียดของอุปกรณ์มีดังต่อไปนี้



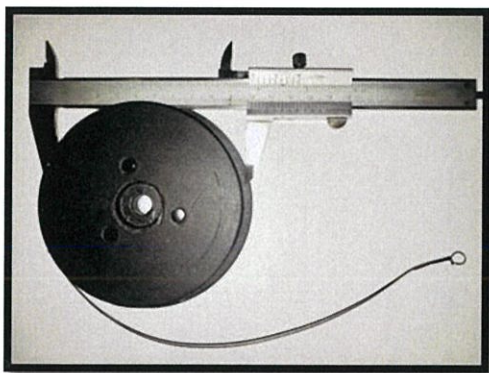
รูปที่ 3.1 ดรัมเบรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร หนา 1.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 ดรัมเบรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 1.5 เซนติเมตร



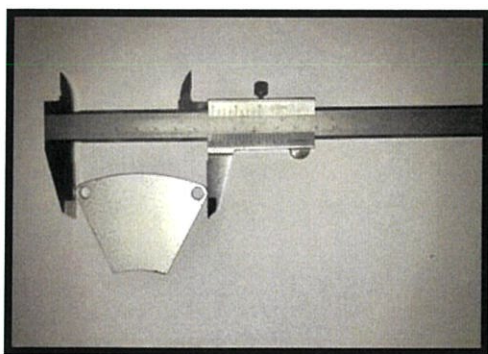
รูปที่ 3.3 ดรัมเบรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร หนา 1.5 เซนติเมตร



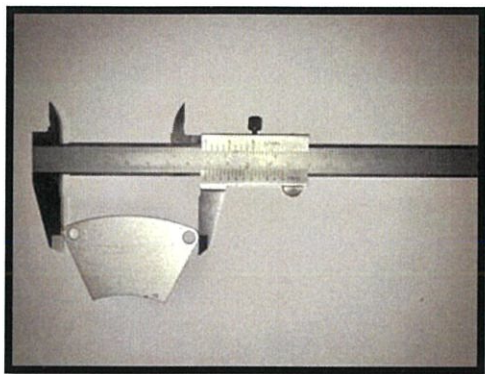
รูปที่ 3.4 ล้อขับเคลื่อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 2 เซนติเมตร



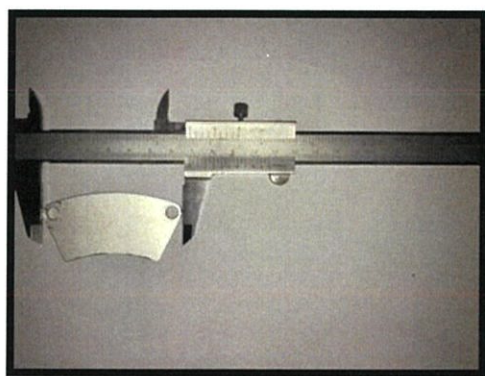
รูปที่ 3.5 ก้านเบรกสามารถปรับองศาของผ้าเบรกได้ 3 ค่า คือ $20^{\circ} - 60^{\circ}$, $30^{\circ} - 70^{\circ}$ และ $40^{\circ} - 80^{\circ}$



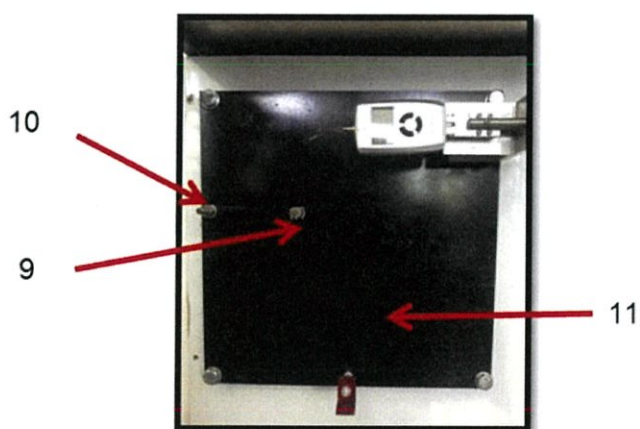
รูปที่ 3.6 ผ้าเบรกสำหรับดรัมเบรกเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร มีความหนา 0.38 เซนติเมตร



รูปที่ 3.7 ผ้าเบรกสำหรับดรัมเบรกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร มีความหนา 0.35 เซนติเมตร



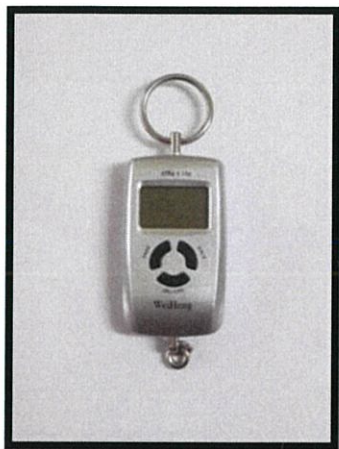
รูปที่ 3.8 ผ้าเบรกสำหรับดรัมเบรกเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร มีความหนา 0.29 เซนติเมตร



รูปที่ 3.9 เพลลาของล้อขับ

รูปที่ 3.10 เพลลาของก้านเบรก

รูปที่ 3.11 เหล็กแผ่นขนาด 35×35 เซนติเมตร หนา 0.4 เซนติเมตร



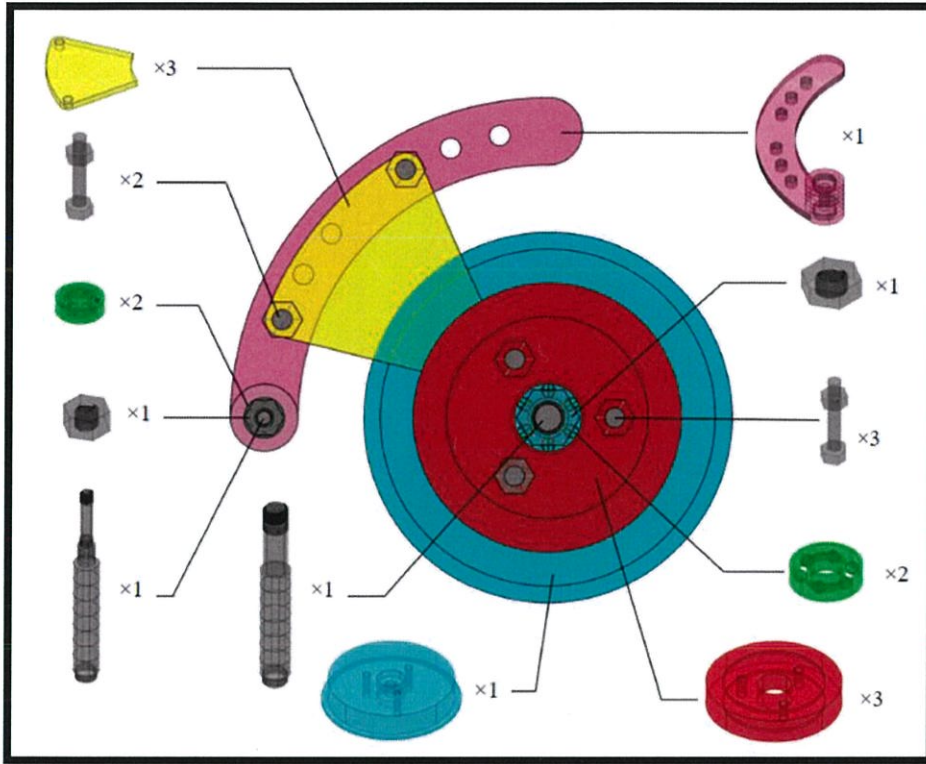
รูปที่ 3.12 เครื่องวัดแรงดึง สำหรับวัดแรงคาน



รูปที่ 3.13 ชุดปรับแรงคาน



รูปที่ 3.14 ชุดลูกตุ้มถ่วงน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัม



รูปที่ 3.15 แสดงชุดทดลองตรีเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอกโดยแยกส่วนประกอบ

3.3 การคำนวณ

3.3.1 แรงบิดจากล้อขับ

แรงบิดจากล้อขับ คือค่าอินพุต ที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของลูกตุ้มถ่วงน้ำหนัก (mg) ที่สามารถปรับค่าได้คูณกับรัศมีของล้อขับ (R)

จะได้ว่า

$$T = mg \times R \quad (3.1)$$

3.3.2 โมเมนต์บิดที่แท่งเบรกส่งไปยังดรัมเบรก

โมเมนต์บิดที่แท่งเบรกส่งไปยังดรัมเบรก คือ ผลรวมของแรงเสียดทานคูณกับรัศมีของดรัมเบรก

จะได้ว่า

$$T = \frac{f p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a} \quad (3.2)$$

3.3.3 แรงดัน

แรงดัน คือ แรงที่ใส่ให้กับก้านเบรก เพื่อก่อให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผ้าเบรกกับดรัมเบรก ในการวิเคราะห์เบรกแบบสถิต

จะได้ว่า

$$F = \frac{M_N - M_f}{c} \quad (3.3)$$

(1) โมเมนต์ของแรงที่ตั้งฉากกับจุดหมุนของก้านเบรก

$$M_f = \int f dN (r - a \cos \theta) = \frac{f p_a b r}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta (r - a \cos \theta) d\theta \quad (3.4)$$

(2) โมเมนต์ของแรงเสียดทาน

$$M_N = \int dN (a \sin \theta) = \frac{p_a b r a}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta \quad (3.5)$$

นำสมการ (3.4) และ (3.5) แทนในสมการ (3.3) แก้สมการเพื่อหาค่า p_a (ความดันที่สูงที่สุด เนื่องจากการเบรก) นำค่า p_a ที่คำนวณได้แทนในสมการ (3.2) สามารถหาค่าโมเมนต์บิดที่แท่งเบรกส่งไปยังดรัมเบรกได้ โดยตามทฤษฎีการวิเคราะห์เบรกแบบสถิตค่าของโมเมนต์บิดที่แท่งเบรกส่งไปยังดรัมเบรกต้องเท่ากับแรงบิดจากล้อขับ จึงจะทำให้ล้อขับเริ่มหยุดหมุน

3.4 การเลือกเครื่องมือวัดขนาดแรงและการเลือกวัสดุ

3.4.1 เครื่องวัดแรงดึง (Tension gauge)

เครื่องวัดแรงดึงแบบดิจิตอล ในชุดทดลองใช้สำหรับวัดแรงดึงที่ก้านเบรกโดยมีหลักการทำงาน คือ เมื่อมีแรงมากระทำความต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนตามทำให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าทางออกเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์นี้คำนวณหาค่าของแรงดึงได้



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดแรงดึงที่ใช้ในชุดการทดลอง

คุณสมบัติหลัก

ความแม่นยำแบบคู่, การแปลงได้หลายหน่วย, การตอบสนองที่รวดเร็ว

หน้าจอแสดงผล: 1.3 x 0.8 "แอลซีดีพร้อมแสงไฟสีฟ้า

เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 หน่วย ได้แก่ kg, oz, lb, jin

วัสดุที่ใช้ โลหะ, พลาสติก ABS

เครื่องวัดอุณหภูมิในตัว การวัดอุณหภูมิของอากาศ กดปุ่ม UNIT 2 วินาทีเพื่อวัดอุณหภูมิ

รายละเอียด

รับน้ำหนักสูงสุด : 45 กิโลกรัม

ความแม่นยำ : 0-10 กิโลกรัม/ 5กรัม , 10-45 กิโลกรัม/ 10กรัม

แปลงหน่วยได้ 4 หน่วย : kg (kilograms) , lb (pounds) , jin (semi-kilogram) , oz (ounces)

กำลังไฟ : แบตเตอรี่ 2 ก้อน AAA

แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานได้ : 2.4~3.5 โวลต์

Working current : backlight on $I \leq 10\text{mA}$; backlight off $I \leq 5\text{mA}$

น้ำหนัก: 0.16 กิโลกรัม ขนาด: 8.0 x 2.9 x 18.5 เซนติเมตร

3.4.2 เหล็ก SS400

คุณสมบัติ : เป็นเหล็กแผ่นรีดร้อนใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป มีคุณสมบัติในการเชื่อม
สามารถเชื่อมต่อ

การใช้งาน : ใช้ในงานโครงสร้างต่างๆ ใช้ในการสร้างตึก ก่อสะพาน สร้างเรือ หรือใช้
ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น

JIS		DIN			AISI
SS400(SS41)		-			-
ส่วนผสมทางเคมี (%)					
C	Si	Mn	P	S	
-	-	-	0.050 max	0.050 max	
ความทนต่อการ ยัดตัว (Yieldstrength, kgf/mm ²)	ความทนต่อแรง ดึงสูงสุด (Tensile Strength, kgf/mm ²)	การยัดตัวก่อน ขาด (Elongation, %)	การลดขนาด ก่อนขาด (Reduction of Area, %)	ความทนแรงกระแทก สูงสุด (Impact Energy, kgf/mm ²)	
22 min.	41-52	17 min.	-	-	

(ที่มา : บริษัท กรุงเทพเหล็กกล้า จำกัด, คุณสมบัติและการใช้งานSS400. [4])

บทที่ 4

การออกแบบการทดลองและชุดการทดลอง

จากการออกแบบชุดทดลองในบทที่ 3 ในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับ โมเมนต์บิดที่ส่ง แรงดัน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและรูปทรงทางเรขาคณิตของดรัมเบรก แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีการวิเคราะห์เบรกแบบสถิต

4.1 วัตถุประสงค์

- 4.1.1 เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจพื้นฐาน และหลักการทำงานของดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก
- 4.1.2 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับ โมเมนต์บิดที่ส่ง แรงดัน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและรูปทรงทางเรขาคณิต โดยใช้เงื่อนไขสภาวะสมดุลแบบสถิต

4.2 ชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก



รูปที่ 4.1 แสดงชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก

4.3 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

การทดลองที่ 1 ทำการหา Torque of friction (T_f) ที่รัศมีดรัมเบรก 4, 5 หรือ 6 cm และมุม $\theta_1 - \theta_2$ เท่ากับ $20^\circ - 60^\circ$, $30^\circ - 70^\circ$ หรือ $40^\circ - 80^\circ$ กำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.32

วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งดรัมเบรกตามขนาดรัศมีที่กำหนดไว้ และขันน็อตกับสกรูให้แน่น
2. เลือกรองเท้าเบรกที่มีรัศมีเท่ากับดรัมเบรก โดยติดตั้งตามตำแหน่ง $\theta_1 - \theta_2$ ที่กำหนดไว้ เสร็จแล้วขันน็อตกับสกรูให้แน่น
3. เปิดเครื่อง Tension gauge หมุนชุดปรับแรงดันให้รองเท้าเบรกสัมผัสกับดรัมเบรกจนล้อไม่สามารถหมุนได้
4. ใส่ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักล้อขับตามค่าที่กำหนดช่วงไว้
5. หมุนชุดปรับแรงดัน เพื่อผ่อนแรงจนล้อขับเริ่มหมุน ทำการบันทึกค่าแรงดันจาก Tension gauge
6. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนค่าน้ำหนักที่ถ่วงล้อขับตามที่ได้กำหนดไว้

ข้อควรระวัง ควรค่อยๆผ่อนแรงดันโดยหมุนชุดปรับแรงดันอย่างช้าๆ เพราะจะได้ไม่ทำให้ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักเคลื่อนที่ก่อนที่จะอ่านค่าได้จาก Tension gauge

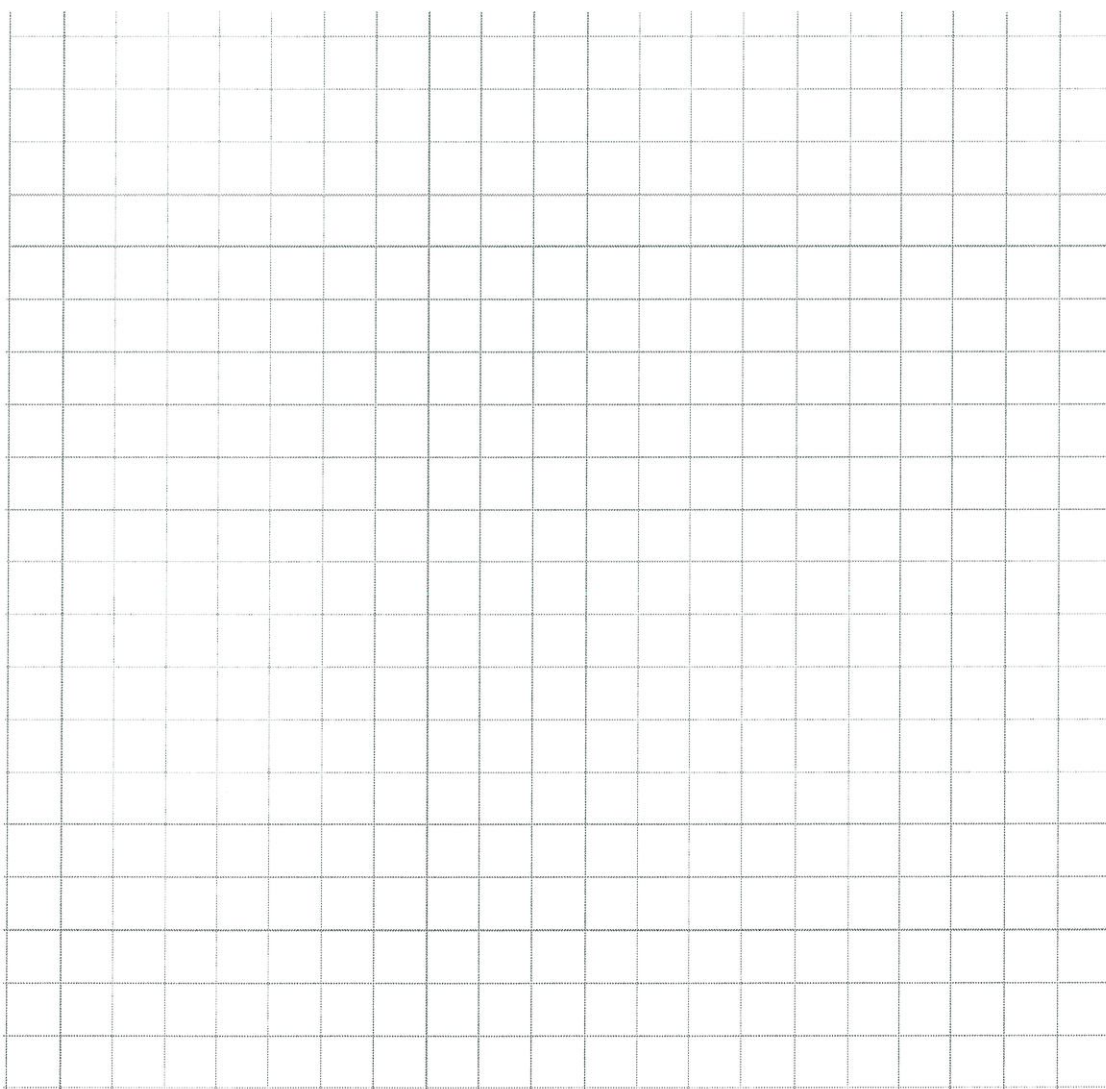
ตารางบันทึกผลการทดลอง

r (drum) (cm)	$\theta_1 - \theta_2$	m (kg)	F1 (N)	F2 (N)	F3 (N)	F avg (N)	Pmax (kPa)	Tm (N.m)	Tf (N.m)	Percentage difference Between Tm and Tf
.....									

ทำการคำนวณและแสดงการคำนวณค่า Torque ที่เกิดจากการใส่ น้ำหนัก (T_m) ค่าแรงดันสูงสุด (p_a) ค่า Torque of friction (T_f) และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 1 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) กับมวล m (kg)



การทดลองที่ 2 ทำการหา Torque of friction (T_f) รัศมีดรัมเบรก 4, 5 หรือ 6 cm และมวล (m) เท่ากับ 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 หรือ 2 kg โดยเปลี่ยนค่า $\theta_1 - \theta_2$ กำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.32

วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งดรัมเบรกตามรัศมีที่กำหนดไว้ และขันน็อตกับสกรูให้แน่น
2. เลือกร่องเท้าเบรกที่มีขนาดเท่ากับดรัมเบรก โดยติดตั้งตามตำแหน่ง $\theta_1 - \theta_2$ ที่กำหนดไว้ และขันน็อตกับสกรูให้แน่น
3. เปิดเครื่อง Tension gauge หมุนชุดปรับแรงดันให้ผ้าเบรกแตะกับดรัมเบรกจนล้อไม่สามารถหมุนได้
4. ใส่ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักล้อขับตามค่าที่กำหนดช่วงไว้
5. หมุนชุดปรับแรงดัน เพื่อผ่อนแรงจนล้อขับเริ่มหมุน ทำการบันทึกค่าแรงดันจาก Tension gauge
6. ทำการทดลองในช่วง $\theta_1 - \theta_2$ ที่กำหนดไว้ คือ ($20^\circ - 60^\circ$) ($30^\circ - 70^\circ$) และ ($40^\circ - 80^\circ$) ตามลำดับ

ข้อควรระวัง ควรค่อยๆผ่อนแรงโดยหมุนชุดปรับแรงดันอย่างช้าๆ เพราะจะได้ไม่ทำให้ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักเคลื่อนที่ก่อนที่จะอ่านค่าได้จาก Tension gauge

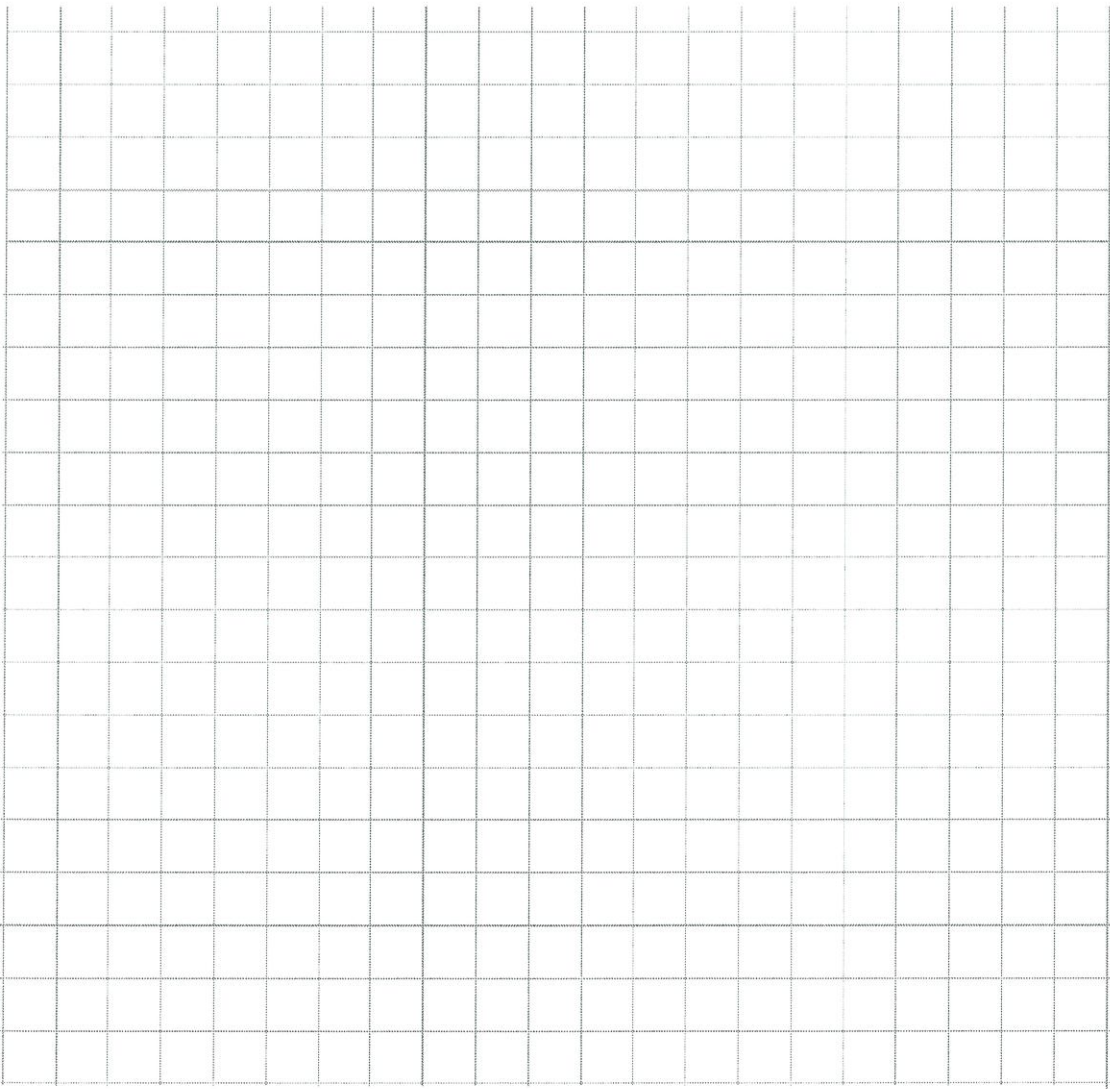
ตารางบันทึกผลการทดลอง

r (drum) (cm)	m (kg)	$\theta_1 - \theta_2$	F1 (N)	F2 (N)	F3 (N)	F avg (N)	Pmax (kPa)	Tm (N.m)	Tf (N.m)	Percentage difference between Tm and Tf
.....	$20^\circ - 60^\circ$								
		$30^\circ - 70^\circ$								
		$40^\circ - 80^\circ$								

ทำการคำนวณและแสดงการคำนวณค่า Torque ที่เกิดจากการใส่ น้ำหนัก (T_m) ค่าแรงดันสูงสุด (p_a) ค่า Torque of friction (T_f) และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 2 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน $F(N)$ กับ $\theta_1 - \theta_2$



การทดลองที่ 3 ทำการหา Torque of friction (T_f) ที่มุม $\theta_1 - \theta_2 = 20^\circ - 60^\circ, 30^\circ - 70^\circ$ หรือ $40^\circ - 80^\circ$ และมวล (m) = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 หรือ 2 kg โดยจะทำการเปลี่ยนรัศมีของดรัมเบรก กำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.32

วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งล้อข้อรัศมีที่กำหนดไว้แล้วชั้นน็อตและสกรูให้แน่น
2. เลือกร่องเท้าเบรกที่มีรัศมีเท่ากับล้อข้อแล้วใส่ตามตำแหน่ง $\theta_1 - \theta_2$ ที่กำหนดไว้ ชั้นน็อตและสกรูให้แน่น
3. เปิดเครื่อง Tension gauge หมุนชุดปรับแรงดันให้ผ้าเบรกสัมผัสกับดรัมเบรกจนไม่สามารถหมุนได้
4. ใส่ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักล้อข้อตามค่าที่กำหนดช่วงไว้
5. หมุนชุดปรับแรงดันเพื่อผ่อนแรงจนล้อข้อเริ่มหมุนทำการบันทึกค่าแรงดันจาก Tension gauge
6. ทำการทดลองในช่วงรัศมีของดรัมเบรกที่กำหนดไว้ ได้แก่ 4 cm 5 cm และ 6 cm ตามลำดับ

ข้อควรระวัง ควรค่อยๆผ่อนแรงโดยหมุนชุดปรับแรงดันอย่างช้าๆ เพราะจะได้ไม่ทำให้ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักเคลื่อนที่ก่อนที่จะอ่านค่าได้จาก Tension gauge

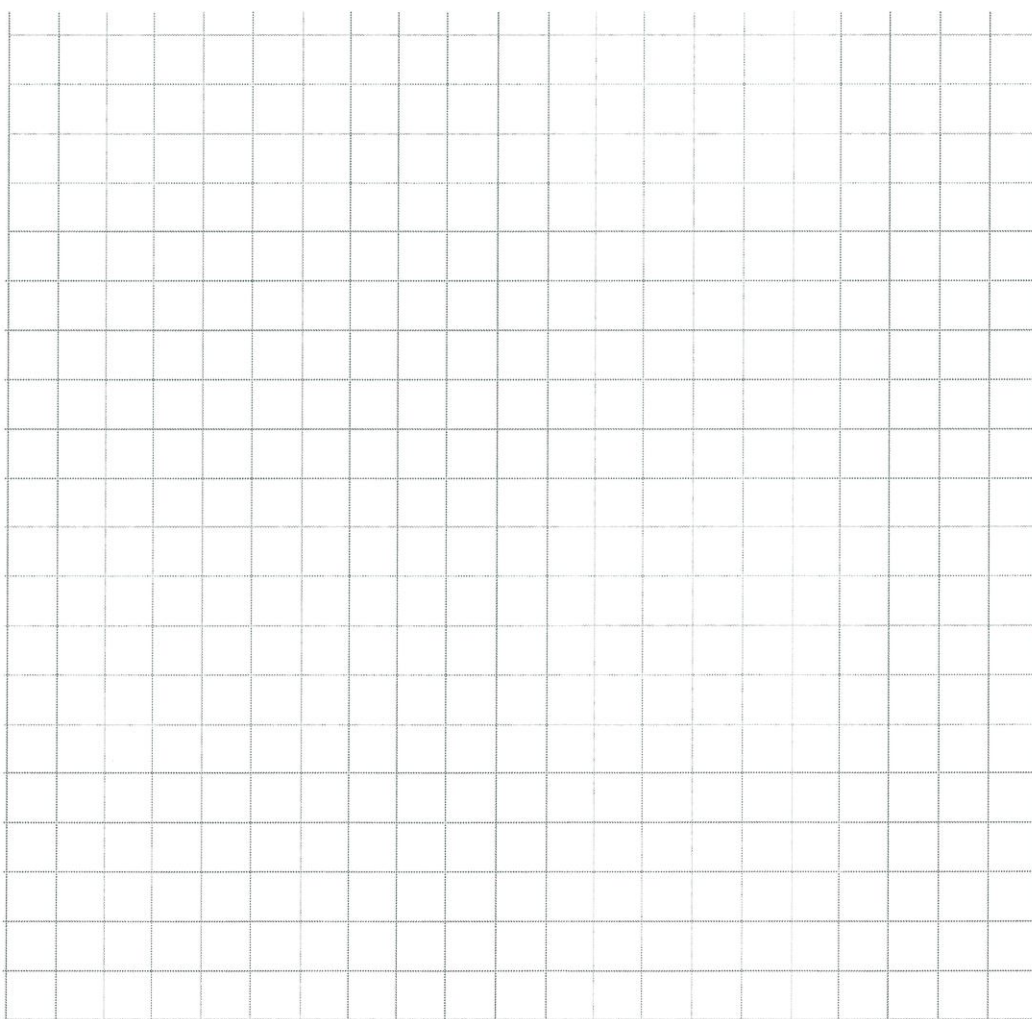
ตารางบันทึกผลการทดลอง

$\theta_1 - \theta_2$	m (kg)	r (drum) (cm)	F1 (N)	F2 (N)	F3 (N)	F avg (N)	Pmax (kPa)	Tm (N.m)	Tf (N.m)	Percentage difference between Tm and Tf
.....	4								
		5								
		6								

ทำการคำนวณและแสดงการคำนวณค่า Torque ที่เกิดจากการใส่น้ำหนัก (T_m) ค่าแรงดันสูงสุด (p_a) ค่า Torque of friction (T_f) และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 3 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) กับรัศมีล้อ r (m)



บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทดลองชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก ในบทที่ 4 ผู้วิจัยได้บันทึกและสรุปอภิปรายผลการทดลอง ซึ่งการวิเคราะห์ผลการทดลองจะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทที่ใช้ในการดิ่งก้านเบรกกับมวลแขวน มุมเริ่มต้นและมุมสิ้นสุดการเบรก และรัศมีของล้อ โดยมีผลการทดลอง วิธีการคำนวณ และสรุปอภิปรายผลดังนี้

5.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ตัวอย่างที่ 1 รัศมีล้อ = 0.04 เมตร และความหนาของร่องเท้าเบรก (b) = 0.0038 เมตร

มุมเริ่มต้นการเบรก (θ_1) = 20° และมุมสิ้นสุดการเบรก (θ_2) = 60° ที่น้ำหนัก 250 กรัม

$$\text{จาก } M_n = \frac{p_a b r a}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta \, d\theta$$

$$M_n = \frac{[p_a] \times (0.0038) \times (0.04) \times (0.085)}{\sin(60)} \times \int_{20}^{60} \sin^2 \theta \, d\theta$$

$$M_n = 0.043 \times 10^{-4} \times p_a$$

$$\text{จาก } M_f = \frac{\mu p_a b r}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta (r - a \cos \theta) \, d\theta$$

$$M_f = \frac{[\mu p_a] \times 0.0038 \times 0.04}{\sin(60)} \times \int_{20}^{60} \sin \theta (0.04 - 0.085 \cos \theta) \, d\theta$$

$$M_f = -0.016 \times 10^{-4} \times \mu p_a$$

$$\text{จาก } F_c = M_n - M_f$$

$$F_c = [0.043 + 0.016\mu] \times 10^{-4} \times P_a$$

ที่ F เฉลี่ย = 0.74 kg หรือ 7.26 N

$$7.26 \times 0.085 = [0.043 + 0.016\mu] \times 10^{-4} \times p_a$$

จะได้
$$p_a = \frac{6171}{[0.043+0.016\mu]}$$

โดยตามทฤษฎี ค่า Torque จะต้องเท่ากับ mgR

แทนค่า p_a ลงในสมการ

$$T = \frac{\mu p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a} = mgR$$

แทนค่า
$$0.25 \times 9.81 \times 0.05 = \frac{\mu \left[\frac{6171}{0.043+0.016\mu} \right] \times 0.0038 \times 0.04^2 \times (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60}$$

$$39724.36 = \mu \left[\frac{6171}{0.043+0.016\mu} \right]$$

$$1708.15 + 635.59\mu = 6171\mu$$

$$1708.15 = 5535.41\mu$$

$$\mu = 0.308$$

ตัวอย่างที่ 2 รัศมีล้อ = 0.05 เมตร และความหนาของร่องเท้าเบรก (b) = 0.0035 เมตร

มุมเริ่มต้นการเบรก (θ_1) = 20° และมุมสิ้นสุดการเบรก (θ_2) = 60° ที่น้ำหนัก 250 กรัม

จาก
$$M_n = \frac{p_a b r a}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta$$

$$M_n = \frac{[p_a] \times (0.0035) \times (0.05) \times (0.085)}{\sin(60)} \times \int_{20}^{60} \sin^2 \theta d\theta$$

$$M_n = 0.05 \times 10^{-4} \times P_a$$

จาก
$$M_f = \frac{\mu p_a b r}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta (r - a \cos \theta) d\theta$$

$$M_f = \frac{[\mu p_a] \times 0.0035 \times 0.05}{\sin(60)} \times \int_{20}^{60} \sin \theta (0.05 - 0.085 \cos \theta) d\theta$$

$$M_f = -0.0099 \times 10^{-4} \times \mu p_a$$

จาก
$$F_c = M_n - M_f$$

$$F_c = [0.05 + 0.0099\mu] \times 10^{-4} \times p_a$$

ที่ F เฉลี่ย = 0.54 kg หรือ 5.3 N

$$5.3 \times 0.085 = [0.05 + 0.0099\mu] \times 10^{-4} \times p_a$$

จะได้
$$p_a = \frac{4505}{[0.05+0.0099\mu]}$$

โดยตามทฤษฎี ค่า Torque จะต้องเท่ากับ mgR

แทนค่า p_a ลงในสมการ

$$T = \frac{\mu p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a} = mgR$$

แทนค่า
$$0.25 \times 9.81 \times 0.05 = \frac{\mu \left[\frac{4505}{0.05+0.0099\mu} \right] \times 0.0035 \times 0.05^2 \times (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60}$$

$$27602.75 = \mu \left[\frac{4505}{0.05+0.0099\mu} \right]$$

$$1380.14 + 273.27\mu = 4505\mu$$

$$1380.14 = 4231.73\mu$$

$$\mu = 0.326$$

ตัวอย่างที่ 3 รัศมีล้อ = 0.06 เมตร และความหนาของร่องเท้าเบรก (b) = 0.0029 เมตร

มุมเริ่มต้นการเบรก (θ_1) = 20° และมุมสิ้นสุดการเบรก (θ_2) = 60° ที่น้ำหนัก 250 กรัม

จาก
$$M_n = \frac{p_a b r a}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta$$

$$M_n = \frac{[p_a] \times (0.0029) \times (0.06) \times (0.085)}{\sin(60)} \times \int_{20}^{60} \sin^2 \theta d\theta$$

$$M_n = 0.0496 \times 10^{-4} \times p_a$$

จาก
$$M_f = \frac{\mu p_a b r}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta (r - a \cos \theta) d\theta$$

$$M_f = \frac{[\mu p_a] \times 0.0029 \times 0.06}{\sin(60)} \times \int_{20}^{60} \sin \theta (0.06 - 0.085 \cos \theta) d\theta$$

$$M_f = -0.00104 \times 10^{-4} \times \mu p_a$$

จาก
$$F_c = M_n - M_f$$

$$F_c = [0.05 + 0.001\mu] \times 10^{-4} \times p_a$$

ที่ F เฉลี่ย = 0.44 kg หรือ 4.316 N

$$4.316 \times 0.085 = [0.05 + 0.001\mu] \times 10^{-4} \times p_a$$

จะได้
$$p_a = \frac{3668.6}{[0.05+0.001\mu]}$$

โดยตามทฤษฎี ค่า Torque จะต้องเท่ากับ mgR

แทนค่า p_a ลงในสมการ

$$T = \frac{\mu p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a} = mgR$$

แทนค่า
$$0.25 \times 9.81 \times 0.05 = \frac{\mu \left[\frac{3668.6}{0.05+0.001\mu} \right] \times 0.0029 \times 0.06^2 \times (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60}$$

$$23134.49 = \mu \left[\frac{3668.6}{0.05+0.001\mu} \right]$$

$$1156.72 + 23.13\mu = 3668.6\mu$$

$$1156.72 = 3645.47\mu$$

$$\mu = 0.317$$

คำนวณค่า M_n และ M_f ในแต่ละรัศมีล้อในทุกช่วงค่ามุมที่กำหนดไว้ แล้วนำมาเขียนเป็นตาราง 5.1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงสมการ $F_c = M_n - M_f$ ที่รัศมี drum และ θ_1, θ_2 ต่าง ๆ

r (m)	$F_c = M_n - M_f$		
	$\theta_1 = 20^\circ, \theta_2 = 60^\circ$	$\theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = 70^\circ$	$\theta_1 = 40^\circ, \theta_2 = 80^\circ$
0.04	$F_c = [0.043 + 0.016\mu]p_a \times 10^{-4}$	$F_c = [0.057 + 0.016\mu]p_a \times 10^{-4}$	$F_c = [0.066 - 0.000058\mu]p_a \times 10^{-4}$
0.05	$F_c = [0.05 + 0.01\mu]p_a \times 10^{-4}$	$F_c = [0.064 + 0.0013\mu]p_a \times 10^{-4}$	$F_c = [0.077 - 0.011\mu]p_a \times 10^{-4}$
0.06	$F_c = [0.05 + 0.001\mu]p_a \times 10^{-4}$	$F_c = [0.064 - 0.008\mu]p_a \times 10^{-4}$	$F_c = [0.077 - 0.021\mu]p_a \times 10^{-4}$

จากการคำนวณทั้งหมด ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ≈ 0.32

5.2 ผลการทดลองที่ 1

ตัวอย่าง กำหนดให้ $r = 0.04 \text{ m}$, $\theta_1 - \theta_2 = 20^\circ - 60^\circ$, $\mu = 0.32$

การคำนวณแบบที่ 1

r (m)	$\theta_1 - \theta_2$	m (kg)	F ₁ (N)	F ₂ (N)	F ₃ (N)	F _{avg} (N)	Pmax (kPa)	T _m (N.m)	T _f (N.m)	Percentage difference
0.04	20° - 60°	0.25	6.67	6.87	8.34	7.29	128.772	0.123	0.127	3.25
		0.50	14.22	15.70	11.77	13.90	245.532	0.245	0.243	0.82
		0.75	20.80	19.42	21.27	20.70	365.648	0.368	0.361	1.9
		1.00	25.52	31.39	29.43	27.78	508.378	0.491	0.502	2.24
		1.25	35.32	38.26	34.34	35.97	635.38	0.613	0.627	2.28

หา T_m จาก $T = mgR$

$$\text{ที่ } m = 0.25 \text{ kg} \quad T_m = 0.25 \times 9.81 \times 0.05 = 0.123 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 0.50 \text{ kg} \quad T_m = 0.50 \times 9.81 \times 0.05 = 0.245 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 0.75 \text{ kg} \quad T_m = 0.75 \times 9.81 \times 0.05 = 0.368 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 1.00 \text{ kg} \quad T_m = 1.00 \times 9.81 \times 0.05 = 0.491 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 1.25 \text{ kg} \quad T_m = 1.25 \times 9.81 \times 0.05 = 0.613 \text{ N} \cdot \text{m}$$

จากตาราง $F_c = M_n - M_f$ ที่ $r = 0.04 \text{ m}$, $\theta_1 - \theta_2 = 20^\circ - 60^\circ$

$$F_c = [0.043 + 0.016\mu]p_a \times 10^{-4}$$

หา p_a จาก $p_a = \frac{F_c \times 10^4}{[0.043 + 0.016\mu]}$

$$\text{ที่ } m = 0.25 \text{ kg} \quad p_a = \frac{7.29 \times 0.085 \times 10^4}{[0.043 + 0.016(0.32)]} = 128.772 \text{ kPa}$$

$$m = 0.50 \text{ kg} \quad p_a = \frac{13.9 \times 0.085 \times 10^4}{[0.043 + 0.016(0.32)]} = 245.532 \text{ kPa}$$

$$m = 0.75 \text{ kg} \quad p_a = \frac{20.7 \times 0.085 \times 10^4}{[0.043 + 0.016(0.32)]} = 365.684 \text{ kPa}$$

$$m = 1.00 \text{ kg} \quad p_a = \frac{28.78 \times 0.085 \times 10^4}{[0.043 + 0.016(0.32)]} = 508.378 \text{ kPa}$$

$$m = 1.25 \text{ kg} \quad p_a = \frac{35.97 \times 0.085 \times 10^4}{[0.043 + 0.016(0.32)]} = 635.38 \text{ kPa}$$

หาค่า T_f จากสมการ $T_f = \frac{\mu p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a}$

$$\text{ที่ } m = 0.23 \text{ kg} \quad T_f = \frac{0.32 \times 128,772 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} = 0.127 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 0.50 \text{ kg} \quad T_f = \frac{0.32 \times 245,532 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} = 0.243 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 0.75 \text{ kg} \quad T_f = \frac{0.32 \times 365,648 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} = 0.361 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 1.00 \text{ kg} \quad T_f = \frac{0.32 \times 508,375 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} = 0.502 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 1.25 \text{ kg} \quad T_f = \frac{0.32 \times 635,380 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} = 0.627 \text{ N} \cdot \text{m}$$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

$$\text{ที่ } m = 0.25 \text{ kg} \quad \frac{|0.127 - 0.123|}{0.123} \times 100 = 3.25\%$$

$$m = 0.50 \text{ kg} \quad \frac{|0.243 - 0.245|}{0.245} \times 100 = 0.82\%$$

$$m = 0.75 \text{ kg} \quad \frac{|0.361 - 0.368|}{0.368} \times 100 = 1.9\%$$

$$m = 1.00 \text{ kg} \quad \frac{|0.502 - 0.491|}{0.491} \times 100 = 2.24\%$$

$$m = 1.25 \text{ kg} \quad \frac{|0.627 - 0.613|}{0.613} \times 100 = 2.28\%$$

การคำนวณแบบที่ 2

r (m)	$\theta_1 - \theta_2$	m (kg)	F ₁ (N)	F ₂ (N)	F ₃ (N)	F _{avg} (N)	Pmax (kPa)	T _m (N.m)	T _f (N.m)	Percentage difference
0.04	20° – 60°	0.25	6.67	6.87	8.34	7.29	125.941	0.123	0.124	1.46
		0.50	14.22	15.70	11.77	13.90	240.022	0.245	0.237	3.32
		0.75	20.80	19.42	21.27	20.70	358.057	0.368	0.353	3.85
		1.00	25.52	31.39	29.43	27.78	496.987	0.491	0.491	0.09
		1.25	35.32	38.26	34.34	35.97	615.587	0.613	0.608	0.82

หา T_m จาก $T = mgR$

$$\text{ที่ } m = 0.25 \text{ kg} \quad T_m = 0.25 \times 9.81 \times 0.05 = 0.123 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 0.50 \text{ kg} \quad T_m = 0.50 \times 9.81 \times 0.05 = 0.245 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 0.75 \text{ kg} \quad T_m = 0.75 \times 9.81 \times 0.05 = 0.368 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 1.00 \text{ kg} \quad T_m = 1.00 \times 9.81 \times 0.05 = 0.491 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 1.25 \text{ kg} \quad T_m = 1.25 \times 9.81 \times 0.05 = 0.613 \text{ N} \cdot \text{m}$$

จากสมการ $F_c = M_n - M_f$ สามารถจัดสมการใหม่ได้เป็น

$$F_c = \frac{p_a b r}{\sin \theta_a} (a \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta \, d\theta - \mu \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta (r - a \cos \theta) \, d\theta)$$

$$\text{หา } p_a \text{ จาก } p_a = \frac{F_c \times \sin \theta_a}{b r (a \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta \, d\theta - \mu \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta (r - a \cos \theta) \, d\theta)}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ } m = 0.25 \text{ kg} \quad p_a &= \frac{7.29 \times 0.085 \times \sin 60}{0.0038 \times 0.04 (0.0085 \int_{20}^{60} \sin^2 \theta \, d\theta - 0.32 \int_{20}^{60} \sin \theta (r - a \cos \theta) \, d\theta)} \\ &= 125.941 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$m = 0.50 \text{ kg} \quad p_a = \frac{13.9 \times 0.085 \times \sin 60}{0.0038 \times 0.04 (0.0085 \int_{20}^{60} \sin^2 \theta \, d\theta - 0.32 \int_{20}^{60} \sin \theta (r - a \cos \theta) \, d\theta)}$$

$$= 240.022 \text{ kPa}$$

$$m = 0.75 \text{ kg} \quad p_a = \frac{20.7 \times 0.085 \times \sin 60}{0.0038 \times 0.04 (0.0085 \int_{20}^{60} \sin^2 \theta \, d\theta - 0.32 \int_{20}^{60} \sin \theta (r - a \cos \theta) \, d\theta)}$$

$$= 358.057 \text{ kPa}$$

$$m = 1.00 \text{ kg} \quad p_a = \frac{28.78 \times 0.085 \times \sin 60}{0.0038 \times 0.04 (0.0085 \int_{20}^{60} \sin^2 \theta \, d\theta - 0.32 \int_{20}^{60} \sin \theta (r - a \cos \theta) \, d\theta)}$$

$$= 496.987 \text{ kPa}$$

$$m = 1.25 \text{ kg} \quad p_a = \frac{35.97 \times 0.085 \times \sin 60}{0.0038 \times 0.04 (0.0085 \int_{20}^{60} \sin^2 \theta \, d\theta - 0.32 \int_{20}^{60} \sin \theta (r - a \cos \theta) \, d\theta)}$$

$$= 615.587 \text{ kPa}$$

หาค่า T_f จากสมการ $T_f = \frac{\mu P_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a}$

$$\text{ที่ } m = 0.23 \text{ kg} \quad T_f = \frac{0.32 \times 125,941 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} = 0.124 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 0.50 \text{ kg} \quad T_f = \frac{0.32 \times 240,022 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} = 0.237 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 0.75 \text{ kg} \quad T_f = \frac{0.32 \times 358,057 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} = 0.353 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 1.00 \text{ kg} \quad T_f = \frac{0.32 \times 496,987 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} = 0.491 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$m = 1.25 \text{ kg} \quad T_f = \frac{0.32 \times 615,587 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} = 0.608 \text{ N} \cdot \text{m}$$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

$$\text{ที่ } m = 0.25 \text{ kg} \quad \frac{|0.124 - 0.123|}{0.123} \times 100 = 1.46\%$$

$$m = 0.50 \text{ kg} \quad \frac{|0.237 - 0.245|}{0.245} \times 100 = 3.32\%$$

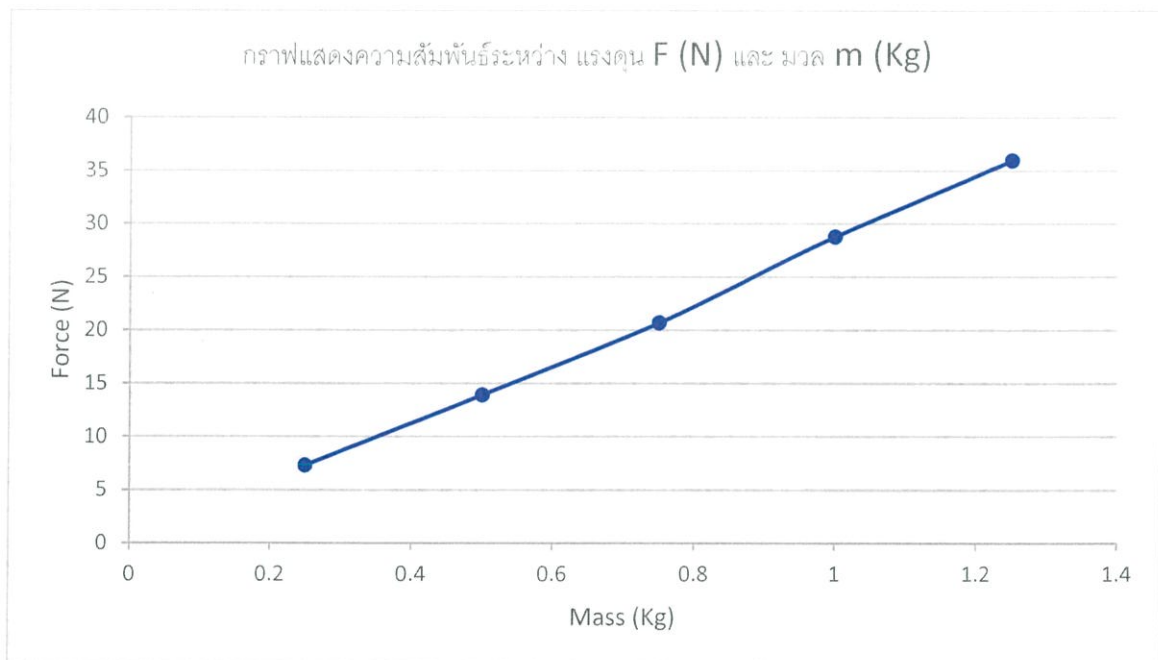
$$m = 0.75 \text{ kg} \quad \frac{|0.353 - 0.368|}{0.368} \times 100 = 3.85\%$$

$$m = 1.00 \text{ kg} \quad \frac{|0.491-0.491|}{0.491} \times 100 = 0.09\%$$

$$m = 1.25 \text{ kg} \quad \frac{|0.608-0.613|}{0.613} \times 100 = 0.82\%$$

สรุปอภิปรายผลการทดลองและเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างของแรงดัน F (N) ที่ใช้ในการดึงก้านเบรกกับมวล m (kg)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มมวล ค่า Torque of moment เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันหรือแรงที่ใช้ในการดึงก้านเบรคนั้นสูงขึ้นและทำให้แรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ผลที่ได้นั้นเป็นไปตามทฤษฎีและมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีอยู่ไม่เกิน 20 % อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งนี้ผลที่ได้ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ทดลองเอง ผลที่ได้เป็นไปดัง รูป 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) กับมวล m (kg)

5.3 ผลการทดลองที่ 2

ตัวอย่าง กำหนดให้ $r = 0.05 \text{ m}$, $m = 0.5 \text{ kg}$, $b = 0.0035 \text{ m}$

การคำนวณแบบที่ 1

r (m)	m (kg)	$\theta_1 - \theta_2$	F_1 (N)	F_2 (N)	F_3 (N)	F_{avg} (N)	Pmax (kPa)	T_m (N.m)	T_f (N.m)	Percentage difference
0.05	0.5	$20^\circ - 60^\circ$	11.77	7.85	8.83	9.48	151.466	0.245	0.215	12.24
		$30^\circ - 70^\circ$	10.79	14.72	9.81	11.77	155.311	0.245	0.242	1.22
		$40^\circ - 80^\circ$	13.73	10.79	15.7	13.41	155.124	0.245	0.261	6.53

หา T_m จาก $T = mgR$

$$T_m = 0.5 \times 9.81 \times 0.05 = 0.245 \text{ N} \cdot \text{m}$$

หา p_a จากตาราง $F_c = M_n - M_f$

$$\text{ที่ } r = 0.05 \text{ m ; } \theta_1 - \theta_2 = 20^\circ - 60^\circ \quad F_c = [0.05 + 0.01\mu]p_a \times 10^{-4}$$

$$p_a = \frac{9.48 \times 0.085 \times 10^4}{[0.05 + 0.01(0.32)]} = 151.466 \text{ kPa}$$

$$r = 0.05 \text{ m ; } \theta_1 - \theta_2 = 30^\circ - 70^\circ \quad F_c = [0.064 + 0.0013\mu]p_a \times 10^{-4}$$

$$p_a = \frac{11.7 \times 0.085 \times 10^4}{[0.064 + 0.0013(0.32)]} = 155.311 \text{ kPa}$$

$$r = 0.05 \text{ m ; } \theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ \quad F_c = [0.077 - 0.011\mu]p_a \times 10^{-4}$$

$$p_a = \frac{13.41 \times 0.085 \times 10^4}{[0.077 - 0.011(0.32)]} = 155.124 \text{ kPa}$$

หา T_f จากสมการ $T_f = \frac{\mu p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a}$

$$\begin{aligned} \text{ที่ } \theta_1 - \theta_2 = 20^\circ - 60^\circ \quad T_f &= \frac{0.32 \times 151,466 \times 0.0035 \times 0.05^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60} \\ &= 0.215 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_1 - \theta_2 = 30^\circ - 70^\circ \quad T_f &= \frac{0.32 \times 155,311 \times 0.0035 \times 0.05^2 (\cos 30 - \cos 70)}{\sin 70} \\ &= 0.242 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ \quad T_f &= \frac{0.32 \times 155,124 \times 0.0035 \times 0.05^2 (\cos 40 - \cos 80)}{\sin 80} \\ &= 0.261 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

$$\text{ที่ } \theta_1 - \theta_2 = 20^\circ - 60^\circ \quad \frac{|0.215 - 0.245|}{0.245} \times 100 = 12.24\%$$

$$\theta_1 - \theta_2 = 30^\circ - 70^\circ \quad \frac{|0.242 - 0.245|}{0.245} \times 100 = 1.22\%$$

$$\theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ \quad \frac{|0.261 - 0.245|}{0.245} \times 100 = 6.53\%$$

การคำนวณแบบที่ 2

r (m)	m (kg)	$\theta_1 - \theta_2$	F_1 (N)	F_2 (N)	F_3 (N)	F_{avg} (N)	Pmax (kPa)	T_m (N.m)	T_f (N.m)	Percentage difference
0.05	0.5	$20^\circ - 60^\circ$	11.77	7.85	8.83	9.48	150.408	0.245	0.214	12.81
		$30^\circ - 70^\circ$	10.79	14.72	9.81	11.77	155.174	0.245	0.242	1.21
		$40^\circ - 80^\circ$	13.73	10.79	15.7	13.41	154.918	0.245	0.260	6.39

หา T_m จาก $T = mgR$

$$T_m = 0.5 \times 9.81 \times 0.05 = 0.245 \text{ N} \cdot \text{m}$$

หา p_a จากตาราง $p_a = \frac{Fc \times \sin \theta_a}{br(a \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta - \mu \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta (r-a \cos \theta) d\theta)}$

ที่ $r = 0.05 \text{ m}$; $\theta_1 - \theta_2 = 20^\circ - 60^\circ$

$$p_a = \frac{9.48 \times 0.085 \times \sin 60}{0.0035 \times 0.05 (0.0085 \int_{20}^{60} \sin^2 \theta d\theta - 0.32 \int_{20}^{60} \sin \theta (r-a \cos \theta) d\theta)} = 150.408 \text{ kPa}$$

$r = 0.05 \text{ m}$; $\theta_1 - \theta_2 = 30^\circ - 70^\circ$

$$p_a = \frac{11.7 \times 0.085 \times \sin 70}{0.0035 \times 0.05 (0.0085 \int_{30}^{70} \sin^2 \theta d\theta - 0.32 \int_{30}^{70} \sin \theta (r-a \cos \theta) d\theta)} = 155.174 \text{ kPa}$$

$r = 0.05 \text{ m}$; $\theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ$

$$p_a = \frac{13.41 \times 0.085 \times \sin 80}{0.0035 \times 0.05 (0.0085 \int_{40}^{80} \sin^2 \theta d\theta - 0.32 \int_{40}^{80} \sin \theta (r-a \cos \theta) d\theta)} = 154.918 \text{ kPa}$$

หา T_f จากสมการ $T_f = \frac{\mu p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a}$

ที่ $\theta_1 - \theta_2 = 20^\circ - 60^\circ$ $T_f = \frac{0.32 \times 150,408 \times 0.0035 \times 0.05^2 (\cos 20 - \cos 60)}{\sin 60}$
 $= 0.214 \text{ N} \cdot \text{m}$

$\theta_1 - \theta_2 = 30^\circ - 70^\circ$ $T_f = \frac{0.32 \times 155,174 \times 0.0035 \times 0.05^2 (\cos 30 - \cos 70)}{\sin 70}$
 $= 0.242 \text{ N} \cdot \text{m}$

$\theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ$ $T_f = \frac{0.32 \times 154,918 \times 0.0035 \times 0.05^2 (\cos 40 - \cos 80)}{\sin 80}$
 $= 0.260 \text{ N} \cdot \text{m}$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

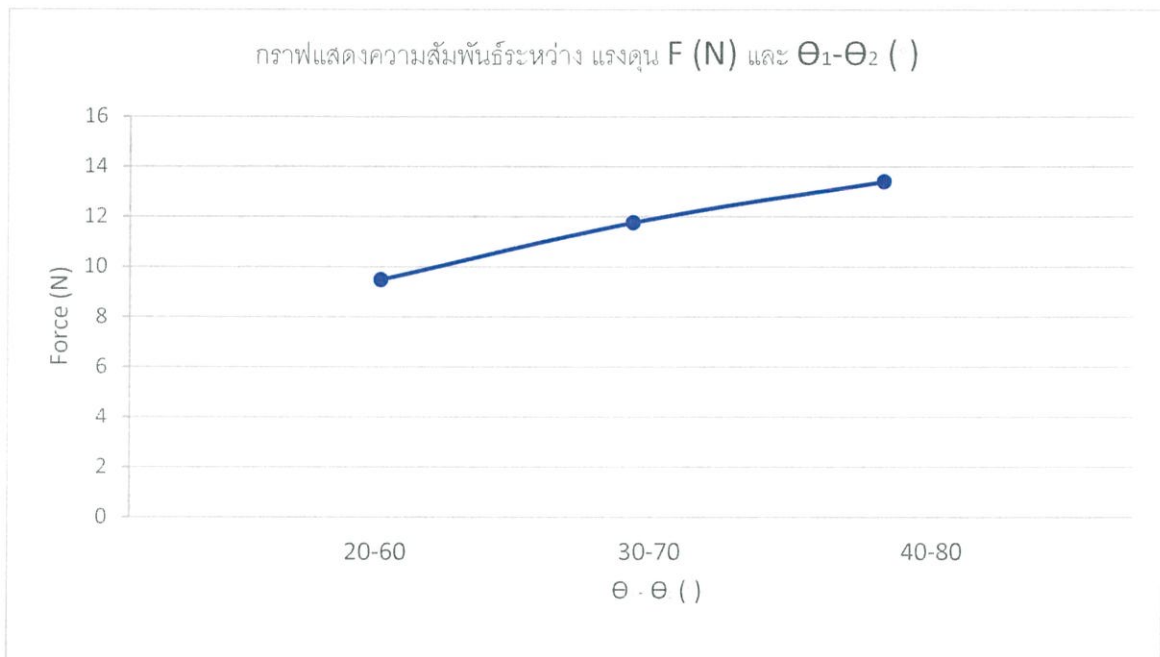
ที่ $\theta_1 - \theta_2 = 20^\circ - 60^\circ$ $\frac{|0.214 - 0.245|}{0.245} \times 100 = 12.81\%$

$\theta_1 - \theta_2 = 30^\circ - 70^\circ$ $\frac{|0.242 - 0.245|}{0.245} \times 100 = 1.21\%$

$\theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ$ $\frac{|0.260 - 0.245|}{0.245} \times 100 = 6.39\%$

สรุปอภิปรายผลการทดลองและเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างของแรงดัน F (N) ที่ใช้ในการดึงก้านเบรกกับ $\theta_1 - \theta_2$ ที่เปลี่ยนไป

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่ม $\theta_1 - \theta_2$ ให้มากขึ้นและกำหนดให้รัศมีล้อและ Torque of moment เริ่มต้นมีค่าคงที่จะทำให้แรงที่ใช้ในการดึงก้านเบรกรุนั้นเพิ่มมากขึ้น ผลที่ได้นั้นเป็นไปตามทฤษฎีและมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีอยู่ไม่เกิน 20 % อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งนี้ผลที่ได้ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ทดลองเอง ผลที่ได้เป็นไปดัง รูป 5.2



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) กับ $\theta_1 - \theta_2$ (°)

5.4 ผลการทดลองที่ 3

ตัวอย่าง กำหนดให้ $\theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ$, $m = 1$ kg

การคำนวณแบบที่ 1

$\theta_1 - \theta_2$	m (kg)	r (m)	F ₁ (N)	F ₂ (N)	F ₃ (N)	F _{avg} (N)	Pmax (kPa)	T _m (N.m)	T _f (N.m)	Percentage difference
40° - 80°	1	0.04	29.43	33.35	35.32	32.70	421.255	0.491	0.493	0.41
		0.05	21.58	23.54	27.47	24.20	279.940	0.491	0.472	3.87
		0.06	16.68	21.58	19.62	19.29	233.303	0.491	0.469	4.48

หา T_m จาก $T = mgR$

$$T_m = 1 \times 9.81 \times 0.05 = 0.491 \text{ N} \cdot \text{m}$$

หา p_a จากตาราง $F_c = M_n - M_f$

$$\text{ที่ } r = 0.04 \text{ m ; } \theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ \quad F_c = [0.066 - 0.000058\mu]P_a \times 10^{-4}$$

$$p_a = \frac{32.7 \times 0.085 \times 10^4}{[0.066 - 0.000058(0.32)]} = 421.255 \text{ kPa}$$

$$r = 0.05 \text{ m ; } \theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ \quad F_c = [0.077 - 0.011\mu]P_a \times 10^{-4}$$

$$p_a = \frac{24.2 \times 0.085 \times 10^4}{[0.077 - 0.011(0.32)]} = 279.940 \text{ kPa}$$

$$r = 0.06 \text{ m ; } \theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ \quad F_c = [0.077 - 0.021\mu]P_a \times 10^{-4}$$

$$p_a = \frac{19.29 \times 0.085 \times 10^4}{[0.077 - 0.021(0.32)]} = 233.303 \text{ kPa}$$

หา T_f จากสมการ $T_f = \frac{\mu p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a}$

ที่ $r = 0.04 \text{ m}$, $b = 0.0038 \text{ m}$

$$T_f = \frac{0.32 \times 421,255 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 40 - \cos 80)}{\sin 80}$$

$$= 0.493 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$r = 0.05 \text{ m}$, $b = 0.0035$

$$T_f = \frac{0.32 \times 279,940 \times 0.0035 \times 0.05^2 (\cos 40 - \cos 80)}{\sin 80}$$

$$= 0.472 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$r = 0.06 \text{ m}$, $b = 0.0029 \text{ m}$

$$T_f = \frac{0.32 \times 233,303 \times 0.0029 \times 0.06^2 (\cos 40 - \cos 80)}{\sin 80}$$

$$= 0.469 \text{ N} \cdot \text{m}$$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

ที่ $r = 0.06 \text{ m}$ $\frac{|0.493 - 0.491|}{0.491} \times 100 = 0.41\%$

$r = 0.06 \text{ m}$ $\frac{|0.472 - 0.491|}{0.491} \times 100 = 3.87\%$

$r = 0.06 \text{ m}$ $\frac{|0.469 - 0.491|}{0.491} \times 100 = 4.48\%$

การคำนวณแบบที่ 2

$\theta_1 - \theta_2$	m (kg)	r (m)	F_1 (N)	F_2 (N)	F_3 (N)	F_{avg} (N)	Pmax (kPa)	T_m (N.m)	T_f (N.m)	Percentage difference
40° - 80°	1	0.04	29.43	33.35	35.32	32.70	415.967	0.491	0.487	0.75
		0.05	21.58	23.54	27.47	24.20	279.608	0.491	0.471	3.99
		0.06	16.68	21.58	19.62	19.29	231.050	0.491	0.472	3.70

หา T_m จาก $T = mgR$

$$T_m = 1 \times 9.81 \times 0.05 = 0.491 \text{ N} \cdot \text{m}$$

หา p_a จากตาราง $\frac{FC \times \sin \theta_a}{br(a \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta - \mu \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta (r - a \cos \theta) d\theta)}$

ที่ $r = 0.04 \text{ m}$; $\theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ$

$$p_a = \frac{32.7 \times 0.085 \times \sin 80}{0.0038 \times 0.04 (0.0085 \int_{40}^{80} \sin^2 \theta d\theta - 0.32 \int_{40}^{80} \sin \theta (r - a \cos \theta) d\theta)} = 415.967 \text{ kPa}$$

$r = 0.05 \text{ m}$; $\theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ$

$$p_a = \frac{24.2 \times 0.085 \times \sin 80}{0.0035 \times 0.05 (0.0085 \int_{40}^{80} \sin^2 \theta d\theta - 0.32 \int_{40}^{80} \sin \theta (r - a \cos \theta) d\theta)} = 279.608 \text{ kPa}$$

$r = 0.06 \text{ m}$; $\theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - 80^\circ$

$$p_a = \frac{19.29 \times 0.085 \times \sin 80}{0.0029 \times 0.06 (0.0085 \int_{40}^{80} \sin^2 \theta d\theta - 0.32 \int_{40}^{80} \sin \theta (r - a \cos \theta) d\theta)} = 231.050 \text{ kPa}$$

หา T_f จากสมการ $T_f = \frac{\mu p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a}$

ที่ $r = 0.04 \text{ m}$, $b = 0.0038 \text{ m}$

$$T_f = \frac{0.32 \times 415,967 \times 0.0038 \times 0.04^2 (\cos 40 - \cos 80)}{\sin 80}$$

$$= 0.487 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$r = 0.05 \text{ m} , b = 0.0035$$

$$T_f = \frac{0.32 \times 279,608 \times 0.0035 \times 0.05^2 (\cos 40 - \cos 80)}{\sin 80}$$

$$= 0.471 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$r = 0.06 \text{ m} , b = 0.0029 \text{ m}$$

$$T_f = \frac{0.32 \times 231,050 \times 0.0029 \times 0.06^2 (\cos 40 - \cos 80)}{\sin 80}$$

$$= 0.472 \text{ N} \cdot \text{m}$$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

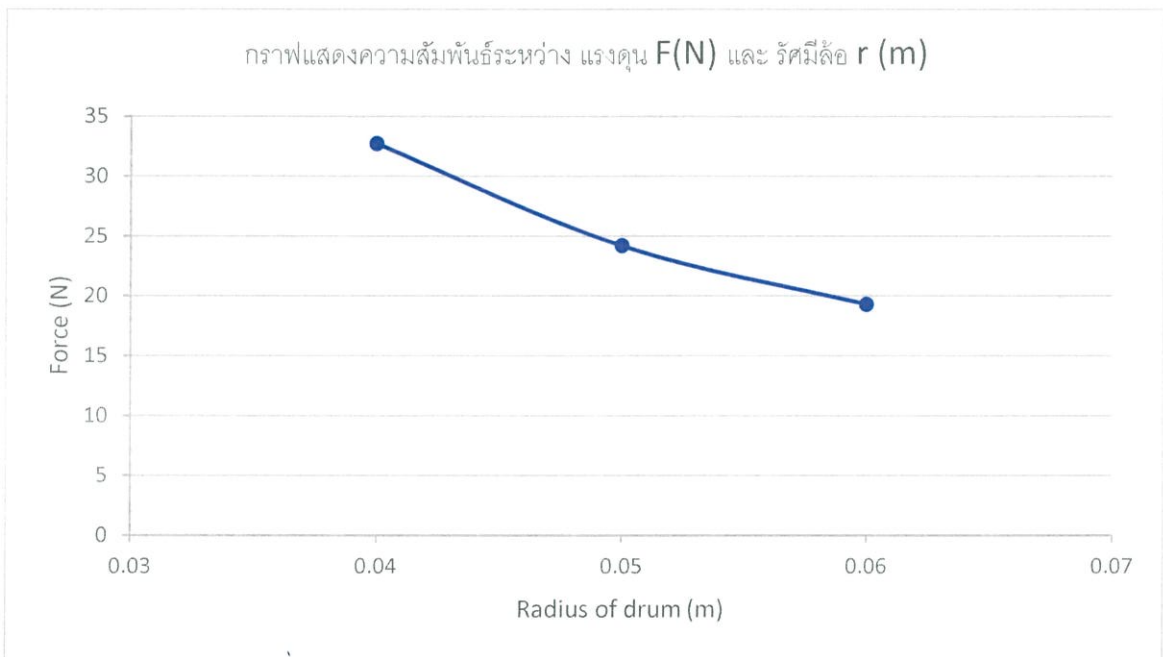
$$\text{ที่ } r = 0.06 \text{ m} \quad \frac{|0.487 - 0.491|}{0.491} \times 100 = 0.75\%$$

$$r = 0.06 \text{ m} \quad \frac{|0.471 - 0.491|}{0.491} \times 100 = 3.99\%$$

$$r = 0.06 \text{ m} \quad \frac{|0.472 - 0.491|}{0.491} \times 100 = 3.70\%$$

สรุปอภิปรายผลการทดลองและเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) ที่ใช้ในการดึง ก้านเบรกกับรัศมีของล้อ r (m)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อรัศมีล้อเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงที่ใช้ในการดึงก้านเบรคนั้นลดลงและทำให้ แรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นจะลดลงด้วย ผลที่ได้นั้นเป็นไปตามทฤษฎีและมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีอยู่ ไม่เกิน 20 % อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งนี้ผลที่ได้ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ทดลองเอง ผลที่ได้เป็นไปดัง รูป 5.3



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) กับรัศมีล้อ r (m)

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานชุดทดลอง

การทดลอง ดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก

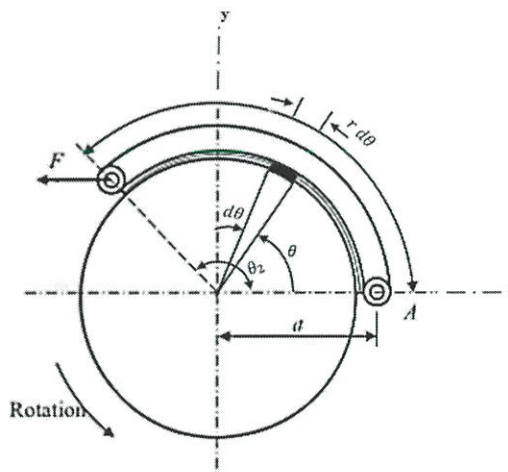
1. วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจพื้นฐาน และหลักการทำงานของดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก
- 1.2 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับ โมเมนต์บิด แรงดัน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและรูปทรงทางเรขาคณิต โดยใช้เงื่อนไขสภาวะสมดุลแบบสถิต

2. ทฤษฎี

การวิเคราะห์เบรกแบบสถิต (Static Analysis of Brakes)

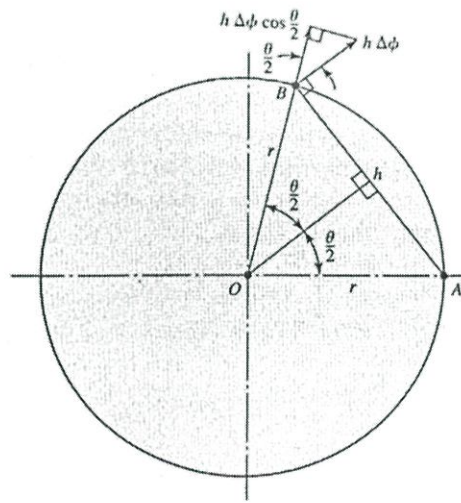
ในระบบเบรกการเบรกประเภทผ้าเบรกขยายตัวจากภายในหรือหดตัวจากภายนอกสัมผัสกับพื้นผิวของดรัม เรียกว่า "ดรัมเบรก (drum brake)" ดรัมเบรกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอกและดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านใน ดรัมเบรกทั้ง 2 ชนิด นิยมใช้ในระบบเบรกของรถยนต์



รูปที่ ก.1 รูปทรงเรขาคณิตของดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก

การวิเคราะห์ดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก สามารถพิจารณาได้ตามรูปที่ ก.1 ซึ่งจะแสดงให้เห็นจานผ้าเบรกที่มีจุดหมุนอยู่ที่จุด A และมีแรงดุน F กระทำที่ปลายอีกด้านหนึ่ง เนื่องจากจานผ้าเบรกมีความยาว จึงไม่สามารถตั้งสมมติฐานให้ความดันมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอได้แต่สามารถทำกลไกให้ไม่มีแรงดันเกิดขึ้น ที่จุดหมุนได้ ดังนั้น จึงสมมติฐานว่าความดัน ณ จุดหมุนนี้มีค่าเท่ากับศูนย์

พิจารณาใช้สลักยึดส่วนที่เป็นบานพับให้สามารถเลื่อนไปมาได้เพื่อเพิ่มความดันให้กับแผ่นรับแรงเสียดทานที่จุดหมุน พิจารณาความดัน p ที่กระทำบนแผ่นวัสดุรับแรงเสียดทานในตำแหน่งที่ทำมุม θ กับจุดหมุนและกำหนดให้ความดันสูงสุด p_o จะเกิดขึ้นในตำแหน่งที่ทำมุม θ_o กับจุดหมุน จากนั้นเขียนผังวัตถุอิสระ ดังแสดงตามรูปที่ ก.2

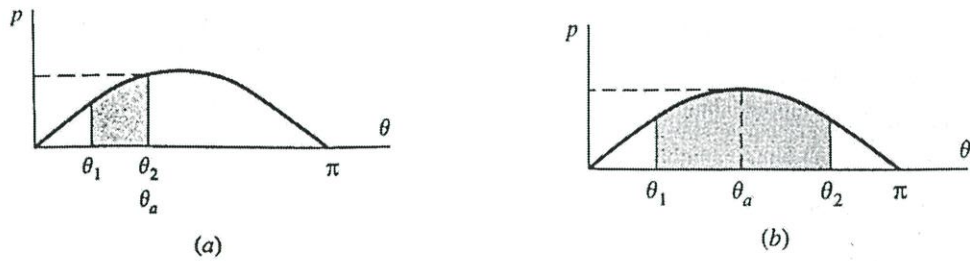


รูปที่ ก.2 ผังวัตถุอิสระแสดงแรงกระทำ ณ จุดใด ๆ บนแผ่นรับแรงเสียดทาน

พิจารณาที่จุด B ในรูปที่ ก.2 ถ้าแผ่นรับแรงเสียดทานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อเกิดการหมุนไปเป็นมุม $\Delta\theta$ ระยะการทวัดตัวในแนวตั้งฉากกับแนวเส้นตรง AB คือ $h\Delta\theta$ จากสามเหลี่ยม AOB จะได้ $h \approx 2r \sin(\theta/2)$ ดังนั้น $h\Delta\theta \approx 2r\Delta\theta \sin(\theta/2)$ และระยะการทวัดตัวในแนวตั้งฉากกับขอบดรัม คือ $h\Delta\theta \cos(\theta/2) \approx r\Delta\theta \sin \theta$ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นรับแรงเสียดทาน รวมทั้งความดันจะแปรผันกับค่า $\sin \theta$ ซึ่งในรูปแบบของความดันที่จุด B เป็นจุดที่ความดันมีค่าสูงสุด

ดังนั้น จะได้ว่า

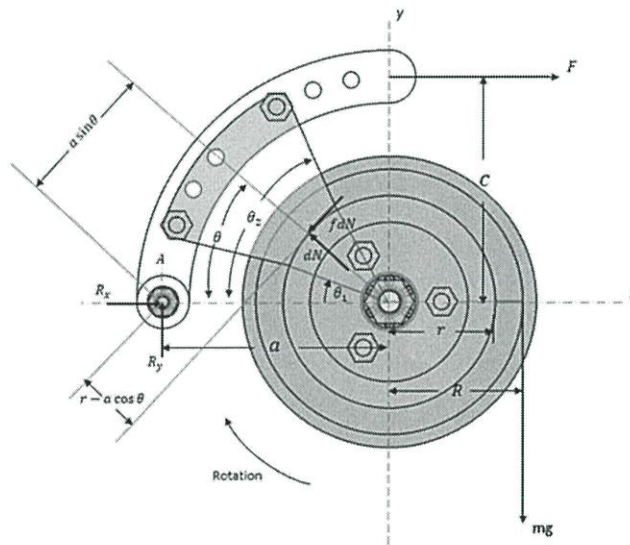
$$p = \frac{p_a}{\sin \theta_a} \sin \theta \quad (\text{ก.1})$$



รูปที่ 3 (a) แท่งเบรกสั้น (b) แท่งเบรกลยาว

การกระจายของความดันนี้มีความสำคัญและมีคุณลักษณะเฉพาะที่มีประโยชน์ ดังนี้

- การกระจายของความดันเป็นฟังก์ชันของ Sine เมื่อเทียบกับมุม θ
- ถ้าแท่งเบรกสั้น ความดันสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ปลายแท่งเบรก θ_2 ดังแสดงตาม รูปที่ 3 (a)
- ถ้าแท่งเบรกลยาว ความดันสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ $\theta_a = 90^\circ$ ดังแสดงตาม รูปที่ 3 (b)



รูปที่ 4 แรงกระทำบนก้ามเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก

เมื่อ $\theta = 0$ สมการที่ (ก.1) แสดงให้เห็นว่าความดันมีค่าเป็นศูนย์ วัสดุที่ใช้รับแรงเสียดทานจึงไม่กดลงบนดรัม การออกแบบที่ดีควรวางตำแหน่งของแผ่นรับแรงเสียดทานไว้บริเวณที่ความดันมีค่าสูงสุด ดังแสดงตามรูปที่ 3 ในรูปจะเห็นได้ว่าเริ่มต้นมีแผ่นรับแรงเสียดทานที่มุม θ_1 และสิ้นสุดที่มุม θ_2

เมื่อ b คือ ความกว้างหน้าสัมผัสของแผ่นรับแรงเสียดทาน แทนค่าความดันจากสมการที่ (ก.1) ลงไปจะได้

$$dN = \frac{p_a b r \sin \theta d\theta}{\sin \theta_a} \quad (\text{ก.2})$$

แรงกระทำในแนวตั้งฉาก dN มีองค์ประกอบในพิกัดโคออร์ดิเนตคือ $dN \cos \theta$ และ $dN \sin \theta$ ดังรูปที่ ก.4 สำหรับแรงเสียดทาน $f dN$ จะมีองค์ประกอบในพิกัดโคออร์ดิเนตคือ $f dN \sin \theta$ และ $f dN \cos \theta$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงและโมเมนต์แบบสถิต จะสามารถหาค่าของแรงดัน F โมเมนต์บิด T และแรงปฏิกิริยาที่สลักยึดก้ามเบรกได้

หาแรงดัน F จากเงื่อนไขโมเมนต์ลัพธ์รอบจุด A เท่ากับศูนย์ เริ่มจากแกนโมเมนต์ของแรงเสียดทาน คือ $r - a \cos \theta$ ดังนั้น โมเมนต์ที่เกิดจากแรงเสียดทานรอบจุด A คือ

$$M_f = \frac{f p_a b r}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta (r - a \cos \theta) d\theta \quad (\text{ก.3})$$

สามารถหาค่าได้ เมื่อแทนค่า dN จากสมการ (ก.2) จะมีความสะดวกขึ้นถ้าทำการอินทิเกรตสมการที่ (ก.3) สำหรับปัญหาแต่ละอย่าง ดังนั้น จะคงไว้ในรูปนี้ โมเมนต์ของแรงตั้งฉากรอบจุด A คือ $a \sin \theta$ ดังนั้นโมเมนต์ที่เกิดจากแรงตั้งฉาก dN รอบจุด A คือ

$$M_N = \frac{p_a b r a}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta \quad (\text{ก.4})$$

แรงดันที่กระทำจะต้องทำให้โมเมนต์เหล่านี้อยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้น

$$F = \frac{M_N - M_f}{c} \quad (\text{ก.5})$$

แรงเสียดทานจะมีทิศทางไปในทางตรงข้ามถ้าการหมุนเปลี่ยนทิศทาง ดังนั้น สำหรับการหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แรงดันคือ

$$F = \frac{M_N + M_f}{c} \quad (\text{ก.6})$$

เนื่องจากโมเมนต์ทั้งคู่เสริมซึ่งกันละกัน เบรกจะสูญเสียความสามารถในการกระตุ้นให้ทำงานโดยใช้พลังงานในตัวเอง (self-energizing)

โมเมนต์บิดที่แท่งเบรกส่งไปยังดรัมคือ ผลรวมของแรงเสียดทาน $f dN$ คูณด้วยรัศมีของดรัม

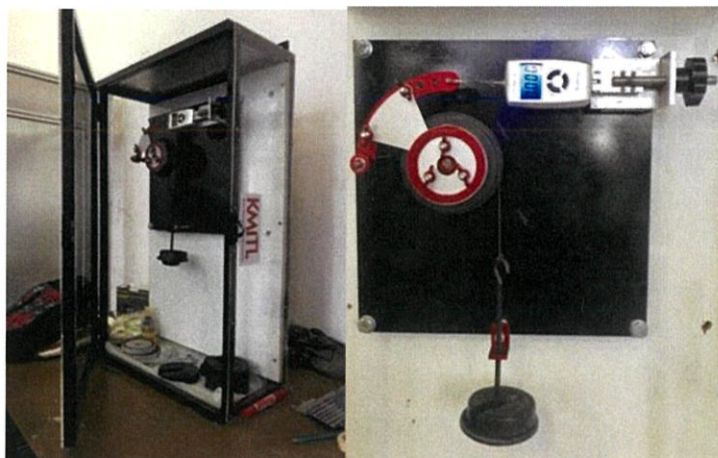
$$\text{นั่นคือ } T_f = \frac{f p_a b r^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_a} \quad (\text{ก.7})$$

แรงขับที่ล้อกระทำ คือ

$$T_m = mgR \quad (\text{ก.8})$$

จากการวิเคราะห์โดยใช้เงื่อนไขสภาวะสมดุลแบบสถิตพบว่าถ้า $T_f = T_m$ จะทำให้ล้อขับเริ่มหยุดหมุน หรือเกิดการเบรก

3. ชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก



รูปที่ ก.5 แสดงชุดทดลองดรัมเบรกชนิดแผ่นรับแรงเสียดทานจับจากด้านนอก

3.1 เครื่องวัดแรงดึง (Tension gauge)



วิธีใช้งาน : กดปุ่ม Unit เมื่อต้องการปรับเปลี่ยนหน่วย กดปุ่ม On/Off เพื่อเปิดหรือปิดเครื่อง หลังจากเปิดเครื่อง หน้าปัดจะมีแสงสว่าง รอจนเครื่องตั้งค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์แล้วจึงเริ่มทำการวัด หลังจากมีแรงหรือน้ำหนักกระทำกับแกนการวัดค่าน้ำหนักที่อ่านได้จะเปลี่ยนไป เมื่อค่าที่เปลี่ยนไปหยุดนิ่งประมาณ 2-3 วินาที เครื่องจะล็อคค่าที่อ่านได้โดยมีสัญลักษณ์รูปกุญแจแสดงว่าค่าถูกล็อคแล้ว ค่าที่อ่านจะไม่เปลี่ยนจนกว่าจะรีเซ็ตโดยการกด Tar

ข้อควรระวัง : ในการวัดแรงคานบนชุดทดลองเครื่องมักจะล็อคค่าก่อนถึงจังหวะที่ต้องการอ่านจริง จึงควรแก้ไขโดยการเซตแรงดึงไว้ที่ค่าที่จะทำการวัด แล้วค่อยเปิดเครื่องเมื่อเครื่องตั้งค่าศูนย์แล้วจึงลดแรงดึงที่กระทำกับเครื่องซึ่งจะทำได้รวดเร็วกว่า แล้วค่อยทำการอ่านค่าซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าลบแทนแสดงถึงการตั้งค่าศูนย์ที่ตำแหน่งมีแรงดึงกระทำ

3.2 ชุดทดลองทดลองประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- ดรัมเบรก 3 ชั้น คือ ขนาดรัศมี 4 เซนติเมตร 5 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร
- รองเท้าเบรก 3 ชั้น คือ ขนาดความหนา 4 มิลลิเมตร 3.4 มิลลิเมตร และ 2.8 มิลลิเมตร
- ชุดลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัม

4. ลำดับขั้นตอนการทดลอง

การทดลองที่ 1 ทำการหา Torque of friction (T_f) ที่รัศมีดรัมเบรก = _____ cm (คงที่) และมุม $\theta_1 - \theta_2 =$ _____ (คงที่) กำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.32

วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งดรัมเบรกตามขนาดรัศมีที่กำหนดไว้ และขันน็อตกับสกรูให้แน่น
2. เลือกร่องเท้าเบรกที่มีรัศมีเท่ากับดรัมเบรก โดยติดตั้งตามตำแหน่ง $\theta_1 - \theta_2$ ที่กำหนดไว้ เสร็จแล้วขันน็อตกับสกรูให้แน่น
3. เปิดเครื่อง Tension gauge หมุนชุดปรับแรงดันให้ร่องเท้าเบรกสัมผัสกับดรัมเบรกจนล้อไม่สามารถหมุนได้
4. ใส่ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักล้อขับตามค่าที่กำหนดช่วงไว้
5. หมุนชุดปรับแรงดัน เพื่อผ่อนแรงจนล้อขับเริ่มหมุน ทำการบันทึกค่าแรงดันจาก Tension gauge
6. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนค่าน้ำหนักที่ถ่วงล้อขับตามที่ได้กำหนดไว้

ข้อควรระวัง ควรค่อยๆ ผ่อนแรงโดยหมุนชุดปรับแรงดันอย่างช้าๆ เพราะจะได้ไม่ทำให้ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักเคลื่อนที่ก่อนที่จะอ่านค่าได้จาก Tension gauge

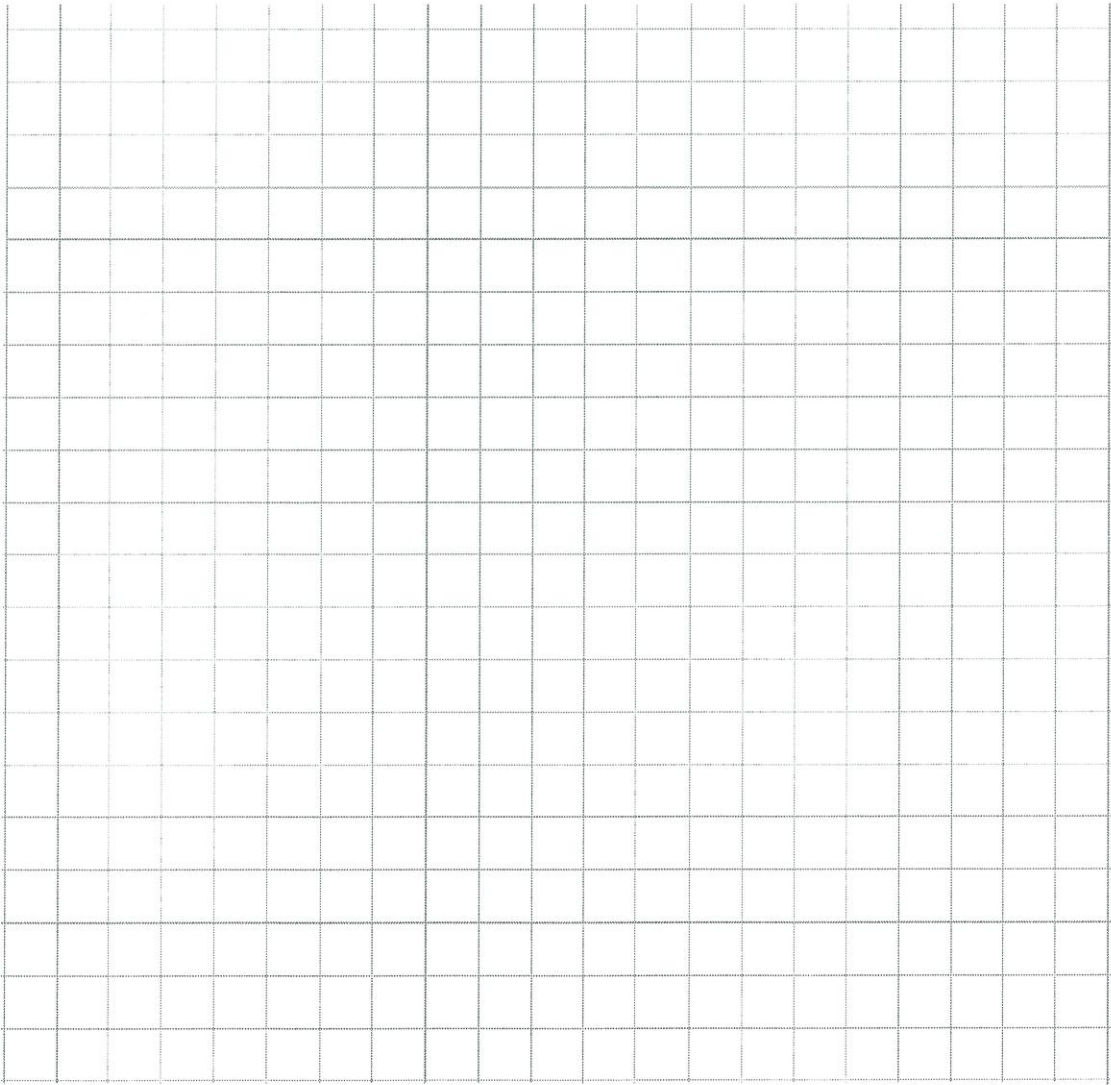
ตารางบันทึกผลการทดลอง

r (drum) (cm)	$\theta_1 - \theta_2$	m (kg)	F1 (N)	F2 (N)	F3 (N)	F avg (N)	Pmax (kPa)	Tm (N.m)	Tf (N.m)	Percentage difference Between Tm and Tf
.....									

ทำการคำนวณและแสดงการคำนวณค่า Torque ที่เกิดจากการใส่น้ำหนัก (T_m) ค่าแรงดันสูงสุด (p_a) ค่า Torque of friction (T_f) และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 1 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) กับมวล M (kg)



การทดลองที่ 2 ทำการหา Torque of friction รัศมีดรัมเบรก = _____ cm (คงที่) และมวล (m) = _____ kg (คงที่) โดยเปลี่ยนค่า $\theta_1 - \theta_2$ กำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.32

วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งดรัมเบรกตามรัศมีที่กำหนดไว้ และขันน็อตกับสกรูให้แน่น
2. เลือกร่องเท้าเบรกที่มีขนาดเท่ากับดรัมเบรก โดยติดตั้งตามตำแหน่ง $\theta_1 - \theta_2$ ที่กำหนดไว้ และขันน็อตกับสกรูให้แน่น
3. เปิดเครื่อง Tension gauge หมุนชุดปรับแรงดันให้ผ้าเบรกแตะกับดรัมเบรกจนล้อไม่สามารถหมุนได้
4. ใส่ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักล้อขับตามค่าที่กำหนดช่วงไว้
5. หมุนชุดปรับแรงดัน เพื่อผ่อนแรงจนล้อขับเริ่มหมุน ทำการบันทึกค่าแรงดันจาก Tension gauge
6. ทำการทดลองในช่วง $\theta_1 - \theta_2$ ที่กำหนดไว้ คือ ($20^\circ - 60^\circ$) ($30^\circ - 70^\circ$) และ ($40^\circ - 80^\circ$) ตามลำดับ

ข้อควรระวัง ควรค่อยๆผ่อนแรงโดยหมุนชุดปรับแรงดันอย่างช้าๆ เพราะจะได้ไม่ทำให้ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักเคลื่อนที่ก่อนที่จะอ่านค่าได้จาก Tension gauge

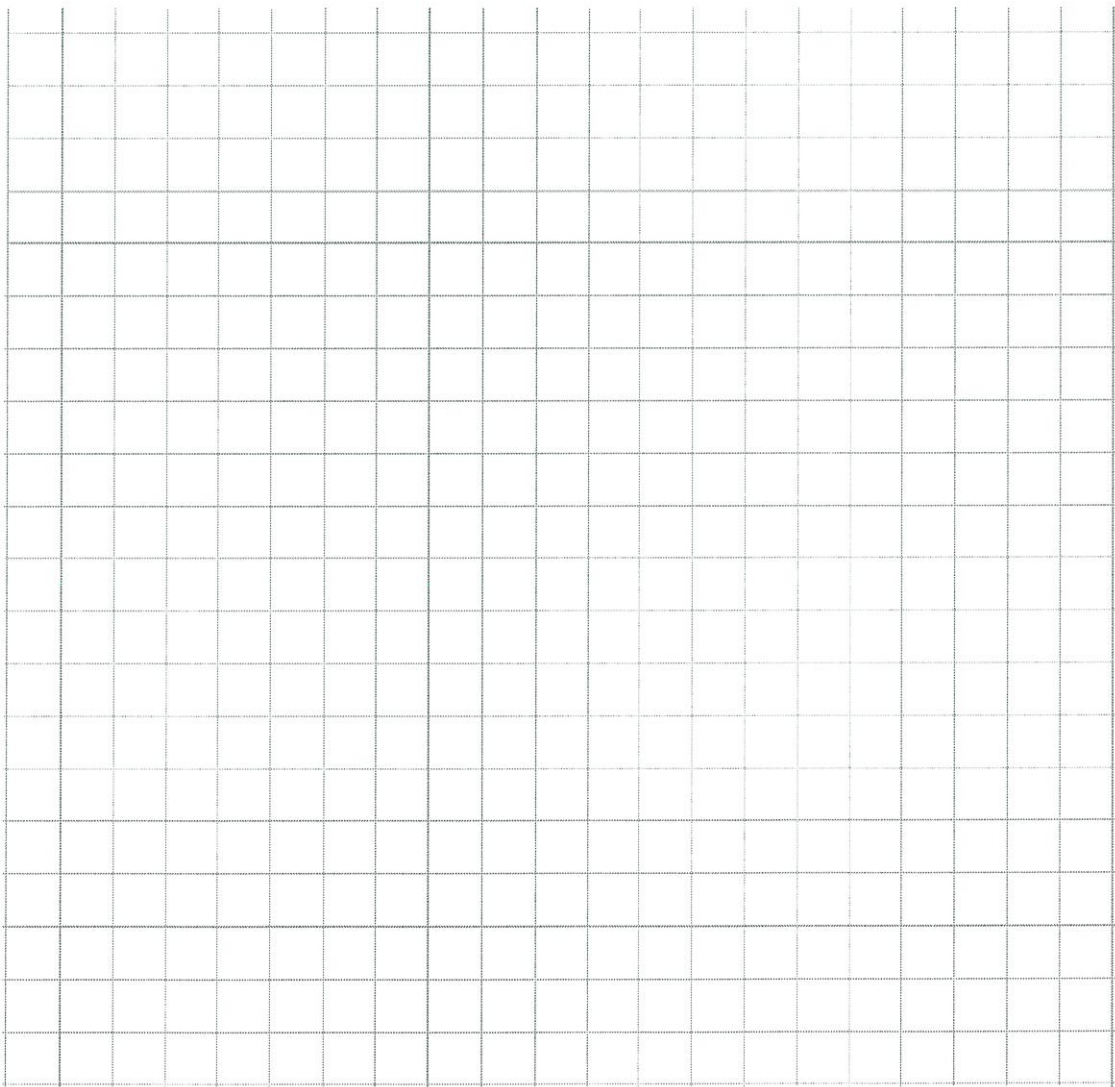
ตารางบันทึกผลการทดลอง

r (drum) (cm)	m (kg)	$\theta_1 - \theta_2$	F1 (N)	F2 (N)	F3 (N)	F avg (N)	Pmax (kPa)	T_m (N.m)	T_f (N.m)	Percentage difference between T_m and T_f
.....	$20^\circ - 60^\circ$								
		$30^\circ - 70^\circ$								
		$40^\circ - 80^\circ$								

ทำการคำนวณและแสดงการคำนวณค่า Torque ที่เกิดจากการใส่ น้ำหนัก (T_m) ค่าแรงดันสูงสุด (p_a) ค่า Torque of friction (T_f) และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

สรุปและผลอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 2 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน $F(N)$ กับ $\theta_1 - \theta_2$



การทดลองที่ 3 ทำการหา Torque of friction ที่มีมุม $\theta_1 - \theta_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ cm (คงที่) และมวล (m) = kg (คงที่) โดยจะทำการเปลี่ยนรัศมีของดรัมเบรก กำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.32

วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งล้อข้อรัศมีที่กำหนดไว้แล้วขันน็อตและสกรูให้แน่น
2. เลือกร่องเท้าเบรกที่มีรัศมีเท่ากับล้อข้อแล้วใส่ตามตำแหน่ง $\theta_1 - \theta_2$ ที่กำหนดไว้ ขันน็อตและสกรูให้แน่น
3. เปิดเครื่อง Tension gauge หมุนชุดปรับแรงดันให้ผ้าเบรกสัมผัสกับดรัมเบรกจนไม่สามารถหมุนได้
4. ใส่ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักล้อข้อตามค่าที่กำหนดช่วงไว้
5. หมุนชุดปรับแรงดัน เพื่อผ่อนแรงจนล้อข้อเริ่มหมุน ทำการบันทึกค่าแรงดันจาก Tension gauge
6. ทำการทดลอง ในช่วงรัศมีของดรัมเบรกที่กำหนดไว้ได้ แก่ 4 cm 5 cm และ 6 cm ตามลำดับ

ข้อควรระวัง ควรค่อยๆผ่อนแรงโดยหมุนชุดปรับแรงดันอย่างช้าๆ เพราะจะได้ไม่ทำให้ลูกเหล็กถ่วงน้ำหนักเคลื่อนที่ก่อนที่จะอ่านค่าได้จาก Tension gauge

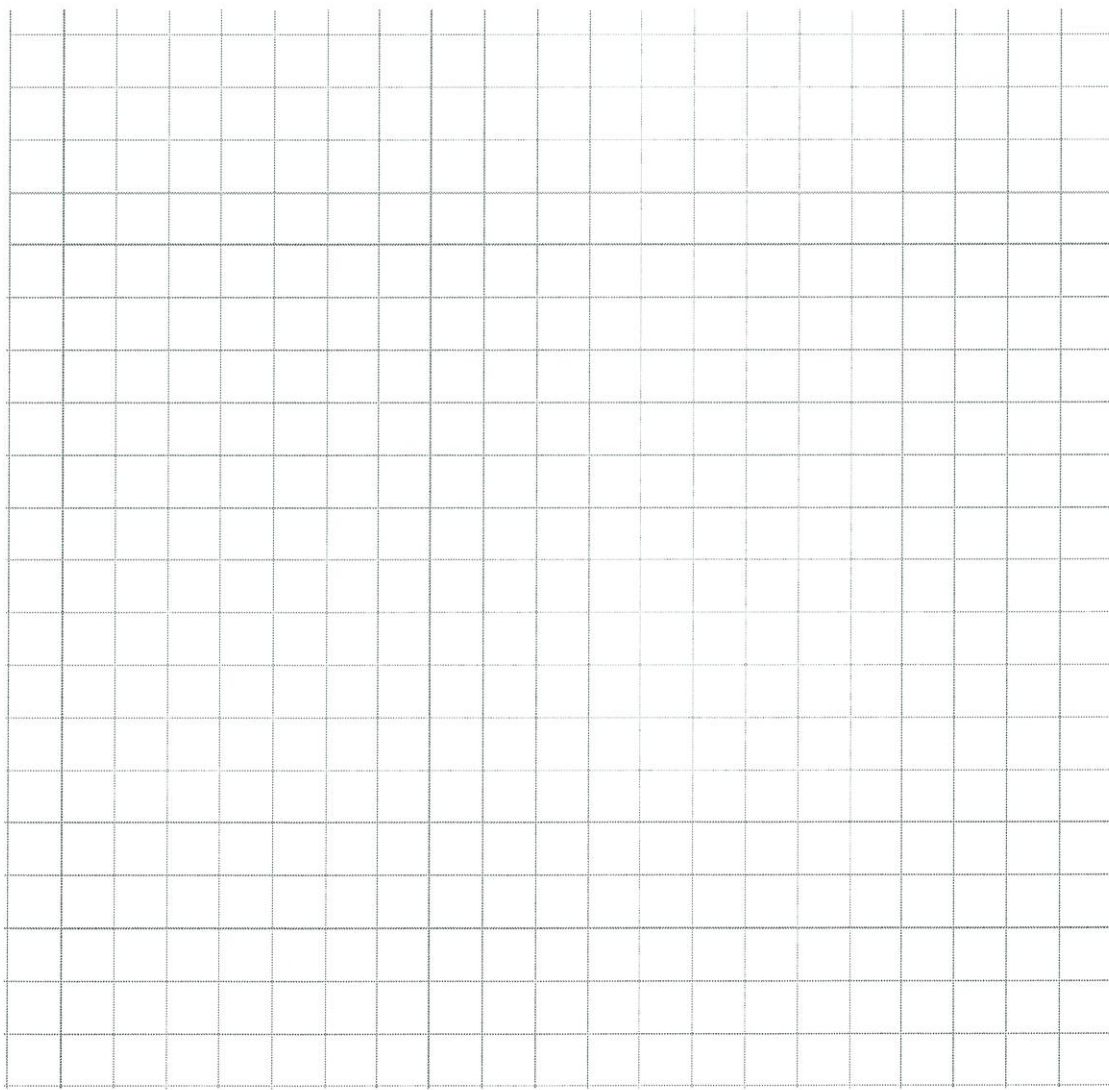
ตารางบันทึกผลการทดลอง

$\theta_1 - \theta_2$	m (kg)	r (drum) (cm)	F1 (N)	F2 (N)	F3 (N)	F avg (N)	Pmax (kPa)	Tm (N.m)	Tf (N.m)	Percentage difference between Tm and Tf
.....	4								
		5								
		6								

ทำการคำนวณและแสดงการคำนวณค่า Torque ที่เกิดจากการใส่น้ำหนัก (T_m) ค่าแรงดันสูงสุด (p_a) ค่า Torque of friction (T_f) และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง T_m และ T_f

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 3 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน F (N) กับรัศมีล้อ r (m)



ภาคผนวก ข

ตารางเก็บผลการทดลอง

$$r = 0.04 \quad \theta_{1-2} = 20^\circ - 60^\circ$$

F1	F2	F3	F avg	F (N)
0.68	0.7	0.85	0.743333	7.2921
1.45	1.6	1.2	1.416667	13.8975
2.12	1.98	2.24	2.113333	20.7318
2.6	3.2	3	2.933333	28.776
3.6	3.8	3.5	3.633333	35.643
4.81	4.5	4.41	4.573333	44.8644
5.4	5.24	5.72	5.453333	53.4972
6.2	5.94	6.12	6.086667	59.7102

F	C	sin θ	1	b	r	aI	fI	2	Pa	cos1-cos2	Tb	T=mgr	%
7.2921	0.085	0.866	0.536771	0.0038	0.04	0.025	-0.00304	4.26E-06	125941.2027	0.4397	0.12441134	0.122625	1.46
13.8975	0.085	0.866	1.022995	0.0038	0.04	0.025	-0.00304	4.26E-06	240022.4714	0.4397	0.237106814	0.24525	-3.32
20.7318	0.085	0.866	1.526068	0.0038	0.04	0.025	-0.00304	4.26E-06	358057.0515	0.4397	0.353707576	0.367875	-3.85
28.776	0.085	0.866	2.118201	0.0038	0.04	0.025	-0.00304	4.26E-06	496987.7055	0.4397	0.490950579	0.4905	0.09
35.643	0.085	0.866	2.623681	0.0038	0.04	0.025	-0.00304	4.26E-06	615587.0444	0.4397	0.60810924	0.613125	-0.82
44.8644	0.085	0.866	3.302468	0.0038	0.04	0.025	-0.00304	4.26E-06	774849.0136	0.4397	0.765436584	0.73575	4.03
53.4972	0.085	0.866	3.937929	0.0038	0.04	0.025	-0.00304	4.26E-06	923945.3253	0.4397	0.912721758	0.858375	6.33
59.7102	0.085	0.866	4.395268	0.0038	0.04	0.025	-0.00304	4.26E-06	1031249.489	0.4397	1.018722451	0.981	3.85

$$r = 0.04 \quad \theta_{1-2} = 30^\circ - 70^\circ$$

F1	F2	F3	F avg	F (N)
0.97	0.7	0.84	0.836667	8.2077
1.61	1.75	1.56	1.64	16.0884
2.4	2.35	2.56	2.436667	23.9037
3.15	3.22	2.98	3.116667	30.5745
3.64	3.89	3.9	3.81	37.3761
4.8	4.53	4.5	4.61	45.2241
5.76	5.64	5.9	5.766667	56.571
6.56	6.4	6.71	6.556667	64.3209

F	C	sin θ	1	b	r	aI	fI	2	Pa	cos1-cos2	Tb	T=mgr	%
8.2077	0.085	0.9397	0.655586	0.0038	0.04	0.0344	-0.0019	5.52E-06	118817.2274	0.524	0.128906564	0.122625	5.12
16.0884	0.085	0.9397	1.285053	0.0038	0.04	0.0344	-0.0019	5.52E-06	232900.7006	0.524	0.252677408	0.24525	3.03
23.9037	0.085	0.9397	1.909296	0.0038	0.04	0.0344	-0.0019	5.52E-06	346037.4231	0.524	0.375421108	0.367875	2.05
30.5745	0.085	0.9397	2.442123	0.0038	0.04	0.0344	-0.0019	5.52E-06	442606.0063	0.524	0.480189789	0.4905	-2.10
37.3761	0.085	0.9397	2.985397	0.0038	0.04	0.0344	-0.0019	5.52E-06	541068.0911	0.524	0.587012758	0.613125	-4.26
45.2241	0.085	0.9397	3.612252	0.0038	0.04	0.0344	-0.0019	5.52E-06	654678.189	0.524	0.71027003	0.73575	-3.46
56.571	0.085	0.9397	4.51858	0.0038	0.04	0.0344	-0.0019	5.52E-06	818939.4555	0.524	0.888479503	0.858375	3.51
64.3209	0.085	0.9397	5.1376	0.0038	0.04	0.0344	-0.0019	5.52E-06	931129.4271	0.524	1.010196059	0.981	2.98

$$r = 0.04 \quad \theta_{1-2} = 40^\circ - 80^\circ$$

F1	F2	F3	F avg	F (N)
0.78	0.82	0.7	0.766667	7.521
1.64	1.59	1.68	1.636667	16.0557
2.56	2.42	2.38	2.453333	24.0672
3	3.4	3.6	3.333333	32.7
4.2	3.97	4	4.056667	39.7959
5.1	5.18	5.22	5.166667	50.685
6.01	5.9	6.11	6.006667	58.9254
6.47	6.61	6.5	6.526667	64.0266

F	C	sin θ	1	b	r	aI	fI	2	Pa	cos1-cos2	Tb	T=mgr	%
7.521	0.085	0.9848	0.629568	0.0038	0.04	0.0433	7.52E-06	6.58E-06	95672.36315	0.5924	0.11197139	0.122625	-8.69
16.0557	0.085	0.9848	1.343991	0.0038	0.04	0.0433	7.52E-06	6.58E-06	204239.697	0.5924	0.239034576	0.24525	-2.53
24.0672	0.085	0.9848	2.014617	0.0038	0.04	0.0433	7.52E-06	6.58E-06	306151.5621	0.5924	0.358308447	0.367875	-2.60
32.7	0.085	0.9848	2.737252	0.0038	0.04	0.0433	7.52E-06	6.58E-06	415966.7963	0.5924	0.48683213	0.4905	-0.75
39.7959	0.085	0.9848	3.331235	0.0038	0.04	0.0433	7.52E-06	6.58E-06	506231.5911	0.5924	0.592474702	0.613125	-3.37
50.685	0.085	0.9848	4.24274	0.0038	0.04	0.0433	7.52E-06	6.58E-06	644748.5343	0.5924	0.754589801	0.73575	2.56
58.9254	0.085	0.9848	4.932527	0.0038	0.04	0.0433	7.52E-06	6.58E-06	749572.167	0.5924	0.877271498	0.858375	2.20
64.0266	0.085	0.9848	5.359539	0.0038	0.04	0.0433	7.52E-06	6.58E-06	814462.9872	0.5924	0.95321731	0.981	-2.83

$$r = 0.05 \quad \theta_{1-2} = 20^\circ - 60^\circ$$

F1	F2	F3	F avg	F (N)
0.6	0.52	0.62	0.58	5.6898
1.2	0.8	0.9	0.966667	9.483
1.58	1.64	1.6	1.606667	15.7614
2.25	2.3	2.29	2.28	22.3668
2.7	2.6	2.79	2.696667	26.4543
3.5	3.2	3.49	3.396667	33.3213
3.9	4.1	4.02	4.006667	39.3054
4.6	4.51	4.54	4.55	44.6355

F	C	sin θ	1	b	r	aI	fI	2	Pa	cos1-cos2	Tb	T=mgr	%
5.6898	0.085	0.866	0.418826	0.0035	0.05	0.025	-0.00152	4.64E-06	90244.81319	0.4397	0.128297695	0.122625	4.63
9.483	0.085	0.866	0.698044	0.0035	0.05	0.025	-0.00152	4.64E-06	150408.022	0.4397	0.213829492	0.24525	-12.81
15.7614	0.085	0.866	1.160197	0.0035	0.05	0.025	-0.00152	4.64E-06	249988.5055	0.4397	0.355399363	0.367875	-3.39
22.3668	0.085	0.866	1.64642	0.0035	0.05	0.025	-0.00152	4.64E-06	354755.4725	0.4397	0.504342665	0.4905	2.82
26.4543	0.085	0.866	1.947301	0.0035	0.05	0.025	-0.00152	4.64E-06	419586.5165	0.4397	0.596510549	0.613125	-2.71
33.3213	0.085	0.866	2.452781	0.0035	0.05	0.025	-0.00152	4.64E-06	528502.6703	0.4397	0.751352595	0.73575	2.12
39.3054	0.085	0.866	2.89327	0.0035	0.05	0.025	-0.00152	4.64E-06	623415.3187	0.4397	0.886286378	0.858375	3.25
44.6355	0.085	0.866	3.285619	0.0035	0.05	0.025	-0.00152	4.64E-06	707955	0.4397	1.0064733	0.981	2.60

$$r = 0.05 \quad \theta_{1-2} = 30^\circ - 70^\circ$$

F1	F2	F3	F avg	F (N)
0.62	0.6	0.54	0.586667	5.7552
1.1	1.5	1	1.2	11.772
2.02	1.84	1.98	1.946667	19.0968
2.5	2.6	2.51	2.536667	24.8847
3.1	3.24	3.17	3.17	31.0977
3.71	3.94	3.8	3.816667	37.4415
4.3	4.4	4.37	4.356667	42.7389
5.02	4.9	5.22	5.046667	49.5078

F	C	sin θ	1	b	r	aI	fI	2	Pa	cos1-cos2	Tb	T=mgr	%
5.7552	0.085	0.9397	0.459694	0.0035	0.05	0.0344	-0.00023	6.06E-06	75862.68327	0.524	0.118448152	0.122625	-3.41
11.772	0.085	0.9397	0.940283	0.0035	0.05	0.0344	-0.00023	6.06E-06	155173.6703	0.524	0.242280312	0.24525	-1.21
19.0968	0.085	0.9397	1.525347	0.0035	0.05	0.0344	-0.00023	6.06E-06	251726.1763	0.524	0.393032506	0.367875	6.84
24.8847	0.085	0.9397	1.987653	0.0035	0.05	0.0344	-0.00023	6.06E-06	328019.8975	0.524	0.512153659	0.4905	4.41
31.0977	0.085	0.9397	2.483913	0.0035	0.05	0.0344	-0.00023	6.06E-06	409917.1124	0.524	0.640023824	0.613125	4.39
37.4415	0.085	0.9397	2.990621	0.0035	0.05	0.0344	-0.00023	6.06E-06	493538.4792	0.524	0.770585992	0.73575	4.73
42.7389	0.085	0.9397	3.413748	0.0035	0.05	0.0344	-0.00023	6.06E-06	563366.6309	0.524	0.879612132	0.858375	2.47
49.5078	0.085	0.9397	3.954411	0.0035	0.05	0.0344	-0.00023	6.06E-06	652591.4913	0.524	1.018923312	0.981	3.87

$$r = 0.05 \quad \theta_{1-2} = 40^\circ - 80^\circ$$

F1	F2	F3	F avg	F (N)
0.62	0.6	0.59	0.603333	5.9187
1.4	1.1	1.6	1.366667	13.407
1.9	1.79	1.81	1.833333	17.985
2.2	2.4	2.8	2.466667	24.198
3.48	3.34	3.29	3.37	33.0597
3.7	3.78	3.64	3.706667	36.3624
4.3	4.4	4.37	4.356667	42.7389
5.18	5.4	5.26	5.28	51.7968

F	C	sin θ	1	b	r	aI	fI	2	Pa	cos1-cos2	Tb	T=mgr	%
5.9187	0.085	0.9848	0.495443	0.0035	0.05	0.0433	0.001904	7.24E-06	68390.67123	0.5924	0.115191891	0.122625	-6.06
13.407	0.085	0.9848	1.122273	0.0035	0.05	0.0433	0.001904	7.24E-06	154918.0951	0.5924	0.260931908	0.24525	6.39
17.985	0.085	0.9848	1.505488	0.0035	0.05	0.0433	0.001904	7.24E-06	207816.9568	0.5924	0.350030608	0.367875	-4.85
24.198	0.085	0.9848	2.025566	0.0035	0.05	0.0433	0.001904	7.24E-06	279608.2691	0.5924	0.470950272	0.4905	-3.99
33.0597	0.085	0.9848	2.767361	0.0035	0.05	0.0433	0.001904	7.24E-06	382005.3515	0.5924	0.643419899	0.613125	4.94
36.3624	0.085	0.9848	3.043824	0.0035	0.05	0.0433	0.001904	7.24E-06	420168.1017	0.5924	0.707698247	0.73575	-3.81
42.7389	0.085	0.9848	3.577588	0.0035	0.05	0.0433	0.001904	7.24E-06	493848.6591	0.5924	0.831800008	0.858375	-3.10
51.7968	0.085	0.9848	4.335807	0.0035	0.05	0.0433	0.001904	7.24E-06	598512.8355	0.5924	1.00808815	0.981	2.76

$$r = 0.06 \quad \theta_{1-2} = 20^\circ - 60^\circ$$

F1	F2	F3	F avg	F (N)
0.41	0.48	0.34	0.41	4.0221
0.9	0.87	0.8	0.856667	8.4039
1.35	1.41	1.3	1.353333	13.2762
1.8	1.54	1.7	1.68	16.4808
2.34	2.27	2.2	2.27	22.2687
2.7	2.81	2.64	2.716667	26.6505
3.6	3	2.9	3.166667	31.065
3.6	3.71	3.5	3.603333	35.3487

F	C	sinθ	1	b	r	aI	fI	2	Pa	cos1-cos2	Tb	T=mgr	%
4.0221	0.085	0.866	0.296067	0.00295	0.06	0.025	-0.00017	4.45E-06	66466.41016	0.4397	0.11468729	0.122625	-6.47
8.4039	0.085	0.866	0.618611	0.00295	0.06	0.025	-0.00017	4.45E-06	138876.9708	0.4397	0.239631168	0.24525	-2.29
13.2762	0.085	0.866	0.977261	0.00295	0.06	0.025	-0.00017	4.45E-06	219393.1912	0.4397	0.3785613	0.367875	2.90
16.4808	0.085	0.866	1.213152	0.00295	0.06	0.025	-0.00017	4.45E-06	272350.1684	0.4397	0.469938165	0.4905	-4.19
22.2687	0.085	0.866	1.639199	0.00295	0.06	0.025	-0.00017	4.45E-06	367996.9538	0.4397	0.634975973	0.613125	3.56
26.6505	0.085	0.866	1.961743	0.00295	0.06	0.025	-0.00017	4.45E-06	440407.5144	0.4397	0.75991985	0.73575	3.29
31.065	0.085	0.866	2.286695	0.00295	0.06	0.025	-0.00017	4.45E-06	513358.4524	0.4397	0.885796145	0.858375	3.19
35.3487	0.085	0.866	2.602018	0.00295	0.06	0.025	-0.00017	4.45E-06	584147.8811	0.4397	1.007942771	0.981	2.75

$$r = 0.06 \quad \theta_{1-2} = 30^\circ - 70^\circ$$

F1	F2	F3	F avg	F (N)
0.4	0.51	0.42	0.443333	4.3491
0.9	0.85	0.93	0.893333	8.7636
1.6	1.48	1.54	1.54	15.1074
2.12	1.8	2	1.973333	19.3584
2.5	2.32	2.55	2.456667	24.0999
2.94	2.6	2.78	2.773333	27.2064
3.42	3.56	3.34	3.44	33.7464
3.71	3.6	3.9	3.736667	36.6567

F	C	sinθ	1	b	r	aI	fI	2	Pa	cos1-cos2	Tb	T=mgr	%
4.3491	0.085	0.9397	0.347382	0.00295	0.06	0.0344	0.00145	5.83E-06	59563.31506	0.524	0.11287439	0.122625	-7.95
8.7636	0.085	0.9397	0.699988	0.00295	0.06	0.0344	0.00145	5.83E-06	120022.3191	0.524	0.227446139	0.24525	-7.26
15.1074	0.085	0.9397	1.206696	0.00295	0.06	0.0344	0.00145	5.83E-06	206904.1471	0.524	0.392089986	0.367875	6.58
19.3584	0.085	0.9397	1.546243	0.00295	0.06	0.0344	0.00145	5.83E-06	265123.9287	0.524	0.502418337	0.4905	2.43
24.0999	0.085	0.9397	1.924967	0.00295	0.06	0.0344	0.00145	5.83E-06	330061.3775	0.524	0.625476883	0.613125	2.01
27.2064	0.085	0.9397	2.173098	0.00295	0.06	0.0344	0.00145	5.83E-06	372606.6025	0.524	0.706101447	0.73575	-4.03
33.7464	0.085	0.9397	2.695477	0.00295	0.06	0.0344	0.00145	5.83E-06	462175.4973	0.524	0.875837372	0.858375	2.03
36.6567	0.085	0.9397	2.927936	0.00295	0.06	0.0344	0.00145	5.83E-06	502033.6555	0.524	0.951369858	0.981	-3.02

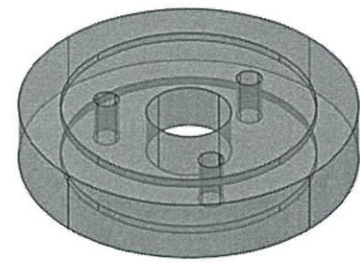
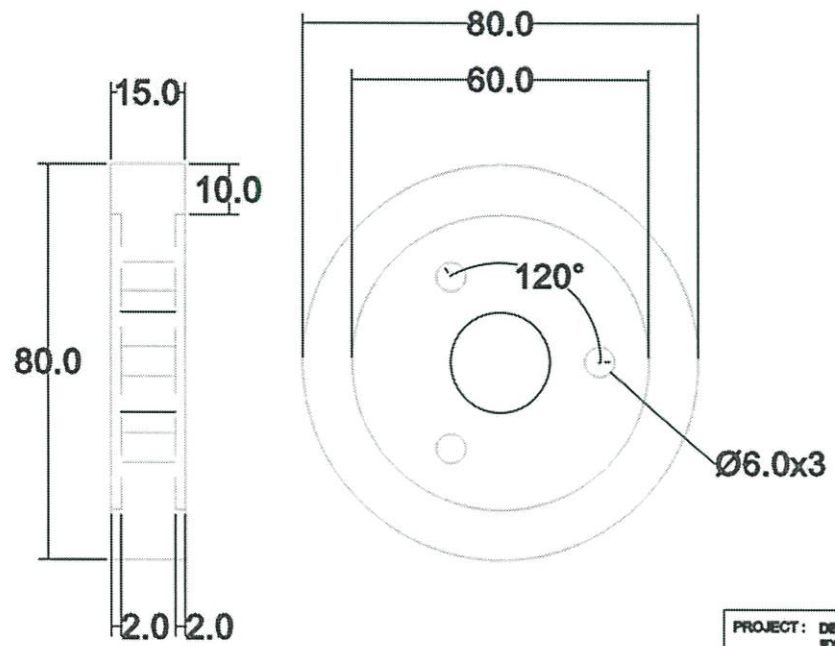
$$r = 0.06 \quad \theta_{1-2} = 40^\circ - 80^\circ$$

F1	F2	F3	F avg	F (N)
0.6	0.38	0.45	0.476667	4.6761
0.98	1.17	1.2	1.116667	10.9545
1.38	1.5	1.81	1.563333	15.3363
1.7	2.2	2	1.966667	19.293
2.5	2.78	2.67	2.65	25.9965
3.2	3	3.28	3.16	30.9996
3.7	3.81	3.54	3.683333	36.1335
3.84	3.9	4.1	3.946667	38.7168

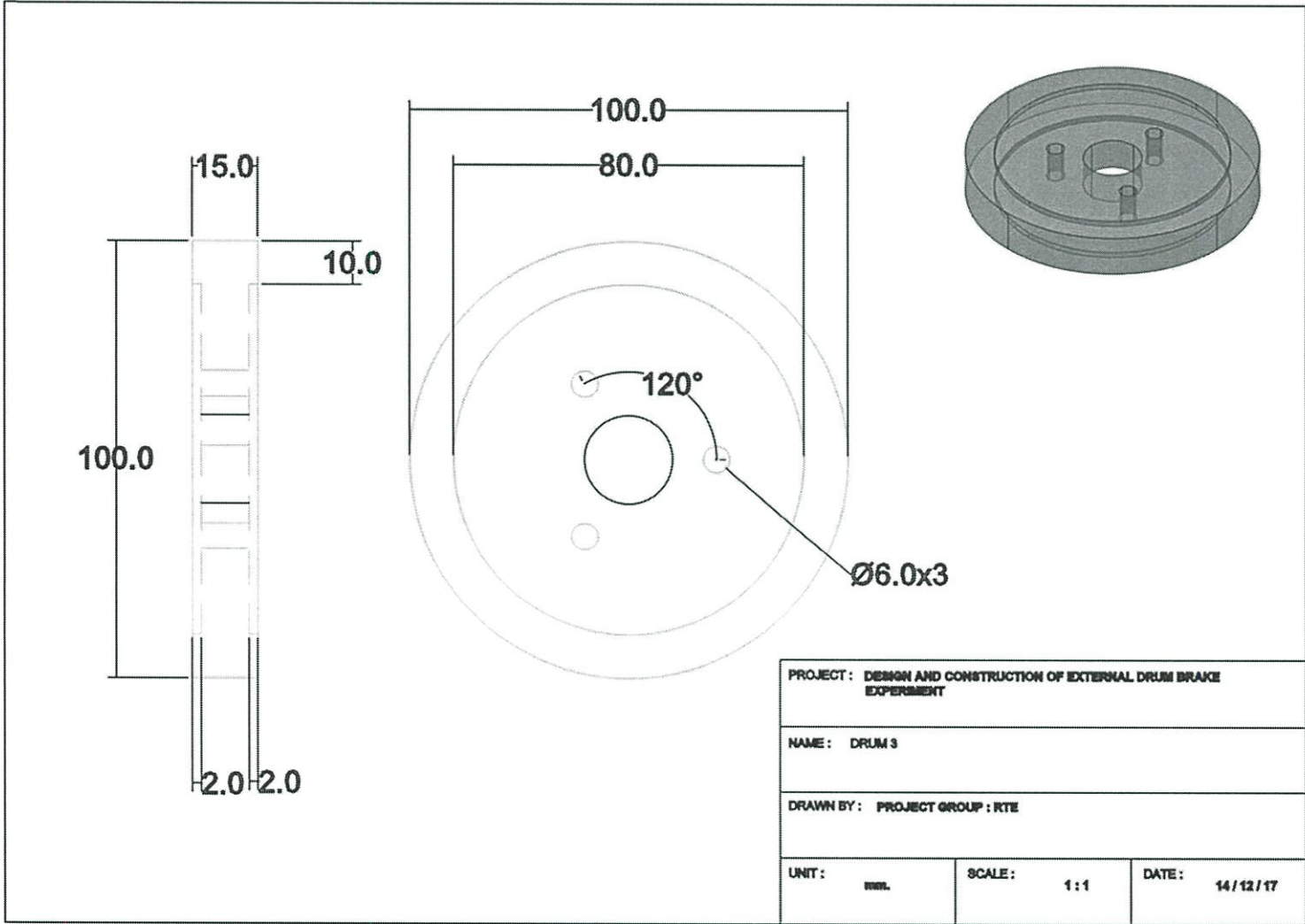
F	C	sinθ	1	b	r	aI	fI	2	Pa	cos1-cos2	Tb	T=mgr	%
4.6761	0.085	0.9848	0.391427	0.00295	0.06	0.0433	0.00381	6.99E-06	56000.30027	0.5924	0.11448059	0.122625	-6.64
10.9545	0.085	0.9848	0.916979	0.00295	0.06	0.0433	0.00381	6.99E-06	131189.5146	0.5924	0.268188796	0.24525	9.35
15.3363	0.085	0.9848	1.283771	0.00295	0.06	0.0433	0.00381	6.99E-06	183665.3205	0.5924	0.375464314	0.367875	2.06
19.293	0.085	0.9848	1.614978	0.00295	0.06	0.0433	0.00381	6.99E-06	231050.1899	0.5924	0.472332506	0.4905	-3.70
25.9965	0.085	0.9848	2.176115	0.00295	0.06	0.0433	0.00381	6.99E-06	311330.3407	0.5924	0.636448038	0.613125	3.80
30.9996	0.085	0.9848	2.594915	0.00295	0.06	0.0433	0.00381	6.99E-06	371246.7458	0.5924	0.758934264	0.73575	3.15
36.1335	0.085	0.9848	3.024663	0.00295	0.06	0.0433	0.00381	6.99E-06	432729.593	0.5924	0.884622744	0.858375	3.06
38.7168	0.085	0.9848	3.240906	0.00295	0.06	0.0433	0.00381	6.99E-06	463666.8218	0.5924	0.947867266	0.981	-3.38

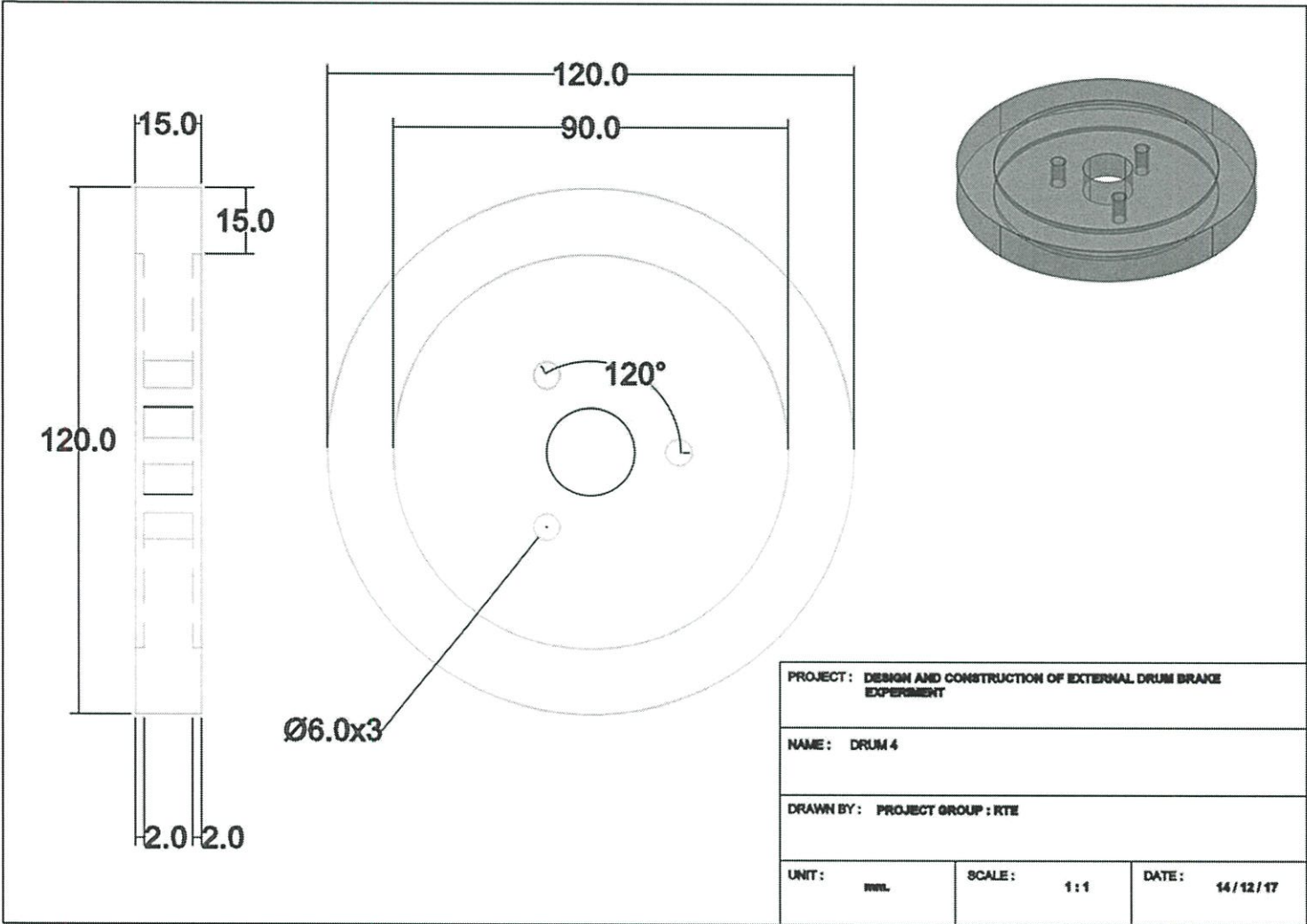
ภาคผนวก ค

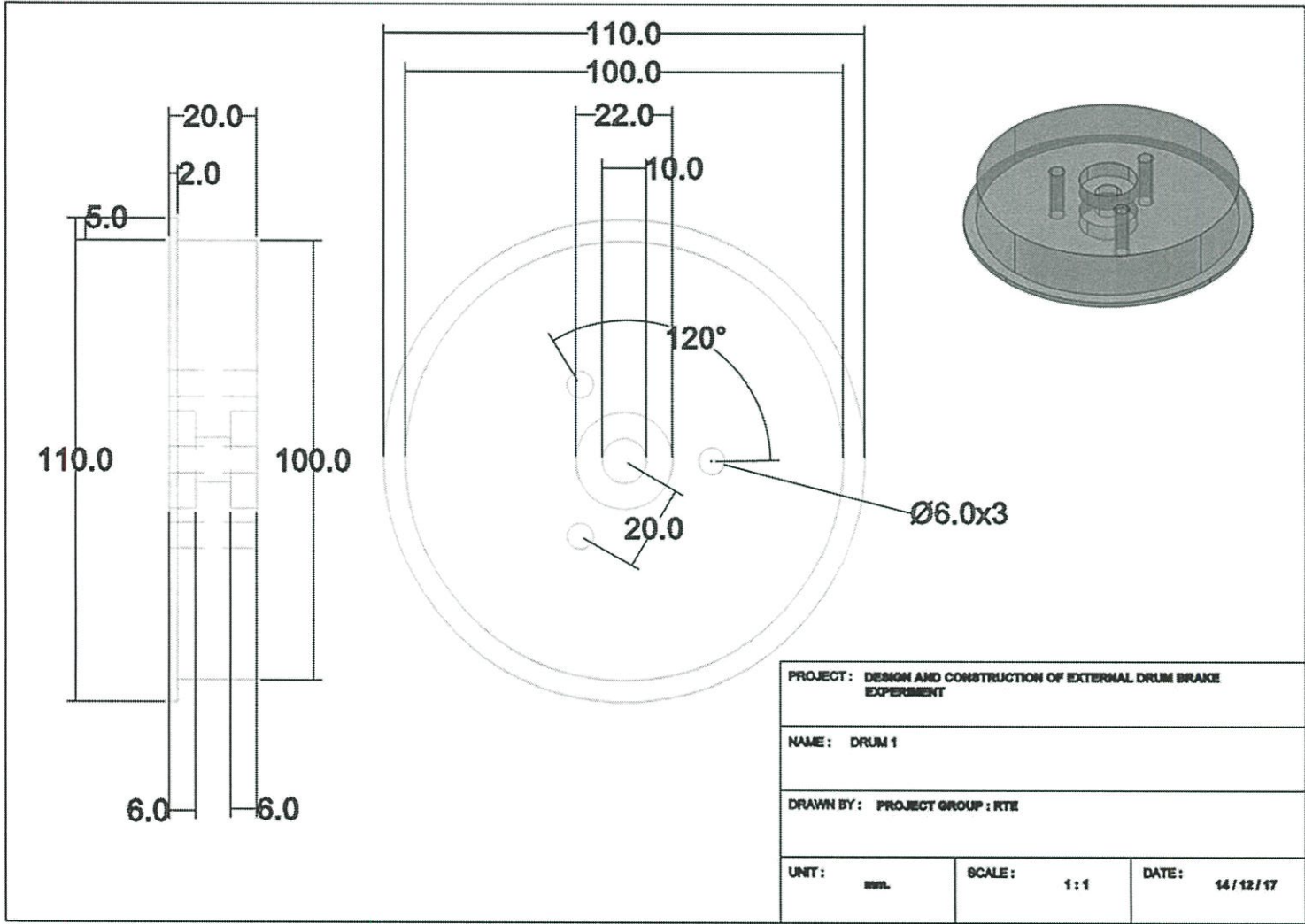
แบบชี้แจงงานชุดทดลองเตรียมเบรคชนิดแผ่นรับแรงเสียดทาน
จับจากด้านนอก

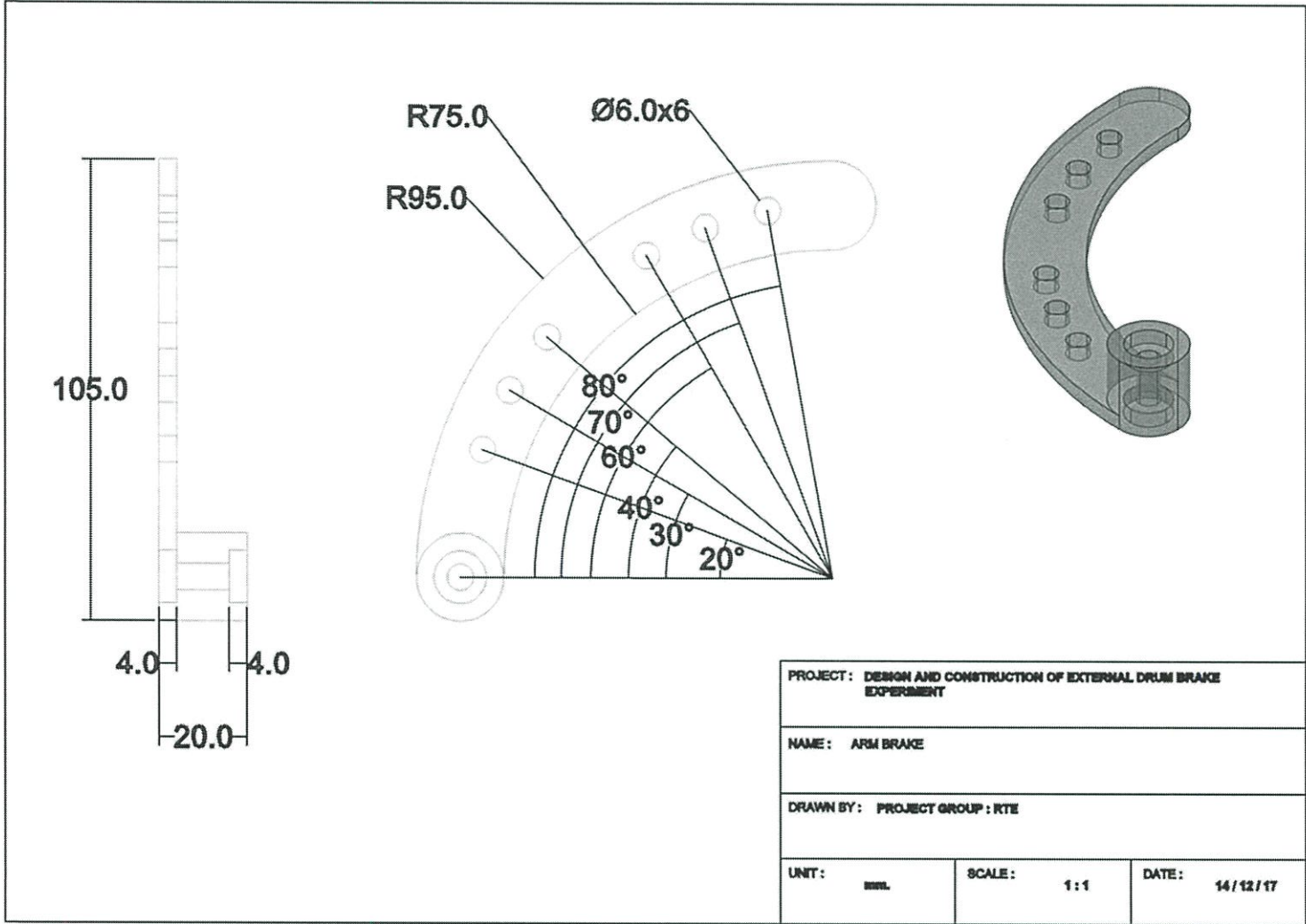


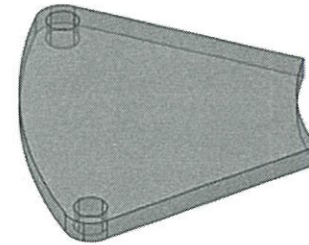
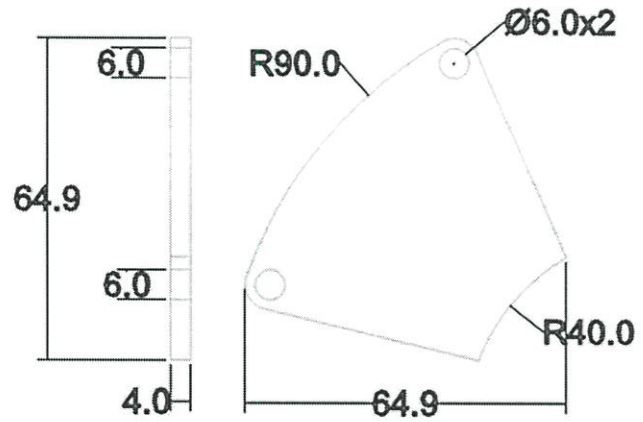
PROJECT : DESIGN AND CONSTRUCTION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENT		
NAME : DRUM 2		
DRAWN BY : PROJECT GROUP : RTE		
UNIT : mm.	SCALE : 1 : 1	DATE : 14 / 12 / 17



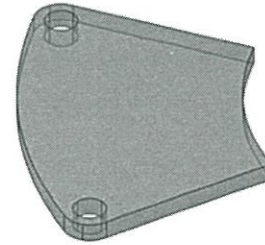
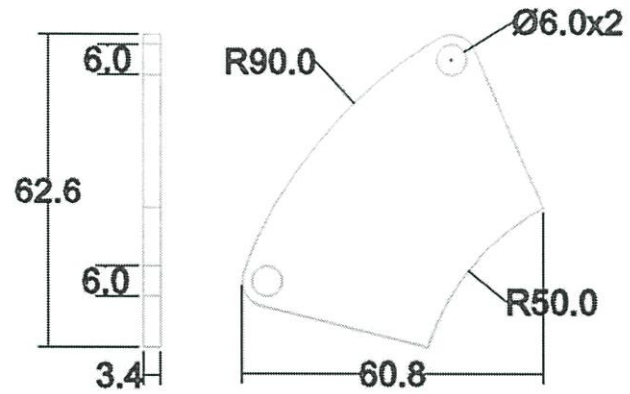








PROJECT: DESIGN AND CONSTRUCTION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENT		
NAME: BRAKE SHOE 1		
DRAWN BY: PROJECT GROUP: RTE		
UNIT: mm.	SCALE: 1:1	DATE: 14/12/17



PROJECT: DESIGN AND CONSTRUCTION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENT

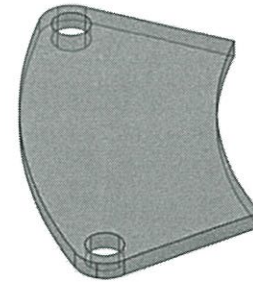
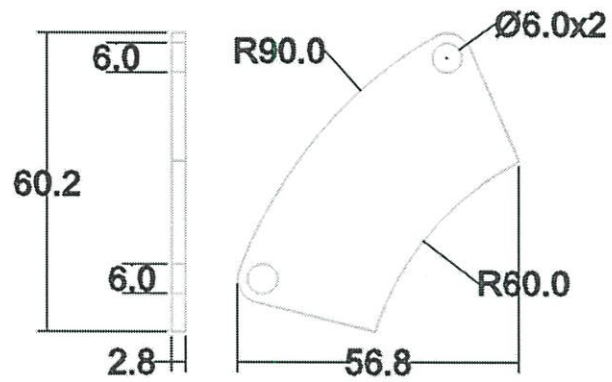
NAME: BRAKE SHOE 2

DRAWN BY: PROJECT GROUP : RTE

UNIT: mm.

SCALE: 1:1

DATE: 14/12/17



PROJECT : DESIGN AND CONSTRUCTION OF EXTERNAL DRUM BRAKE
EXPERIMENT

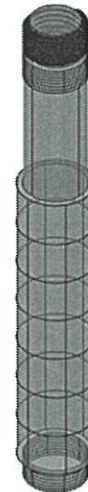
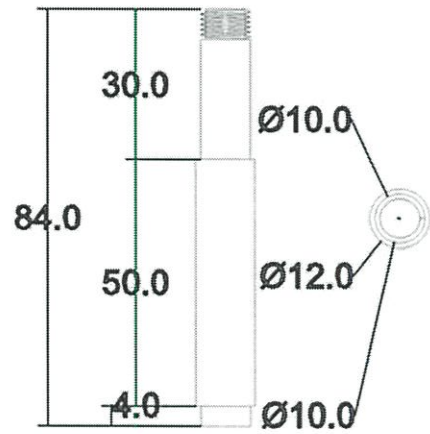
NAME : BRAKE SHOE 3

DRAWN BY : PROJECT GROUP : RTE

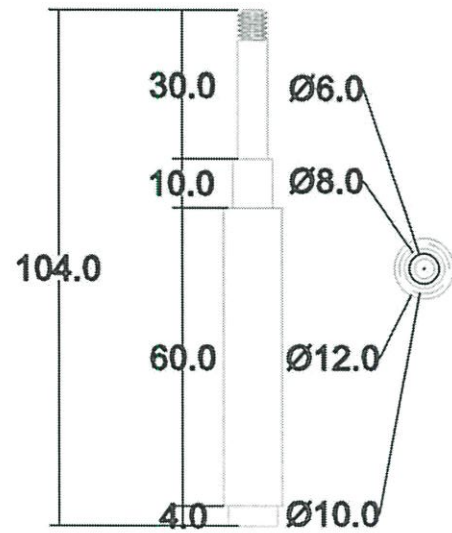
UNIT : mm.

SCALE : 1 : 1

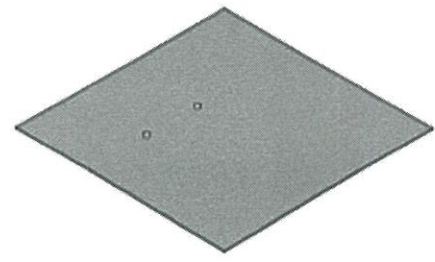
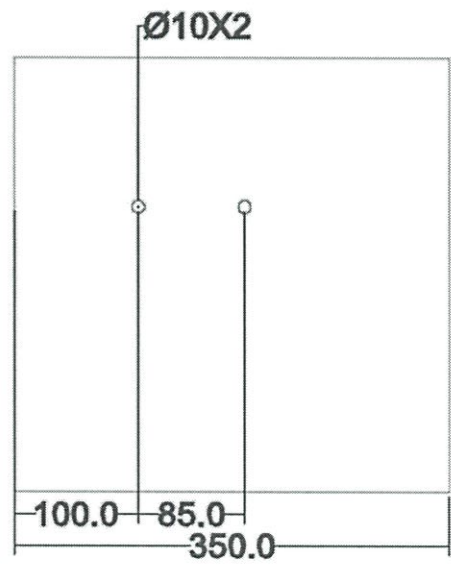
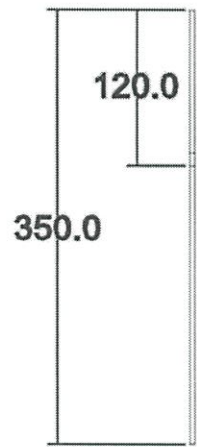
DATE : 14 / 12 / 17



PROJECT : DESIGN AND CONSTRUCTION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENT		
NAME : SHAFT 2		
DRAWN BY : PROJECT GROUP : RTE		
UNIT : mm.	SCALE : 1 : 1	DATE : 14 / 12 / 17



PROJECT : DESIGN AND CONSTRUCTION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENT		
NAME : SHAFT 1		
DRAWN BY : PROJECT GROUP : RTE		
UNIT : mm.	SCALE : 1 : 1	DATE : 14 / 12 / 17



PROJECT : DESIGN AND CONSTRUCTION OF EXTERNAL DRUM BRAKE EXPERIMENT		
NAME : PLATE		
DRAWN BY : PROJECT GROUP : RTE		
UNIT : mm.	SCALE : 1 : 4	DATE : 14 / 12 / 17

บรรณานุกรม

- [1] นายครรชิต คำมูล; นายวิรัตน์ จันทร์กิง และ นายถิรวุฒิ หงส์พิทักษ์ชน. การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความเสียดทานสถิต. ปรินูญานิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาลำปาง, 2557
- [2] ภาณุฤทธิ์ ยุกตะทัด, “การออกแบบเครื่องจักรกล2”, บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2554
- [3] Machine Design II, Prof. K.Gopinath & Prof.M.M.Mayuram
- [4] บริษัท กรุงเทพเหล็กกล้า จำกัด, คุณสมบัติและการใช้งานSS400 [ออนไลน์], 2549.
แหล่งที่มา <http://www.bssteel.co.th/product-detail-SS41.php>.