

ชุดทดลองแรงบนเฟืองตรง

Spur Gears Force Experimental Kit

ธนเวช อุตมวาทีน
ปรัดถกร สีนโต
ศรัณย์พจน์ ไข่มุกข์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ชุดทดลองแรงบนเฟืองตรง

Spur Gears Force Experimental Kit

ธนเวช อุดมวาทีน
ปรัตถกร สีนโต
ศรัณย์พจน์ ไช่มุกข์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

SPUR GEARS FORCE EXPERIMENTAL KIT

TANAWECH UTAMAVATIN
PARATAKORN SINTO
SARANPOD KAIMOOK

BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดทดลองแรงบนเฟืองตรง
SPUR GEARS FORCE EXPERIMENT

ผู้จัดทำ

- | | |
|----------------------------|-----------------------|
| 1. นาย ธนเวช อุตมวาทีน | รหัสประจำตัว 57010571 |
| 2. นาย ปรัตถกร สินโต | รหัสประจำตัว 57010745 |
| 3. นาย ศรัณย์พจน์ ไช้มุกข์ | รหัสประจำตัว 57011216 |



อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิวัฒน์)

ชุดทดลองแรงบนเฟืองตรง

นายธนเวช	อุตมวาทีน	57010571
นายปรัตถกร	สินโต	57010745
นายศรัณย์พจน์	ไข่มุกข์	57011216
ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2560		

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นการจัดทำเกี่ยวกับการออกแบบและจัดทำชุดทดลองที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์แรงที่เฟืองตรงกระทำต่อกันในขณะที่เฟืองกำลังขบกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อ ได้ใช้เป็นชุดทดลอง เพื่อให้สามารถเข้าใจเรื่องการวิเคราะห์แรงขณะที่เฟืองตรงขบกันได้อย่างเข้าใจมากขึ้น โดยจะมีโดยทางกลุ่มของข้าพเจ้าได้มีการออกแบบให้มีการทดลองโดยใช้เฟืองตรง 2 ชุดคือเฟืองขับ กับเฟืองตามซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดทั้งหมด 6 ขนาด แล้วจึงทำการใส่มวลโหลดที่ต่างกัน 5 ค่าเพื่อให้เกิดทอร์กที่เฟืองขับและทำการเปลี่ยนมุมที่เฟืองขบกันทั้งหมด 5 มุม ในแต่ละการขบกันแต่ละครั้งจะส่งผลให้เฟืองที่ขบกันมีแรงเกิดขึ้นในแนวแกนที่ตั้งฉากกัน 2 แนวแล้วจึงนำมาหาแรงลัพธ์ของทั้ง 2 แกนและเทียบค่าจากการคำนวณโดยเมื่อมีการออกแบบได้ตามจุดประสงค์ที่กำหนดไว้แล้วจากนั้นก็จะมี การทดสอบ ปรับปรุงและแก้ไขให้ได้ชุดทดลองที่ได้ค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีมากที่สุด จากนั้นมีการเลือกและจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อจัดทำชุดทดลองขึ้น เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานได้จริง นอกจากนั้นแล้ว ยังมีการจัดทำเอกสารประกอบการทดลองขึ้น เพื่อให้นักศึกษาที่ทำการทดลองสามารถเข้าใจจุดประสงค์ของการทดลองและเข้าใจวิธีการทดลอง โดยเมื่อได้ทำการทดลองชุดทดลองที่ได้จัดทำขึ้นในทุกกรณีแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ 20.50 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังเข้าใจพฤติกรรมของแรงที่เกิดบนเฟืองในกรณีต่างๆที่จะส่งผลให้เฟืองเกิดความเสียหายของเฟือง

Spurs Gear Force Experimental kit

Tanawech Utamavatin 57010571

Paratakorn Sinto 57010745

Saranpod Kaimook 57011216

Asst.Prof. Dr. Akapot Tantrapiwat Advisor

Year 2017

ABSTRACT

The thesis is the design and development of experimental kit for analyzing force of spur gear when gear transmits power. The purpose is to be used as an experimental kit in order to more understanding. The equipment is designed to work with a set of two spur gears. There are 6 sizes of gears and 5 different loads are applied to generate torque including changing 5 attack angles of gear. In each tests will result force in gear are formed in perpendicular of two-axis. A calculation of value from theory is compared. When the equipment was designed and fabricated. Then it was tasted to receive the nearest result according to the theory. The experimental kit has percentage of relative error 20.50 percent. The experimental kit can make student to behavior of force on spur gear in all case.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ รวมถึงให้คำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้จัดทำตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ คุณจุลวิษณุ มาฟัก และคุณเจตจำนงค์ เกษประดิษฐ์ ช่างเทคนิคประจำภาควิชาเครื่องกลที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการให้ยืมเครื่องมือทางการช่าง รวมถึงสถานที่ที่ใช้ปฏิบัติงาน ทำให้คณะผู้จัดทำสะดวกในการทำงานอย่างมาก

ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน รวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ที่กรุณาสละเวลาเอื้อเฟื้อมาช่วยงานและให้ความร่วมมือต่างๆที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงการฉบับนี้มีความสำเร็จลุล่วงโดยดี

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้จัดทำเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และคุณค่าอันพึงมาจากงาน ปริญญานิพนธ์ชิ้นนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบงานชิ้นนี้เป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และวางรากฐานการศึกษาแก่คณะผู้จัดทำ รวมถึง ขอมอบงานชิ้นนี้ให้ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อไว้ให้นักศึกษารุ่นหลังใช้ศึกษาในภายภาคหน้าต่อไป

นายธนเวช อุตมวาทีน

นายปรัตถกร สินโต

นายศรัณย์พจน์ ไข่มุกข์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย	2
1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เฟืองตรง	5
2.1.1 ความรู้พื้นฐานของเฟืองตรง	5
2.1.2 องค์ประกอบพื้นฐานของเฟืองตรง	6
2.2 การวิเคราะห์แรงในเฟืองตรง	8
2.2.1 แรงบิด	11
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดลอง	13
3.1 บทนำของการออกแบบชุดทดลอง	13
3.2 ขั้นตอนการออกแบบชุดทดลอง	13
3.3 การเลือกเครื่องมือวัดขนาดแรงและเลือกวัสดุ	13
3.3.1 ตาชั่งสปริง	13
3.3.2 Linear guide	14
3.3.3 Aluminium profile	15
3.4 การเลือกเฟืองตรง	16

3.5 การเลียดขนาดของโหนดที่ใส่	17
3.6 แบบชุดทดลอง	18
3.6.1 ส่วนวัดแรง	18
3.6.2 ส่วนเฟืองขับ	19
3.7 ผังวัตถุอิสระ (Free Body Diagram)	21
บทที่ 4 ผลการทดลอง	24
4.1 บทนำผลการทดลอง	24
4.2 ทดสอบความเที่ยงตรงของตาชั่งสปริง	24
4.3 ทดสอบค่าที่ใช้ในการทดลองในทุกกรณีของชุดทดลอง	25
4.2.1 วิธีการทดลอง	25
4.2.2 ผลการทดลอง	26
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง	46
5.1 บทนำ	46
5.2 การหาค่าจากการทดลองโดยใช้ทฤษฎี	46
5.3 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดลอง	47
5.3.1 ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในแต่ละกรณี	47
5.3.2 การหาค่าความคลาดเคลื่อน	48
5.3.3 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน	64
5.3.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการแก้ไข	64
5.4 อภิปรายผลการทดลอง	65
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก	67
การทดลองชุดทดลองโดยกลุ่มตัวอย่าง	
ใบงานการทดลอง	
แบบชุดทดลอง	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการศึกษา	3
3.1 แสดงขนาดของเฟืองตรงที่เลือกใช้สำหรับการทดลอง	16
4.1 ตารางแสดงค่าการวัดมวลโดยใช้ตาชั่งสปริง	24
4.2 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1 กิโลกรัม	28
4.3 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1.5 กิโลกรัม	29
4.4 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2 กิโลกรัม	29
4.5 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2.5 กิโลกรัม	29
4.6 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 3 กิโลกรัม	30
4.7 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1 กิโลกรัม	30
4.8 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1.5 กิโลกรัม	30
4.9 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2 กิโลกรัม	31
4.10 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2.5 กิโลกรัม	31
4.11 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 3 กิโลกรัม	31
4.12 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1 กิโลกรัม	32
4.13 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1.5 กิโลกรัม	32
4.14 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2 กิโลกรัม	32
4.15 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2.5 กิโลกรัม	33
4.16 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 3 กิโลกรัม	33
4.17 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1 กิโลกรัม	33
4.18 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1.5 กิโลกรัม	34
4.19 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2 กิโลกรัม	34
4.20 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2.5 กิโลกรัม	34
4.21 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 3 กิโลกรัม	35
4.22 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 0 องศา	35
4.23 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 30 องศา	36
4.24 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 45 องศา	36
4.25 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 60 องศา	37

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบทั่วไปของเฟืองตรง	6
2.2 เฟืองขับและเฟืองตาม	6
2.3 ชื่อตำแหน่งต่างๆของเฟืองตรง	8
2.4 ผังวัตถุอิสระที่แสดงแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อเฟือง	9
2.5 แรงกระทำบนพีเนียน	10
2.6 เฟืองในขณะสัมผัสกัน	10
2.7 แรงที่เกิดบนเฟืองตาม	11
3.1 ตาซิ่งสปริง	14
3.2 โครงสร้างพื้นฐานของ Linear guide	14
3.3 Linear guide	15
3.4 V-Slot Aluminium profile	15
3.5 เฟืองตรงที่ใช้	17
3.6 ส่วนวัดแรง	19
3.7 ส่วนเฟืองขับ	19
3.8 แบบชุดทดลอง	20
3.9 ชุดทดลองจริง	20
3.10 ผังวัตถุอิสระส่วนเฟืองขับ	21
3.11 ผังวัตถุอิสระของเฟืองตาม 1	21
3.12 ผังวัตถุอิสระของเฟืองตาม 2	22
3.13 ผังวัตถุอิสระของแท่งรับแรง 1	22
3.14 ผังวัตถุอิสระของแท่งรับแรง 2	23
4.1 วัดมุมตามกรณีที่ต้องการ	25
4.2 ปรับกลไกของส่วนวัดแรง	26
4.3 ใส่น้ำหนัก 0.50 กิโลกรัม	26
4.4 ชันสกรูเพื่อให้เฟืองขับแน่น	27
5.1 แสดงการชกกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มวล 1 กิโลกรัม	48
5.2 แสดงการชกกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มวล 1.5 กิโลกรัม	49
5.3 แสดงการชกกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มวล 2 กิโลกรัม	49
5.4 แสดงการชกกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มวล 2.5 กิโลกรัม	49

5.37 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มุม 30 องศา	61
5.38 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มุม 45 องศา	61
5.39 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มุม 60 องศา	61
5.40 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มุม 90 องศา	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ชิ้นส่วนพื้นฐานสำคัญสำหรับการส่งผ่านกำลังซึ่งนิยมใช้งานอย่างแพร่หลายก็คือ เฟือง ซึ่งมี การพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเป็นพื้นฐานโดยทั่วไปสำหรับการศึกษากลไกในระบบต่างๆ จึงได้จัดทำ ชุดทดลองเพื่อศึกษาเรียนรู้แรงกระทำในแนวต่างๆ บนเฟืองในขณะที่เฟืองทำการขบกันซึ่งแรงนั้นอยู่ใน ระนาบที่ตั้งฉากกัน 2 แกนซึ่งมีผลต่อการออกแบบเพลลาและแบริงที่มารองรับการทำงานของชุด เฟืองที่รับแรง คณะผู้จัดทำเห็นว่าเรื่องดังกล่าวมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนและในบางองค์ประกอบยาก แก่การทำความเข้าใจในหลักการทำงานและมีความสำคัญที่ต้องการอธิบายให้เข้าใจง่าย มี ประสิทธิภาพและถูกต้องตามหลักทฤษฎีเพื่อเพิ่มความรู้หรือประสิทธิภาพในการออกแบบกลไกต่างๆ ได้อย่างดีขึ้น โดยชุดทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้นักศึกษาที่ศึกษาอยู่หรือสนใจมาทำการทดลองได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสร้างชุดทดลองการวิเคราะห์แรงที่เฟืองกระทำต่อกันขณะที่ขบกัน
- 1.2.2 เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับการเรียนหรือการออกแบบได้
- 1.2.3 เพื่อเป็นชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา
- 1.2.4 เพื่อให้เกิดภาพชัดเจนในระบบกลไกที่มีเฟืองเป็นส่วนประกอบได้

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

- 1.3.1 การประกอบและจัดสร้างค้อนข้างที่จะมีความคลาดเคลื่อนกับแบบที่ออกแบบไว้จริง จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง
- 1.3.2 มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบชุดทดลองบ่อยครั้ง เนื่องจากแบบที่ออกมาไม่มีความสมบูรณ์ และเหมาะสมกับการใช้งานที่มากพอ
- 1.3.3 ผู้ที่ทำการทดลองอาจจะได้ค่าที่คลาดเคลื่อนมาก หากใช้วิธีการทดลองที่ผิด
- 1.3.4 เมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ตัวชุดทดลองอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนมาก

1.4 ทฤษฎีใช้ในการวิจัย

การวิเคราะห์แรงในเฟืองตรงซึ่งเป็นทฤษฎีหลักที่ใช้เป็นหลักในการออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามทฤษฎีได้ผลการทดลองที่แม่นยำสามารถใช้ในการศึกษาและการทดลองได้จริง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 เนื้อหาที่จะศึกษา

การออกแบบชุดทดลองสำหรับการศึกษาแรงที่กระทำบนเฟืองตรงทั้ง 2 เฟือง ในขณะที่เฟืองขบกัน โดยจะสนใจเฉพาะแรง 2 แรงในแกนที่ตั้งฉากกัน และนำมาหาแรงลัพธ์ ซึ่งเป็นความรู้จากวิชา Machine Design

1.5.2 ระยะเวลา

ตั้งแต่ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2560 จนถึง ปลายภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2560

1.5.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

1. ตัวแปรต้น

- จำนวนฟันเฟือง จำนวน 6 แบบ ได้แก่ 38, 50, 64, 19, 25 และ 32
- Module ของเฟือง จำนวน 2 module ได้แก่ module 1 และ module 2
- ขนาดของเฟือง จำนวน 3 ขนาด ซึ่งจะมีการจับคู่กันระหว่างเฟือง module 1 และเฟือง module 2 โดยให้เข้าคู่และมีขนาดเท่ากันทั้งหมด 3 คู่
- มวล (ภาระ) ที่ใส่ จำนวน 5 ค่า ได้แก่ 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 กิโลกรัม
- มุมขบที่เปลี่ยน จำนวน 5 มุม ได้แก่ 0° , 30° , 45° , 60° และ 90°

2. ตัวแปรตาม

แรงที่ถ่ายทอดกำลัง(F_t) และ แรงในแนวสัมผัสที่เปลี่ยนไป(F_r)

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษา	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ทำการคัดเลือกหัวข้อที่ทำการศึกษา										
2. ศึกษาข้อมูลของทฤษฎีเฟืองตรง										
3. ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทำชุดทดลอง										
4. ออกแบบชุดการทดลองและรูปแบบการทดลอง										
5. เตรียมอุปกรณ์และประกอบชุดทดลอง										
6. ออกแบบใบงานการทดลอง										
7. ทดสอบการทำงานของชุดทดลอง										

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

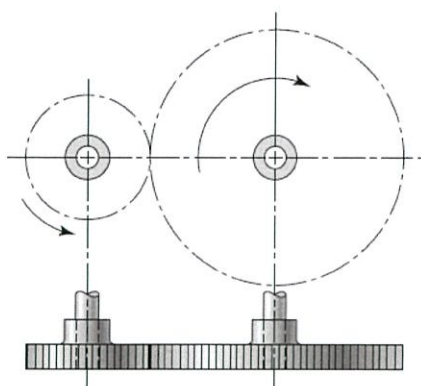
2.1 เฟืองตรง

2.1.1 ความรู้พื้นฐานของเฟืองตรง

เฟืองคืออุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญมีหน้าที่โดยทั่วไปดังนี้

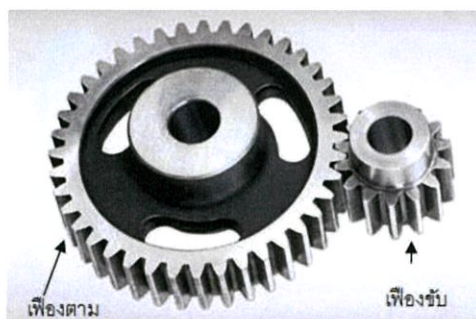
1. เปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่
2. เปลี่ยนแปลงแรงบิด และความเร็ว
3. เปลี่ยนทิศทางการหมุน
4. ส่งกำลังในแนวที่แตกต่าง
5. ป้องกันการหมุนย้อนกลับ

เฟืองตรง (Spur Gears) คือเฟืองที่มีฟันในแนวขนานกับทิศทางการหมุนและใช้ในการส่งกำลังการเคลื่อนที่จากเพลลาที่หนึ่งไปยังอีกเพลลาหนึ่งซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะคือฟันของเฟืองจะเป็นแนวขนานไปกับรูเพลลาโดยเฟืองตรงนั้นเป็นเฟืองที่ง่ายที่สุดจึงมักถูกใช้เป็นเครื่องมือในการส่งผ่านกำลังมากที่สุดเมื่อเทียบกับเฟืองชนิดอื่น



รูปที่ 2.1 รูปแบบทั่วไปของเฟืองตรง (ภาพจาก Shigley's Mechanical Engineering Design
McGraw-Hill 10th Edition หน้าที่ 666 [1])

ซึ่งเฟืองตัวที่ใหญ่กว่าจะเรียกว่า เฟืองตาม (Gears) ส่วนเฟืองที่มีขนาดเล็กกว่าจะเรียกว่า เฟืองขับ (Pinion)



รูปที่ 2.2 เฟืองขับและเฟืองตาม (ภาพจาก

http://1.179.134.197/stem/seabirds/teacher/lesson3/seabird_lesson3/seabird08.php)

2.1.2 องค์ประกอบพื้นฐานของเฟืองตรง

การที่จะให้ฟันเฟืองขบกันได้สนิทไม่มีความฝืดจะต้องให้ฟันเฟืองมีรูปทรงเหมือนกัน ทั้งเฟืองขับและเฟืองตามโดยทั่วไปนั้นการคำนวณในทางทฤษฎีเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟืองนั้นจะใช้ *pitch circle* เป็นหลักจึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางนั้นใช้ *pitch diameter*

circular pitch (p) คือระยะที่วัดบน *pitch circle* จากจุดบนฟันจากฟันหนึ่งไปยังฟันที่ติดกัน โดย *circular pitch* นั้นจะมีค่าเท่ากับค่าของ *tooth thickness* กับ *width of space* เข้าด้วยกัน

$$p = \frac{\pi d}{N} = \pi m \quad : \text{inch. or mm.} \quad (2.1)$$

module (m) คืออัตราส่วนของ *pitch diameter* กับ *number of teeth* มักจะใช้หน่วยเป็นมิลลิเมตร(mm.) โดยโมดูลนั้นก็คืออัตราส่วนของขนาดฟันในหน่วย SI

$$m = \frac{d}{N} \quad : \text{mm.} \quad (2.2)$$

diametral pitch (P) คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนของฟันกับ *pitch diameter* ซึ่งเป็นส่วนกลับของ *module* โดยจะใช้ในหน่วย U.S. เท่านั้นซึ่งจะมีหน่วยเป็น จำนวนฟันต่อนิ้ว

$$P = \frac{N}{d} \quad : \text{teeth per inch.} \quad (2.3)$$

addendum (a) คือระยะที่วัดจาก *top land* จนถึง *pitch circle*

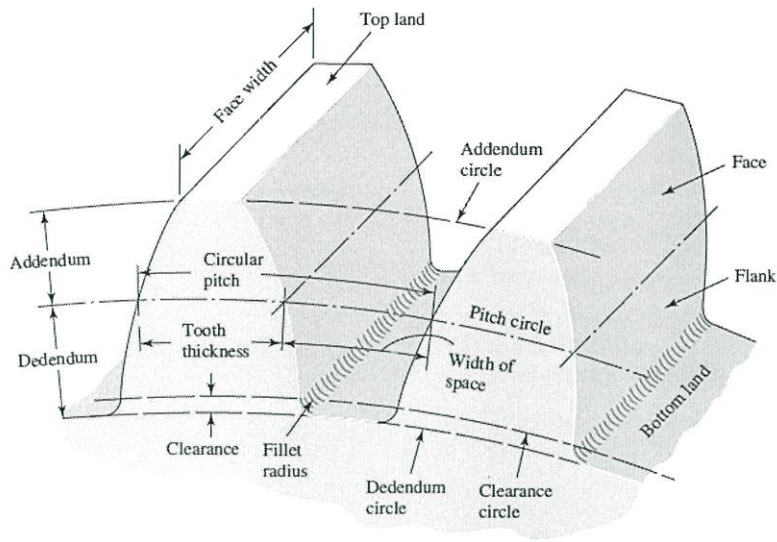
dedendum (d) คือระยะที่วัดจาก *bottom land* จนถึง *pitch circle*

whole depth (h_t) คือผลรวมของ *addendum* กับ *dedendum*

clearance circle คือวงกลมที่สัมผัสกับ *addendum circle* ของเฟืองที่นำมาขับ

clearance (c) คือค่าของ *dedendum* ซึ่งเกินค่า *addendum* ของเกียร์ที่มาจับคู่

backlash คือค่าของ *width of space* ซึ่งมากเกินไปเกินความหนาของฟันที่วัดอยู่บน *pitch circle*



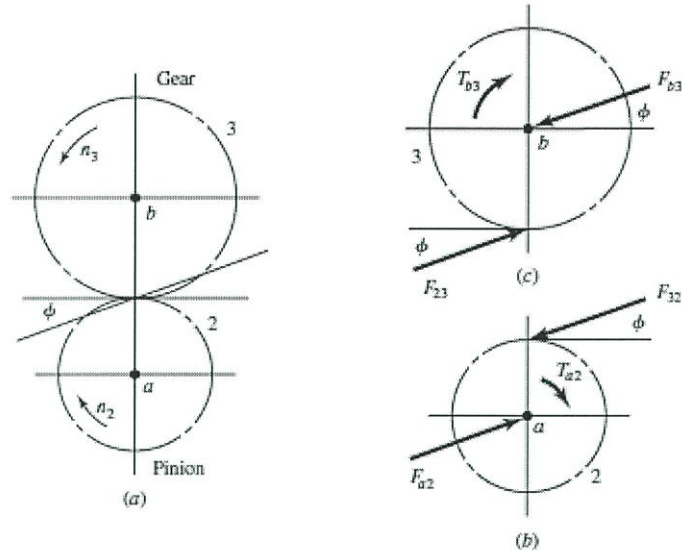
รูปที่ 2.3 ชื่อตำแหน่งต่างๆของเฟืองตรง (ภาพจาก Shigley's Mechanical Engineering Design McGraw-Hill 10th Edition หน้าที่ 668 [1])

2.2 การวิเคราะห์แรงในเฟืองตรง

เริ่มทำการวิเคราะห์แรงที่กระทำที่เกิดขึ้นในเฟือง สัญลักษณ์ที่ใช้แสดงดังนี้ โดยเริ่มจากหมายเลข 1 จะใช้สำหรับกรอบอ้างอิงของโลก (เรเนียนเกียร์) หมายเลข 2 จะใช้แสดงเฟืองต้นกำลังหรือเฟืองขับ และหมายเลข 3, 4, 5, ... จะใช้สำหรับเฟืองที่อยู่ถัดจากเฟืองที่ 2 ไปจนถึงเฟืองตัวสุดท้าย และเมื่อเฟืองมีจำนวนหลายเฟืองก็จะต้องมีเพลลาที่เกี่ยวข้องจำนวนหลายอันเช่นกัน ดังนั้นเราจะใช้ตัวอักษรอังกฤษตัวพิมพ์เล็กตั้งแต่ a, b, c, ... สำหรับแทนเพลลาตั้งแต่เฟืองขับตัวแรกไปยังเฟืองตัวสุดท้าย

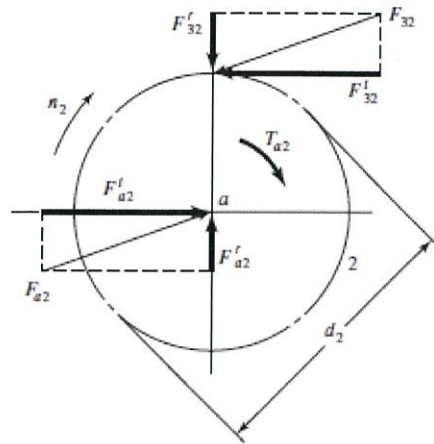
ดังนั้น จากที่เรากำหนดสัญลักษณ์ต่างๆ เราจะเรียกแรงที่เฟือง 2 กระทำกับเฟือง 3 ว่า F_{23} และเรียกแรงที่เฟือง 2 กระทำกับต่อเพลลา a ว่า F_{2a} ในทางกลับกัน ถ้าเราเขียนว่า F_{a2} จะหมายถึงแรงที่เพลลา a กระทำต่อเฟือง 2 และสุดท้ายเราจะใช้ตัวอักษรยก x, y, z ในการบ่งบอกทิศทางของแรงในพิกัดโคออร์ดิเนต และใช้ตัวอักษรยก r และ t สำหรับแสดงทิศทางของแรงในแนวรัศมี และ

ทิศทางการแนวสัมผัส ตามลำดับ โดยจากข้างต้นจะสามารถสรุปได้ว่า เช่น F_{43}^t จะหมายถึงแรงในแนวสัมผัสของเฟือง 4 ที่กระทำต่อ เฟือง 3



รูปที่ 2.4 ผังวัตถุอิสระที่แสดงแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อเฟือง (ภาพจาก Shigley's Mechanical Engineering Design McGraw-Hill 10th Edition หน้าที่ 698 [1])

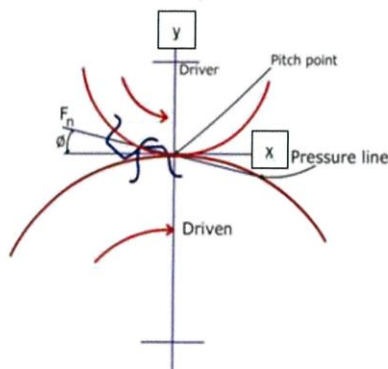
รูป 2.4(a) เฟืองขับ (Pinion) 2 ยึดติดอยู่กับเพลลา a ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว n_2 รอบต่อนาที ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และขับเฟือง 3 ที่อยู่บนเพลลา b ให้หมุนด้วยความเร็ว n_3 รอบต่อนาที แรงปฏิกิริยาระหว่างฟันเฟืองที่ขบกันจะเกิดขึ้นตามแนวเส้น ดังรูป 2.4(b) จะเห็นได้ว่ามีแรง F_{a2} และโมเมนต์บิด T_{a2} จากเพลลา a มากระทำต่อเฟือง 2 และแรง F_{32} จากเฟือง 3 มากระทำต่อเฟือง 2 ในขณะเดียวกันเราสามารถเขียนผังวัตถุอิสระของเฟือง 3 ได้ดังรูปที่ 2.4(c)



รูปที่ 2.5 แรงกระทำบนฟันเฟือง (ภาพจาก Shigley's Mechanical Engineering Design
McGraw-Hill 10th Edition หน้าที่ 699 [1])

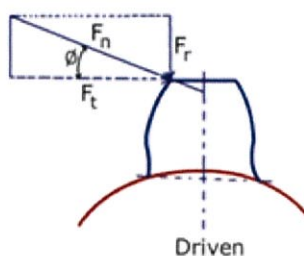
ถ้ากำหนดให้ $W_t = F_{32}^t$ โดยจะเรียกว่า โหลดที่ถูกถ่ายทอดกำลัง จากภาพจะเห็นได้ว่ากำลัง จะถูกส่งถ่ายด้วยแรงในแนวสัมผัส และสำหรับแรงในแนวรัศมี F_{32}^r จะไม่ได้ใช้ในการส่งกำลัง ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับโหลดส่งกำลังจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$T = \frac{d}{2} W_t \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.6 เฟืองในขณะสัมผัสกัน (ภาพจาก <http://nptel.ac.in/courses/116102012/49>)

เมื่อพิจารณาที่เฟืองตามซึ่งเกิดแรงที่ได้รับจากเฟืองขับจะเห็นได้ว่า ขณะที่เฟืองขับหมุนนั้น จะส่งแรงมากระทำต่อเฟืองตาม โดยจะได้แรงทั้งหมด 2 แรงซึ่งแรงที่เกิดขึ้นแรงแรกคือ F^t (Tangential Force) ซึ่ง F^t คือแรงที่ถูกถ่ายทอดหรือไหลดส่งกำลังไปยังเฟืองตาม โดยกำลังทั้งหมด จะถูกส่งถ่ายด้วยแรงในแนวสัมผัสด้วย (แรงกระทำในแนวแกน X) นอกจากนี้ยังมีแรงในแนวรัศมี F^r (Radial Force) ซึ่งแรงในแนวรัศมีนี้จะไม่ใช่ในการส่งกำลัง (แรงกระทำในแนวแกน Y) โดยแรงทั้งสองแรงนี้จะรวมกันเป็นแรงที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่เฟืองขับกระทำต่อเฟืองตาม เรียกว่าแรงลัพธ์ F^n ซึ่งมุมที่แรงลัพธ์เกิดขึ้นนี้จะเท่ากับมุมขับ θ



รูปที่ 2.7 แรงที่เกิดบนเฟืองตาม (ภาพจาก <http://nptel.ac.in/courses/116102012/49>)

โดยแรงทั้งสามแรง F^t , F^r และ F^n มีความสัมพันธ์กับมุม θ ดังนี้

$$F^t = F^n \cos \theta \quad (2.5)$$

$$F^r = F^n \sin \theta \quad (2.6)$$

$$F^r = F^t \tan \theta \quad (2.7)$$

2.2.1 แรงบิด (Torque)

จากข้างต้นพบว่า แรงที่ทำหน้าที่ส่งกำลังจากเฟืองหนึ่งไปยังอีกเฟืองหนึ่ง คือแรง F^t ซึ่งแรงนี้เป็นแรงที่ตั้งฉากกับแนวรัศมีของเฟือง ซึ่งจะสามารถก่อให้เกิดแรงบิด (T) ได้โดยมี

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ถูกถ่ายทอด กับ แรงบิดตั้งสมการดังต่อไปนี้ โดย แรงบิด (Torque) หรือ T มีหน่วยเป็น N-m

$$T = F^t r \text{ หรือ } T = F^t \left(\frac{d}{2}\right) \quad (2.8)$$

โดย r คือ รัศมีของเฟือง

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเฟือง

จากสมการที่ (2.7) ทำให้สามารถหาแรง F_t ได้ตามสมการ

$$F^t = 2 \frac{T}{d} \quad (2.9)$$

จากนั้นเราจะทำการหาค่าแรงลัพธ์ F^n ที่ได้จากการคำนวณจาก F^t และ F^r ตั้งสมการต่อไปนี้

$$F^n = \sqrt{(F^t)^2 + (F^r)^2} \quad (2.10)$$

บทที่ 3

การออกแบบชุดทดลอง

3.1 บทนำของการออกแบบชุดทดลอง

ในการออกแบบชุดทดลองชุดนี้นั้นเป็นการออกแบบให้มีการทดลองที่สามารถให้ค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีรวมถึงออกแบบให้ทำการทดลองได้ง่าย เห็นภาพ และแข็งแรงทนทาน

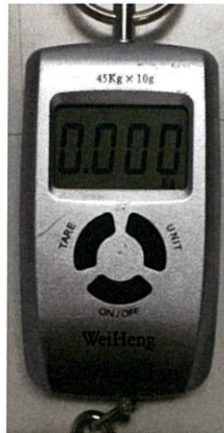
3.2 ขั้นตอนการออกแบบชุดทดลอง

1. กำหนดขนาดโดยไม่ให้เกินโครง คือ 50x79 เซนติเมตร
2. เลือกเครื่องมือวัดขนาดของแรงในแนวแกนทั้ง 2 แกนและเลือกวัสดุ
3. เลือกเฟืองสำหรับชุดทดลอง
4. เลือกขนาดของโหลดที่ใส่
5. แบบชุดทดลอง

3.3 การเลือกเครื่องมือวัดขนาดแรงและเลือกวัสดุ

3.3.1 ตาชั่งสปริง (Spring Gauge)

เครื่องมือที่เลือกใช้ในการวัดนั้นก็คือน้ำหนักชั่งสปริงแบบดิจิตอลโดยมีหลักการทำงานก็คือเปลี่ยนแรงที่ทำให้เกิดการยืดสปริงไปเป็นน้ำหนักแล้วไปแสดงผลบนจออีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่จัดหาได้ง่ายและมีกลไกการใช้งานไม่ซับซ้อนสามารถแสดงผลค่าการทดลองที่เกิดขึ้นได้แบบทันทีซึ่งมีช่วงในการวัดค่าอยู่ที่ 0-45 กิโลกรัม มีความละเอียด 0.10 กรัมเทียบเป็นหน่วยนิวตัน คือ 0-441 นิวตัน

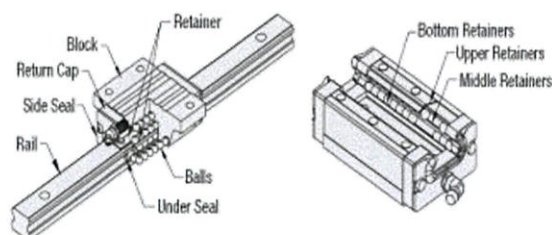


รูปที่ 3.1 ตาชั่งสปริง

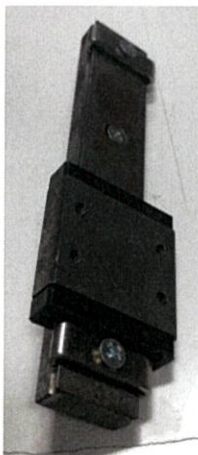
3.3.2 Linear guide

ทำงานได้โดยเคลื่อนที่ของบอล(Balls)ที่อยู่ในบล็อก(Block)ไปตามราง(Rail) ซึ่งมีข้อดีคือ

1. ความแข็งแรงสูงและมีสมดุลดีในทุกทิศทาง ด้วยการใช้ฟรีโพลดเพียงปานกลาง
2. ความเสียดทานระดับปานกลางและมีความสามารถในการจับความสั่นสะเทือน
3. อายุยาวและความเชื่อถือได้สูง
4. ความต้านทานแรงกระแทกสูง



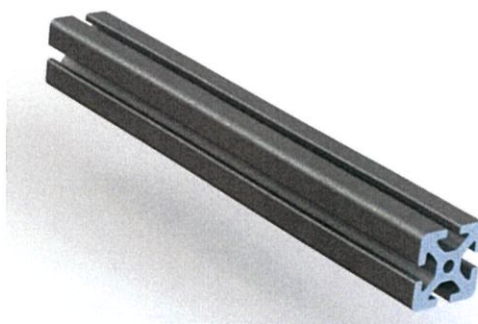
รูปที่ 3.2 โครงสร้างพื้นฐานของ Linear guide (ภาพจาก https://th.misumi-ec.com/maker/misumi/mech/campaign/email20111025/linear_guide.html)



รูปที่ 3.3 Linear guide

3.3.3 Aluminium profile

Aluminium profile คือ อลูมิเนียมที่ผ่านการรีดขึ้นรูปเป็นเส้นยาว เพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานต่างๆได้ ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับอลูมิเนียมที่กล่าวไว้ในข้างต้น ซึ่งทางกลุ่มได้เลือกใช้ V-Slot Aluminium profile ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งเหล็กยาว มีเซาะร่องเป็นราง ทั้ง4ด้านตามความยาวเส้น เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในลักษณะของรางเลื่อนในแนวเส้นตรงเพื่อความแม่นยำ แข็งแรง ลื่น ไม่มีสนิมและที่สำคัญง่ายต่อการติดตั้งใช้งานซึ่งช่วยให้เราสามารถออกแบบอุปกรณ์ต่างๆได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 3.4 V-Slot Aluminium profile

3.4 การเลือกเฟืองตรง

อุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในการทดลองก็คือเฟืองซึ่งคุณสมบัติของเครื่องที่เราเลือกใช้นั้นจะต้องเป็นไปตามขนาดของชุดทดลองที่ได้วางแผนไว้ และมีน้ำหนักของเฟือง ที่เหมาะสมไม่ทำให้โครงสร้างหลักรับมวลจนเกิดความเสียหายสะสมในระยะยาวได้จึงเลือกขนาดตามตาราง

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของเฟืองตรงที่เลือกใช้สำหรับการทดลอง

	Number of teeth	Pitch Diameter (mm.)	Bore (mm.)	Outside Diameter (mm.)	Weight (kg)
Module 1	38	38	10	40	0.14
	50	50	10	52	0.22
	64	64	10	66	0.32
Module 2	19	38	12	42	0.21
	25	50	12	54	0.42
	32	64	12	68	0.63

โดยกำหนดให้เฟืองแรกของแต่ละ Module ซึ่งมีขนาดเล็กสุดทำหน้าที่เป็นเฟืองขับของแต่ละการทดลองชุดนั้น



รูปที่ 3.5 เฟืองตรงที่ใช้

3.5 การเลือกขนาดของโหลดที่ใส่

การเลือกขนาดโหลดที่จะใส่นั้น เราจะคำนึงถึง

- โครงสร้างและขนาดของชุดทดลอง 79x50 cm
- ช่วงการทำงานที่เหมาะสมของตาชั่งสปริง 0-45 kg

ซึ่งเราจะกำหนดขนาดของมวลที่ใส่ โดยไม่ให้กระทบกับโครงสร้างจนเกิดความเสียหาย และนอกจากนี้จะมีการสมมุติค่ามวลที่จะใส่ ทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ 1,000 1,500 2,000 2,500 และ 3,000 กรัม โดยเราจะทำการคำนวณมวลที่ใส่ว่าเกินขนาดที่เราจะคำนึงถึงหรือไม่ โดยใช้สูตร

$$T_1 = F_1 r_1 = T_2 = F_2 r_2 \quad (3.1)$$

โดย T_1 คือแรงบิดที่เฟืองขับ : N-m

F_1 คือ น้ำหนักของมวลที่ใส่ : N

r_1 คือระยะห่างของโบลต์จากจุดศูนย์กลางเฟืองขับ : m.

T_2 คือแรงบิดที่เฟืองตาม : N-m

F_2 คือ แรงลัพธ์ที่ได้จากตาชั่ง : N

r_2 คือรัศมีของเฟืองตาม : m.

ดังนั้น

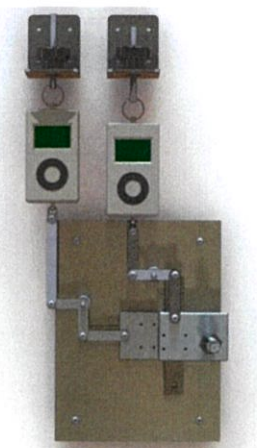
$$F_2 = \frac{F_1 r_1}{r_2} \quad (3.2)$$

3.6 แบบชุดทดลอง

กลไกการทำงานของชุดทดลองนั้นแบ่งออกเป็นสองส่วนในการออกแบบ คือ ส่วนชุดเฟืองขับ และส่วนวัดแรงโดยส่วนแรกคือส่วนวัดแรง มีหน้าที่วัดที่ที่กระทำกับเฟืองตามในแต่ละแกนผ่านกลไกที่ออกแบบมาเฉพาะ เพื่อส่งผ่านแรงไปยังเครื่องชั่งสปริง ประกอบด้วย รางสไลด์ กลไก ตาชั่งสปริง แผ่นยึดเฟือง อีกส่วนคือ ส่วนเฟืองขับจะทำหน้าที่ใส่แรงหมุน (Torque) ให้กับเฟืองขับ จะประกอบด้วย มวลโหลด เส้นลวดสลิง โบลต์ยึดเฟือง ลูกปืน ชุดกำหนดตำแหน่งเฟือง

3.6.1 ส่วนวัดแรง

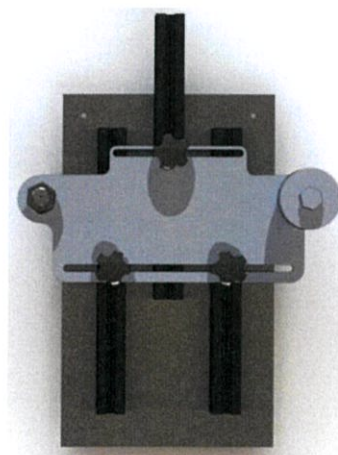
ส่วนที่ทำหน้าที่วัดแรงในแนวแกน 2 แกน โดยจะประกอบไปด้วยตาชั่งสปริงสองตัว ทำหน้าที่วัดแรงแต่ละแกนซึ่งประกอบไปด้วย แรงที่ใช้ส่งกำลัง (Tangential Force) และแรงตามแนวรัศมี (Radial Force) โดยแรงจะทำหน้าที่ต่างกันในแต่ละองศาที่เฟืองขบกัน



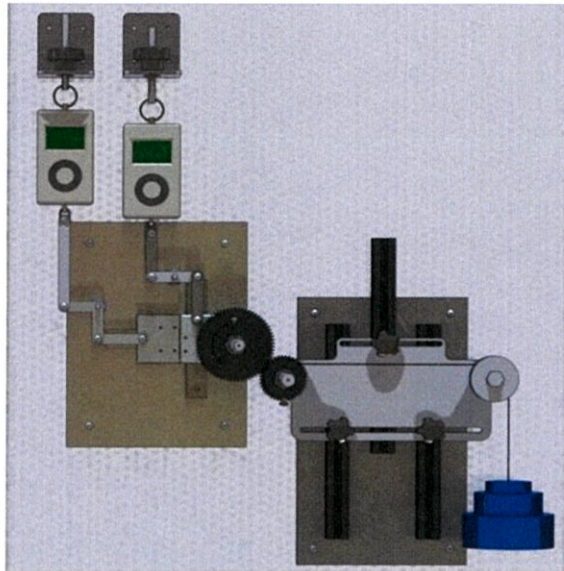
รูปที่ 3.6 ส่วนวัดแรง

3.6.2 ส่วนเฟืองขับ

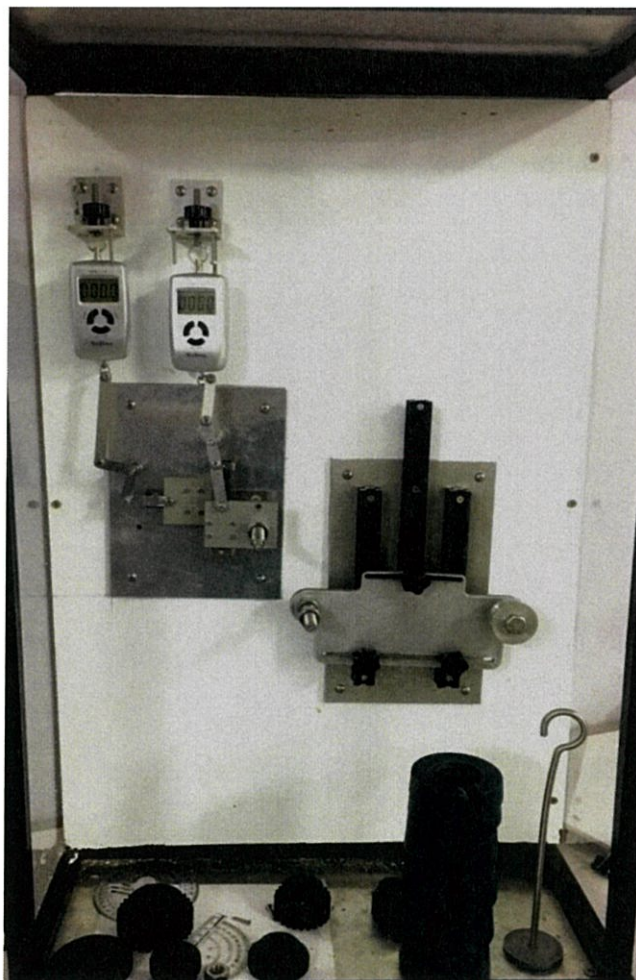
ส่วนที่ให้มวลแก่เฟืองขับโดยจะมีหน้าที่สร้างทอร์กในระบบสมดุลสถิต (Static) โดยใส่โหลดที่เป็นค่าคงที่ลงไป



รูปที่ 3.7 ส่วนเฟืองขับ

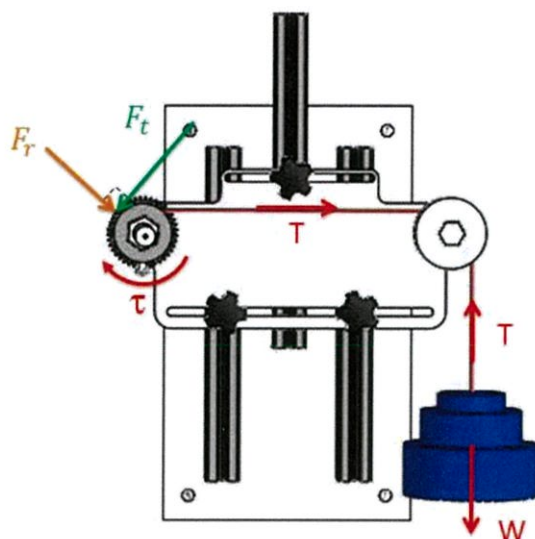


รูปที่ 3.8 แบบชุดทดลอง.

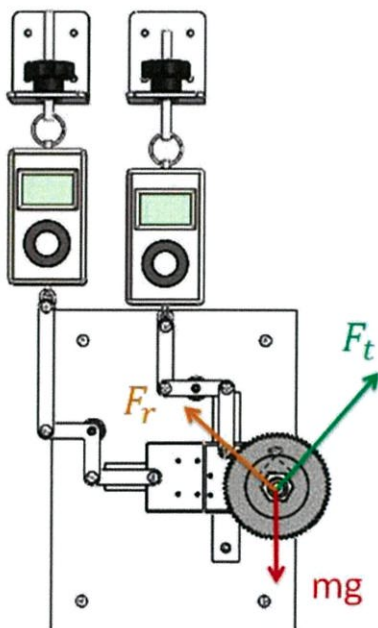


รูปที่ 3.9 ชุดทดลองจริง

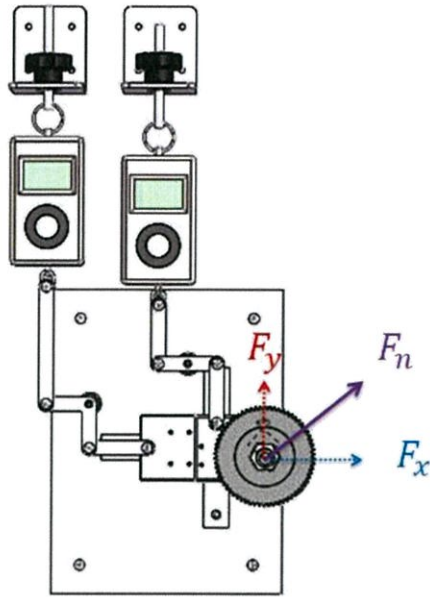
3.7 ผังวัตถุอิสระ (Free Body Diagram)



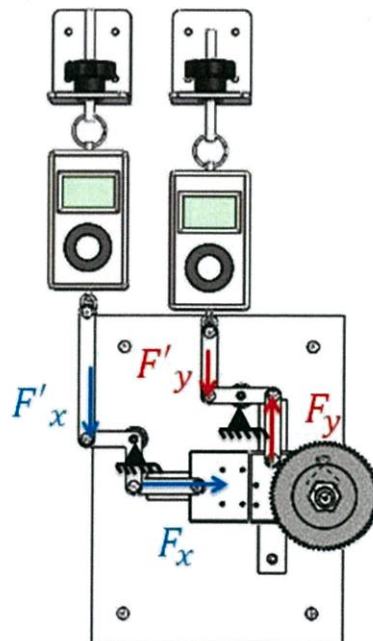
รูปที่ 3.10 ผังวัตถุอิสระเมื่อเริ่มใส่มวล



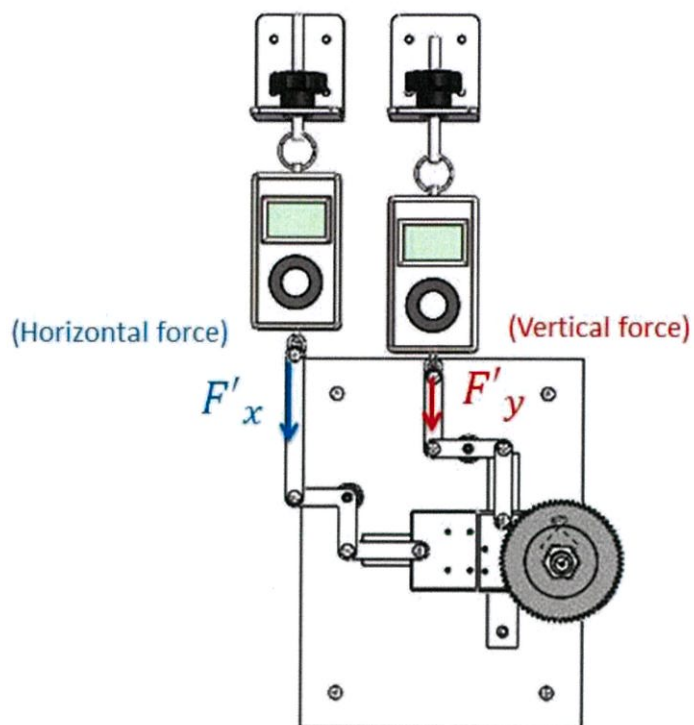
รูปที่ 3.11 ผังวัตถุอิสระของเฟืองตาม 1



รูปที่ 3.12 ผังวัดถลุมอิสระของเฟืองตาม 2



รูปที่ 3.13 ผังวัดถลุมอิสระของแท่งรับแรง 1

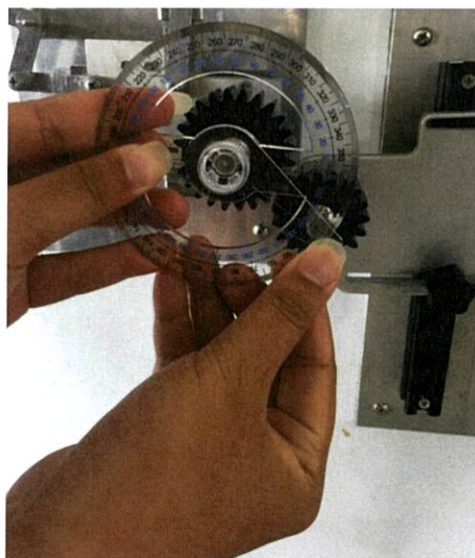


รูปที่ 3.14 ผังวัดคุณสมบัติของแท่งรับแรง 2

4.3 ทดสอบค่าที่ใช้ในการทดลองในทุกกรณีของชุดทดลอง

4.2.1 วิธีการทดลอง

1. เคลื่อนเพลลาเฟืองตามขึ้นไว้ด้านบนสุด แล้วผลักมาทางขวาสุด จากนั้นติดตั้งคลิปค้ำยันไว้ที่ส่วนปลายของราง Liner-motion guide สำหรับวัดแรงในแนวตั้ง
2. ใส่เฟืองตามขนาดที่ต้องการ จากนั้นขันสกรูที่ฮับของเฟืองเพื่อล็อกเฟืองไม่ให้หมุน
3. ใส่เฟืองขับตามขนาดที่ต้องการ
4. ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมขบเฟือง
5. เคลื่อนส่วนรองรับเฟืองขับ โดยให้เฟืองขบกันตามมุมที่กำหนด จากนั้นขันมือหมุนเพื่อล็อก



รูปที่ 4.1 วัดมุมตามกรณีที่ต้องการ

6. ถอดอุปกรณ์วัดมุมขบเฟืองออก ชั้นสกรูเพื่อล็อคเฟืองขับ และถอดคลิปก้ายันออก
7. ติดตั้งที่แขวนมวลที่ปลายของลวดสลิง จากนั้นนำไปพาดไว้ pulley
8. ปรับตั้งกลไกที่อยู่ด้านบนตาชั่งสปริงให้พอดี



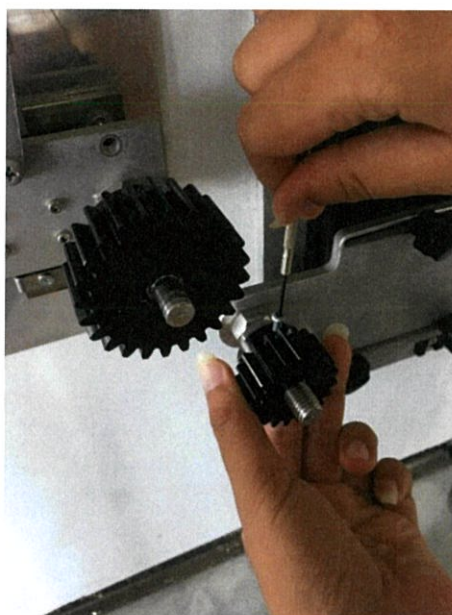
รูปที่ 4.2 ปรับกลไกของส่วนวัดแรง

9. แขนงน้ำหนัก 0.50 กิโลกรัม เพื่อให้เฟืองขบกันได้ตลอดเวลา



รูปที่ 4.3 ใส่ น้ำหนัก 0.50 กิโลกรัม

- 10.เปิดเครื่องชั่งสปริง
- 11.ขันสกรูเพื่อปลดล็อคเฟืองขับ จากนั้นกดปุ่ม Tare บนเครื่องชั่งสปริง
- 12.ขันสกรูเพื่อล็อคเฟืองขับ แขนวน้ำหนักที่ต้องการทดลอง
- 13.ขันสกรูเพื่อปลดล็อคเฟืองขับ



รูปที่ 4.4 ขันสกรูเพื่อให้เฟืองขับแน่น

- 14.อ่านค่าจากเครื่องชั่งสปริง และบันทึกผลการทดลอง
- 15.ขันสกรูเพื่อล็อคเฟืองขับ จากนั้นปลดน้ำหนักทดลองออก
- 16.กรณีต้องการเปลี่ยนน้ำหนักที่ใช้ในการทดลอง ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 11
- 17.จากนั้นขันสกรูเพื่อล็อคเฟืองขับ แล้วปลดน้ำหนักทั้งหมดรวมถึงที่แขวนมวลออกจากปลายลวดสลิง

- 18.ติดตั้งคลิปค้ำยัน ณ ตำแหน่งเดิม
- 19.ชั้นปลดล็อคมือหมุน เพื่อเลื่อนส่วนรองรับเฟืองขับลงมาที่ตำแหน่งล่างสุด จากนั้นชั้นเพื่อให้ล็อกกับที่
20. กรณีต้องการเปลี่ยนมุมทดลอง ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4.
- 21.ชั้นสกรูเพื่อปลดล็อกและถอดเฟืองทั้งหมดออก
- 22.กรณีต้องการเปลี่ยนเฟืองทดลอง ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2.
- 23.ถอดคลิปค้ำยันออก
- 24.สิ้นสุดการทดลอง

4.2.2 ผลการทดลอง

ทำการทดลองตามหัวข้อ 4.2.1 โดยในการทดลองนั้นจะมีทั้งหมด 2 กรณีซึ่งแต่เงื่อนไขนั้นจะทำการทดลอง 4 ครั้ง

- กรณีให้มวล (ใส่น้ำหนักโหลด) คงที่แล้วทำการเปลี่ยนมุมขบจะได้ทั้งหมด 20 ตาราง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	0.46	0.44	0.54	0.50
30	0.24	0.43	0.46	0.43	0.32	0.44	0.53	0.40
45	0.42	0.30	0.39	0.49	0.62	0.56	0.51	0.51
60	0.76	0.66	0.63	0.60	0.21	0.25	0.40	0.24
90	0.54	0.47	0.51	0.53	0	0	0	0

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1.5 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	0.79	0.89	0.84	0.64
30	0.50	0.50	0.61	0.47	0.45	0.70	0.56	0.76
45	0.55	0.56	0.58	0.56	0.72	0.79	0.67	0.63
60	0.78	0.87	0.83	0.89	0.35	0.31	0.39	0.33
90	0.87	0.82	0.86	0.93	0	0	0	0

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	1.20	1.11	1.42	1.32
30	0.77	0.85	0.75	0.56	1.16	0.83	1.13	1.22
45	0.73	0.87	0.82	0.79	0.74	1.17	0.90	0.80
60	1.09	1.13	1.18	1.10	0.60	0.71	0.75	0.63
90	1.07	1.26	1.23	1.31	0	0	0	0

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2.5 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	1.41	1.64	1.22	1.38
30	0.52	0.55	0.68	0.66	1.14	1.25	1.47	1.41
45	0.90	0.93	0.91	0.94	1.11	1.10	1.06	1.03
60	1.32	1.31	1.43	1.46	0.84	0.77	0.79	0.76
90	1.40	1.33	1.28	1.65	0	0	0	0

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 3 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	1.99	1.56	1.43	1.51
30	0.50	0.80	0.56	0.72	1.45	1.87	1.56	1.37
45	1.11	1.21	1.23	1.33	1.32	1.47	1.33	1.50
60	1.55	1.60	1.62	1.52	1.21	1.30	1.27	1.41
90	1.84	1.79	1.87	2.01	0	0	0	0

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	0.39	0.47	0.42	0.36
30	0.36	0.36	0.33	0.34	0.25	0.26	0.27	0.27
45	0.40	0.35	0.35	0.34	0.39	0.36	0.31	0.33
60	0.30	0.44	0.36	0.41	0.21	0.26	0.24	0.30
90	0.42	0.47	0.58	0.43	0	0	0	0

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1.5 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	0.63	0.72	0.82	0.79
30	0.36	0.41	0.38	0.43	0.54	0.55	0.53	0.54
45	0.48	0.46	0.50	0.48	0.53	0.50	0.53	0.52
60	0.55	0.57	0.58	0.60	0.22	0.26	0.23	0.21
90	0.71	0.69	0.80	0.72	0	0	0	0

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	0.99	1.01	0.89	0.91
30	0.52	0.62	0.67	0.62	0.69	0.74	0.71	0.73
45	0.69	0.71	0.73	0.70	0.67	0.72	0.73	0.80
60	0.75	0.79	0.77	0.76	0.50	0.47	0.53	0.51
90	0.97	1.04	0.96	1.01	0	0	0	0

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2.5 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	1.23	1.15	1.10	1.02
30	0.79	0.81	0.74	0.78	0.92	0.91	0.93	0.89
45	0.82	0.82	0.85	0.90	0.82	0.87	0.89	0.92
60	1.04	1.03	1.06	1.02	0.61	0.63	0.67	0.70
90	1.38	1.27	1.28	1.38	0	0	0	0

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 3 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	1.23	1.47	1.34	1.61
30	0.93	1.00	0.96	0.89	1.05	1.14	1.10	1.17
45	1.09	1.08	1.01	1.07	1.00	1.06	1.04	1.13
60	1.10	1.15	1.20	1.22	0.83	0.80	0.85	0.89
90	1.67	1.68	1.59	1.58	0	0	0	0

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	0.56	0.49	0.52	0.48
30	0.41	0.43	0.42	0.40	0.30	0.39	0.41	0.38
45	0.49	0.43	0.44	0.47	0.41	0.50	0.46	0.46
60	0.55	0.65	0.57	0.53	0.36	0.31	0.26	0.21
90	0.46	0.51	0.52	0.48	0	0	0	0

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1.5 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	0.79	0.91	1.00	0.97
30	0.47	0.35	0.52	0.54	0.79	0.84	0.72	0.81
45	0.73	0.78	0.74	0.81	0.70	0.74	0.63	0.74
60	0.80	0.81	0.82	0.79	0.56	0.47	0.49	0.60
90	0.84	0.90	0.83	1.00	0	0	0	0

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	1.22	1.11	1.23	1.33
30	0.74	0.66	0.77	0.79	0.73	0.86	0.82	0.88
45	0.89	0.92	0.93	0.90	0.97	0.96	0.91	0.95
60	1.01	1.05	1.15	1.20	1.07	0.96	0.97	0.86
90	1.31	1.21	1.32	1.22	0	0	0	0

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2.5 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	1.48	1.32	1.21	1.14
30	0.69	0.57	0.50	.60	1.72	1.65	1.60	1.21
45	1.21	1.13	1.19	1.20	1.28	1.22	1.30	0.95
60	1.42	1.09	1.14	1.19	0.95	1.10	0.92	0.98
90	1.41	1.34	1.27	1.52	0	0	0	0

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 3 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	1.92	1.81	1.84	1.79
30	0.79	1.13	0.81	0.82	1.54	1.78	1.62	1.82
45	1.40	1.37	1.42	1.60	1.60	1.43	1.54	1.39
60	1.63	1.43	1.58	1.70	1.29	1.36	1.38	1.31
90	1.72	1.87	1.86	1.98	0	0	0	0

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	0.41	0.39	0.51	0.44
30	0.23	0.27	0.27	0.26	0.26	0.27	0.31	0.37
45	0.39	0.33	0.30	0.29	0.32	0.31	0.29	0.30
60	0.41	0.40	0.39	0.30	0.35	0.32	0.36	0.34
90	0.53	0.47	0.42	0.44	0	0	0	0

ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 1.5 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	0.65	0.72	0.59	0.68
30	0.34	0.35	0.37	0.30	0.75	0.68	0.66	0.75
45	0.63	0.60	0.59	0.58	0.63	0.46	0.52	0.53
60	0.56	0.61	0.54	0.60	0.28	0.30	0.26	0.31
90	0.65	0.71	0.72	0.69	0	0	0	0

ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	0.92	1.02	0.89	1.01
30	0.50	0.52	0.45	0.53	0.75	0.82	0.9	0.82
45	0.67	0.66	0.71	0.72	0.58	0.62	0.63	0.59
60	0.84	0.90	0.88	0.84	0.53	0.57	0.61	0.57
90	0.92	1.04	1.01	0.87	0	0	0	0

ตารางที่ 4.20 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 2.5 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	1.23	1.31	1.18	1.22
30	0.56	0.62	0.51	0.57	0.98	0.99	1.11	0.98
45	0.86	0.87	0.91	0.93	0.78	0.79	0.81	0.82
60	1.05	1.10	1.20	1.01	0.63	0.64	0.59	0.63
90	1.26	1.38	1.16	1.27	0	0	0	0

ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อใส่มวลขนาด 3 กิโลกรัม

มุมขบ (°)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	0	0	0	0	1.42	1.32	1.25	1.67
30	0.67	0.63	0.59	0.60	1.17	1.21	1.22	1.01
45	1.05	0.93	1.12	0.94	0.99	1.01	1.22	1.24
60	1.18	1.22	1.30	1.29	0.63	0.72	0.71	0.70
90	1.49	1.58	1.67	1.73	0	0	0	0

- กรณีให้มุมขบคงที่แล้วทำการเปลี่ยนมวล(น้ำหนักโหลด) เปลี่ยนแปลง
จะได้ทั้งหมด 20 ตาราง

ตารางที่ 4.22 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 0 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0	0	0	0	0.43	0.51	0.39	0.55
1.5	0	0	0	0	0.81	0.79	0.83	0.54
2	0	0	0	0	1.01	1.21	1.11	1.32
2.5	0	0	0	0	1.23	1.45	1.32	1.54
3	0	0	0	0	2.01	1.79	1.82	1.89

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 30 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.39	0.31	0.41	0.43	0.42	0.51	0.44	0.46
1.5	0.51	0.49	0.62	0.53	0.69	0.61	0.56	0.73
2	0.81	0.75	0.76	0.83	1.12	0.98	1.17	1.24
2.5	0.63	0.67	0.59	0.57	1.21	1.32	1.46	1.39
3	0.72	0.74	0.69	0.82	1.51	1.54	1.73	1.61

ตารางที่ 4.24 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 45 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.51	0.48	0.53	0.49	0.47	0.52	0.41	0.50
1.5	0.62	0.63	0.59	0.61	0.71	0.69	0.64	0.76
2	0.78	0.81	0.73	0.80	0.90	1.12	1.02	0.86
2.5	1.01	1.16	0.99	0.93	1.23	1.16	1.19	1.03
3	0.92	1.06	1.02	0.99	1.38	1.54	1.21	1.11

ตารางที่ 4.25 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 60 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.65	0.62	0.64	0.59	0.27	0.34	0.26	0.31
1.5	0.81	0.79	0.77	0.89	0.33	0.36	0.34	0.37
2	1.11	1.19	1.01	1.22	0.74	0.75	0.64	0.67
2.5	1.41	1.39	1.31	1.29	0.79	0.81	0.76	0.83
3	1.59	1.61	1.54	1.60	1.31	1.29	1.40	1.22

ตารางที่ 4.26 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 50 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 90 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.51	0.6	0.41	0.44	0	0	0	0
1.5	0.72	0.75	0.80	0.79	0	0	0	0
2	1.08	1.11	1.04	1.07	0	0	0	0
2.5	1.41	1.33	1.24	1.40	0	0	0	0
3	1.75	1.68	1.77	1.82	0	0	0	0

ตารางที่ 4.27 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 0 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0	0	0	0	0.42	0.51	0.39	0.41
1.5	0	0	0	0	0.69	0.62	0.74	0.66
2	0	0	0	0	1.01	0.99	0.96	1.02
2.5	0	0	0	0	1.22	1.33	1.31	1.29
3	0	0	0	0	1.45	1.62	1.39	1.44

ตารางที่ 4.28 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 30 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.34	0.36	0.35	0.29	0.21	0.31	0.24	0.27
1.5	0.40	0.38	0.44	0.46	0.51	0.49	0.55	0.51
2	0.61	0.59	0.58	0.62	0.81	0.74	0.71	0.72
2.5	0.80	0.81	0.77	0.69	0.90	0.89	0.81	0.93
3	0.89	0.96	0.84	1.00	1.22	1.02	1.21	0.99

ตารางที่ 4.29 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 45 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.41	0.39	0.42	0.33	0.22	0.29	0.22	0.31
1.5	0.49	0.51	0.48	0.46	0.51	0.48	0.52	0.49
2	0.67	0.71	0.69	0.73	0.74	0.71	0.68	0.73
2.5	1.03	1.06	1.11	0.99	0.65	0.71	0.62	0.63
3	1.07	1.00	0.97	1.13	1.13	1.08	1.13	1.05

ตารางที่ 4.30 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 60 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.29	0.31	0.41	0.39	0.20	0.26	0.29	0.27
1.5	0.54	0.49	0.61	0.57	0.24	0.22	0.25	0.29
2	0.74	0.77	0.80	0.71	0.52	0.49	0.52	0.54
2.5	1.06	1.10	1.02	1.06	0.64	0.71	0.69	0.61
3	1.20	1.19	1.09	1.15	0.84	0.87	0.90	0.81

ตารางที่ 4.31 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 90 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.42	0.41	0.5	0.39	0	0	0	0
1.5	0.72	0.69	0.73	0.71	0	0	0	0
2	1.02	1.1	0.99	0.98	0	0	0	0
2.5	1.18	1.22	1.23	1.19	0	0	0	0
3	1.6	1.54	1.49	1.61	0	0	0	0

ตารางที่ 4.32 ผลการทดลองกรณีเฟือง 38 ฟัน กับ 64 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 90 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0	0	0	0	0.49	0.51	0.60	0.52
1.5	0	0	0	0	0.84	0.79	0.73	0.82
2	0	0	0	0	1.21	1.11	1.15	1.24
2.5	0	0	0	0	1.42	1.59	1.31	1.40
3	0	0	0	0	1.82	1.69	1.87	1.88

ตารางที่ 4.33 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 30 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.41	0.42	0.39	0.45	0.39	0.40	0.38	0.29
1.5	0.39	0.52	0.51	0.55	0.71	0.83	0.71	0.80
2	0.69	0.79	0.74	0.73	0.84	0.85	0.79	0.89
2.5	0.61	0.59	0.63	0.54	1.45	1.64	1.58	1.65
3	0.89	1.01	0.99	0.84	1.45	1.78	1.69	1.74

ตารางที่ 4.34 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 45 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.44	0.47	0.50	0.48	0.43	0.45	0.47	0.46
1.5	0.78	0.80	0.76	0.71	0.71	0.72	0.69	0.70
2	0.91	0.89	0.96	0.91	1.00	0.98	0.94	0.96
2.5	1.39	1.17	1.22	1.03	0.99	1.01	0.98	0.96
3	1.56	1.47	1.39	1.41	1.33	1.32	1.40	1.26

ตารางที่ 4.35 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 60 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.57	0.61	0.59	0.54	0.24	0.26	0.32	0.29
1.5	0.82	0.79	0.80	0.83	0.52	0.59	0.49	0.54
2	1.14	1.21	1.04	1.11	0.99	1.00	0.89	0.97
2.5	1.31	1.22	1.35	1.29	0.99	0.97	1.08	0.94
3	1.56	1.64	1.69	1.59	1.32	1.31	1.29	1.40

ตารางที่ 4.36 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 25 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 90 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.44	0.53	0.49	0.55	0	0	0	0
1.5	0.72	0.81	0.89	0.90	0	0	0	0
2	1.12	1.14	1.23	1.26	0	0	0	0
2.5	1.43	1.52	1.32	1.27	0	0	0	0
3	1.71	1.84	1.71	1.91	0	0	0	0

ตารางที่ 4.37 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 0 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0	0	0	0	0.42	0.47	0.39	0.41
1.5	0	0	0	0	0.61	0.56	0.71	0.64
2	0	0	0	0	0.99	1.01	0.89	1.03
2.5	0	0	0	0	1.23	1.27	1.19	1.30
3	0	0	0	0	1.56	1.64	1.58	1.49

ตารางที่ 4.38 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 30 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.26	0.27	0.24	0.30	0.32	0.34	0.29	0.26
1.5	0.34	0.37	0.29	0.39	0.67	0.75	0.68	0.65
2	0.49	0.51	0.46	0.54	0.84	0.79	0.87	0.84
2.5	0.57	0.54	0.60	0.51	0.99	1.04	0.97	1.01
3	0.61	0.64	0.62	0.61	1.20	1.17	1.11	1.23

ตารางที่ 4.39 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 45 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.37	0.33	0.35	0.32	0.34	0.40	0.36	0.32
1.5	0.59	0.61	0.57	0.62	0.59	0.61	0.51	0.52
2	0.70	0.68	0.74	0.65	0.59	0.61	0.62	0.61
2.5	0.88	0.92	0.89	0.91	0.80	0.79	0.77	0.83
3	1.03	0.99	1.08	1.05	1.11	1.09	1.24	1.16

ตารางที่ 4.40 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 60 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.37	0.40	0.36	0.32	0.31	0.37	0.30	0.32
1.5	0.57	0.55	0.62	0.59	0.31	0.29	0.26	0.28
2	0.89	0.92	0.86	0.84	0.57	0.62	0.57	0.54
2.5	1.08	1.18	1.03	1.14	0.63	0.59	0.66	0.63
3	1.29	1.31	1.28	1.22	0.72	0.71	0.80	0.61

ตารางที่ 4.41 ผลการทดลองกรณีเฟือง 19 ฟัน กับ 32 ฟัน เมื่อให้มุมขบมีขนาด 90 องศา

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)				ค่าจากตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.48	0.51	0.52	0.55	0	0	0	0
1.5	0.71	0.65	0.64	0.69	0	0	0	0
2	1.03	0.99	1.01	0.94	0	0	0	0
2.5	1.31	1.22	1.24	1.29	0	0	0	0
3	1.61	1.54	1.69	1.55	0	0	0	0

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

การวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นจะทำโดยหาค่าจากทฤษฎีแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของผลการทดลองซึ่งได้ทดลองเงื่อนไขละ 4 ครั้งจะได้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นโดยจะหาความคลาดเคลื่อนของตาชั่งสปริงเครื่องที่ 1, ตาชั่งสปริงเครื่องที่ 2 และ ค่าลัพท์ของตาชั่งสปริงทั้ง 2 เครื่องในรูปเปอร์เซ็นต์ซึ่งจะสามารถใช้อ้างอิงความน่าเชื่อถือของชุดทดลองได้ รวมถึงยังวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนและวิธีลดความคลาดเคลื่อนลงในชุดทดลอง

5.2 การหาค่าจากการทดลองโดยใช้ทฤษฎี

จากการทดลองในบทที่ 4 สามารถนำค่าที่ได้จากการทดลองมาตรวจสอบได้ โดยใช้ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในบทที่ 2 ในหัวข้อการวิเคราะห์แรงในเฟืองตรง ซึ่งเราจะสามารถหาค่าแรงที่ได้ในแต่ละแนวแกนได้

โดยแรกเราจะทำการหาแรงลัพท์ที่เกิดขึ้นในเฟืองตาม โดยใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$T_1 = T_2 \quad (5.1)$$

$$F_1 r_1 = F_2 r_2 \quad (5.2)$$

$$F_2 = F_n = F_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (5.3)$$

$$F_n = F_1 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (5.4)$$

โดยที่ เลข 1 แสดงถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นบนเฟืองขับ , เลข 2 แสดงถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นบนเฟืองตาม , T คือ แรงบิด , F_2 หรือ F_r คือแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นบนเฟืองตาม , F_1 คือน้ำหนักที่ใส่ , r คือรัศมีของเฟือง และ N คือจำนวนฟันของเฟือง

ต่อมาจะทำการหาแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวแกนของเฟืองตาม โดยใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$F^t = F^n \cos \theta \quad (5.5)$$

$$F^r = F^n \sin \theta \quad (5.6)$$

$$F^r = F^t \tan \theta \quad (5.7)$$

จากสูตรข้างต้นเราสามารถนำมาใช้หาค่าซึ่งจะสามารถหาได้ในหน่วยนิวตันและนำค่าในหน่วยนิวตันมาหารด้วยความเร่งของโลก (9.81 เมตร/วินาที²) จะได้ค่าในหน่วยกิโลกรัมเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากตาชั่งสปริงโดยจะมี 2 กรณี

- กรณีให้มวล(ใส่น้ำหนักโหลด) คงที่แล้วทำการเปลี่ยนมุมขบจะได้ทั้งหมด 20 รูปแบบ
- กรณีให้มุมขบคงที่แล้วทำการเปลี่ยนมวล(น้ำหนักโหลด) เปลี่ยนแปลงจะได้ทั้งหมด 20 รูปแบบ

5.3 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดลอง

5.3.1 ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในแต่ละกรณี

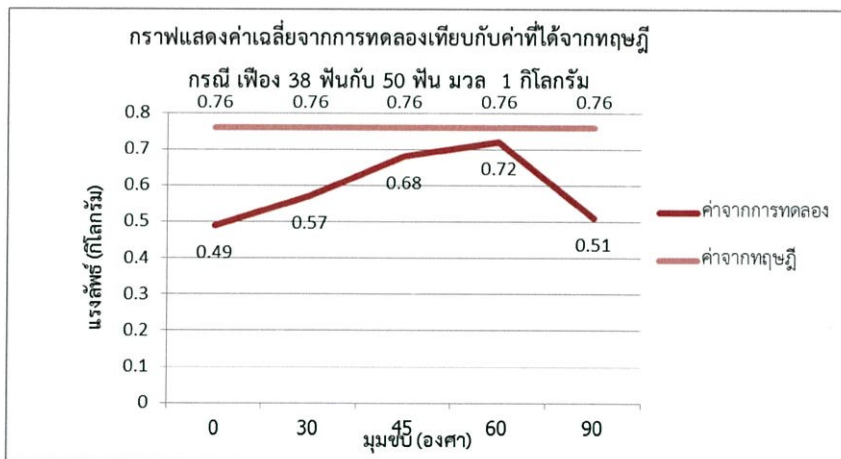
ในการทดลองชุดในแต่ละกรณีซึ่งทำการณิละ 4 ครั้งแล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ย

5.3.2 การหาค่าความคลาดเคลื่อน

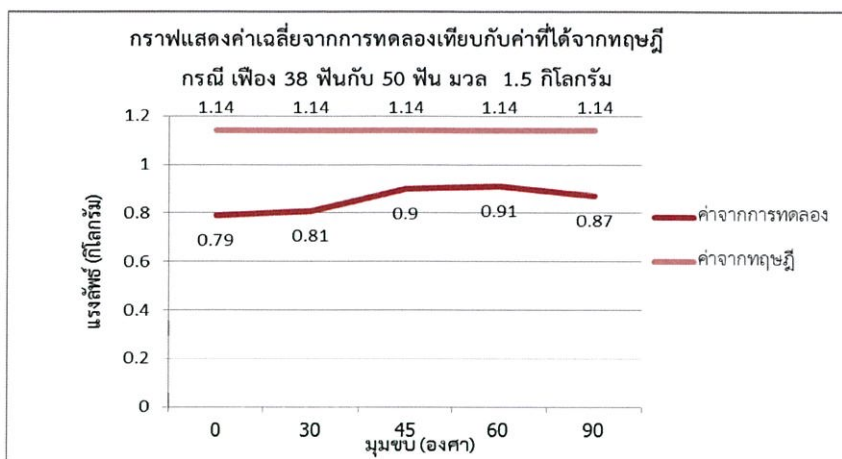
เนื่องจากในการทดลองจริงของชุดทดลอง ย่อมมีค่าที่ได้แตกต่างจากค่าทฤษฎี จึงจะทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดลอง โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงจากบทที่ 4 และใช้ข้อมูลที่ได้จากทฤษฎีในหัวข้อที่ 5.1 มาทำการเปรียบเทียบกันและหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์(%error) โดยจะใช้สูตรในการหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์(\%error)} = \left| \frac{\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าที่ได้จากทฤษฎี}}{\text{ค่าที่ได้จากทฤษฎี}} \right| \times 100\% \quad (5.8)$$

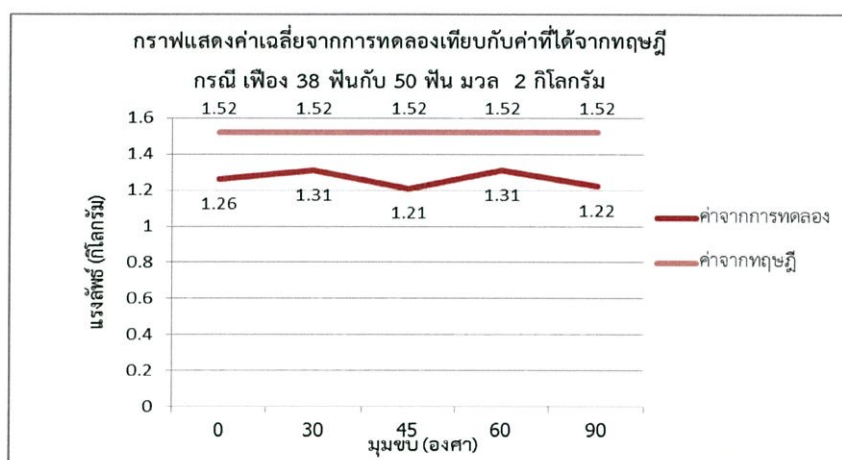
- กรณีให้มวล(ใส่น้ำหนักโหลด) คงที่แล้วทำการเปลี่ยนมุมขบจะค่าเฉลี่ยผลการทดลองและค่าความคลาดเคลื่อนได้ทั้งหมด 20 กราฟ



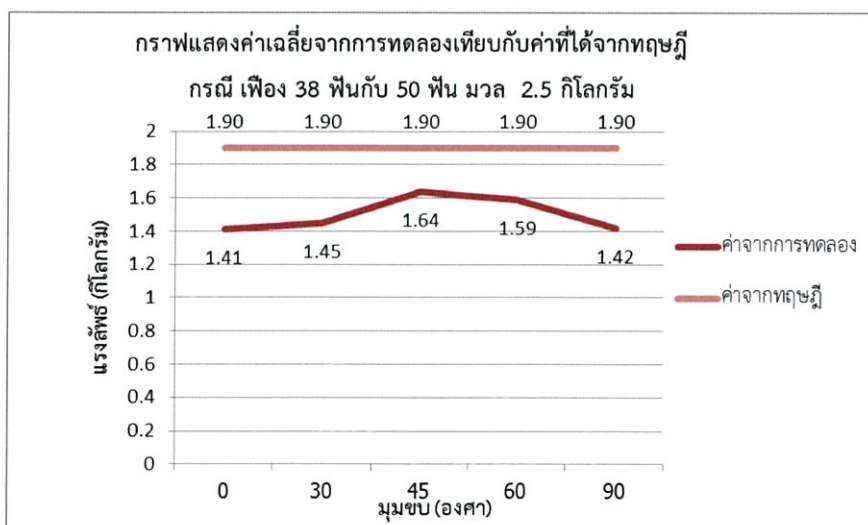
รูปที่ 5.1 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มวล 1 กิโลกรัม



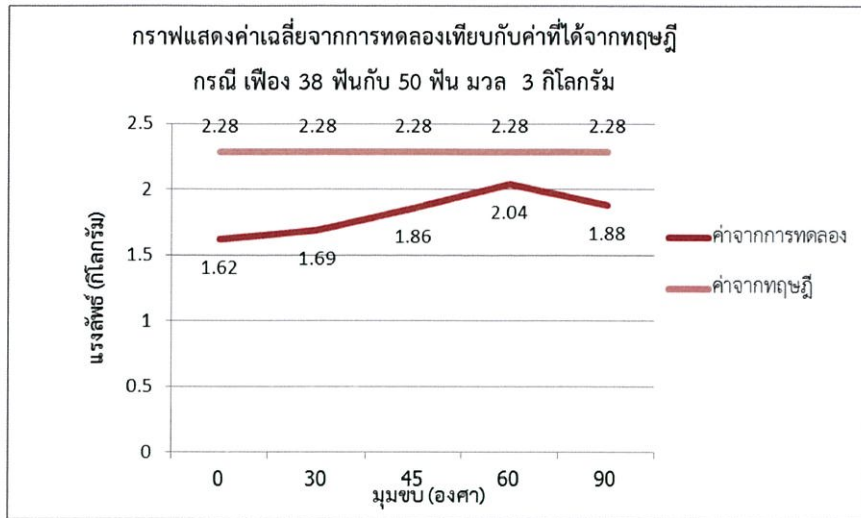
รูปที่ 5.2 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มวล 1.5 กิโลกรัม



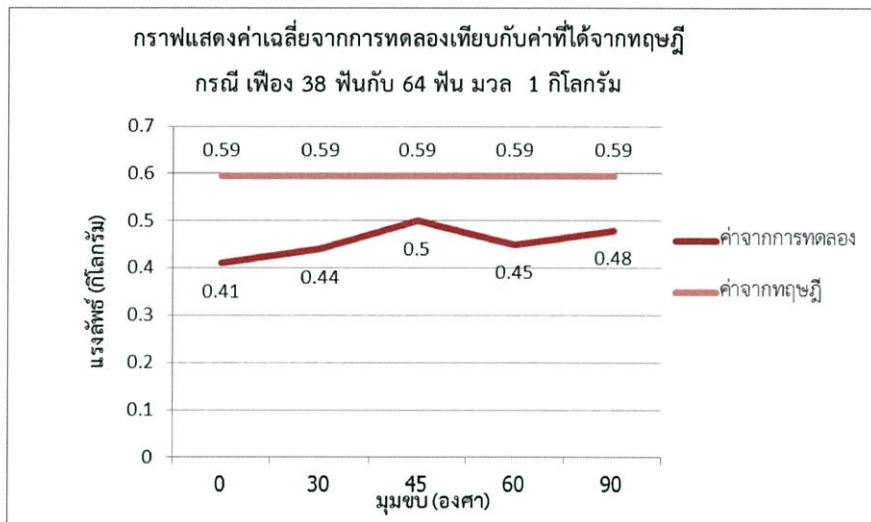
รูปที่ 5.3 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มวล 2 กิโลกรัม



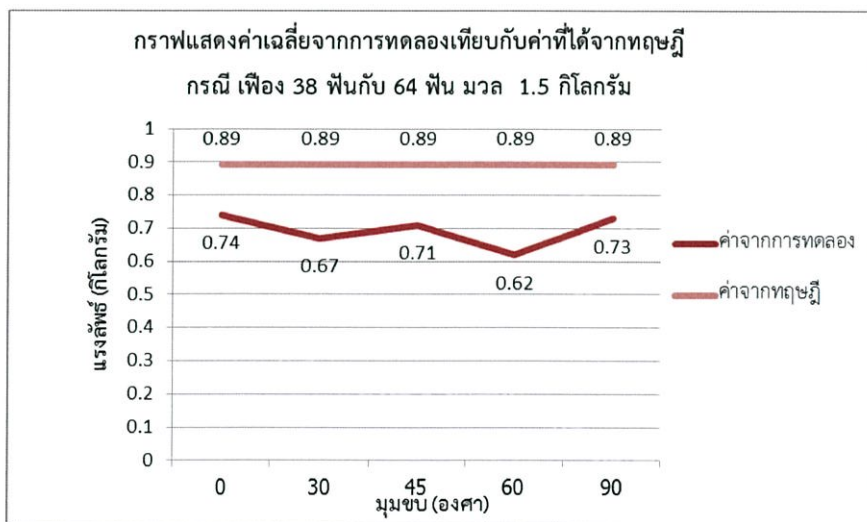
รูปที่ 5.4 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มวล 2.5 กิโลกรัม



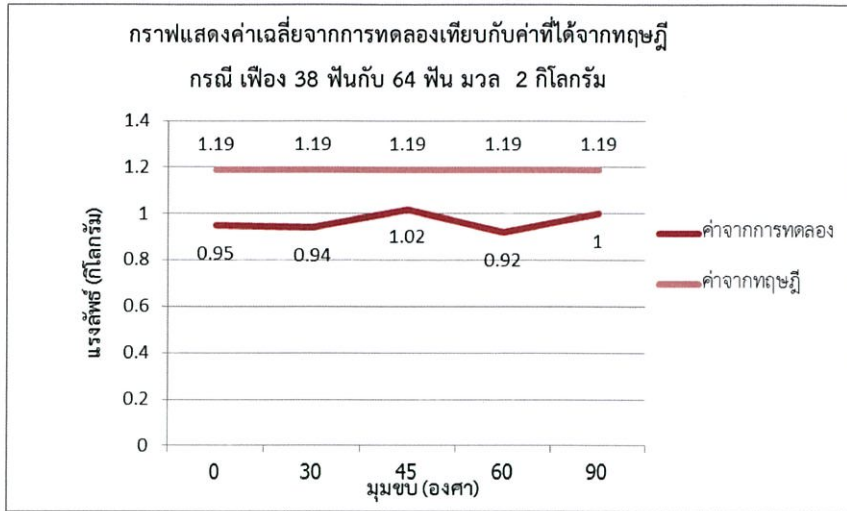
รูปที่ 5.5 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มวล 3 กิโลกรัม



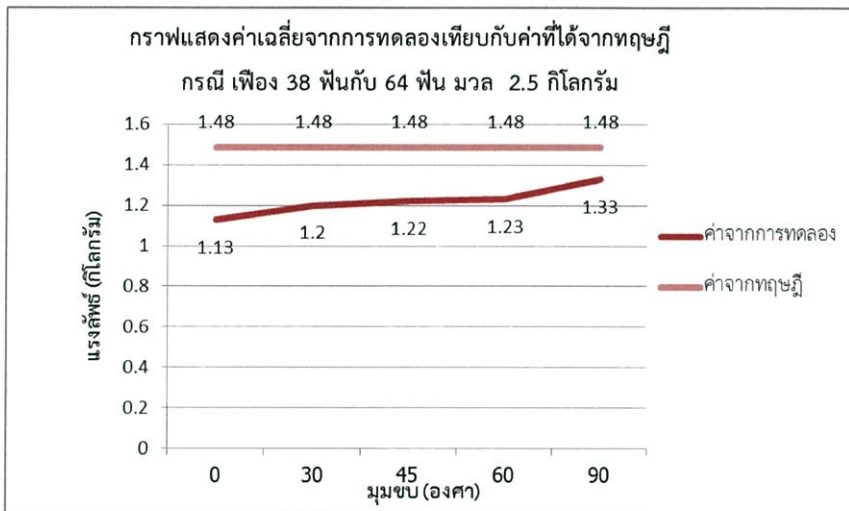
รูปที่ 5.6 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 64 ฟัน มวล 1 กิโลกรัม



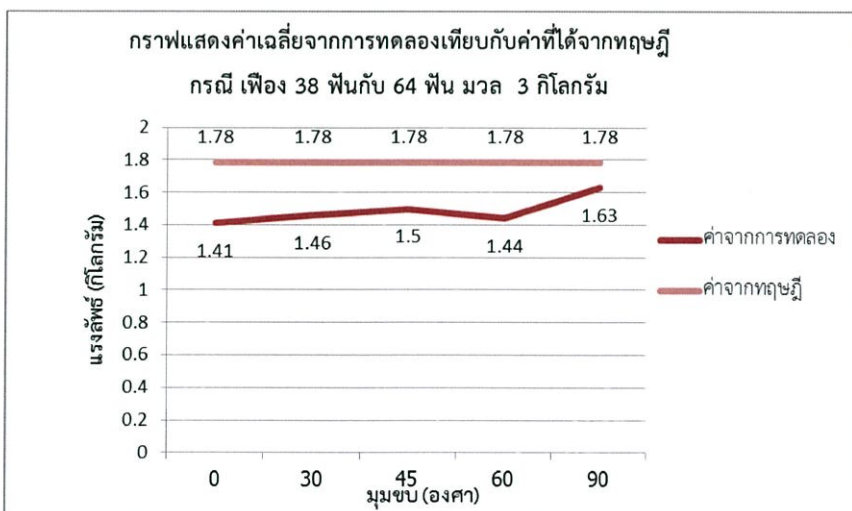
รูปที่ 5.7 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 64 ฟัน มวล 1.5 กิโลกรัม



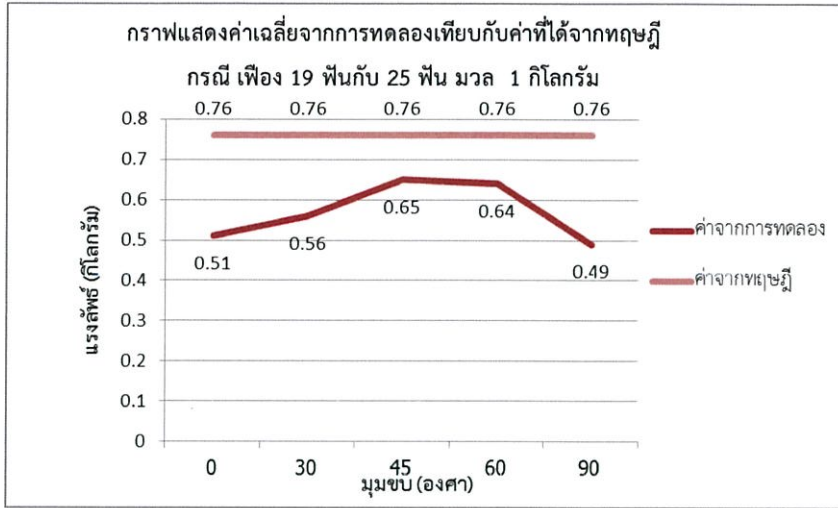
รูปที่ 5.8 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 64 ฟัน มวล 2 กิโลกรัม



รูปที่ 5.9 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 64 ฟัน มวล 2.5 กิโลกรัม



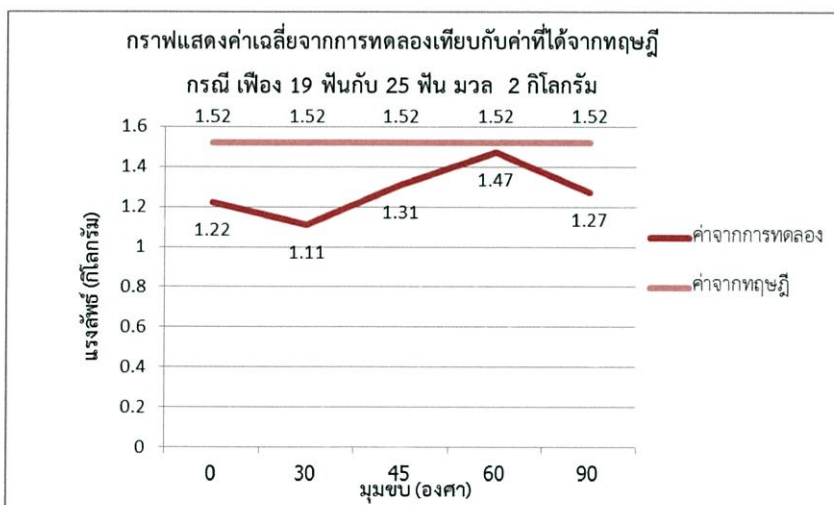
รูปที่ 5.10 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 64 ฟัน มวล 3 กิโลกรัม



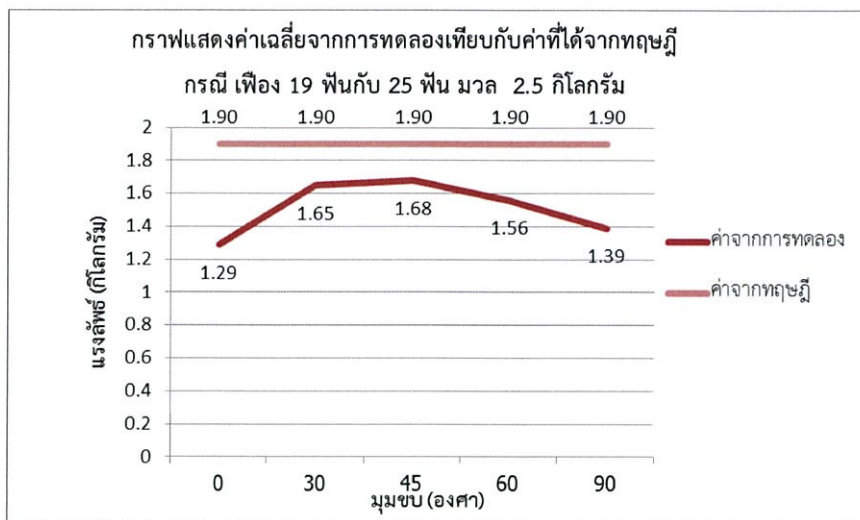
รูปที่ 5.11 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 25 ฟัน มวล 1 กิโลกรัม



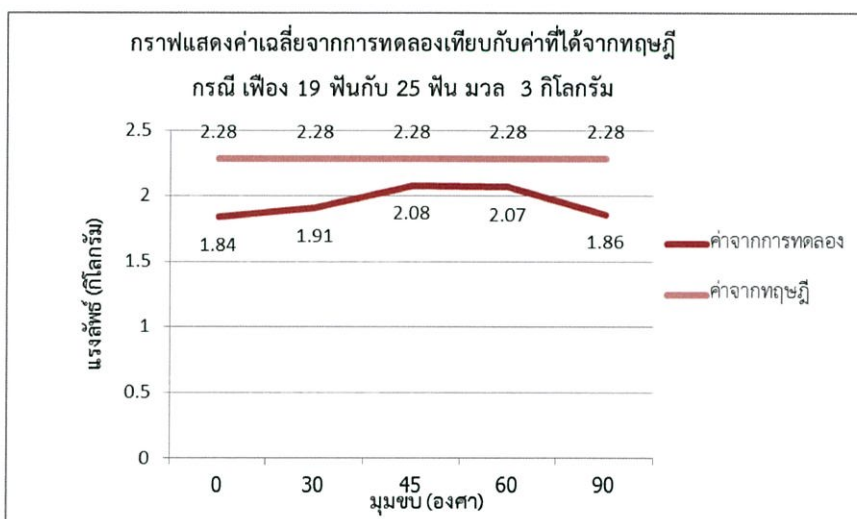
รูปที่ 5.12 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 25 ฟัน มวล 1.5 กิโลกรัม



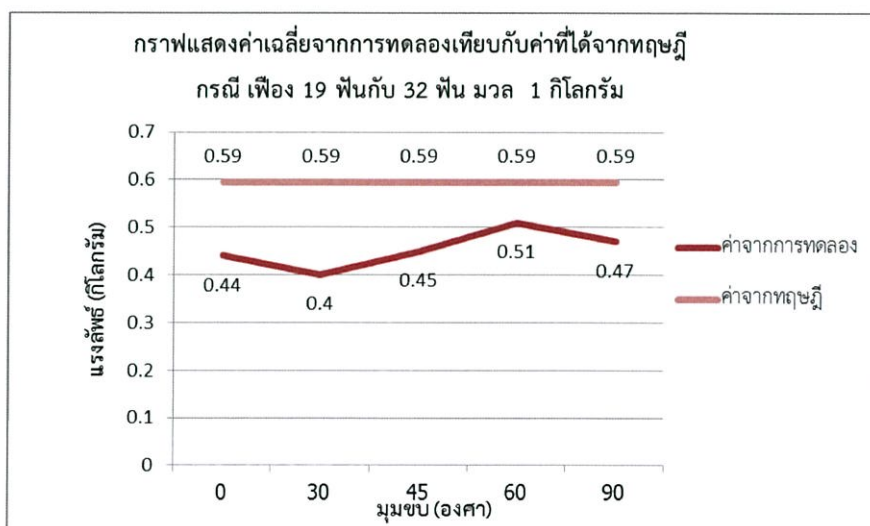
รูปที่ 5.13 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 25 ฟัน มวล 2 กิโลกรัม



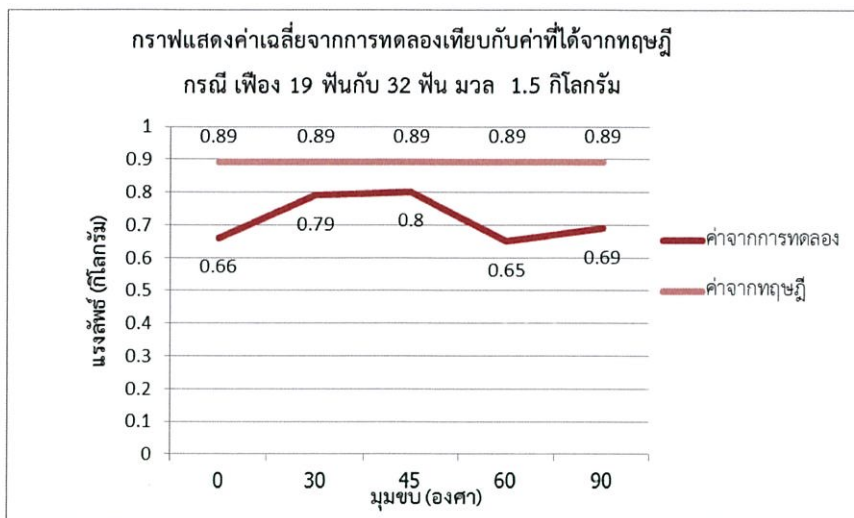
รูปที่ 5.14 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 25 ฟัน มวล 2.5 กิโลกรัม



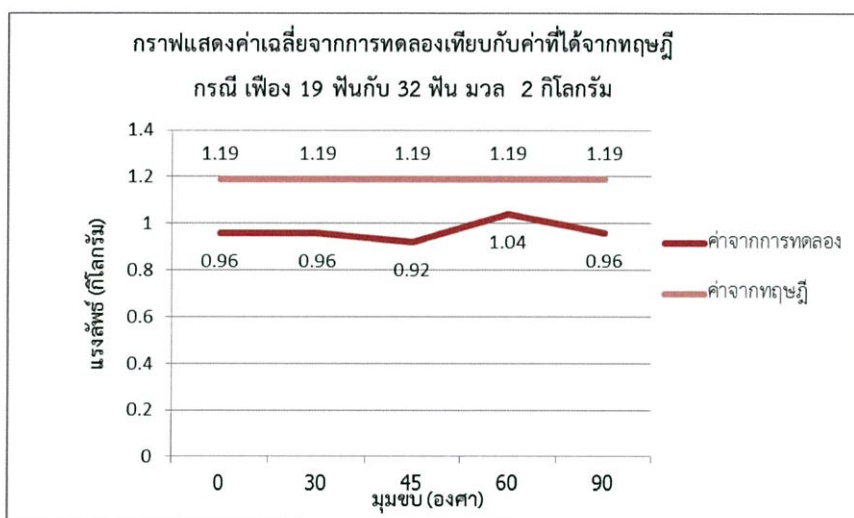
รูปที่ 5.15 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 25 ฟัน มวล 3 กิโลกรัม



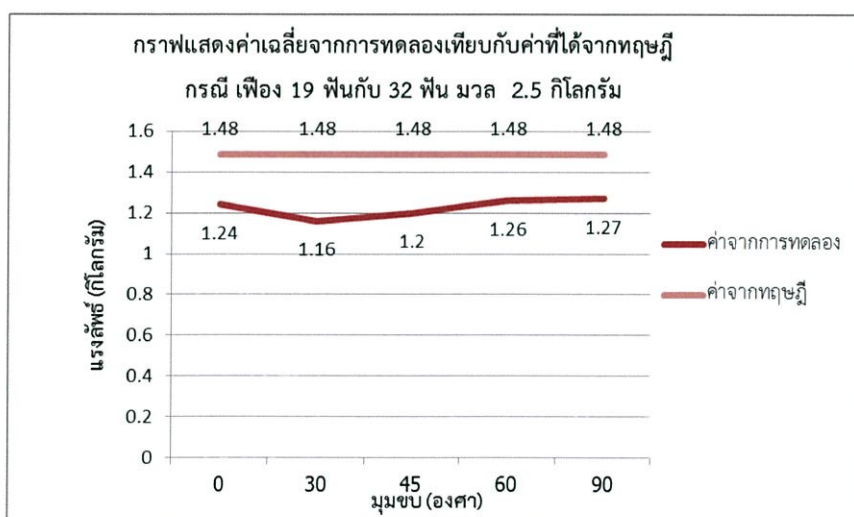
รูปที่ 5.16 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มวล 1 กิโลกรัม



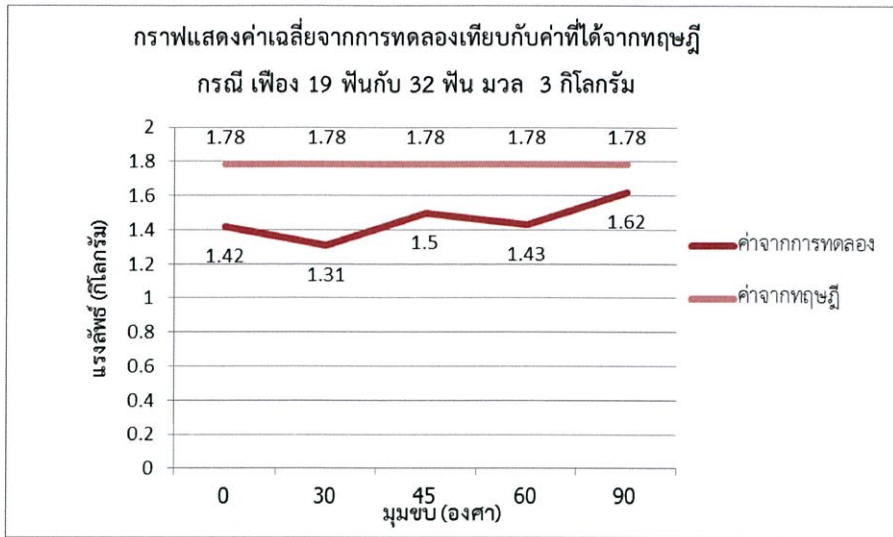
รูปที่ 5.17 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มวล 1.5 กิโลกรัม



รูปที่ 5.18 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มวล 2 กิโลกรัม

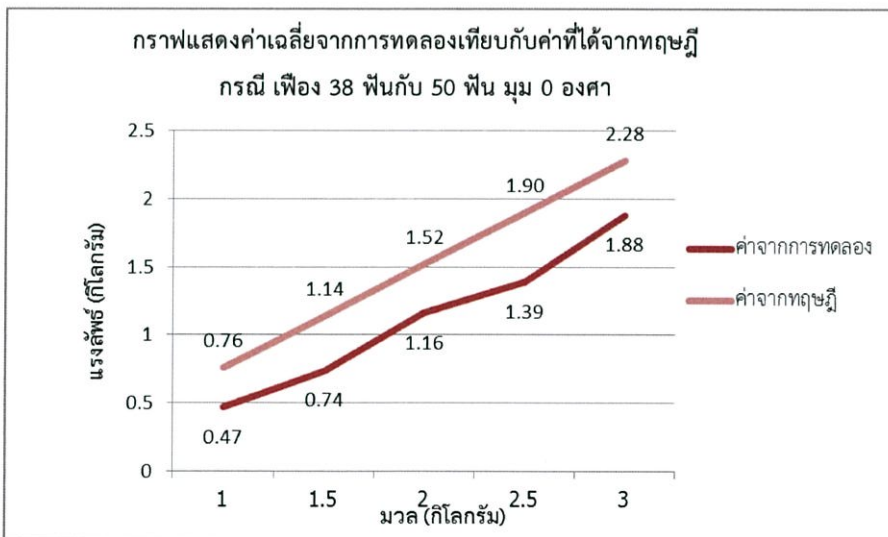


รูปที่ 5.19 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มวล 2.5 กิโลกรัม

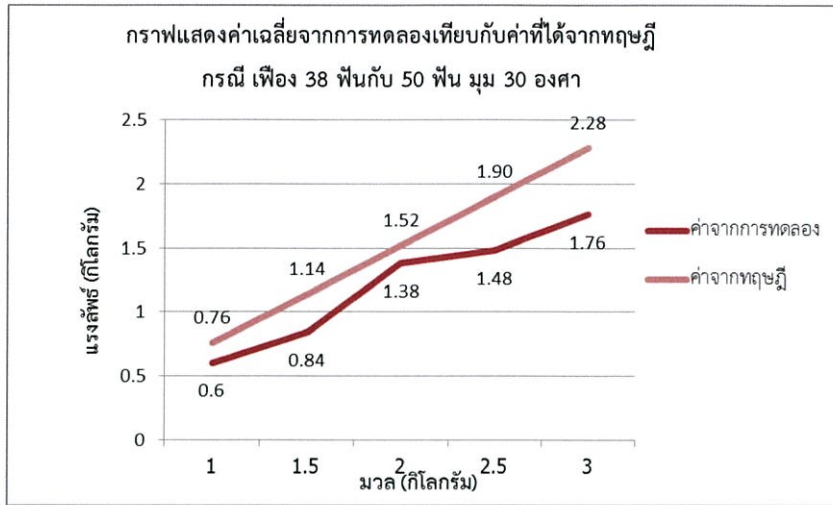


รูปที่ 5.20 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มวล 3 กิโลกรัม

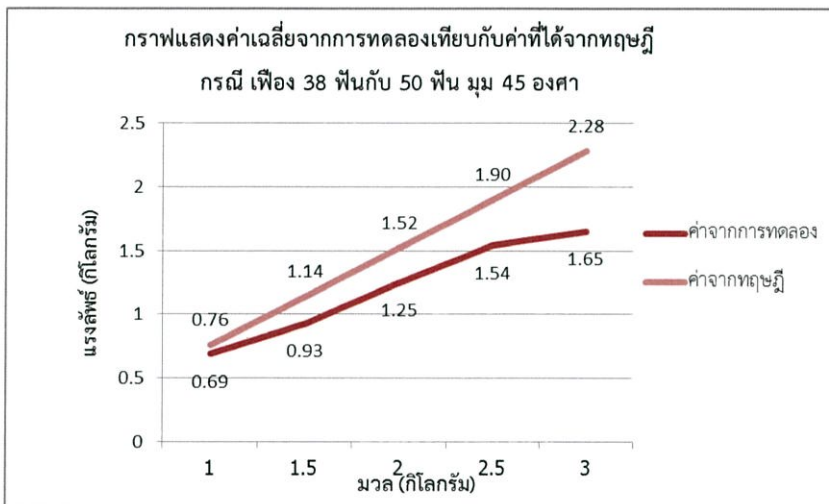
- กรณีให้มุมขบคงที่แล้วทำการเปลี่ยนมวล(น้ำหนักโหลด) เปลี่ยนแปลงจะได้ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองและความคลาดเคลื่อนทั้งหมด 20 กราฟ



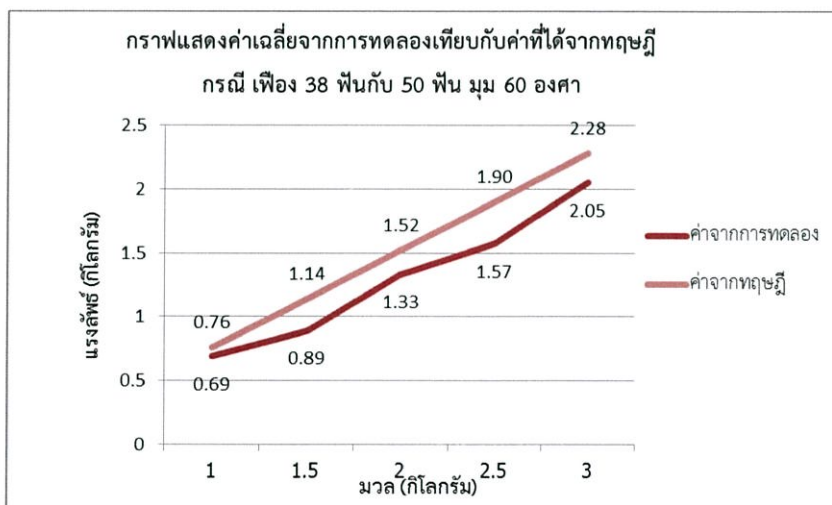
รูปที่ 5.21 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มุม 0 องศา



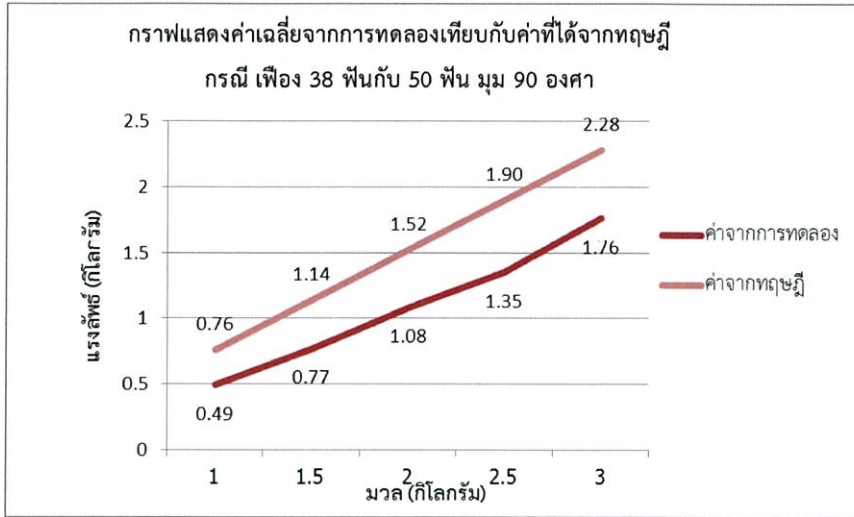
รูปที่ 5.22 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มุม 30 องศา



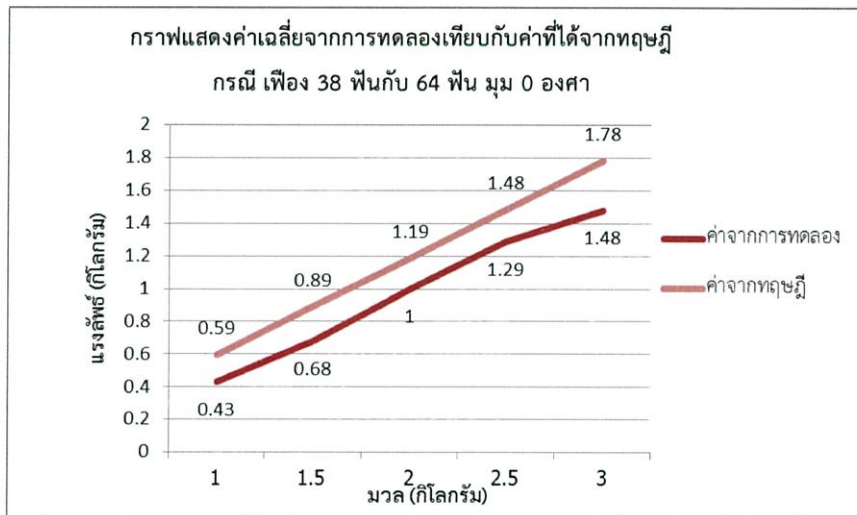
รูปที่ 5.23 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มุม 45 องศา



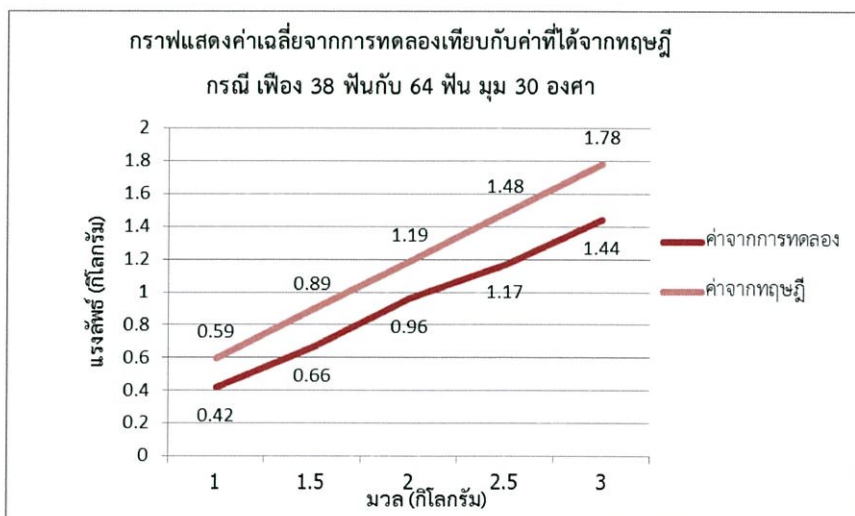
รูปที่ 5.24 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มุม 60 องศา



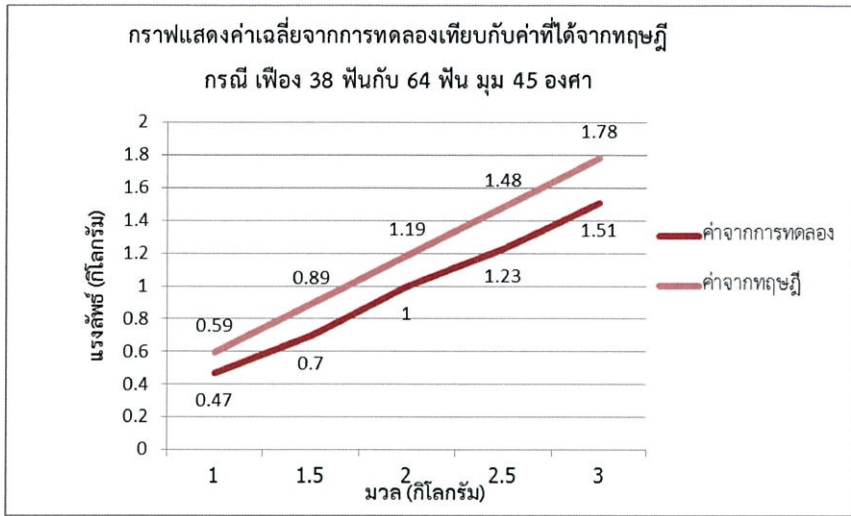
รูปที่ 5.25 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มุม 90 องศา



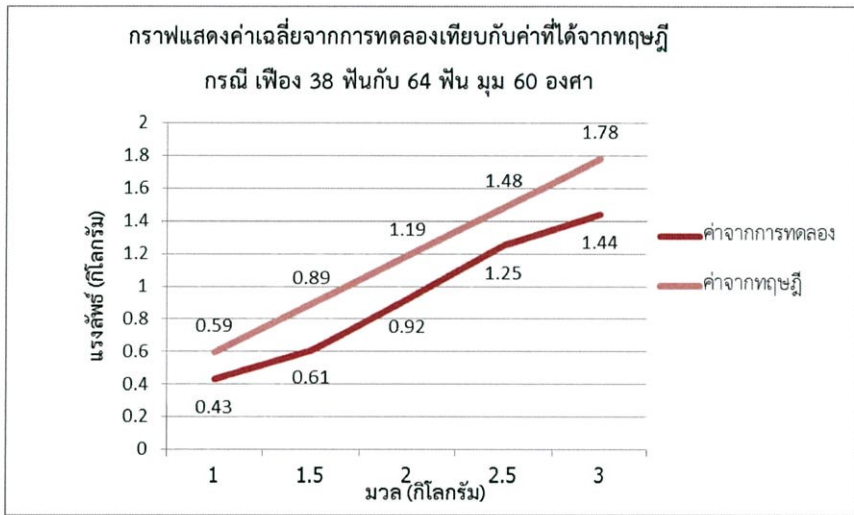
รูปที่ 5.26 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 64 ฟัน มุม 0 องศา



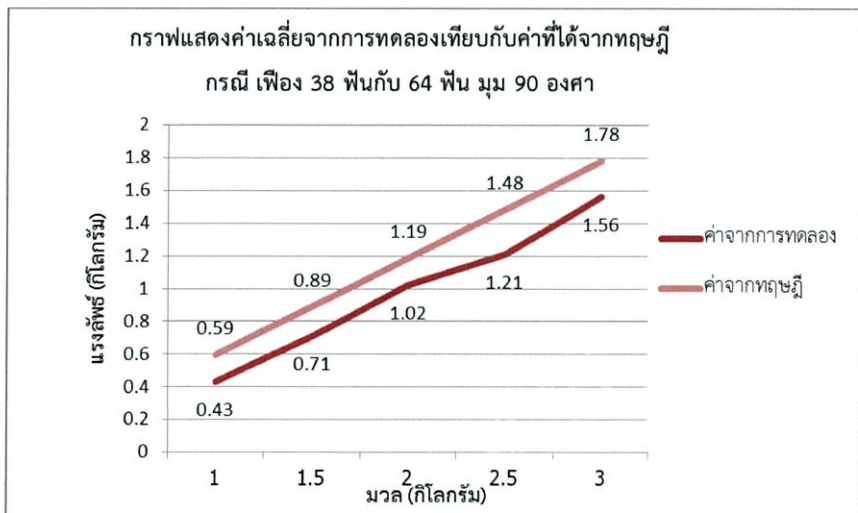
รูปที่ 5.27 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 64 ฟัน มุม 30 องศา



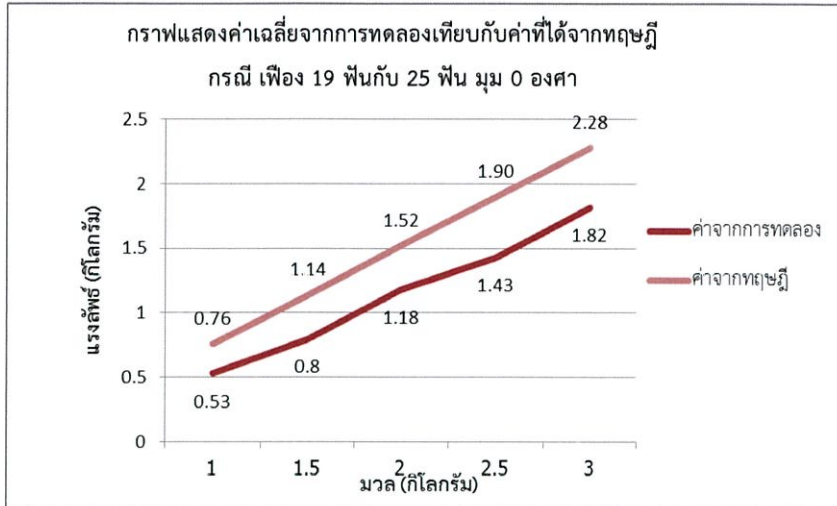
รูปที่ 5.28 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 64 ฟัน มุม 45 องศา



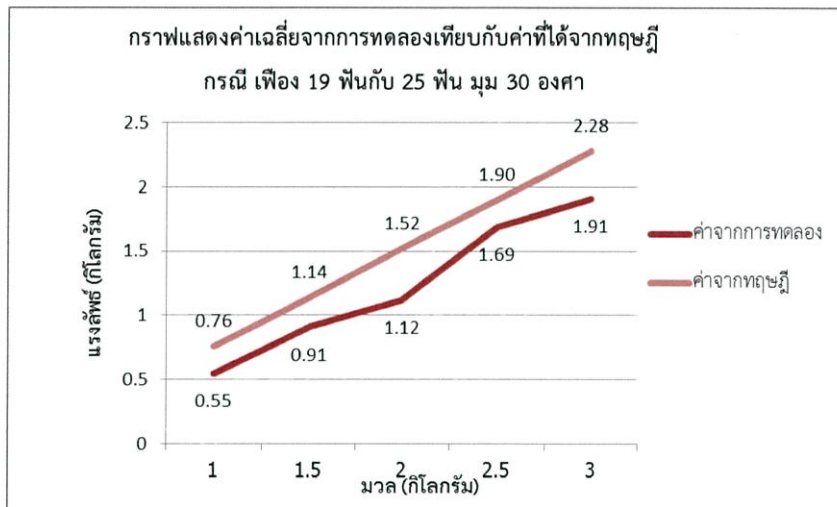
รูปที่ 5.29 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 64 ฟัน มุม 60 องศา



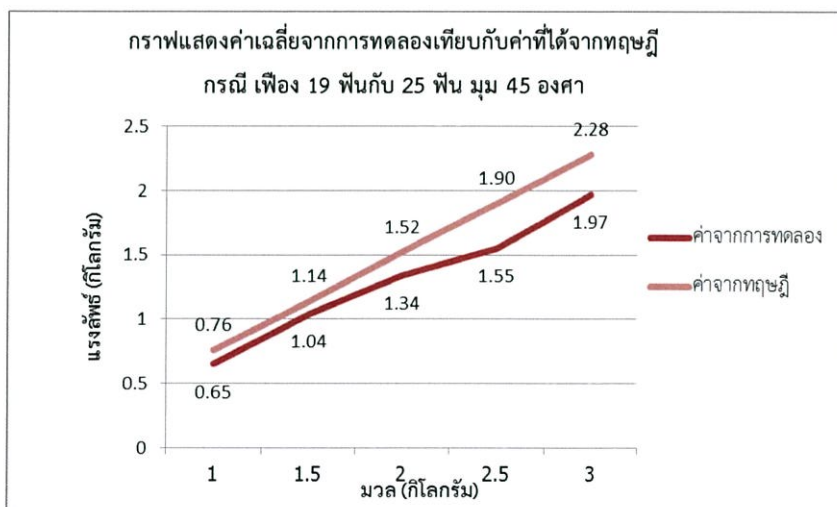
รูปที่ 5.30 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 38 ฟันกับ 64 ฟัน มุม 90 องศา



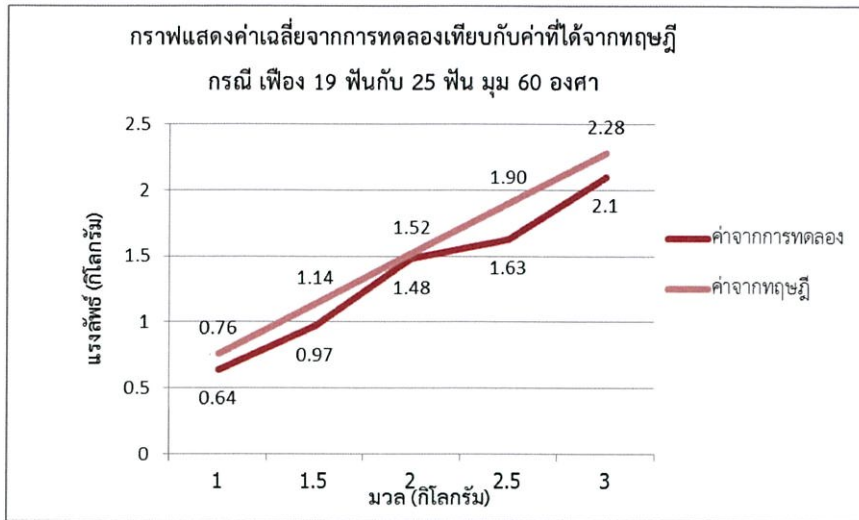
รูปที่ 5.31 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 25 ฟัน มุม 0 องศา



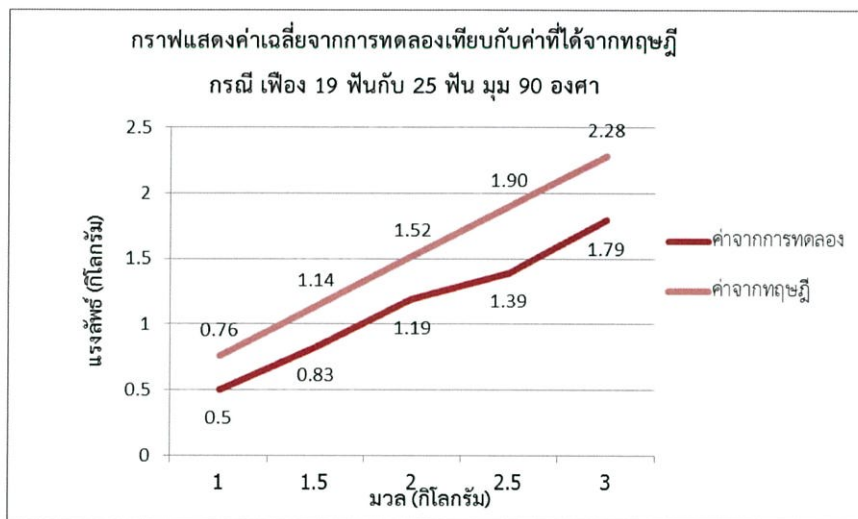
รูปที่ 5.32 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 25 ฟัน มุม 30 องศา



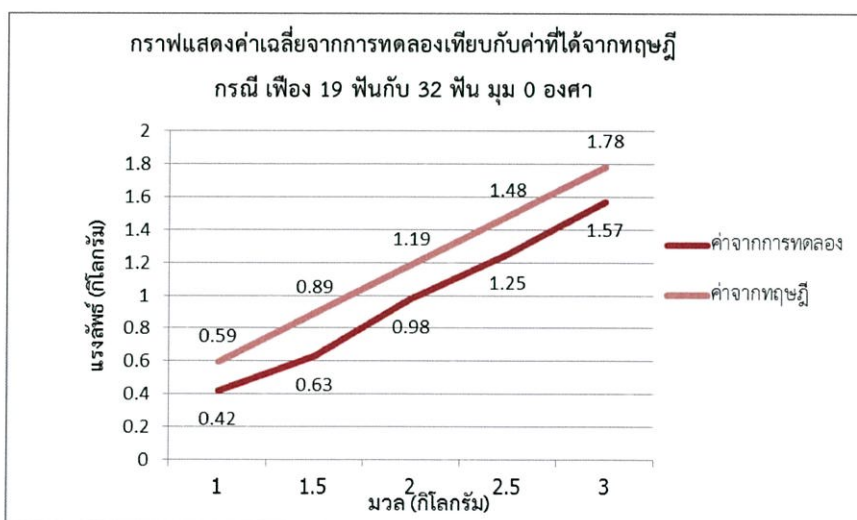
รูปที่ 5.33 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 25 ฟัน มุม 45 องศา



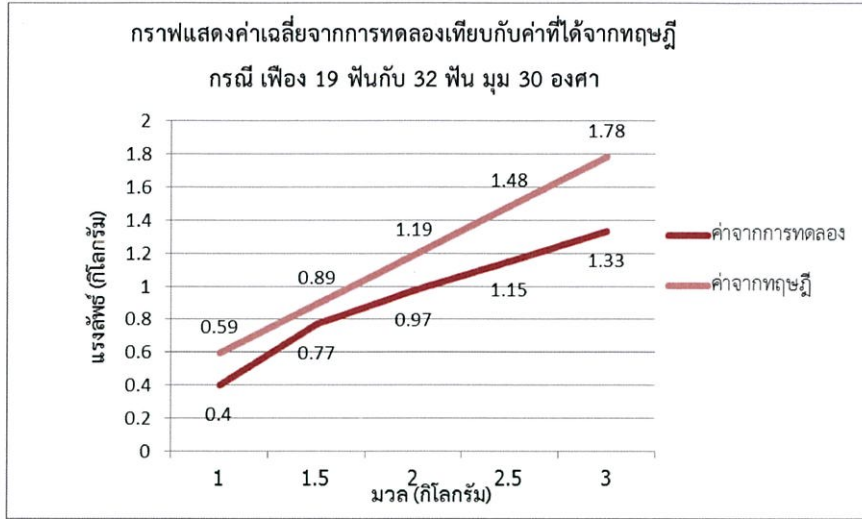
รูปที่ 5.34 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 25 ฟัน มุม 60 องศา



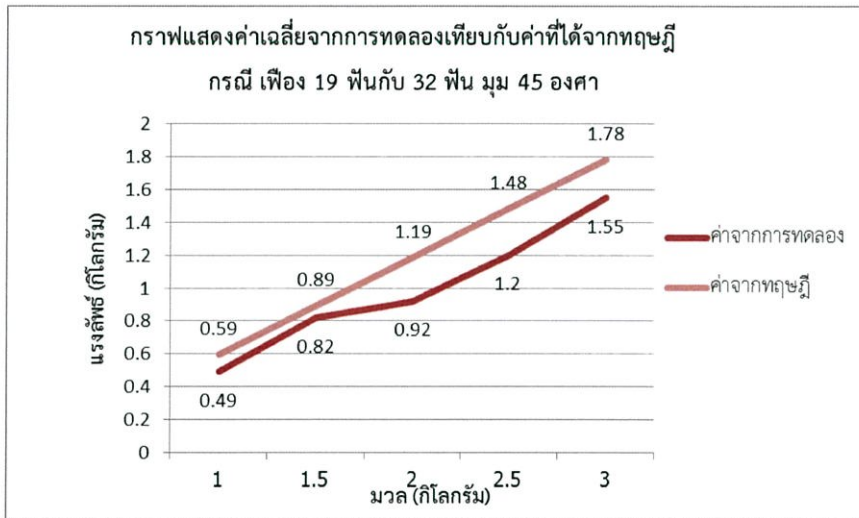
รูปที่ 5.35 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 25 ฟัน มุม 90 องศา



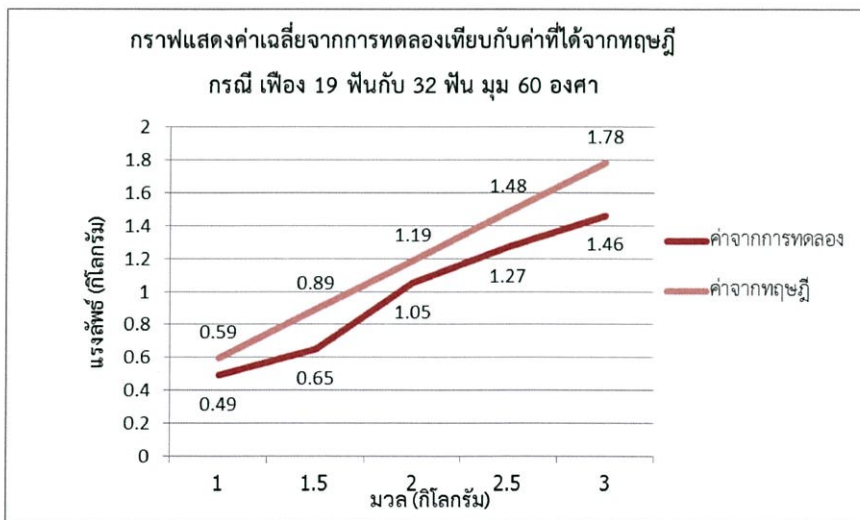
รูปที่ 5.36 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มุม 0 องศา



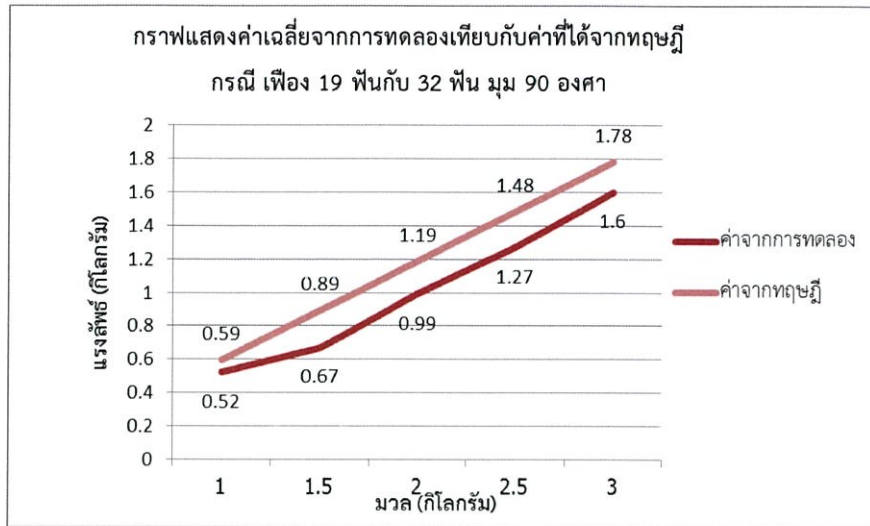
รูปที่ 5.37 แสดงการชกกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มุม 30 องศา



รูปที่ 5.38 แสดงการชกกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มุม 45 องศา



รูปที่ 5.39 แสดงการชกกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มุม 60 องศา



รูปที่ 5.40 แสดงการขบกันกรณี เฟือง 19 ฟันกับ 32 ฟัน มุม 90 องศา

จากกราฟข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า

- ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยของสปริงเครื่องที่ 1 รวมทั้ง 2 กรณีมีค่า 17.98 เปอร์เซ็นต์
- ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยของสปริงเครื่องที่ 2 รวมทั้ง 2 กรณีมีค่า 21.49 เปอร์เซ็นต์
- ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยของค่าผลลัพธ์ทั้ง 2 เครื่อง มีค่า 22.04 เปอร์เซ็นต์
- ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยของชุดทดลองมีความคลาดเคลื่อนมีค่า 20.50 เปอร์เซ็นต์

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากอัตราทดของเฟืองไม่ได้มีค่าตามที่ระบุจริง

เนื่องจากสูตร อัตราทด (r) = $\frac{N_2}{N_1} = \frac{D_2}{D_1}$

แรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นที่เฟืองตาม (F_n) = $\frac{F_1 D_1}{D_2}$

นำสองสมการข้างต้นมารวมกัน

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{แรงลัพท์ที่ได้จากการทดลอง} = \frac{F_1 N_1}{N_2}$$

- ตัวอย่างกรณีที่ 1 สำหรับเฟือง module 1

ใช้เฟือง module 1 ซึ่งเฟืองขับและเฟืองตามที่มีจำนวนฟัน 38 และ 50 ฟัน ตามลำดับ เมื่อใส่มวล 1 กิโลกรัม

$$\text{แรงลัพท์ที่ได้จากทฤษฎี} = \frac{1 \times 9.81 \times 38}{50} = 7.456 \text{ N}$$

แต่เนื่องจากเราต้องการนำอัตราส่วนการทดของเฟืองมาใช้ เพื่อความสะดวกในการคำนวณและไม่มีความยุ่งยาก จึงทำให้เราใช้ D_1 เป็น pitch diameter ด้วย แต่ความเป็นจริงแล้ว จุดที่ทำการติดตั้งสลิงบนเฟืองขับไม่ได้อยู่ที่ pitch diameter ที่มีขนาด 38 mm แต่เป็น hub diameter ซึ่งมีขนาด 35 mm

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะเท่ากับ} \quad \frac{38-35}{38} \times 100 = 7.895 \%$$

เพราะฉะนั้นแล้ว หลังจากการคำนวณหาค่าแรงลัพท์จากการทดลองแล้ว ต้องคูณ 1.0789 เข้าไปด้วยเพื่อให้ค่าที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

- ตัวอย่างกรณีที่ 2 สำหรับเฟือง module 2

ใช้เฟือง module 2 ซึ่งเฟืองขับและเฟืองตามมีจำนวนฟัน 19 และ 25 ฟัน ตามลำดับ เมื่อใส่มวล 1 กิโลกรัม

$$\text{แรงลัพท์ที่ได้จากทฤษฎี} = \frac{1 \times 9.81 \times 19}{25} = 7.456 \text{ N}$$

แต่เนื่องจากเราต้องการนำอัตราส่วนการทดของเฟืองมาใช้ เพื่อความสะดวกในการคำนวณและไม่มีความยุ่งยาก จึงทำให้เราใช้ D_1 เป็น pitch diameter ด้วย แต่ความเป็นจริงแล้ว จุดที่ทำการติดตั้งสลิงบนเฟืองขับไม่ได้อยู่ที่ pitch diameter ที่มีขนาด 38 mm แต่เป็น hub diameter ซึ่งมีขนาด 31 mm

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะเท่ากับ} \quad \frac{38-31}{38} \times 100 = 18.42 \%$$

เพราะฉะนั้นแล้ว หลังจากการคำนวณหาค่าแรงลัพธ์จากการทดลองแล้ว ต้องคูณ 1.1842 เข้าไปด้วยเพื่อให้ค่าที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

ค่าความคลาดเคลื่อนนั้นมีสาเหตุจากหลายปัจจัย โดยได้เสนอปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนและข้อเสนอแนะที่ใช้ในการแก้ไขหรือลดความคลาดเคลื่อนดังต่อไปนี้

5.3.3 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

- แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างข้อต่อหรือจุดหมุนของชิ้นส่วนที่สามารถเคลื่อนไหวได้หรือหมุนได้
- การยืดของวัสดุ (Elongation) ของวัสดุที่เกิดจากการดึง
- มุมขบของเฟืองที่ทำการทดลองที่อาจจะคลาดเคลื่อนไปในขณะทดลองจากมุมที่ต้องการ
- การเกิดความสูญเสียในขณะส่งผ่านแรง (Transmission loss)
- ความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากการวัดตัวแปร กล่าวคือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนหรือมีค่าความเที่ยงของเครื่องมือไม่มากพอ

5.3.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการแก้ไข

- มีการทำความเข้าใจในชุดทดลองให้มากขึ้น โดยการอ่านวิธีการทดลองอย่างละเอียดและทำตามขั้นตอนที่กำหนดไว้
- การปรับปรุงวิธีการประกอบ รวมถึงกระบวนการในการสร้างให้มีความแม่นยำ และความละเอียดมากขึ้นให้ข้อต่อหรือจุดหมุนมีความคลอนน้อยลง
- ปรับปรุงข้อต่อ, จุดหมุนรวมถึงตะขอรับแรงให้มีแรงเสียดทานน้อยลง เช่น ลดความหยาบของผิวสัมผัสลง

5.4 อภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นถึงแรงที่เกิดขึ้นบนเฟืองในแนวแกน 2 แนว แสดงตำแหน่งที่เฟืองได้รับแรงสูงที่สุดของในแต่ละกรณีและในแต่ละแนวแกนที่มีแรงส่งกำลังซึ่งสามารถนำไปศึกษาต่อในเรื่องความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อเฟือง รวมถึงนำไปศึกษาเพื่อออกแบบหรือเลือกอุปกรณ์ที่ใช้กลไกในการส่งกำลังโดยเฟืองได้อย่างชัดเจนมากขึ้นโดยใช้แรงที่ได้วิเคราะห์และทำการทดลองจากชุดทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Richard G.BUDYNAS and J.Keith NISBETT (2015). Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th edition, ISBN: 978-981-4595-28-5, McGrawHill

ภาคผนวก

การทดลองชุดทดลองโดยกลุ่มตัวอย่าง

เนื่องจากชุดทดลองนั้นเป็นชุดทดลองสำหรับนักศึกษาจึงได้ทำการให้นักศึกษาที่ไม่ได้มีส่วนร่วมในการสร้างชุดทดลองนี้มาทำการทดลองโดยอ่านจากใบงานการทดลองแล้วทำตามขั้นตอนที่ได้เขียนไว้โดยได้เลือกกลุ่มตัวอย่างมาทั้งหมด 4 คน ให้มาทำการทดสอบโดยกำหนดให้ทำทั้ง 2 กรณีกรณีละ 1 ครั้ง

- กรณี (กรณีกำหนดให้มวลคงที่เปลี่ยนมุมขบ) กำหนดให้ใช้เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มวล 2 กิโลกรัม
- กรณี (กรณีกำหนดให้มุมขบคงที่เปลี่ยนมวล) กำหนดให้ใช้เฟือง 38 ฟันกับ 50 ฟัน มุมขบ 30 องศา



รูปแสดงการทดลองของชุดทดลองโดยกลุ่มตัวอย่าง



รูปแสดงการทดลองของชุดทดลองโดยกลุ่มตัวอย่าง

ตารางแสดงผลการทดลองกรณีเฟือง38 ฟันกับ50 ฟัน มวล 2 กิโลกรัม ของนักศึกษาคนที่ 1

มุมขบ (°)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)	ค่าผลลัพธ์ของทั้ง 2 เครื่อง
0	0	1.19	1.19
30	0.61	1.08	1.24
45	0.77	0.79	1.19
60	1.06	0.68	1.28
90	1.09	0	1.11

ตารางแสดงผลการทดลองกรณีเฟือง38 ฟันกับ50 ฟัน มวล 2 กิโลกรัม ของนักศึกษาคนที่ 2

มุมขบ (°)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)	ค่าผลลัพธ์ของทั้ง 2 เครื่อง
0	0	1.19	1.19
30	0.71	1.11	1.32
45	0.82	0.77	1.12
60	1.13	0.69	1.32
90	1.21	0	1.21

ตารางแสดงผลการทดลองกรณีเฟือง38 ฟันกับ50 ฟัน มวล 2 กิโลกรัม ของนักศึกษาคนที่ 3

มุมขบ (°)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)	ค่าผลลัพธ์ของทั้ง 2 เครื่อง
0	0	1.06	1.06
30	0.79	1.05	1.31
45	0.89	0.75	1.16
60	1.17	0.69	1.36
90	1.23	0	1.23

ตารางแสดงผลการทดลองกรณีเฟือง38 ฟันกับ50 ฟัน มวล 2 กิโลกรัม ของนักศึกษาคนที่ 4

มุมขบ (°)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)	ค่าผลลัพธ์ของทั้ง 2 เครื่อง
0	0	1.15	1.15
30	0.69	1.03	1.24
45	0.79	0.89	1.19
60	1.06	0.71	1.28
90	1.11	0	1.11

ตารางแสดงผลการทดลองกรณีเฟือง38 ฟันกับ50 ฟัน มุม 30 องศา ของนักศึกษาคนที่ 1

มวล (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)	ค่าผลลัพธ์ของทั้ง 2 เครื่อง
1	0.39	0.42	0.57
1.5	0.51	0.69	0.86
2	0.80	1.12	1.38
2.5	0.63	1.21	1.36
3	0.72	1.51	1.67

ตารางแสดงผลการทดลองกรณีเฟือง38 ฟันกับ50 ฟัน มุม 30 องศา ของนักศึกษาคนที่ 2

มวล (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)	ค่าผลลัพธ์ของทั้ง 2 เครื่อง
1	0.31	0.51	0.60
1.5	0.49	0.61	0.78
2	0.75	0.98	1.23
2.5	0.67	1.32	1.48
3	0.74	1.54	1.71

ตารางแสดงผลการทดลองกรณีเฟือง38 ฟันกับ50 ฟัน มุม 30 องศา ของนักศึกษาคนที่ 3

มวล (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)	ค่าผลลัพธ์ของทั้ง 2 เครื่อง
1	0.41	0.44	0.60
1.5	0.62	0.56	0.84
2	0.76	1.17	1.40
2.5	0.59	1.46	1.57
3	0.69	1.73	1.86

ตารางแสดงผลการทดลองกรณีเฟือง38 ฟันกับ50 ฟัน มุม 30 องศา ของนักศึกษาคนที่ 4

มวล (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 1 (กิโลกรัม)	ค่าตาสั่งสปริงเครื่องที่ 2 (กิโลกรัม)	ค่าผลลัพธ์ของทั้ง 2 เครื่อง
1	0.43	0.46	0.63
1.5	0.53	0.73	0.90
2	0.83	1.24	1.49
2.5	0.57	1.39	1.50
3	0.82	1.61	1.81

การทดลอง Spur Gear Experimental

(การศึกษาแรงในเฟืองตรงที่ตั้งฉากกัน)

ชื่อ รหัส

1.วัตถุประสงค์

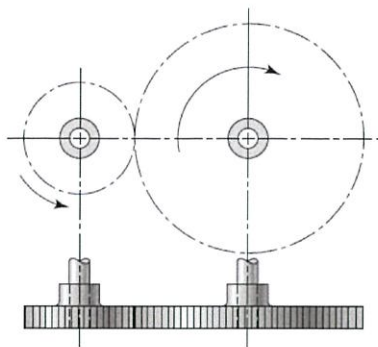
1. เพื่อให้ นักศึกษารู้จักการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เบื้องต้นในการทดลอง และการอ่านข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ต่างๆ
2. เข้าใจการทำงานพื้นฐานของเฟืองตรง อันประกอบไปด้วย หลักการส่งผ่านแรงระหว่างเฟือง รวมถึง แรงที่เกิดขึ้นในเฟืองตรง
3. สามารถนำไปใช้ออกแบบเฟืองตรงที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในงานแต่ละประเภทเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย

2.ทฤษฎี

2.1 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติของเฟืองตรง

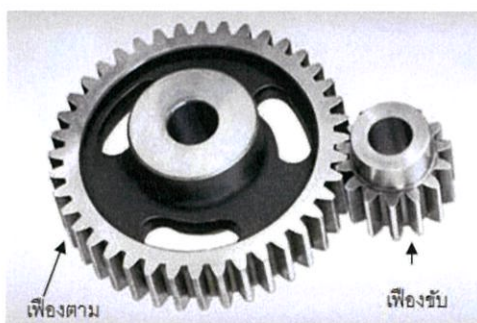
เฟืองตรง (Spur Gears) คือเฟืองที่มีฟันในแนวขนานกับทิศทางการหมุนและใช้ในการส่งกำลังการเคลื่อนที่จากเพลลาที่หนึ่งไปยังอีกเพลลาหนึ่งซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะคือฟันของเฟืองจะเป็นแนวขนานไปกับรูปเพลลา โดยเฟืองตรงนั้นเป็นเฟืองที่ง่ายที่สุดจึงมักถูกใช้เป็นเครื่องมือในการส่งผ่านกำลังมากที่สุดเมื่อเทียบกับเฟืองชนิดอื่น

นอกจากนั้นแล้ว เฟืองตรงคืออุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญมีหน้าที่โดยทั่วไป เช่น เปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ เปลี่ยนแปลงแรงบิด ความเร็ว ส่งผ่านกำลังระหว่างเพลลา เปลี่ยนทิศทางการหมุน และใช้ประโยชน์จากข้อได้เปรียบเชิงกลของ gear ratio โดยลักษณะการขบกันของเฟืองตรงจะเป็นในลักษณะภาพด้านล่าง



รูปที่ 1 รูปแบบทั่วไปของเฟืองตรง

ซึ่งจากข้างต้นเราจะเรียกเฟืองตัวที่ใหญ่กว่าว่า เฟืองตาม (Gears) ส่วนเฟืองที่มีขนาดเล็กกว่าจะเรียกว่า เฟืองขับ (Pinion) ดังภาพด้านล่าง



รูปที่ 2 เฟืองขับและเฟืองตาม

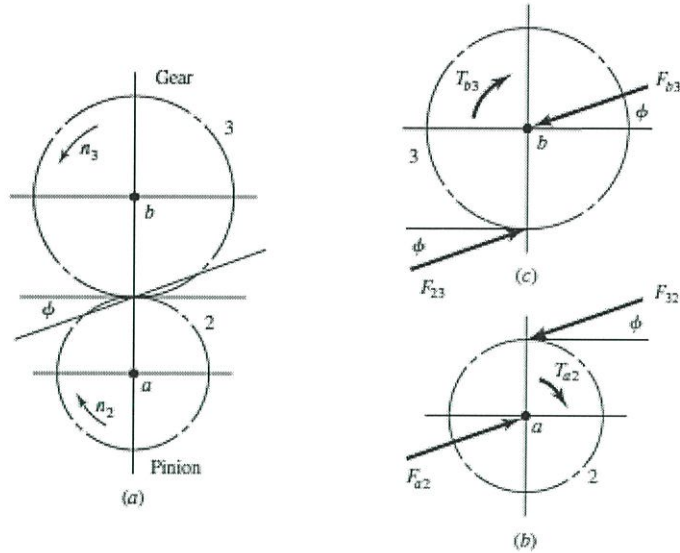
2.2 การวิเคราะห์แรงในเฟืองตรง

ก่อนที่เราจะเริ่มทำการวิเคราะห์แรงที่กระทำที่เกิดขึ้นในเฟือง จะมีการตกลงในเรื่องของสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงดังนี้ โดยเริ่มจากหมายเลข 1 จะใช้สำหรับกรอบอ้างอิงของกลไก (เรเนียนเกียร์) หมายเลข 2 จะใช้แสดงเฟืองต้นกำลังหรือเฟืองขับ และหมายเลข 3, 4, 5, ... จะใช้สำหรับเฟืองที่อยู่ถัดจากเฟืองที่ 2 ไปจนถึงเฟืองตัวสุดท้าย และเมื่อเฟืองมีจำนวนหลายเฟืองก็จะต้องมีเพลลาที่เกี่ยวข้องจำนวนหลายอันเช่นกัน ดังนั้น เราจะใช้ตัวอักษรอังกฤษตัวพิมพ์เล็กตั้งแต่ a, b, c, ... สำหรับแทนเพลลาตั้งแต่เฟืองขับตัวแรกไปยังเฟืองตัวสุดท้าย

ดังนั้น จากที่เรากำหนดสัญลักษณ์ต่างๆ เราจะเรียกแรงที่เฟือง 2 กระทำกับเฟือง 3 ว่า F_{23} และเรียกแรงที่เฟือง 2 กระทำกับต่อเพลลา a ว่า F_{2a} ในทางกลับกัน ถ้าเราเขียนว่า F_{a2} จะหมายถึงแรงที่เพลลา a กระทำต่อเฟือง 2 และสุดท้ายเราจะใช้ตัวอักษรยก x, y, z ในการบ่งบอกทิศทางของแรงในพิกัดโคออร์ดิเนต และใช้

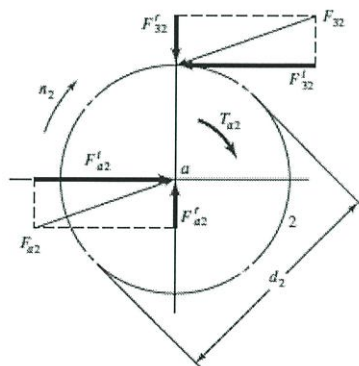
ตัวอักษร r และ t สำหรับแสดงทิศทางของแรงในแนวรัศมี และทิศทางตามแนวสัมผัส ตามลำดับ โดยจากข้างต้นจะสามารถสรุปได้ว่า เช่น F_{43}^t จะหมายถึงแรงในแนวสัมผัสของเฟือง 4 ที่กระทำต่อ เฟือง 3

โดยจะแสดงไว้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผังวัตถุอิสระที่แสดงแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อเฟือง

รูป 4(a) เฟืองขับ (Pinion) 2 ยึดติดอยู่กับเพลลา a ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว n_2 รอบต่อนาที ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และขับเฟือง 3 ที่อยู่บนเพลลา b ให้หมุนด้วยความเร็ว n_3 รอบต่อนาที แรงปฏิกิริยาระหว่างฟันเฟืองที่ขบกันจะเกิดขึ้นตามแนวเส้น ดังรูป 4(b) จะเห็นได้ว่ามีแรง F_{a2} และโมเมนต์บิด T_{a2} จากเพลลา a มากระทำต่อเฟือง 2 และแรง F_{32} จากเฟือง 3 มากระทำต่อเฟือง 2 ในขณะเดียวกันเราสามารถเขียนผังวัตถุอิสระของเฟือง 3 ได้ดังรูปที่ 4(c)



รูปที่ 5 แรงกระทำบนเกียร์

จากรูปที่ 5 ถ้ากำหนดให้ $W_t = F_{32}^t$ โดยจะเรียกว่า โหลดที่เกิดจากน้ำหนักถูกถ่ายทอดกำลัง จากภาพจะเห็นว่ากำลังจะถูกส่งถ่ายด้วยแรงในแนวสัมผัส และสำหรับแรงในแนวรัศมี F_{32}^r จะไม่ได้ใช้ในการส่งกำลัง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับโหลดส่งกำลังจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$T = \frac{d}{2} W_t$$

เมื่อพิจารณาที่เฟืองตามซึ่งเกิดแรงที่ได้รับจากเฟืองขับจะเห็นได้ว่า ขณะที่เฟืองขับหมุนนั้น จะส่งแรงมากระทำต่อเฟืองตาม โดยจะได้แรงทั้งหมด 2 แรงซึ่งแรงที่เกิดขึ้นแรงแรกคือ F^t (Tangential Force) ซึ่ง F^t คือแรงที่ถูกถ่ายทอดหรือโหลดส่งกำลังไปยังเฟืองตาม โดยกำลังทั้งหมดจะถูกส่งถ่ายด้วยแรงในแนวสัมผัสด้วย (แรงกระทำในแนวแกน X) นอกจากนี้ยังมีแรงในแนวรัศมี F^r (Radial Force) ซึ่งแรงในแนวรัศมีนี้จะไม่ใช่ในการส่งกำลัง (แรงกระทำในแนวแกน Y) โดยแรงทั้งสองแรงนี้จะรวมกันเป็นแรงที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่เฟืองขับกระทำต่อเฟืองตาม เรียกว่าแรงลัพธ์ F^n ซึ่งมุมที่แรงลัพธ์เกิดขึ้นนี้จะเท่ากับมุมขับ θ

โดยแรงทั้งสามแรง F^t , F^r และ F^n มีความสัมพันธ์กับมุม θ ดังนี้

$$F^t = F^n \cos \theta$$

$$F^r = F^n \sin \theta$$

$$F^r = F^t \tan \theta$$

จากนั้นเราจะทำการหาค่าแรงลัพธ์ F^n ที่ได้จากการคำนวณจาก F^t และ F^r ดังสมการต่อไปนี้

$$F^n = \sqrt{(F^t)^2 + (F^r)^2}$$

3. อุปกรณ์การทดลอง

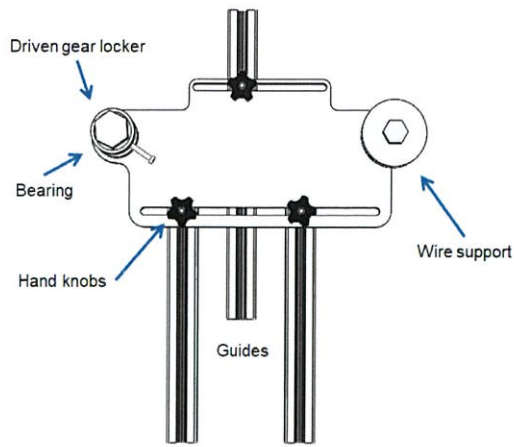
3.1 ชุดทดลองการวิเคราะห์แรงในเฟือง

ประกอบด้วยกล่องโครงเหล็กที่มีฉากหลังเป็นไม้ สำหรับใช้ติดหรือยึดส่วนที่ใช้ในการทดลอง โดยจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้สำหรับวัดแรงและส่วนที่ใช้สำหรับใส่โหลด



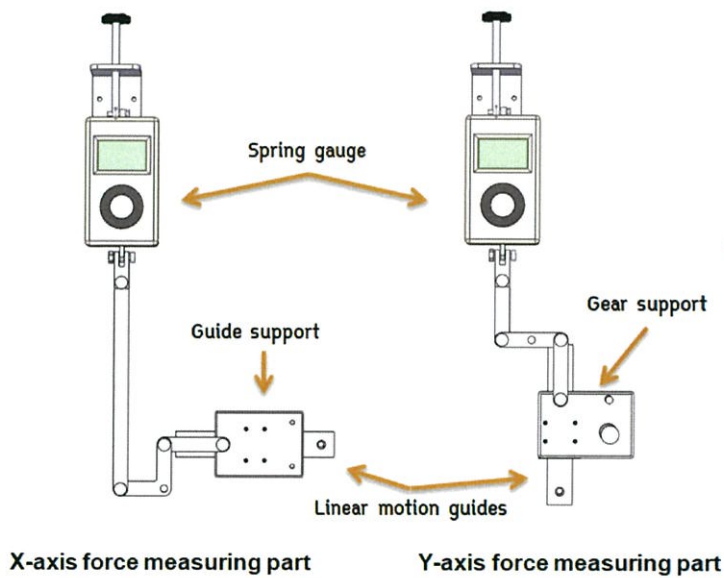
รูปที่ 6 ชุดทดลองทั้งหมดที่ติดตั้งบนแผ่นไม้

จากข้างต้นส่วนที่ใช้สำหรับใส่หลอดหรือเรียกอีกอย่างว่าส่วนที่ไว้สำหรับใส่เกียร์ซึบนั้น จะประกอบไปด้วย อะลูมิเนียมโพรไฟล์แบบรางที่สลีต สำหรับใช้ในการเลื่อนขึ้นลงเพื่อปรับระยะของเฟืองที่จะนำมาขบกัน โดยมีหมุดขันมือ ใช้สำหรับล็อกรางเลื่อน นอกจากนี้จะมีก้านเพลลาสำหรับใส่เกียร์โดยมีแบริ่งรองรับรวมถึงสามารถล็อกไม่ให้เกียร์หลุดออกได้ และยังมีส่วนที่รองรับสายสลิงที่จะใช้ในการส่งแรงบิดจากหลอดมายังเกียร์



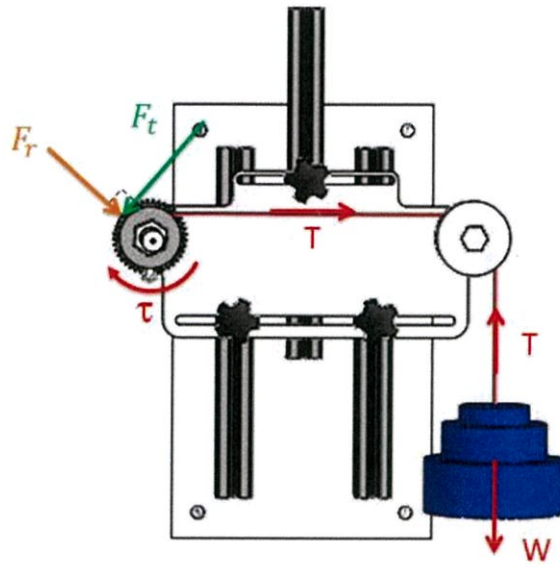
รูปที่ 7 แสดงส่วนที่ใช้ในการติดตั้งเฟืองขับ

ส่วนที่ใช้ในการวัดแรงนั้น จะประกอบไปด้วยตาชั่งสปริงแบบดิจิทัลที่ใช้ในการวัดค่าแรงที่เฟืองตามที่ได้รับจากเฟืองขับ โดยมีตาชั่งทั้งหมดสองอันซึ่งแต่ละอันจะใช้ในการวัดแรงที่ได้ในแต่ละแนวแกน รวมถึงมีลิเนียร์ไกด์ ที่มีจุดใส่เฟืองตาม สามารถขยับได้เมื่อได้รับแรงจากเฟืองขับที่กระทำมา และมีคอนเนคเตอร์ รวมถึงข้อต่อต่างๆที่ใช้สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันอีกด้วย

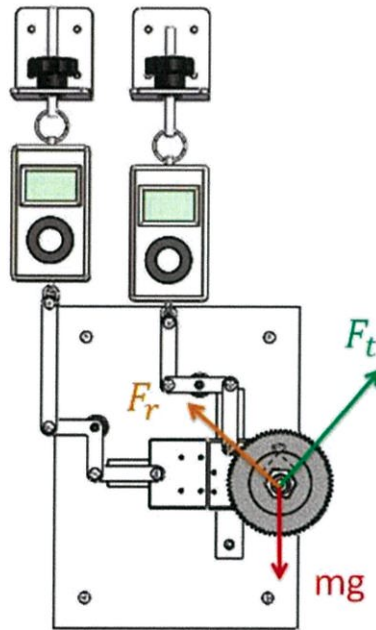


รูปที่ 8 แสดงถึงส่วนที่ใช้สำหรับวัดแรง

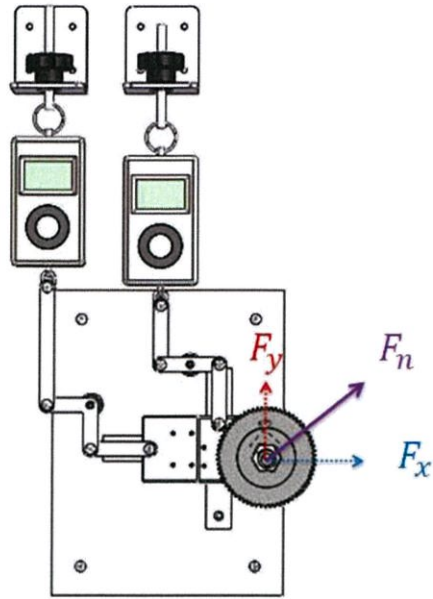
ผังวัดถุอิสระสำหรับชุดการทดลอง



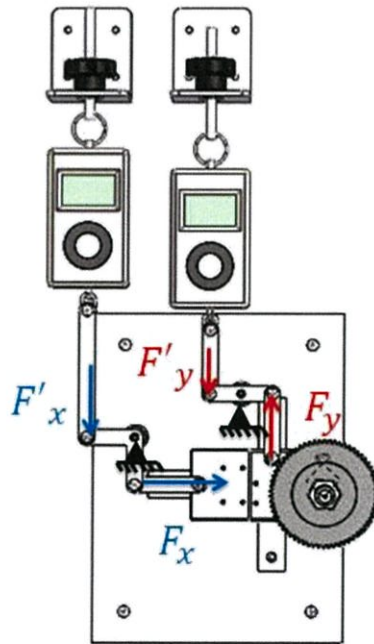
รูปที่ 9 ผังวัดถุอิสระส่วนเฟืองขับ



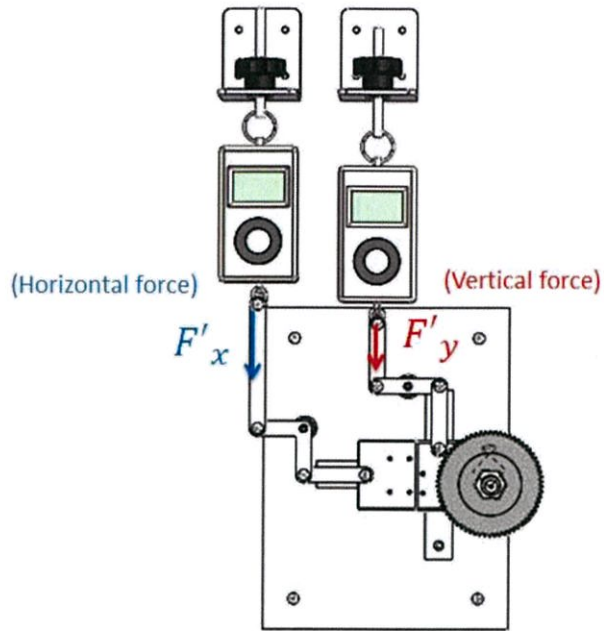
รูปที่ 10 ผังวัดถุอิสระของเฟืองตาม 1



รูปที่ 11 ผังวัดฤทธิสระของเฟืองตาม 2



รูปที่ 12 ผังวัดฤทธิสระของแท่งรับแรง 1



รูปที่ 13 ผังวัตถุอิสระของแท่งรับแรง 2

3.1.1 ตาชั่งสปริงแบบดิจิตอล

วิธีใช้งาน : แรกเริ่มจะทำการเซ็ตศูนย์ขณะที่เฟืองขบกันพอดี หลังจากใส่มวลสามารถดูตัวเลขได้บนหน้าปัด

ข้อควรระวัง : ไม่ควรใช้กับน้ำหนักที่มากจนเกินไป หรือนำไปใช้ผิดวิธี



รูปที่ 14 ตราชั่งสปริง

3.2 โหลดหรือน้ำหนักที่ใช้

ขนาดของโหลดที่ใช้ มีทั้งหมด 5 ขนาด คือ 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 กิโลกรัม

3.3 เฟืองที่ใช้



รูปที่ 15 เฟืองที่ใช้สำหรับการทดลอง

4.เงื่อนไขการทดลอง

module ของเฟือง	
1	
2	

จำนวนฟันเฟืองm1	
38	
50	
64	

จำนวนฟันเฟืองm2	
19	
25	
32	

มวลที่ใส่	
1kg	
1.5kg	
2kg	
2.5kg	
3kg	

มุมขบ	
0°	
30°	
45°	
60°	
90°	

5. ลำดับการทดลอง

1. ตรวจสอบอุปกรณ์ชุดทดลองตามจำนวนที่ระบุไว้ในข้อ 3. หากมีอุปกรณ์สูญหายหรือเสียหายให้บันทึกและแจ้งอาจารย์ผู้สอนทันทีผลการตรวจสอบเครื่องมือและอุปกรณ์.....

2. ทำการเตรียมการทดลองโดยมีวิธีการดังนี้

1. เคลื่อนเพลลาเฟืองตามขึ้นไว้ด้านบนสุด แล้วผลักมาทางขวาสุด จากนั้นติดตั้งคลิปค้ำยันไว้ที่ส่วนปลายของรางLiner-motion guide สำหรับวัดแรงในแนวตั้ง
2. ใส่เฟืองตามขนาดที่ต้องการ จากนั้นขันสกรูที่ฮับของเฟืองเพื่อล็อกเฟืองไม่ให้หมุน
3. ใส่เฟืองขับตามขนาดที่ต้องการ
4. ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมขบเฟือง
5. เคลื่อนส่วนรองรับเฟืองขับ โดยให้เฟืองขบกันตามมุมที่กำหนด จากนั้นขันมือหมุนเพื่อล็อก
6. ถอดอุปกรณ์วัดมุมขบเฟืองออก ขันสกรูเพื่อล็อกเฟืองขับ และถอดคลิปค้ำยันออก
7. ติดตั้งที่แขวนมวลที่ปลายของลวดสลิง จากนั้นนำไปพาดไว้ บน pulley
8. ปรับตั้งกลไกที่อยู่ด้านบนตาชั่งสปริงให้พอดี
9. แขนงน้ำหนัก 500 กรัม เพื่อให้เฟืองขบกันได้ตลอดเวลา
10. เปิดเครื่องชั่งสปริง
11. ขันสกรูเพื่อปลดล็อกเฟืองขับ จากนั้นกดปุ่ม Tare บนเครื่องชั่งสปริง
12. ขันสกรูเพื่อล็อกเฟืองขับ แขนงน้ำหนักที่ต้องการทดลอง
13. ขันสกรูเพื่อปลดล็อกเฟืองขับ
14. อ่านค่าจากเครื่องชั่งสปริง และบันทึกผลการทดลอง
15. ขันสกรูเพื่อล็อกเฟืองขับ จากนั้นปลดน้ำหนักทดลองออก
16. กรณีต้องการเปลี่ยนน้ำหนักที่ใช้ในการทดลอง ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 11.
17. จากนั้นขันสกรูเพื่อล็อกเฟืองขับ แล้วปลดน้ำหนักทั้งหมดรวมถึงที่แขวนมวลออกจากปลายลวดสลิง
18. ติดตั้งคลิปค้ำยัน ณ ตำแหน่งเดิม
19. ขันปลดล็อกมือหมุน เพื่อเคลื่อนส่วนรองรับเฟืองขับลงมาที่ตำแหน่งล่างสุด จากนั้นขันเพื่อให้ล็อกกับที่
20. กรณีต้องการเปลี่ยนมุมทดลอง ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4.
21. ขันสกรูเพื่อปลดล็อกและถอดเฟืองทั้งหมดออก
22. กรณีต้องการเปลี่ยนเฟืองทดลอง ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2.
23. ถอดคลิปค้ำยันออก
24. สิ้นสุดการทดลอง

โดยจะทำเช่นนี้จนครบทุกการทดลอง แต่ละการทดลองจะแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

1. การทดลองที่ 1 มีทั้งหมด 4 การทดลองจะเป็นการทดลองที่ให้มวล (ภาระโหลด) มีค่าคงที่โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงมุมขบ โดยจะทำการเตรียมเฟืองทั้งสองโมดูล โดยใช้เฟืองโมดูล 1 ใช้กับเฟืองโมดูล 2 ตามจำนวนฟันที่กำหนด แต่ละโมดูลจะขบกันโดยเฟืองที่มีจำนวนฟันน้อยสุดจะเป็นเฟืองขับและเฟืองที่เหลือเป็นเฟืองตาม โดยจะให้มุมขบเปลี่ยนไปดังตารางนี้แล้วคำนวณค่า แรงลัพธ์ (F^n) จากทฤษฎีมาเทียบความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 1 ทดลองระหว่างเฟืองโมดูล 1ฟันกับ.....ฟัน มวล.....กิโลกรัม

มุมขบ	ค่าจากเครื่อง ที่ 1	ค่าจากเครื่อง ที่ 2	ค่าลัพธ์ของ 2 เครื่อง	F^n จากทฤษฎี
0				
30				
45				
60				
90				
ค่าความคลาดเคลื่อน				

ตารางที่ 2 ทดลองระหว่างเฟืองโมดูล 1ฟันกับ.....ฟัน มวล.....กิโลกรัม

มุมขบ	ค่าจากเครื่อง ที่ 1	ค่าจากเครื่อง ที่ 2	ค่าลัพธ์ของ 2 เครื่อง	F^n จากทฤษฎี
0				
30				
45				
60				
90				
ค่าความคลาดเคลื่อน				

ตารางที่ 3 ทดลองระหว่างเฟืองโมดูล 2ฟันกับ.....ฟัน มวล.....กิโลกรัม

มุมขบ	ค่าจากเครื่อง ที่ 1	ค่าจากเครื่อง ที่ 2	ค่าลัพท์ของ 2 เครื่อง	F ⁿ จากทฤษฎี
0				
30				
45				
60				
90				
			ค่าความคลาดเคลื่อน	

ตารางที่ 4 ทดลองระหว่างเฟืองโมดูล 2ฟันกับ.....ฟัน มวล.....กิโลกรัม

มุมขบ	ค่าจากเครื่อง ที่ 1	ค่าจากเครื่อง ที่ 2	ค่าลัพท์ของ 2 เครื่อง	F ⁿ จากทฤษฎี
0				
30				
45				
60				
90				
			ค่าความคลาดเคลื่อน	

2.ทำการตั้งค่าอุปกรณ์ที่ต้องการจะทำการทดลอง ซึ่งการทดลองที่ 2 มีทั้งหมด 4 การทดลองจะเป็นการทดลองที่ให้มวลมีค่าคงที่โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงมวล (ภาระโหลด) โดยจะทำการเตรียมเฟืองทั้งสองโมดูล โดยใช้เฟืองโมดูล1ใช้กับเฟืองโมดูล2 ตามจำนวนฟันที่กำหนด แต่ละโมดูลจะขบกันโดยเฟืองที่มีจำนวนฟันน้อยสุดจะเป็นเฟืองขับและเฟืองที่เหลือเป็นเฟืองตาม โดยจะให้มวลเปลี่ยนไปดังตารางนี้แล้วคำนวณค่าแรงลัพท์ (Fⁿ) จากทฤษฎีมาเทียบความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 5 ทดลองระหว่างเฟืองโมดูล 1ฟันกับ.....ฟัน

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากเครื่อง ที่ 1	ค่าจากเครื่อง ที่ 2	ค่าลัฟท์ของ 2 เครื่อง	F ⁿ จากทฤษฎี
1				
1.5				
2				
2.5				
3				
			ค่าความคลาดเคลื่อน	

ตารางที่ 6 ทดลองระหว่างเฟืองโมดูล 1ฟันกับ.....ฟัน

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากเครื่อง ที่ 1	ค่าจากเครื่อง ที่ 2	ค่าลัฟท์ของ 2 เครื่อง	F ⁿ จากทฤษฎี
1				
1.5				
2				
2.5				
3				
			ค่าความคลาดเคลื่อน	

ตารางที่ 7 ทดลองระหว่างเฟืองโมดูล 1ฟันกับ.....ฟัน

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากเครื่อง ที่ 1	ค่าจากเครื่อง ที่ 2	ค่าลัฟท์ของ 2 เครื่อง	F ⁿ จากทฤษฎี
1				
1.5				
2				
2.5				
3				
ค่าความคลาดเคลื่อน				

ตารางที่ 8 ทดลองระหว่างเฟืองโมดูล 1ฟันกับ.....ฟัน

มวล (กิโลกรัม)	ค่าจากเครื่อง ที่ 1	ค่าจากเครื่อง ที่ 2	ค่าลัฟท์ของ 2 เครื่อง	F ⁿ จากทฤษฎี
1				
1.5				
2				
2.5				
3				
ค่าความคลาดเคลื่อน				

6. วิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลอง

.....

.....

.....

.....

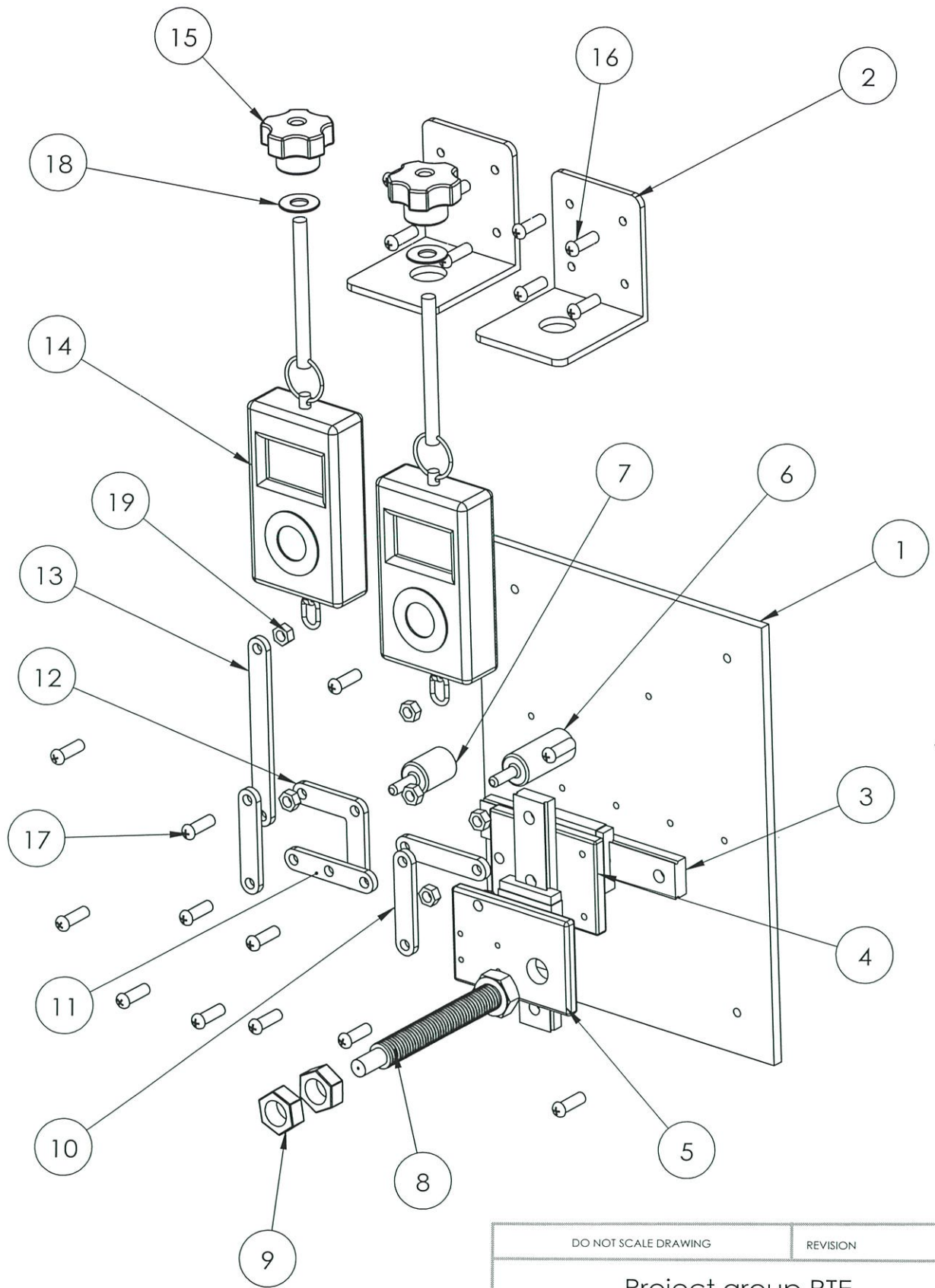
7. วิเคราะห์เงื่อนไขที่เฟืองจะได้รับแรงสูงสุดรวมไปถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเฟือง

.....

.....

.....

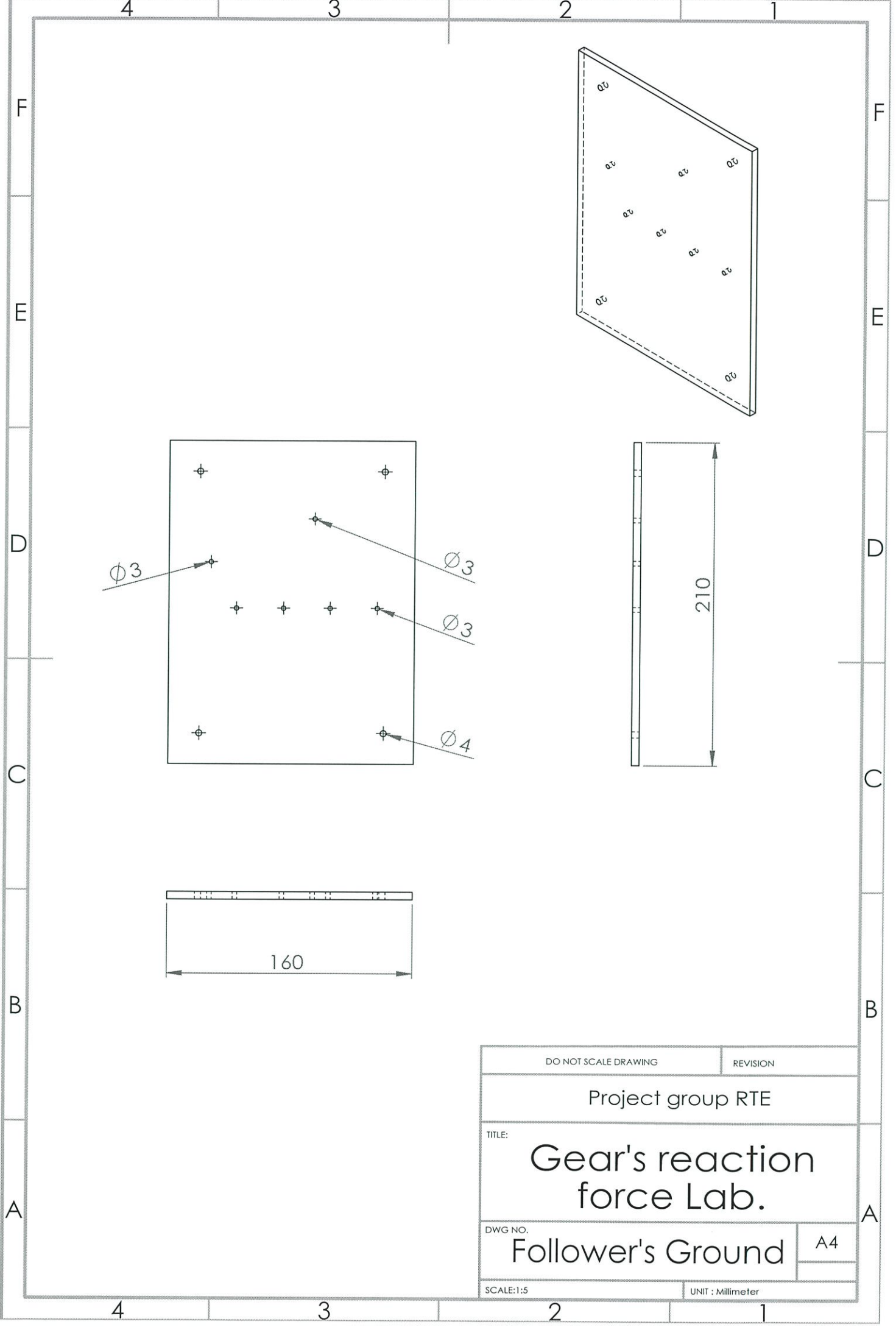
.....



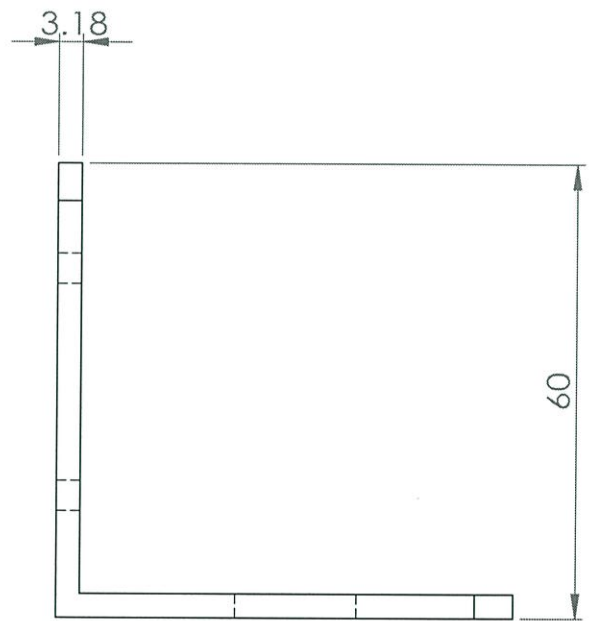
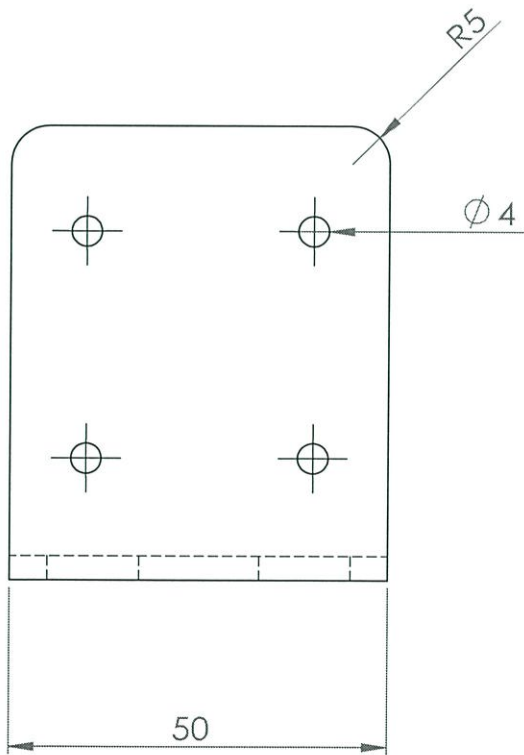
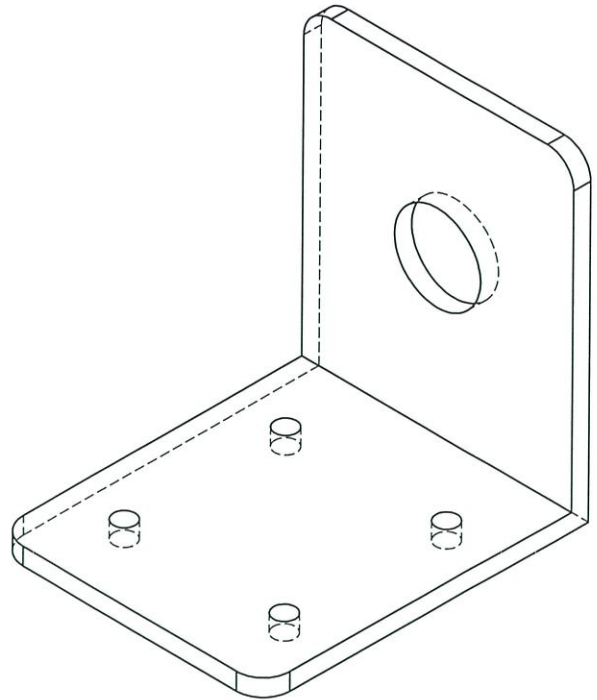
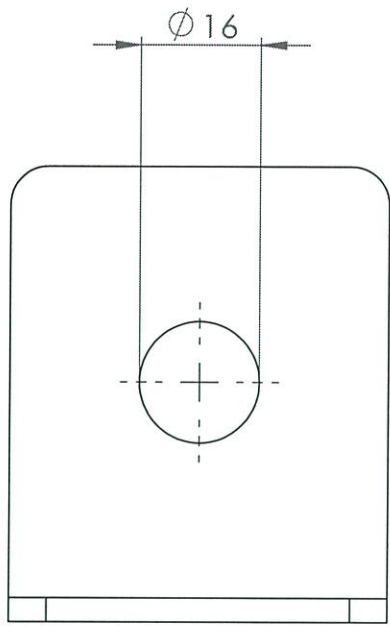
DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
Project group RTE			
TITLE: Gear's reaction force Lab.			
DWG NO.		A4	
SCALE:1:5		UNIT : Millimeter	

Follower Part

ITEM NO.	Part	Qty.
1	Follower's Ground	1
2	Wall mount	2
3	Linear motion guide	2
4	Block joint	1
5	Follower's support	1
6	Fulcrum rod2	1
7	Fulcrum rod1	1
8	Follower Shaft (Hex Head Bolt M12*90mm.)	1
9	Nut M12	2
10	Rigid 5	3
11	Turning Rigid	1
12	Angle Rigid	1
13	Rigid 80	1
14	Spring guage	2
15	Female Knob M6	2
16	Truss Head Self-drilling Screw M5*25mm.	12
17	Truss head Bolt M5*10	8
18	Ring M8	2
19	Nut M5	8



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Follower's Ground		A4
SCALE:1:5		UNIT : Millimeter



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO.		A4
SCALE:1:1		UNIT : Millimeter

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

A

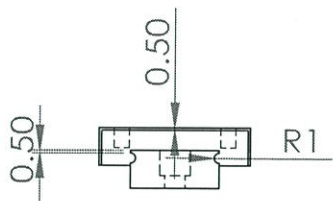
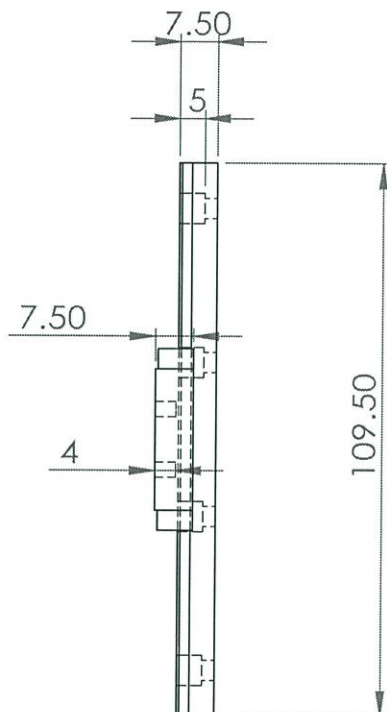
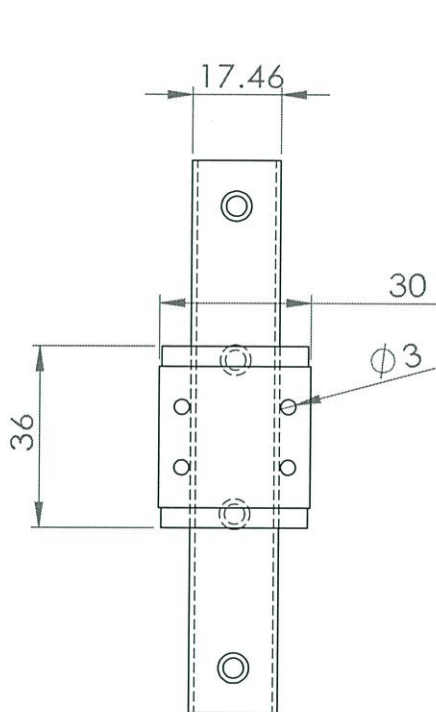
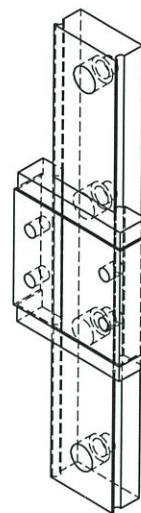
A

4

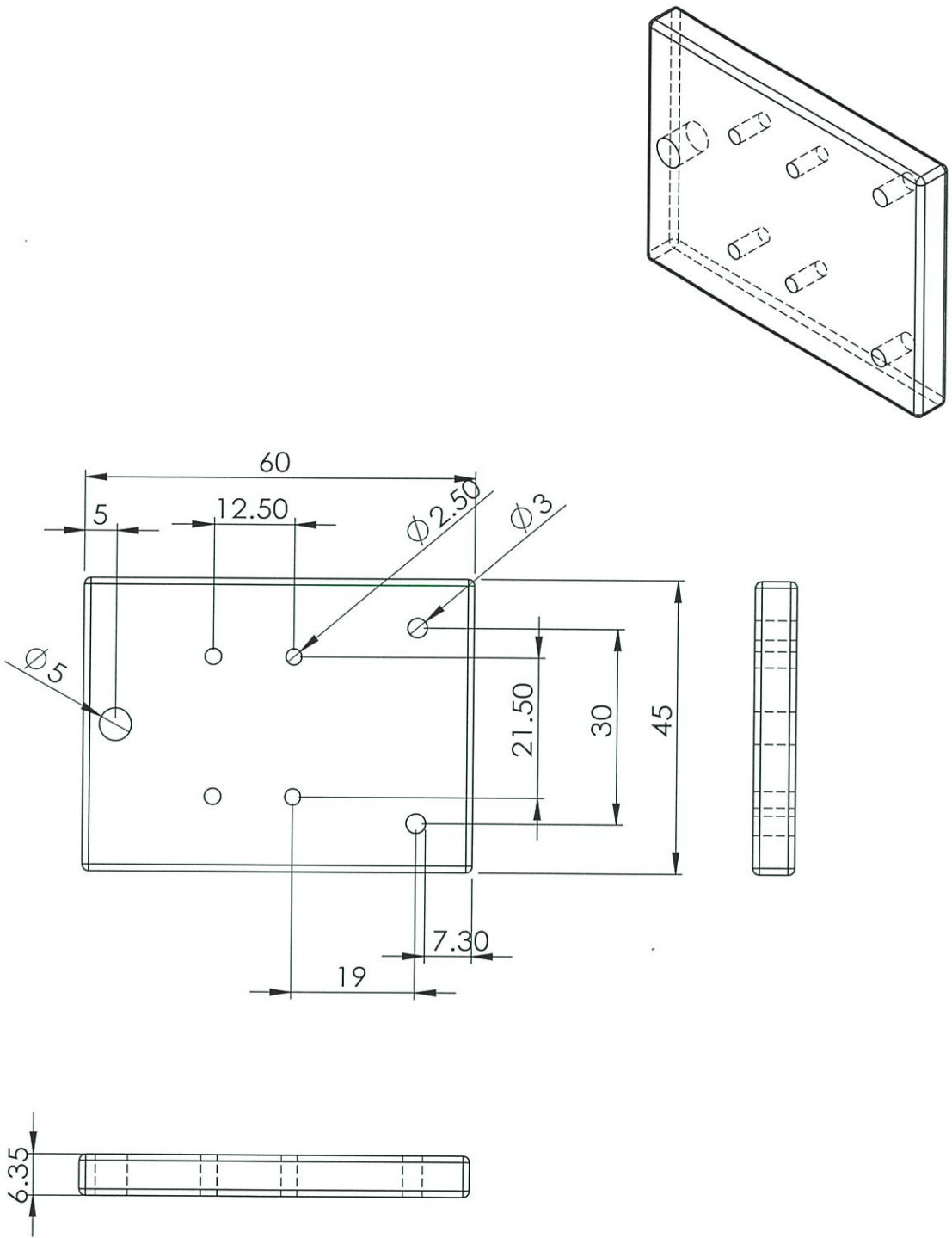
3

2

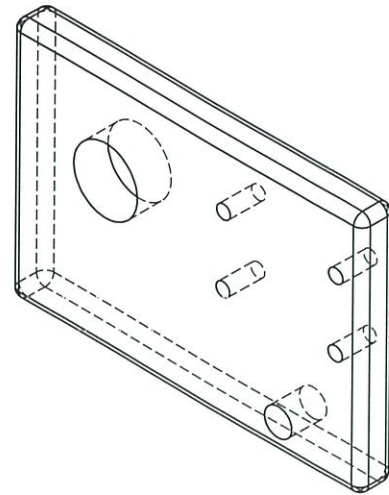
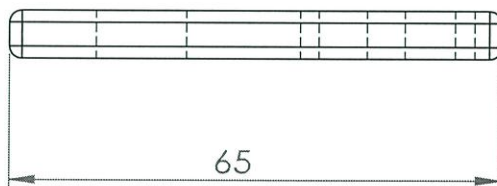
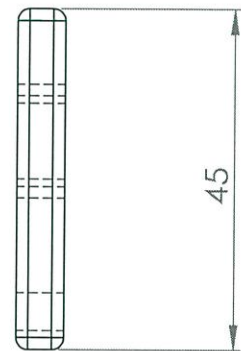
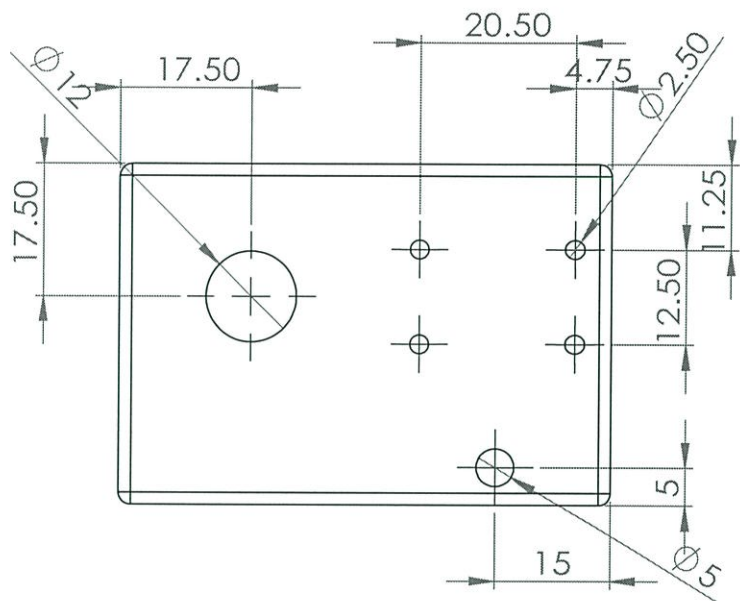
1



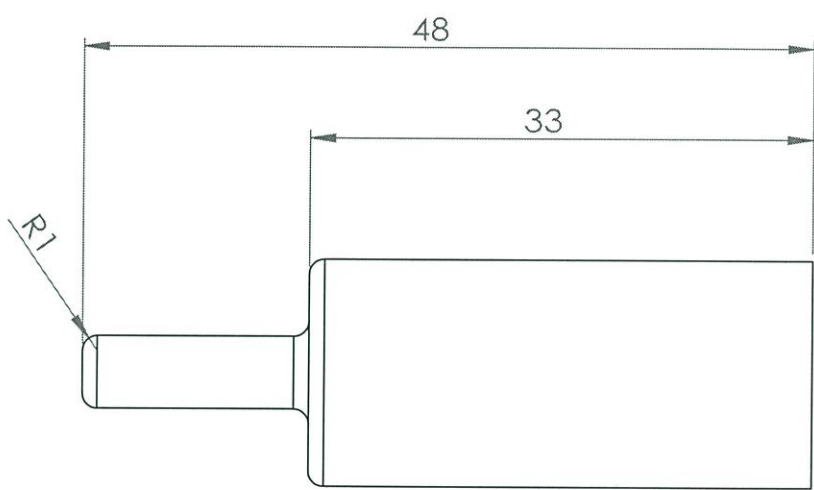
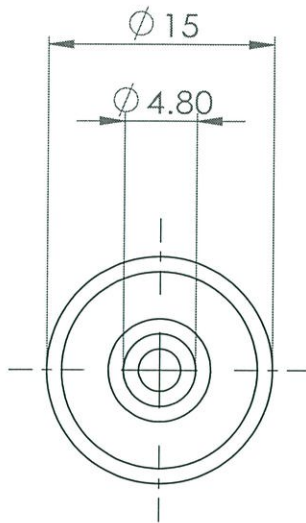
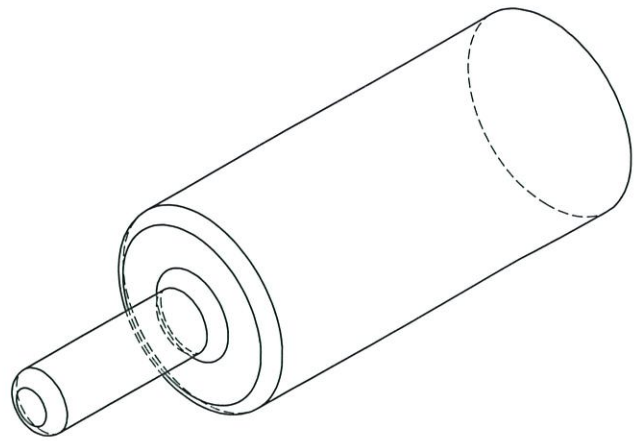
DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Linear guide		A4
SCALE:1:1		UNIT : Millimeter



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Block joint		A4
SCALE:1:1		UNIT : Millimeter



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
Project group RTE			
TITLE:		Gear's reaction force Lab.	
DWG NO.		A4	
Follower's support			
SCALE:1:1		UNIT : Millimeter	



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Fulcrum rod 2		A4
SCALE:2:1		UNIT : Millimeter

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

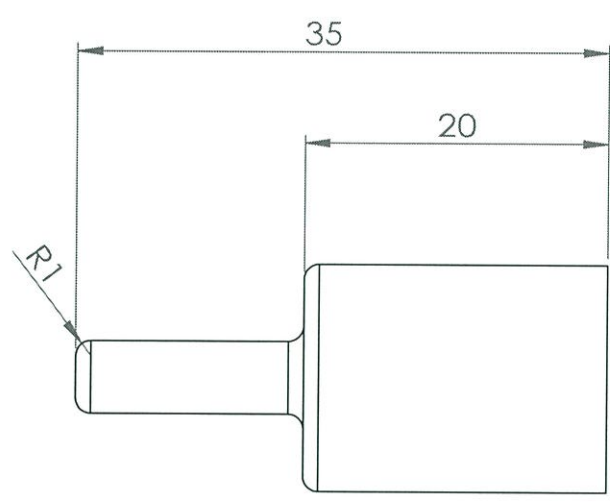
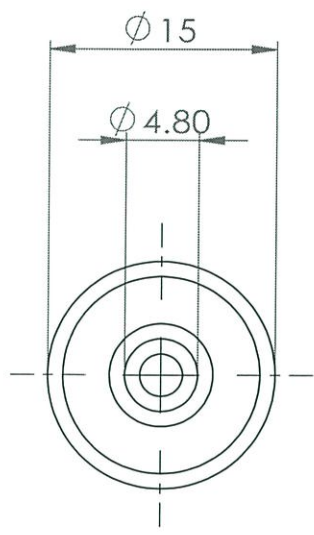
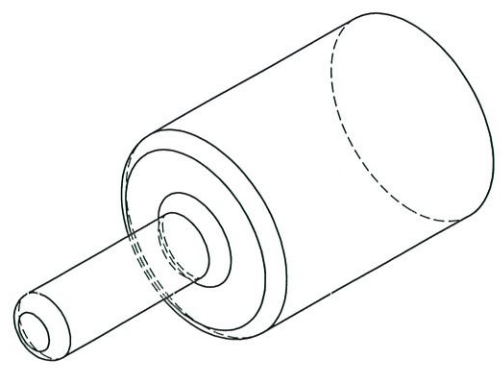
C

B

B

A

A



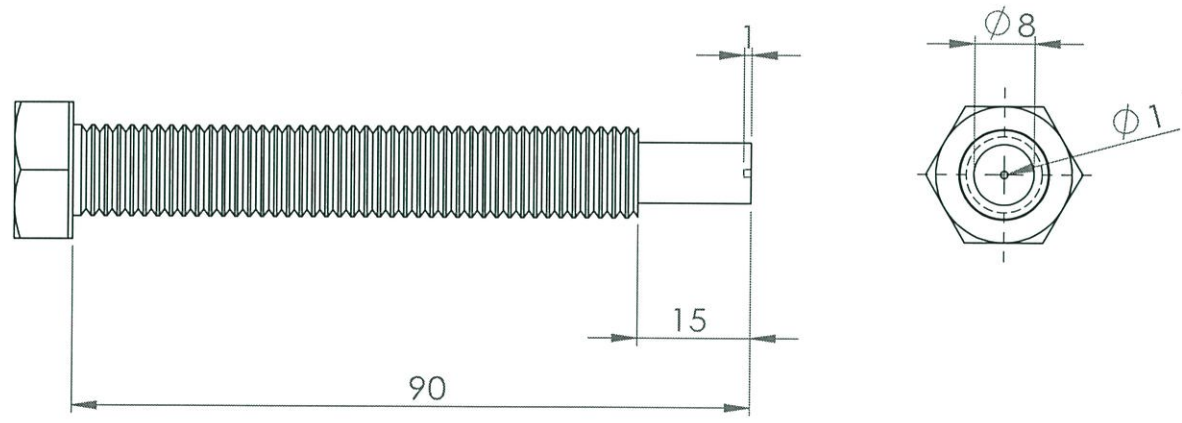
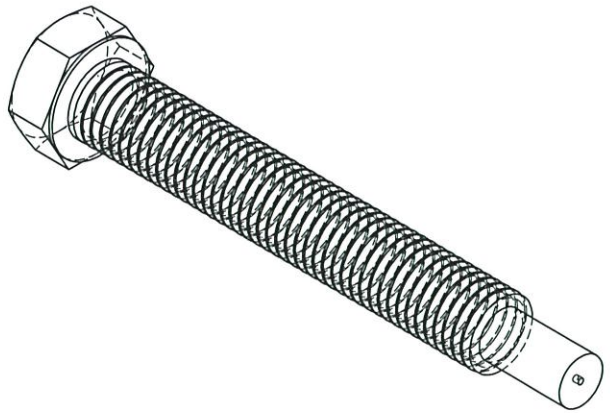
DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO.	Fulcrum rod 1	A4
SCALE:2:1	UNIT : Millimeter	

4

3

2

1



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Follower Shaft		A4
SCALE:1:2		UNIT : Millimeter

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

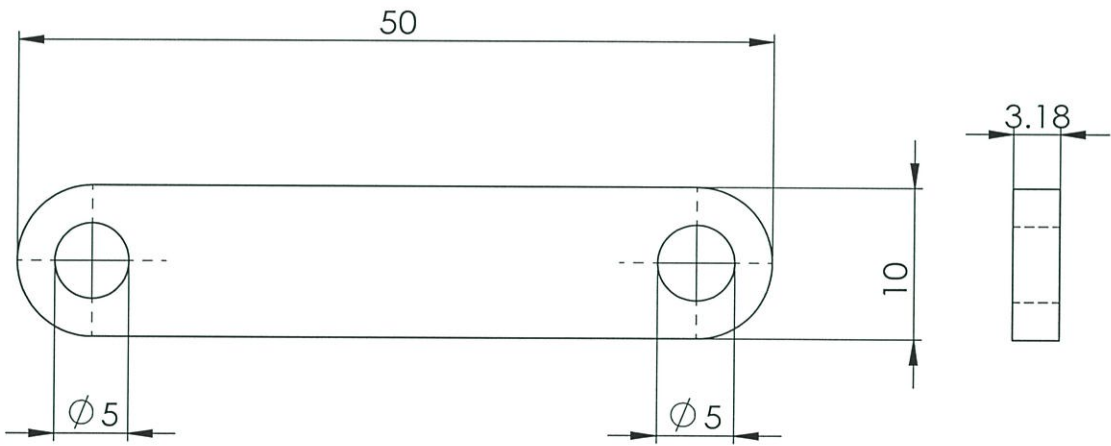
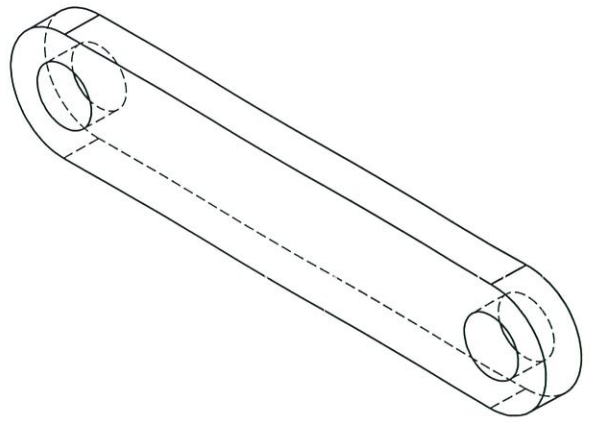
C

B

B

A

A



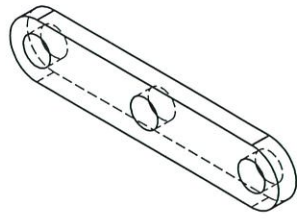
DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO.	Rigid 5	A4
SCALE:2:1	UNIT : Millimeter	

4 3 2 1

4 3 2 1

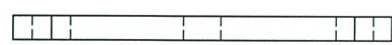
F

F



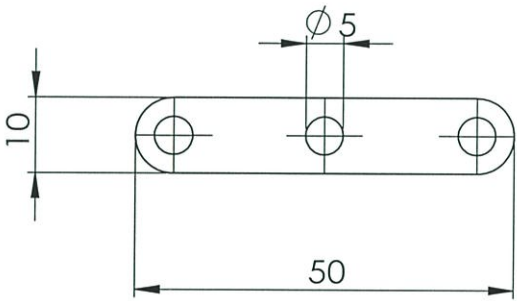
E

E



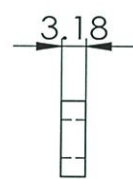
D

D



C

C



B

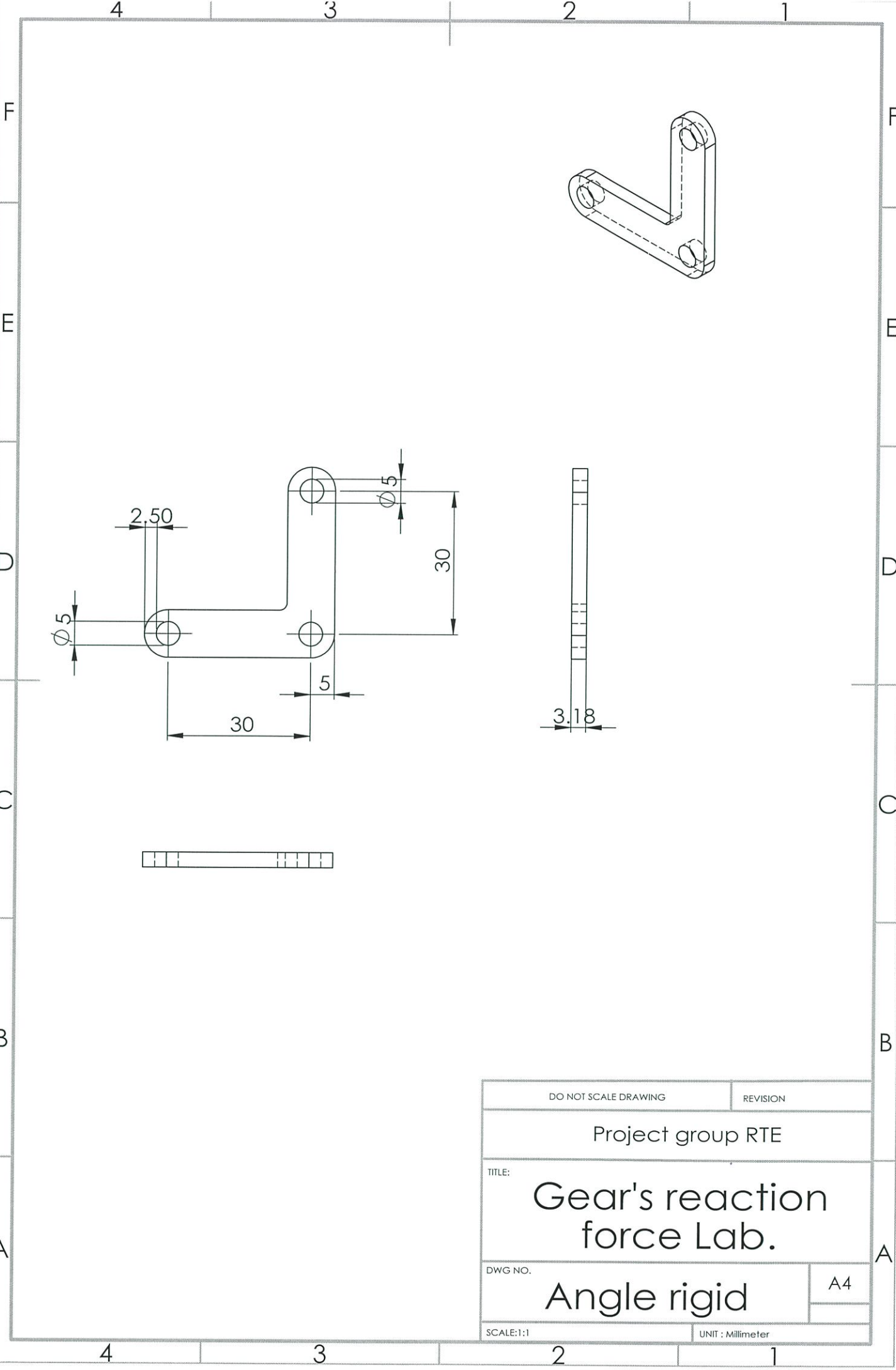
B

A

A

DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Turning rigid		A4
SCALE:1:1		UNIT : Millimeter

4 3 2 1



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Angle rigid		A4
SCALE:1:1		UNIT : Millimeter

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

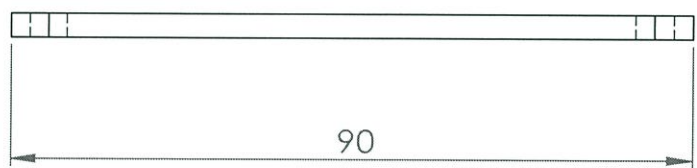
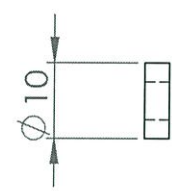
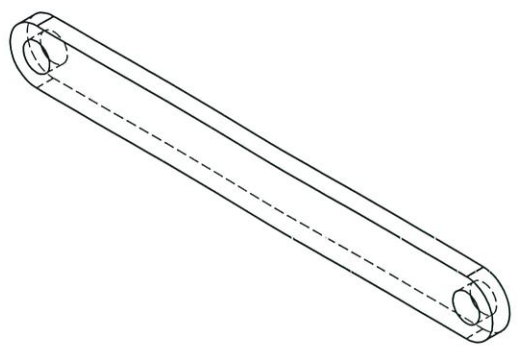
C

B

B

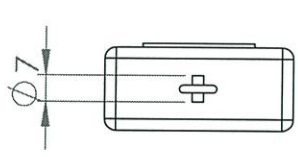
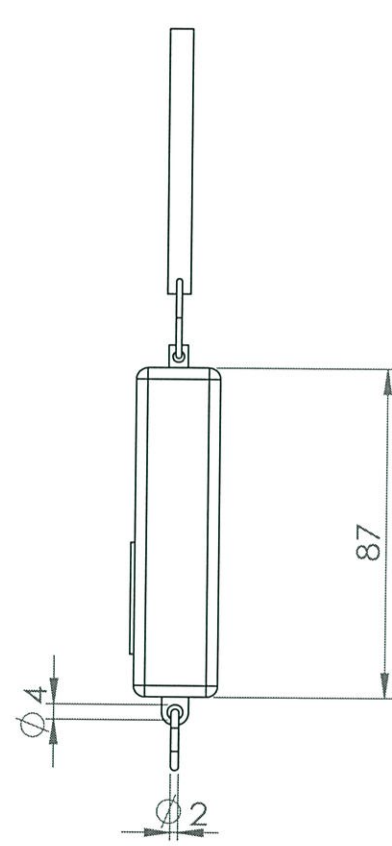
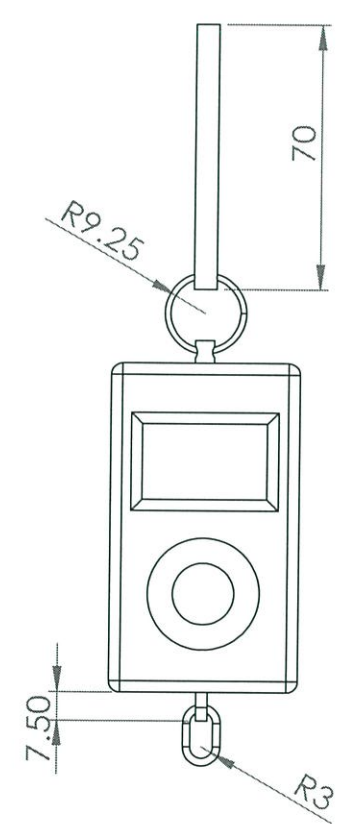
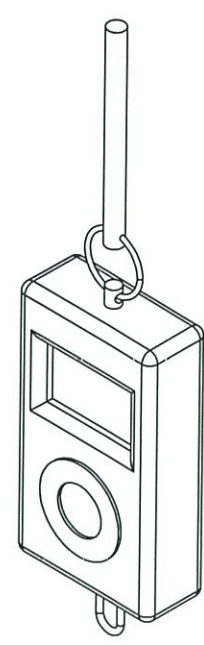
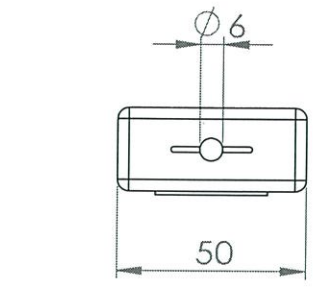
A

A

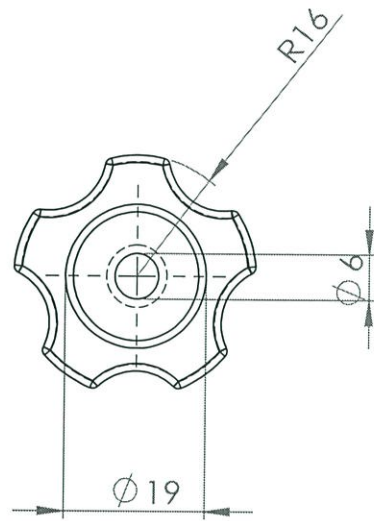
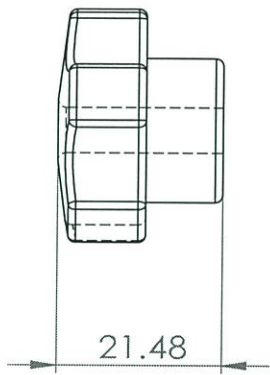
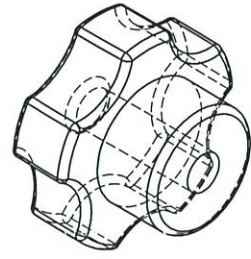


DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Rigid 80		A4
SCALE:1:5		UNIT : Millimeter

4 3 2 1



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO.		A4
SCALE:1:2		UNIT : Millimeter



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Star Knob M6 Female		A4
SCALE:1:1		UNIT : Millimeter

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

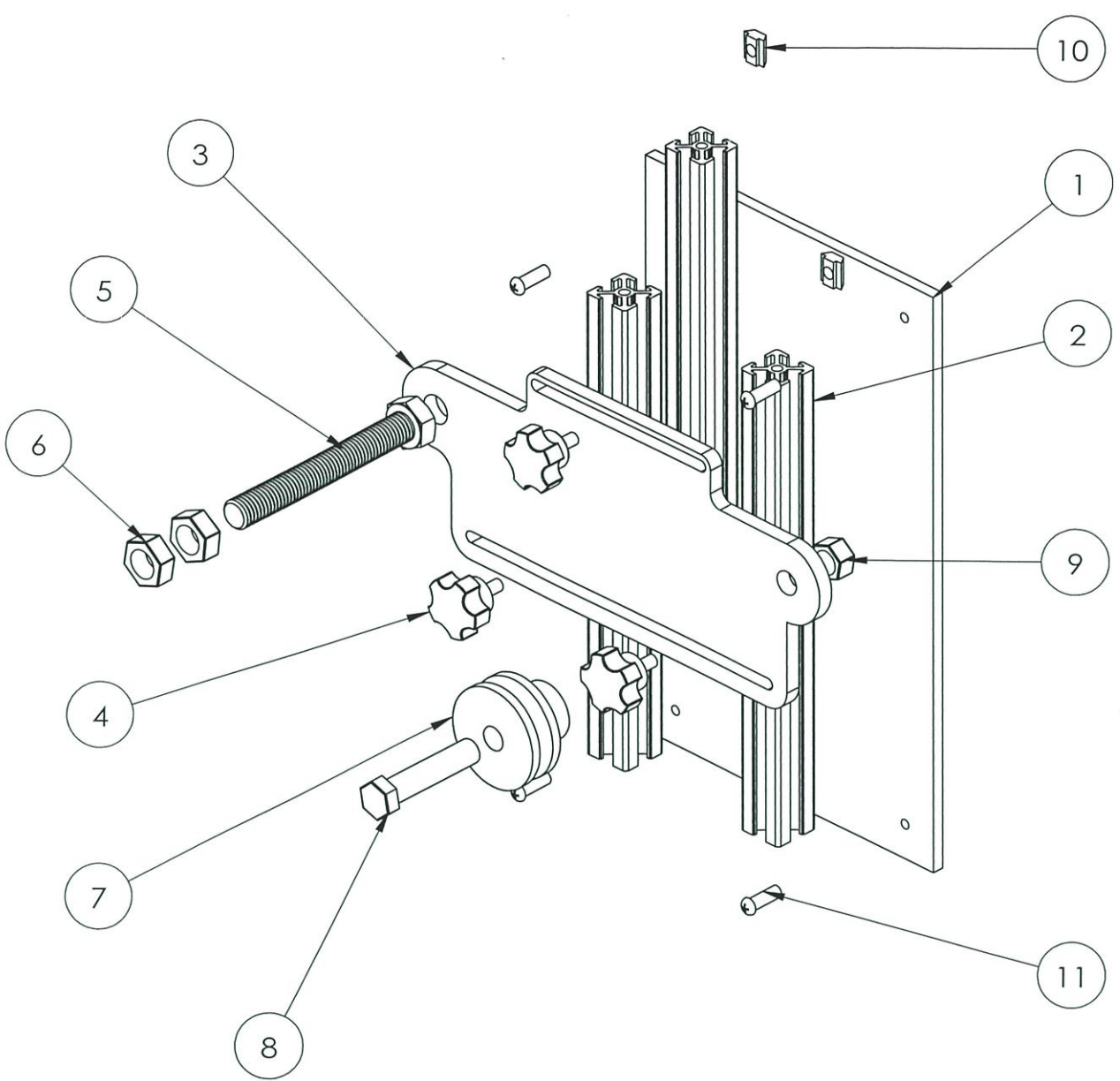
C

B

B

A

A



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Assembly Pinion Part		A4
SCALE:1:5		UNIT : Millimeter

4

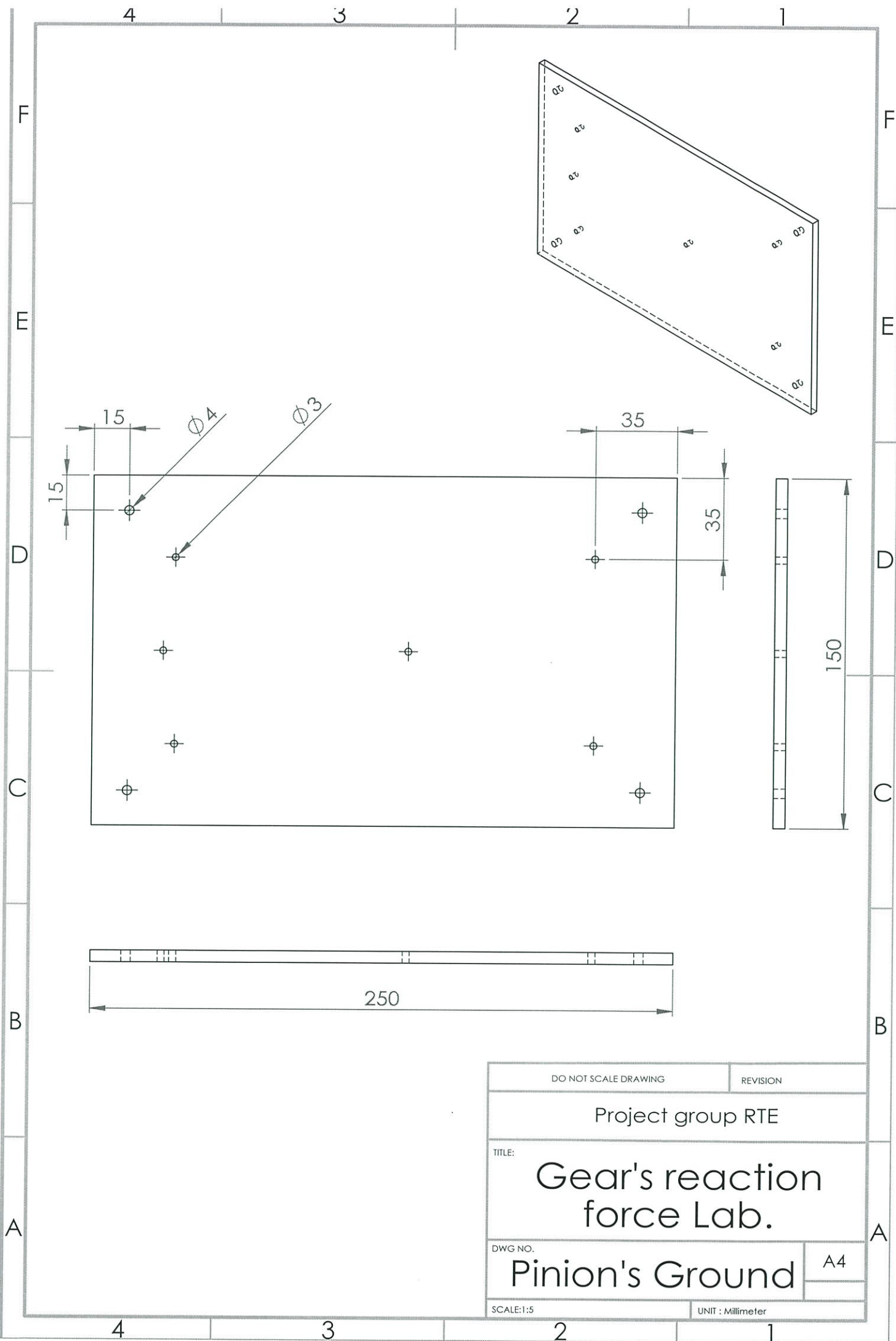
3

2

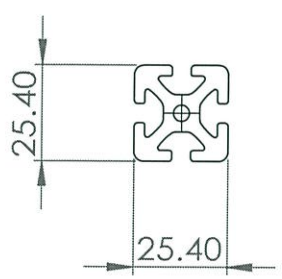
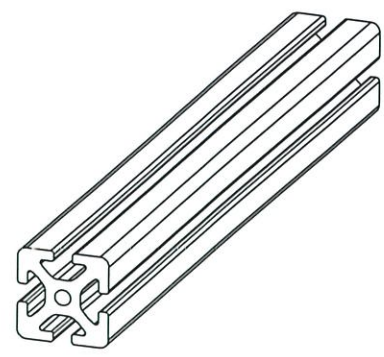
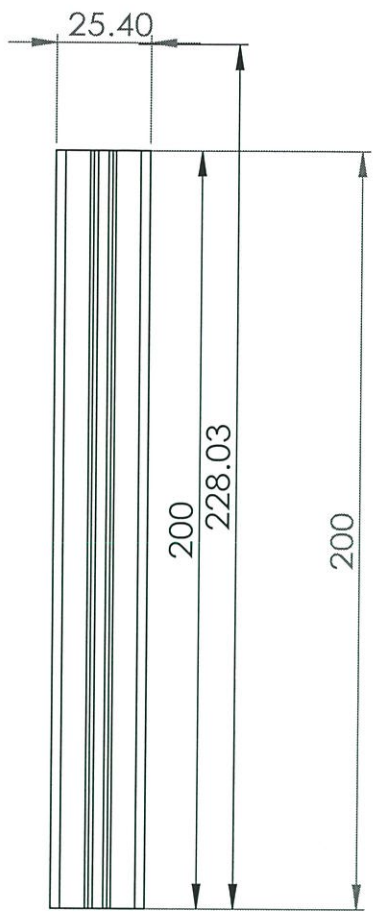
1

Pinion Part

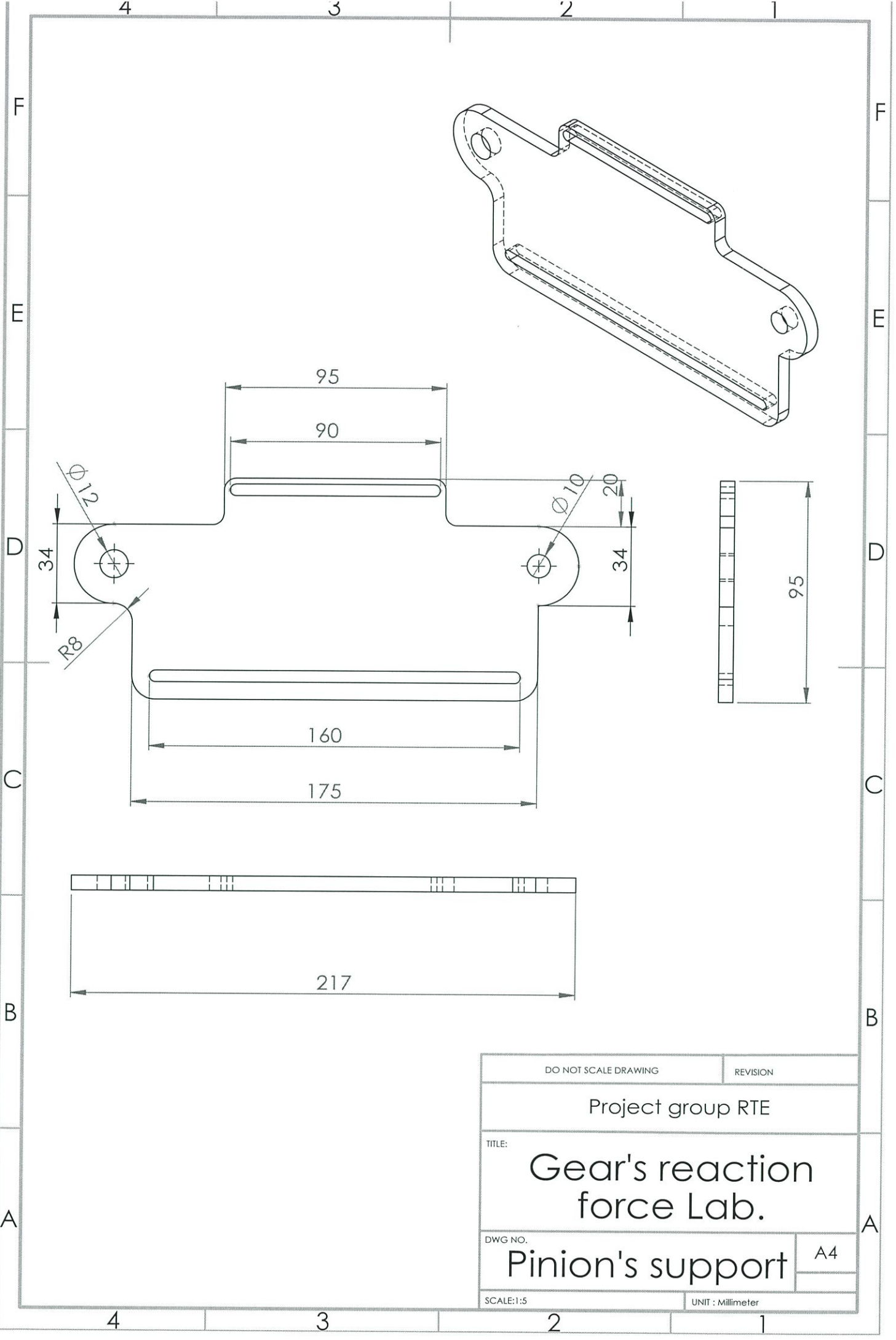
ITEM NO.	Part	Qty.
1	Pinion's Ground	1
2	Aluminium profile 20*20*200mm.	3
3	Pinion's Support	1
4	Male Star Knob M5*10mm.	3
5	Hex Head Bolt M12*90mm.	1
6	Nut M12	2
7	Aluminium pulley	
8	Hex Head Bolt M10*45mm.	1
9	Nut M10	1
10	V-Slot Nut M5	3
11	Truss Head Self-drilling Screw M5*25mm.	4



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
Project group RTE			
TITLE:		Gear's reaction force Lab.	
DWG NO.		Pinion's Ground	
SCALE:1:5		UNIT : Millimeter	
		A4	



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Alumium profile		A4
SCALE:1:2		UNIT : Millimeter



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO. Pinion's support		A4
SCALE: 1:5		UNIT : Millimeter

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

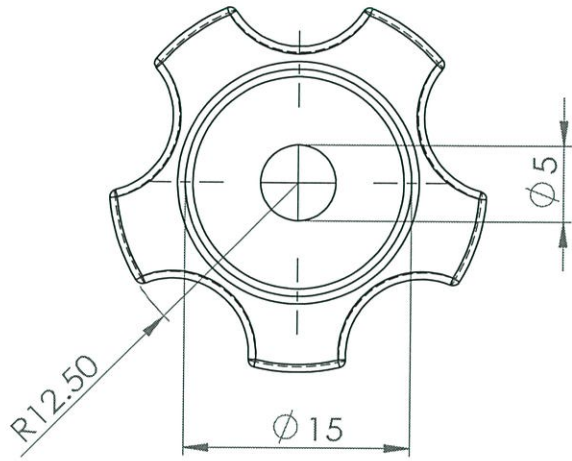
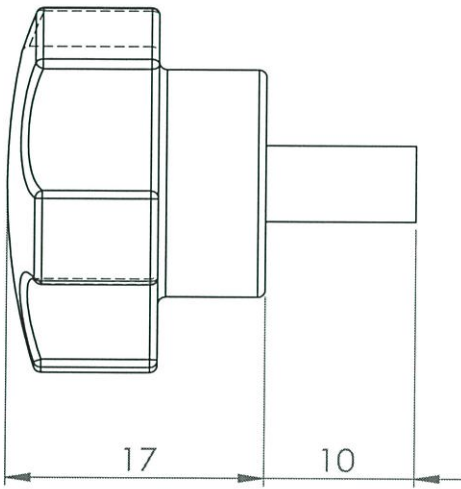
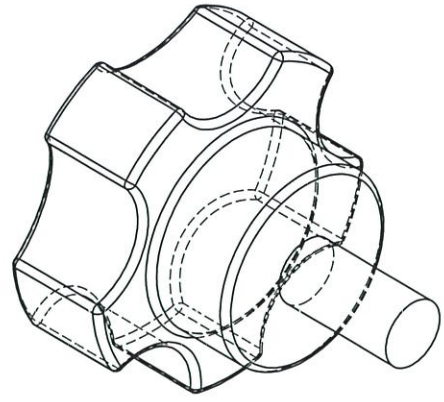
C

B

B

A

A



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE:	Gear's reaction force Lab.	
DWG NO.	Star Knob M5 Male	A4
SCALE:2:1	UNIT : Millimeter	

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

A

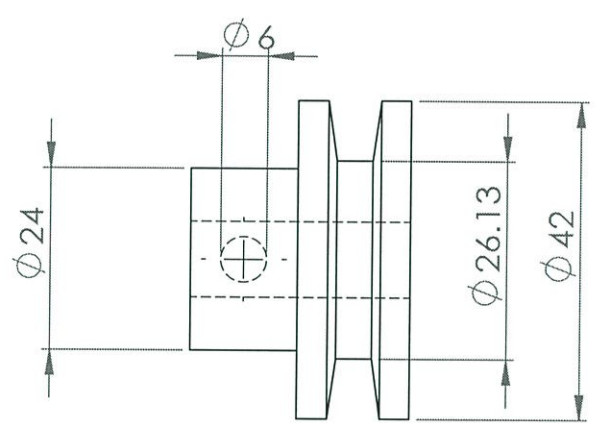
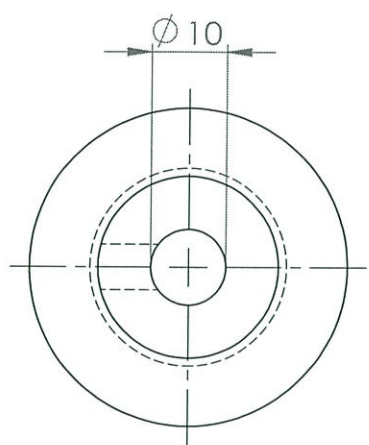
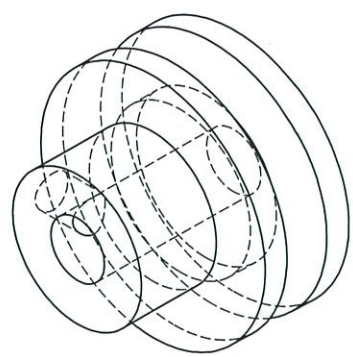
A

4

3

2

1



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
Project group RTE		
TITLE: Gear's reaction force Lab.		
DWG NO.		A4
SCALE:1:1		UNIT : Millimeter