

การออกแบบและพัฒนาแพนโทกราฟแบบไม่สมมาตรสำหรับการวัดแรงสัมผัส

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN ASYMMETRIC PANTOGRAPH
FOR CONTACT FORCE MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและพัฒนาแพนโทกราฟแบบไม่สมมาตรสำหรับการวัดแรงสัมผัส

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN ASYMMETRIC PANTOGRAPH
FOR CONTACT FORCE MEASUREMENT



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN ASYMMETRIC PANTOGRAPH
FOR CONTACT FORCE MEASUREMENT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและพัฒนาแผนโทกราฟแบบไม่สมมาตรสำหรับการวัดแรงสัมผัส

นายนิธินันท์	สินพันธุ์	59010738
นางสาวนิลเนตร	จันทร์แก้ว	59010747
นายพัฒนภูมิ	บุญรอด	59010942
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2562		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาแผนโทกราฟแบบไม่สมมาตรใช้สำหรับการทดลองวัดแรงสัมผัส โดยชุดทดลองประกอบด้วยแบบจำลองย่อส่วนแผนโทกราฟขนาด 1:3.33 ซึ่งจะถูกยกขึ้นด้วยระบบนิวเมติกและสายไฟเหนื่อหัวที่ทำจากสายเคเบิล ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์

ในการออกแบบระบบแผนโทกราฟ ใช้การวิเคราะห์พลศาสตร์ของวัตถุเกร็ง เพื่อหาขนาดแรงยกสูงสุด จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ออกแบบระบบนิวเมติก เลือกขนาดกระบอกสูบนิวเมติกและความดันลมอัดที่เหมาะสม นอกจากนี้โครงงานนี้ได้นำเสนอวิธีการวัดแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างแผนโทกราฟและสายไฟเหนื่อหัวด้วยเซนเซอร์วัดความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN ASYMMETRIC PANTOGRAPH FOR CONTACT FORCE MEASUREMENT

Nitinun Sinpan 59010738
Nilnet Jankaew 59010747
Patphom Boonrawd 59010942
Asst.Prof.Dr.Monsak Pimsarn Advisor
Year 2019

ABSTRACT

The objectives of this project are to design and develop an asymmetric pantograph model for contact force measurement. The designed experiment set includes an asymmetric pantograph model size 1:3.33 lifted up by pneumatics system and contact wire driven by a motor.

For a pantograph system design, dynamics of rigid multi-body system was used to analyze maximum force that can lift the pantograph up and then it was employed to design pneumatics system. Moreover, this project also proposes the contact force measurement method between pantograph and contact wire using accelerometers.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความเอาใจใส่ คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆและคอยให้กำลังใจเสมอมา

และสุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้มีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา ผู้เป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาและยังให้กำลังใจอย่างเต็มที่ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ มีคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น

นิธินันท์ สิ้นพันธุ์
นิลเนตร จันทรแก้ว
พัฒนภูมิ บุญรอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ|||อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป	VII
สารบัญรูป (ต่อ).....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือหัว.....	3
2.2.1.1 ระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือหัว (Overhead catenary).....	3
2.2.1.2 องค์ประกอบของแผนโทกราฟ	5
2.2.1.3 การซ่อมบำรุงแผนโทกราฟ.....	5
2.2.2 สาเหตุการอาร์ค.....	6
2.2.3 แรงสัมผัสระหว่างแผนโทกราฟและสายไฟเหนือหัว	6
2.2.4 การวัดแรงสัมผัส	8
2.2.5 การออกแบบกลไก 4 ชิ้นส่วนต่อโยง (Four bar linkage).....	10
2.2.5.1 กลไก 4 ชิ้นส่วนต่อโยง (Four bar linkage)	10
2.2.5.2 กฎของ Grashof (Grashof's law).....	10
2.2.6 การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์	11
2.2.7 โมเมนต์ความเฉื่อยของมวล.....	12
2.2.8 ค่าความเร่งรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย.....	12
2.2.9 วิธีการสร้างแบบจำลอง.....	13
2.2.10 ระบบขับเคลื่อนกำลังแผนโทกราฟ.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัดqvวางอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.11 การคำนวณและการเลือกกำลังมอเตอร์.....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	17
3.1 การออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ.....	17
3.1.1 ต้นแบบการศึกษาแบบจำลองแพนโทกราฟ.....	17
3.1.2 การออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ.....	18
3.2 การวิเคราะห์เชิงพลวัต (Dynamics analysis).....	20
3.2.1 การวิเคราะห์การกระจัดเชิงมุม.....	21
3.2.2 การวิเคราะห์ความเร็วเชิงมุม.....	23
3.2.3 การวิเคราะห์ความเร่งเชิงมุม.....	24
3.2.4 การวิเคราะห์ความเร่งในพิกัด X Y.....	25
3.3 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆด้วยโปรแกรม Matlab.....	29
3.4 การจำลองลักษณะของแรงสัมผัส.....	33
3.5 ระบบนิวเมติก (Pneumatics).....	35
3.6 การจัดทำแบบจำลองแพนโทกราฟ.....	36
3.7 การติดตั้งแบบจำลองแพนโทกราฟ.....	36
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลลัพธ์.....	38
4.1 การทดสอบการเคลื่อนที่แพนโทกราฟ.....	38
4.2 แนวทางการทดสอบการวัดแรงสัมผัส.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	45
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	45
5.2 ปัญหาจากการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	45
ภาคผนวก.....	46
ภาคผนวก ก แบบจำลองแพนโทกราฟ (SOLIDWORKS).....	47
ภาคผนวก ข วิธีการหาค่าจุดศูนย์กลางมวล ค่ามวล และค่าโมเมนต์เฉื่อยเชิงมวลS.....	52
ภาคผนวก ค โปรแกรมคำนวณใน Matlab.....	60
เอกสารอ้างอิง.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงข้อมูลเกี่ยวกับการซ่อมบำรุงแพนโทกราฟ.....	5
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันของลม (Coefficients of Wind Pressure), C.....	7
2.3 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างวัสดุ 2 วัสดุ.....	15
3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแพนโทกราฟ TSG3	17
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละชิ้นส่วนของแบบจำลองแพนโทกราฟ	20
4.1 ผลการทดสอบแบบจำลองแพนโทกราฟ.....	38
4.2 ตารางตัวอย่างการคำนวณ แรงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics force).....	41
4.3 ตารางตัวอย่างการคำนวณ แรงภายในเนื่องจากสปริง (Inner force).....	42
4.4 ตารางตัวอย่างการคำนวณ แรงเฉื่อย (Inertia force).....	42
4.5 ตารางตัวอย่างแสดงผลการวัดค่าความเร่งและแรงสัมผัสที่เกิดขึ้น.....	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตีพิมพ์อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบสายไฟเหนือหัว (Contact wire).....	4
2.2 การส่งผ่านกระแสไฟฟ้าจากสายไฟเหนือหัวสู่แพนโทกราฟ.....	4
2.3 องค์ประกอบของแพนโทกราฟ	5
2.4 การเกิดอาร์คระหว่างแพนโทกราฟกับสายไฟเหนือหัว	6
2.5 สมดุลแรงบนแพนโทกราฟ.....	6
2.6 รายละเอียดของแรงภายในเนื่องจากสปริง	7
2.7 แผนภาพวัตตอิสระของระบบ	8
2.8 การส่งผ่านแรงที่มีค่าอัตราส่วนความถี่เปลี่ยนไป	9
2.9 กลไก 4 ชั้นส่วนต่อโยง	10
2.10 ประเภทของกลไก 4 ชั้นส่วนต่อโยง	11
2.11 การคำนวณโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule).....	12
2.12 แสดงแผนภาพของแรงและโพลด์ที่กระทำบนตัวรอกซึ่งมีมอเตอร์ขับเคลื่อน.....	14
3.1 แพนโทกราฟ TSG3.....	17
3.2 แบบจำลองแพนโทกราฟออกแบบด้วย SOLIDWORKS	18
3.3 ออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ (1)	18
3.4 ออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ (2)	19
3.5 ออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ (3)	19
3.6 ออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ (4)	19
3.7 แผนภาพวัตตอิสระ	20
3.8 การวิเคราะห์การกระจัดเชิงมุม.....	21
3.9 การวิเคราะห์การกระจัดเชิงมุม (2).....	22
3.10 การวิเคราะห์ความเร็วเชิงมุม.....	23
3.11 การวิเคราะห์ความเร่ง	25
3.12 แผนภาพวัตตอิสระ ชั้นส่วนที่ 2	26
3.13 แผนภาพวัตตอิสระ ชั้นส่วนที่ 3	27
3.14 แผนภาพวัตตอิสระ ชั้นส่วนที่ 4	28
3.15 สมการความสัมพันธ์หาแรงภายในในรูปแบบเมทริกซ์	28
3.16 แผนภาพแสดงการทำงาน (Flowchart)	29
3.17 กราฟแสดงมุมที่เปลี่ยนไปของแต่ละชั้นส่วน.....	30
3.18 กราฟแสดงความเร็วเชิงมุมที่เปลี่ยนไปของแต่ละชั้นส่วน	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด viii อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 กราฟแสดงความเร่งเชิงมุมที่เปลี่ยนไปของแต่ละชั้นส่วน	31
3.20 กราฟแสดงความเร่งในแกน x ที่เปลี่ยนไปของแต่ละชั้นส่วน	31
3.21 กราฟแสดงความเร่งในแกน y ที่เปลี่ยนไปของแต่ละชั้นส่วน	32
3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบนข้อต่อกับเวลา	32
3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับมุมของชั้นส่วนที่ 2	33
3.24 กราฟแสดงการจัดของมวลแพนเฮดและมวลของชั้นที่ 3	35
3.25 แบบจำลองแพนโทกราฟ	36
3.26 การต่อระบบท่อลม	37
3.27 การติดตั้งเซนเซอร์	37
4.1 ชุดแพนโทกราฟที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์	38
4.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเซนเซอร์	39
4.3 แผงควบคุมและขั้นตอนการปรับความเร็วรอบที่แผงควบคุม	40
4.4 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมรับค่าความเร่งจากเซนเซอร์วัดความเร่ง	40
4.5 แสดงข้อมูลตัวอย่างที่ได้รับจากโปรแกรมและการคำนวณ	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าเป็นหนึ่งในวิธีการเดินทางที่ได้รับความนิยมมาก โดยเฉพาะในเมืองที่ประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าสามารถขนส่งผู้โดยสารจำนวนมากไปยังสถานีปลายทางในระยะเวลาสั้นๆ สำหรับประเทศไทย ระบบรถไฟฟ้าที่รู้จักกันเป็นอย่างดี คือ รถไฟฟ้าบีทีเอส (Bangkok Transit System), รถไฟฟ้ามหานคร (Metropolitan Rapid Transit) และรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (Airport Rail Link) แน่นอันวาระบบรถไฟฟ้าต้องการกระแสไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนให้ระบบสามารถทำงานได้ โดยทั้งสามระบบมีรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างกัน รถไฟฟ้าบีทีเอส, รถไฟฟ้ามหานคร รับและจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านรางที่สาม (Third rail) ส่วนรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิใช้ระบบจ่ายไฟเหนือหัว (Overhead catenary)

ระบบจ่ายไฟเหนือหัว (Overhead catenary) เป็นระบบที่ใช้สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ทางรถไฟประเภทหนึ่ง ประกอบด้วย สถานีไฟฟ้าย่อย (Sub-Power station), รถไฟฟ้า (Electric Multiple Unit), แพนโทกราฟ (Pantograph) และสายไฟเหนือหัว (Catenary wire) โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลไปตามสายไฟเหนือหัวที่ยึดตรึงกับเสา เมื่อรถไฟฟ้ายกพานโทกราฟขึ้นติดกับสายไฟเหนือหัว กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าผ่านพานโทกราฟ เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะไหลลงรางกลับไปยังสถานีจ่ายไฟหรือลงดินต่อไป

เมื่อพานโทกราฟถูกยกขึ้นติดกับสายไฟเหนือหัว จุดสัมผัส (Contact points) ระหว่างพานโทกราฟกับสายไฟเหนือหัวจะเกิดแรงสัมผัส (Contact force) ขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการสัมผัส (Contact performance) แรงสัมผัสที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการสึกหรอและระดับสายไฟเหนือหัวเปลี่ยนแปลง ในทางกลับกันหากแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นไม่มากพอ จะทำให้เกิดการสึกหรอและการอาร์คของกระแสไฟฟ้า ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างพานโทกราฟและสายไฟเหนือหัว การออกแบบและพัฒนาพานโทกราฟให้เหมาะสมจึงเป็นเรื่องสำคัญ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์กลไกการทำงานของแบบจำลองพานโทกราฟ
- 1.2.2 เพื่อออกแบบแบบจำลองพานโทกราฟโดยย่อส่วนจากของจริง

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ต้นแบบ คือ แพนโทกราฟ TSG3
- 1.3.2 ไม่คิดผลเนื่องจาก Aerodynamics

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลและออกแบบแพนโทกราฟ
- 1.4.2 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่แพนโทกราฟ
- 1.4.3 ศึกษาการสร้างแบบจำลองย่อส่วนแพนโทกราฟ
- 1.4.4 สร้างแบบจำลองแพนโทกราฟ
- 1.4.5 ศึกษาการยกแพนโทกราฟโดยใช้ระบบนิวเมติก (Pneumatics)
- 1.4.6 ออกแบบวิธีการวัดแรงสัมผัสระหว่างแพนเฮดกับสายไฟเหนือหัว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถวิเคราะห์และเข้าใจกลไกการทำงานของแบบจำลองแพนโทกราฟ
- 1.5.2 สามารถออกแบบและสร้างแบบจำลองแพนโทกราฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jiqin Wu [1] ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแพนโทกราฟและระบบสายไฟเหนือหัว (Pantograph and contact line system) โดยกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างแพนโทกราฟและสายไฟเหนือหัว การออกแบบระบบ โครงสร้างและวิธีการซ่อมบำรุง

Joshua K. Pickard et al. [2] อธิบายเกี่ยวกับการออกแบบและการวิเคราะห์กลไก 4 ชิ้นส่วนต่อโยง (Four bar linkage) โดยการออกแบบที่เหมาะสมซึ่งสอดคล้องกับการจำแนกแต่ละการเชื่อมโยงรวมถึงการเชื่อมโยงการทับและการจำลองคิเนเมติกส์ (Kinematics) ของรูปแบบต่างๆ ของกลไก

M. IKEDA [3] วิจัยเกี่ยวกับการวัดแรงสัมผัส (Contact force) โดยการติดตั้งเซนเซอร์บนสายไฟเหนือหัว พบว่าสามารถวัดแรงได้ที่ความถี่ 15 Hz เมื่อติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่ง 2 ตัวระหว่าง dropper span และพบว่าช่วงความถี่ของการวัดแรงสัมผัสขึ้นอยู่กับจำนวนเซนเซอร์ที่ติดตั้งแต่ละพื้นที่

T. USUDA et al. [4] ศึกษาเกี่ยวกับการวัดแรงสัมผัส (Contact force) โดยการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งบนแพนโทกราฟ พบว่าสามารถวัดแรงที่เกิดขึ้นได้แม่นยำมากขึ้นและสามารถวัดได้ในช่วงความถี่กว้างขึ้น โดยสามารถวัดแรงสัมผัสที่ความถี่ 100 Hz เมื่อติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่ง 3 ตัวบนแต่ละแพนเฮด

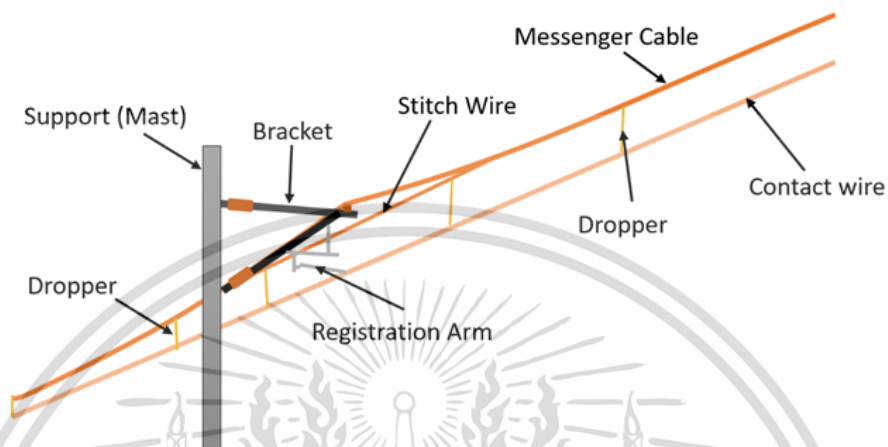
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือหัว (Basic knowledge of overhead catenary system)

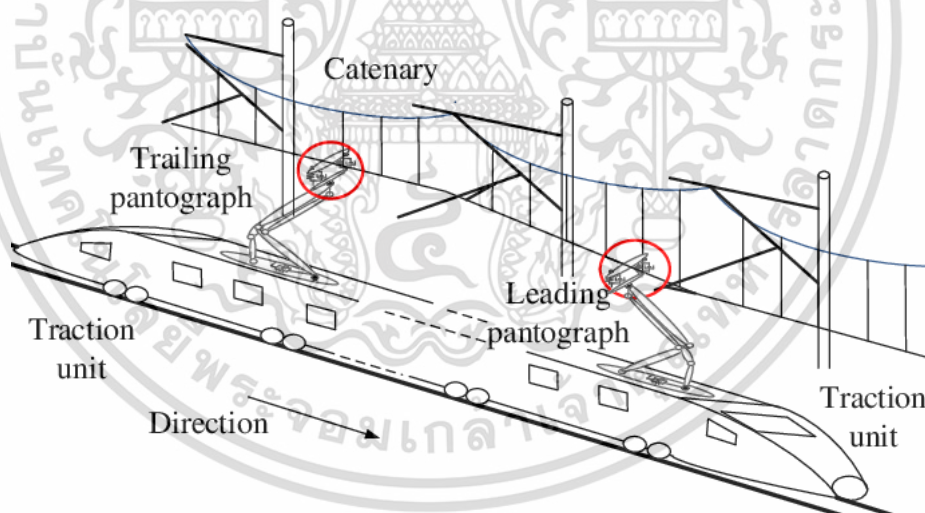
2.2.1.1 ระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือหัว (Overhead catenary)

ระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือหัว (Overhead catenary) เป็นระบบการจ่ายไฟฟ้าแก่ทางรถไฟประเภทหนึ่ง กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านสายลวดตัวนำเปลือยแขวนไว้กับฉนวนซึ่งยึดตรึงกับเสา ผ่านขารับกระแสไฟฟ้าเหนือหัวที่เรียกว่า แพนโทกราฟ (Pantograph) เข้าสู่ระบบขับเคลื่อนขบวนรถ จากนั้นจึงจะไหลลงรางกลับไปยังสถานีจ่ายไฟหรือลงดินต่อไป โดยส่วนใหญ่ระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือหัวมักต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงสูง เพื่อลดการสูญเสียจากการส่งไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล การจ่ายไฟฟ้าด้วยวิธีเหนือหัวมีข้อดี คือ บำรุงทางได้ง่ายเนื่องจากไม่มีรางจ่ายไฟฟ้าที่พื้น

ในขบวนรถไฟฟ้ามักจะเป็นแป้นโทกราฟไม่สมมาตร (Asymmetric pantograph) การทำงานแป้นโทกราฟ เป็นกลไก 4 ชั้นต่อโยง (Four bar linkage) ซึ่งมีระดับความอิสระเท่ากับ 1 โดยในการยกแป้นโทกราฟขึ้นนั้นจะใช้ระบบนิวเมติก (Pneumatics system) เป็นตัวขับเคลื่อน



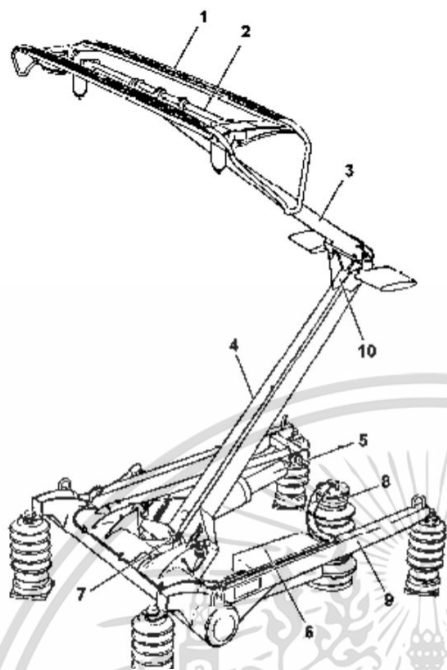
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบสายไฟเหนือหัว (Contact wire) [5]



รูปที่ 2.2 การส่งผ่านกระแสไฟฟ้าจากสายไฟเหนือหัวสู่แป้นโทกราฟ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 องค์ประกอบของแพนโทกราฟ



1. แพนเฮด (Pan head)
2. สปริงรับแรง (Head suspension)
3. ข้อต่อส่วนบน (Upper arm)
4. ข้อต่อส่วนล่าง (Lower arm)
5. กระบอกสูบลม (Air cylinder)
6. แผงควบคุม (Control panel)
7. ก้านประคอง (Forth bar)
8. ฉนวน (Air feed insulator)
9. ฐาน (Pantograph base)
10. ใบกั้นควบคุม (Vane control link)

รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของแพนโทกราฟ [1]

2.2.1.3 การซ่อมบำรุงแพนโทกราฟ

หิมะ ลม หรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานระหว่างแพนโทกราฟและสายไฟเหนือหัวลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบและซ่อมบำรุงอยู่เสมอ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

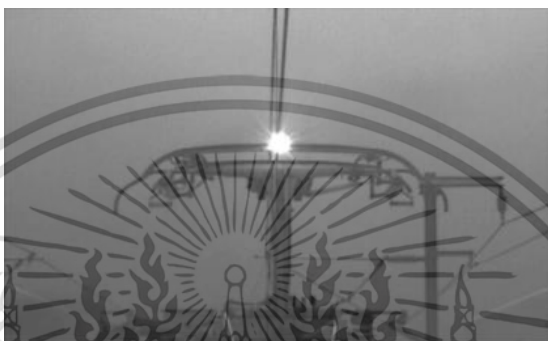
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงข้อมูลเกี่ยวกับการซ่อมบำรุงแพนโทกราฟ [1]

Product Code RST	Document Number	Task / Job No.	Task	Interval
RFB	VI0504	GP X 001	Pantograph - Inspect	Every 24 days
RFB	VI0504	GP X 002	Pantograph - Examine and lubricant	3 monthly
RFB	VI0504	GP X 003	Pantograph - Check contact force	6 monthly
RFB	VI0504	GP X 004	Pantograph - Clean and check for wear	Yearly
RFB	RD0504	GH1	Pantograph - Minor overhaul	Every 3 years
RFB	RD0504	GH2	Pantograph - Major overhaul	Every 6 years

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

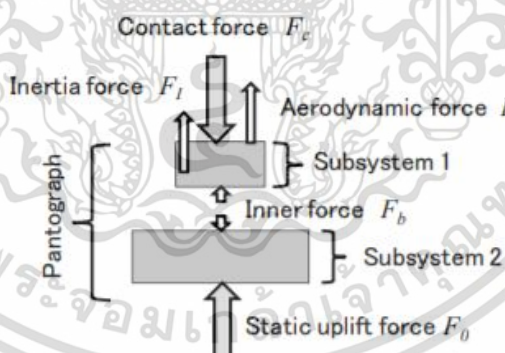
2.2.2 สาเหตุการอาร์ค

รถไฟไฟฟ้าที่ใช้ระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือหัว (Overhead catenary) จะเกิดการอาร์ค เมื่อจุดต่อทางไฟฟ้าระหว่างแพนโทกราฟกับสายไฟเหนือหัวแยกออกจากกันและกระแสไฟฟ้าปริมาณมากไหลผ่าน จุดสัมผัสสุดท้ายจะเกิดความร้อนสูงและจะเกิดอาร์คขึ้น ขณะเกิดการอาร์คจะมีปริมาณการไหลของกระแสไหลสูงและมีแสงจ้า แรงดันตกคร่อมอาร์คมีน้อย แรงดันอาร์คจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัวเท่ากับไอออนของก๊าซ



รูปที่ 2.4 การเกิดอาร์คระหว่างแพนโทกราฟกับสายไฟเหนือหัว [1]

2.2.3 แรงสัมผัสระหว่างแพนโทกราฟและสายไฟเหนือหัว



รูปที่ 2.5 สมดุลแรงบนแพนโทกราฟ [6]

- F_a คือ แรงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics force)
- F_b คือ แรงภายในเนื่องจากสปริงระหว่างระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 (Inner force)
- F_c คือ แรงสัมผัส (Contact forces)
- F_i คือ แรงเฉื่อย (Inertia force)
- F_0 คือ แรงที่เกิดจากการยก (Static uplift force)
- ระบบย่อย 1 คือ มวลของแพนเฮด (Panhead)
- ระบบย่อย 2 คือ มวลของข้อต่อส่วนบน (upper arm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics force, F_a)

จากรูปที่ 2.5 จะมีความสัมพันธ์ $F_a = C v^2$ โดยที่ C เป็นค่าคงที่ได้จากการทดสอบอุโมงค์ลม ดังแสดงในตารางที่ 2.2 เนื่องจากความเร็วขอบเขตที่ใช้ในการทดลองในชุดทดลองมีความเร็วไม่เกิน 80 km/h ส่งผลให้ไม่คิดผลลัพธ์เนื่องจากแรงทางอากาศพลศาสตร์ซึ่งมีค่าน้อยมากในการวิเคราะห์

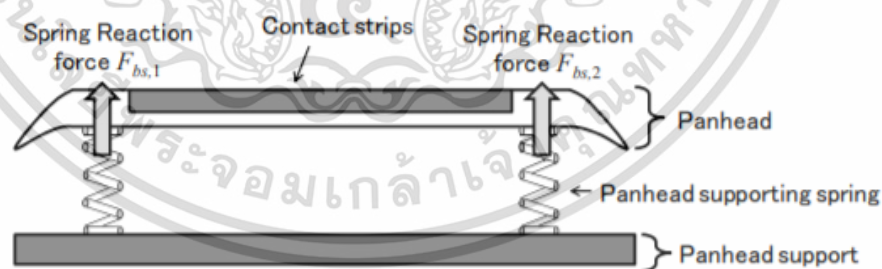
ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันของลม (Coefficients of Wind Pressure), C [1]

ความเร็ว v (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันของลม
<20	1.00
20-30	0.7225
30-35	0.5625
≥ 35	0.49

แรงภายในเนื่องจากสปริงระหว่างระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 (Inner force, F_b)

แรงภายในประกอบไปด้วย แรงปฏิกิริยาของสปริง (F_{bs}) ที่รองรับส่วนหัว กำหนดให้ให้แรงเสียดทานระหว่างส่วนหัวกับส่วนรองรับส่วนหัวมีค่าเล็กน้อยมาก ดังนั้นแรงภายในจะได้ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$F_b = \sum_{i=1}^2 F_{bs,i} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.6 รายละเอียดของแรงภายในเนื่องจากสปริงระหว่างระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 [6]

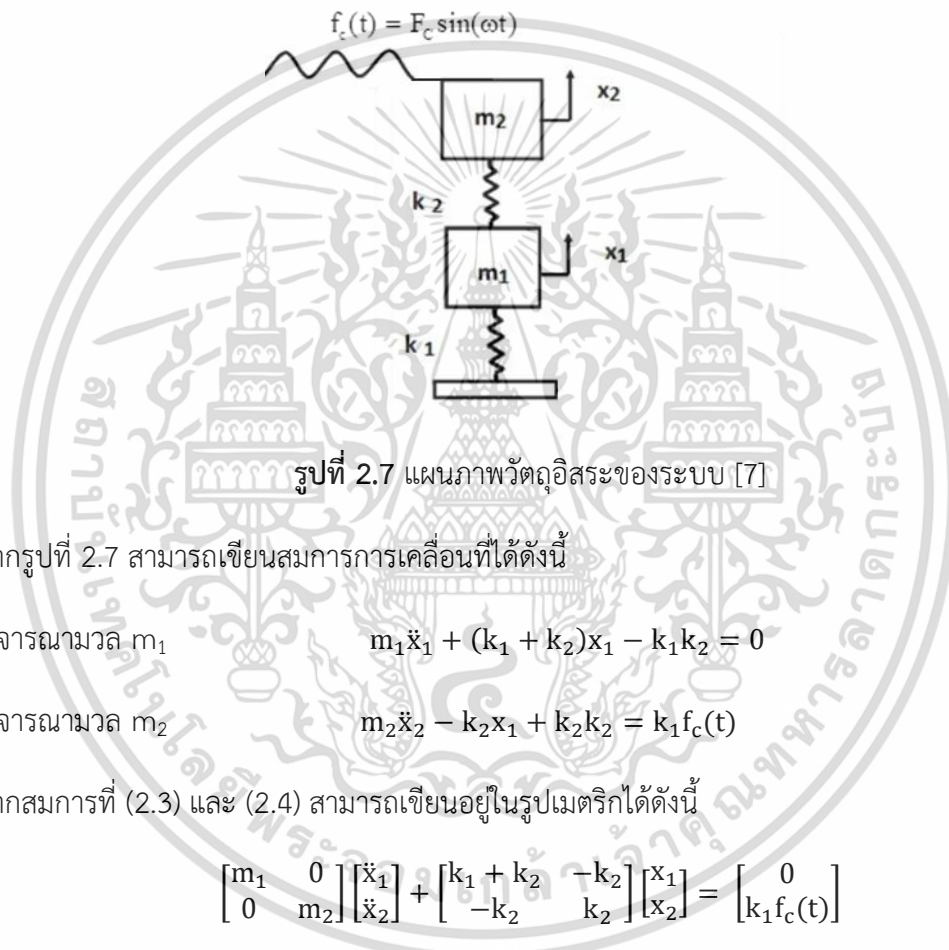
จากรูปที่ 2.6 ในกรณีของวิธีการวัดแรงสัมผัสที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แรงปฏิกิริยาของสปริงย่อย ($F_{bs,i}$) สามารถวัดได้โดยการใช้เซนเซอร์เช่น โหลดเซลล์ หรือ สเตรนเกจ ที่ติดตั้งอยู่ในส่วนหัวซึ่งมีสปริงที่ถูกต้องอยู่ 2 ตัวระหว่างส่วนหัวกับส่วนรองรับส่วนหัว

แรงเฉื่อย (Inertia force, F_i) สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของนิวตัน (Newton's law) ดังแสดงในสมการที่ (2.2)

$$F_i = \sum_i m_i a_i \quad (2.2)$$

ในกรณีของวิธีการวัดแรงสัมผัสแบบใช้ในปัจจุบัน ความเร่งโดยทั่วไปจะถูกวัดโดยเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ที่ถูกติดตั้งบนส่วนบนของแผนโทกราฟ

2.2.4 การวัดแรงสัมผัส



รูปที่ 2.7 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบ [7]

จากรูปที่ 2.7 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

พิจารณามวล m_1
$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_1 x_2 = 0 \quad (2.3)$$

พิจารณามวล m_2
$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = k_1 f_c(t) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) สามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ k_1 f_c(t) \end{bmatrix}$$

พิจารณาสมการของระบบในรูปแบบของ homogeneous

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

สมมติให้คำตอบของสมการอยู่ในรูป $\underline{x} = \underline{u}e^{j\omega t}$ เมื่อ $\underline{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$

$$\begin{bmatrix} -m_1 \omega^2 & 0 \\ 0 & -m_2 \omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -m_1 \omega^2 + k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & -m_2 \omega^2 + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(-\underline{M}\omega^2 + \underline{K})\underline{u} = \underline{0} \quad (2.5)$$

จะสามารถหาค่าของ \underline{u} ได้ก็ต่อเมื่อค่าของ $\det [-\underline{M}\omega^2 + \underline{K}] = 0$

จะได้

$$\begin{vmatrix} -m_1\omega^2 + k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & -m_2\omega^2 + k_2 \end{vmatrix} = 0$$

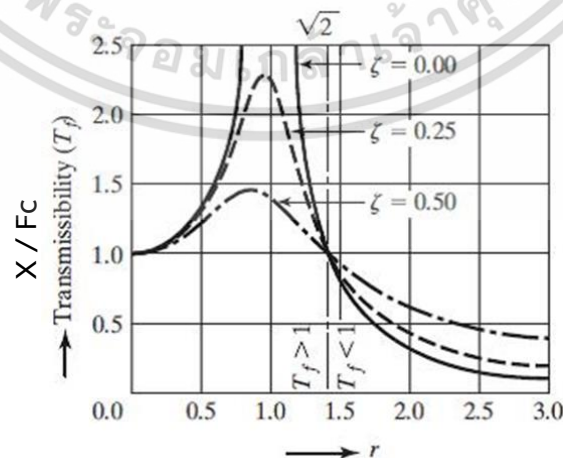
$$(-m_1\omega^2 + k_1 + k_2)(-m_2\omega^2 + k_2) - (-k_2)(-k_2) = 0 \quad (2.6)$$

$$m_1m_2\omega^4 - m_2k_1\omega^2 - m_2k_2\omega^2 - m_1k_2\omega^2 + k_1k_2 + k_2^2 - k_2^2 = 0 \quad (2.7)$$

$$m_1m_2\omega^4 - (m_2k_1 - m_2k_2 - m_1k_2)\omega^2 + k_1k_2 = 0 \quad (2.8)$$

จะพบว่าขนาดของการสั่นสะเทือนของมวลจะลดลงน้อยกว่าขนาดการสั่นของพื้นฐานการกระตุ้น ($T.R. \leq 1$) เมื่อ $r > \sqrt{2}$ ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงแยกกันสะเทือน (Isolation) ดังนั้น หากต้องการควบคุมให้การส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปยังมวลที่มีค่าน้อยจะต้องออกแบบให้ระบบที่มีการสั่นอยู่ในช่วงนี้ เนื่องจากค่า r ยิ่งมาก ขนาดของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจะลดลง การจะเพิ่มค่า r นั้นทำได้ โดยลดความถี่ธรรมชาติ โดยการลดค่าความแข็งสปริง k และเพิ่มมวล m ของระบบ

เมื่อวัตถุถูกกระทำด้วยแรงหรือสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของวัตถุ คือ $r = 1$ วัตถุนั้นจะสั่นด้วยความถี่นั้นและด้วยแอมพลิจูดที่ขนาดใหญ่ แต่ถ้าเป็นคลื่นเสียงก็จะทำให้เสียงดังมากขึ้นจนอาจทำให้วัตถุนั้นเสียหายหรืออาจเกิดความรำคาญได้ การสั่นพ้องด้วยแรง หมายถึง การสั่นพ้องที่เกิดขึ้นโดยการออกแรงกระทำกับวัตถุเป็นจังหวะที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัตถุเป็นเวลานานซึ่งแรงจะมีความถี่พอดีเท่ากับความถี่ธรรมชาติจะทำให้เกิดการสั่นพ้อง แอมพลิจูดของการสั่นที่มากขึ้นทำให้วัตถุนั้นเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 2.8

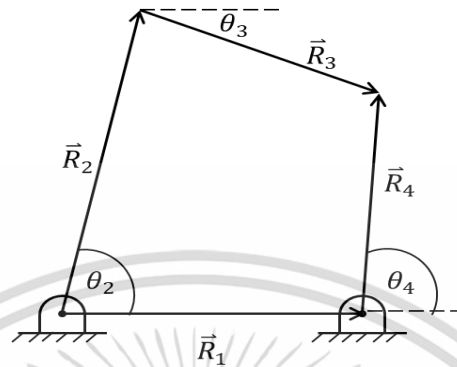


รูปที่ 2.8 การส่งผ่านแรงที่มีค่าอัตราส่วนความถี่เปลี่ยนไป [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การออกแบบกลไก 4 ชิ้นส่วนต่อโยง (Four bar linkage)

2.2.5.1 กลไก 4 ชิ้นส่วนต่อโยง (Four bar linkage)



รูปที่ 2.9 กลไก 4 ชิ้นส่วนต่อโยง[2]

ชิ้นส่วนต่อโยงที่ 1 คือ เฟรม (Frame) หรือโครงสร้างของระบบ

ชิ้นส่วนต่อโยงที่ 2 คือ ส่วนขับเคลื่อน (Input/Driver) ใช้ในการหมุน

ชิ้นส่วนต่อโยงที่ 3 คือ ส่วนที่ถูกขับ (Output)

ชิ้นส่วนต่อโยงที่ 4 คือ ส่วนถ่ายทอดการเคลื่อนที่ไปชิ้นส่วนต่อโยงที่ 3

2.2.5.2 กฎของ Grashof (Grashof's law) ศึกษาและวิเคราะห์กลไก 4 ชิ้นส่วนต่อโยงว่าเป็นกลไกประเภทใด โดยใช้สมการที่ (2.18) ในการพิจารณา

$$s+l < p+q \quad (2.18)$$

โดย l คือ ความยาวของชิ้นส่วนต่อโยงที่ยาวที่สุด

s คือ ความยาวของชิ้นส่วนต่อโยงที่สั้นที่สุด

p, q คือ ชิ้นส่วนต่อโยงที่เหลือ

แบ่งได้เป็นได้เป็นกรณีดังต่อไปนี้

- เมื่อ $l+s < p+q$

จะเป็นกลไกประเภท

Drag-Link เมื่อ s คือ frame

หรือ

Crank-Rocker เมื่อชิ้นส่วนต่อโยง s คือ crank และอยู่ติดกับ frame

- เมื่อ $l+s > p+q$

จะเป็นกลไกประเภท

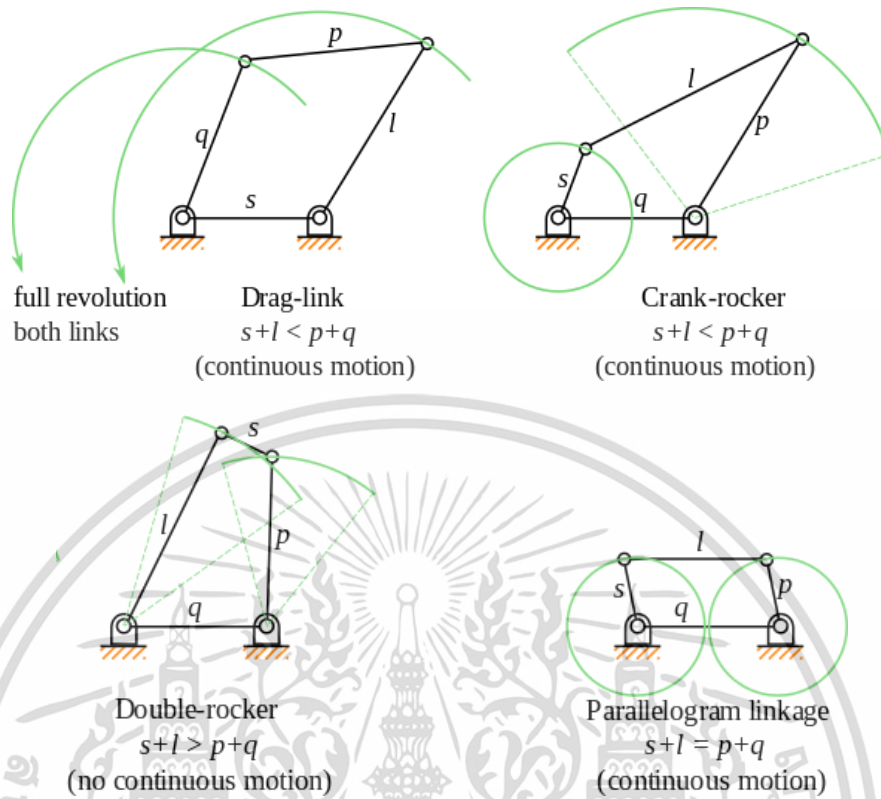
Double-Rocker เมื่อชิ้นส่วนต่อโยงต่อตรงข้าม s เป็น frame

- เมื่อ $s = p$ และ $l = q$

จะเป็นกลไกประเภท

Parallelogram Linkage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ประเภทของกลไก 4 ชิ้นส่วนต่อโยง [2]

2.2.6 การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์

การศึกษาวัตถุที่เกิดการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งโดยใช้ระบบสมการเชิงเส้น ในการหาคำตอบของระบบสมการเชิงเส้นของระบบสมการพลศาสตร์ (Dynamic equations system) โดยใช้สมการที่ (2.19)

$$\sum F_x = ma_x \quad \sum F_y = ma_y \quad \sum M_G = I_G \alpha \quad (2.19)$$

- โดย m คือ มวลของชิ้นส่วน (kg)
- a_x คือ ความเร่งตามแนวแกน x (m/s^2)
- a_y คือ ความเร่งตามแนวแกน y (m/s^2)
- α คือ ความเร่งเชิงมุม (rad/s^2)
- I_G คือ โมเมนต์ความเฉื่อย ($kg \cdot m^2$)

และใช้โปรแกรม Matlab ในการหาค่าแรงลัพธ์ที่เปลี่ยนไปเมื่อวัตถุเกิดการเคลื่อนที่และความเร็วเชิงมุมของชิ้นที่ 2 มีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 โมเมนต์ความเฉื่อยของมวล

โมเมนต์ความเฉื่อยถูกนำไปใช้กับการขยายตัวของวัตถุ ซึ่งมีมวลเป็นข้อจำกัดในการหมุนรอบแกน โมเมนต์ความเฉื่อยเกิดจากการรวมกันของมวลและเรขาคณิตในการศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุอย่างต่อเนื่องหรือที่รู้จักกันในชื่อ พลศาสตร์ของวัตถุแข็งเกร็ง (Dynamics of rigid body) โดยโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ คือ ผลรวมค่าของทุกๆวัตถุในระบบนั้น ดังแสดงในสมการที่ (2.20)

$$I = \sum_{i=1} m_i r_i^2 = \int r_i^2 dm \quad (2.20)$$

โดย

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมวล ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

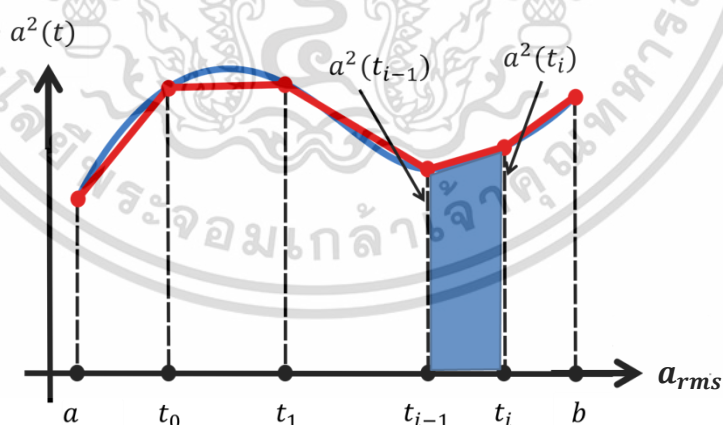
m_i คือ มวลชิ้น i ที่กระจายในเนื้อวัตถุ (kg)

r_i คือ ระยะตั้งฉากจากมวลไปยังแกนหมุน (m)

2.2.8 ค่าความเร่งรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย

ในการวัดค่าความเร่งนั้นมักนิยมใช้การวัดด้วยค่ารากเฉลี่ย (Root mean square value, RMS) ดังแสดงในสมการที่ (2.21)

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} (a(t))^2 dt} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.11 การคำนวณโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule)

สำหรับค่า RMS นั้น จะถูกใช้โดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 กล่าวคือ การแบ่งวิธีนี้จะหาพื้นที่ใต้รูปโดยประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งได้จากการแบ่งพื้นที่ใต้โค้งออกเป็นส่วนย่อย n ส่วนเท่าๆ กัน โดยการสมมติให้ $a(x)$ ต่อเนื่องบนช่วง $[a, b]$ และ $\Delta t = \frac{T_2 - T_1}{n}$ ดังนั้นพื้นที่ใต้กราฟสามารถหาได้ดังแสดงในสมการที่ (2.22)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{พื้นที่ใต้กราฟเฉลี่ยทั้งหมด} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(a_i^2 + a_{i+1}^2)}{2}} \times \Delta t \quad (2.22)$$

จะได้ค่าความเร่งรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย ดังแสดงในสมการที่ (2.23)

$$a_{\text{rms}} = \frac{1}{(T_2 - T_1)} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(a_i^2 + a_{i+1}^2)}{2}} \times \Delta t \quad (2.23)$$

เนื่องจากต้องหาเมื่อรถเคลื่อนที่จะสามารถหาแรงสัมผัสระหว่างเชือกและ pan head ได้โดยใช้สมการ (2.24) ดังนี้

$$F_C = m_C a_{\text{rms}} \quad (2.24)$$

โดย m_C คือ มวลของแพนเฮด (Kg)

2.2.9 วิธีการสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองแพนโทกราฟนั้นทำจากเหล็กกลมกลวงและเหล็กกล่องกลวงเป็นส่วนใหญ่ ผ่านกระบวนการการตัด การบากท่อเหล็กกลม การเชื่อมเพื่อให้ได้ขนาดและรูปแบบตามที่ได้ออกแบบไว้ และพ่นสีเพื่อเก็บงานให้เรียบร้อย นอกจากนี้ยังมีการใช้เพลสำหรับข้อต่อที่ต้องการการเคลื่อนที่แบบหมุนเพื่อให้แบบจำลองแพนโทกราฟสามารถยกขึ้นลงได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยวิธีการสร้างหลักๆที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

2.2.9.1 การตัด (Cutting)

วิธีการตัดแบ่งออกได้หลายอย่างด้วยกันตามชนิดของกรรมวิธีการตัดและการนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป ซึ่งการตัดแต่ละวิธีมีจุดประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานออกมาตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้

2.2.9.2 การเชื่อม (Welding)

วิธีการที่ทำให้โลหะหลอมละลายติดกันและเป็นเนื้อเดียวกันโดยการให้ความร้อนแก่โลหะเพื่อให้ได้รูปร่างตามที่ได้ออกแบบ ซึ่งการเชื่อมพื้นฐานแบ่งออกได้ดังนี้ คือ การเชื่อมด้วยไฟฟ้า การเชื่อมด้วยแก๊ส

2.2.10 ระบบขับเคลื่อนกำลังแพนโทกราฟ

ระบบนิวเมติก (Pneumatics) ใช้การเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล ซึ่งก้านสูบในกระบอกสูบจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นเส้นตรง โดยใช้ลมอัดเป็นตัวกลางที่ใช้ในการดึงชิ้นส่วนของแพนโทกราฟให้เกิดการเคลื่อนขึ้นซึ่งมีอุปกรณ์หลักๆดังนี้

- เครื่องอัดลม (air compressor)
- เครื่องกรองท่อเมน (main air filter)
- กรองลม (air filter)
- วาล์วลดความดัน (pressure reducing valve)
- วาล์วเปลี่ยนทิศทางลม (air flow change valve)
- วาล์วบังคับความเร็ว (speed control valve)
- กระบอกสูบ (air cylinder)

2.2.11 การคำนวณและการเลือกกำลังมอเตอร์

ในการพิจารณากำลังของมอเตอร์ เพื่อให้สอดคล้องกับชุดทดลอง ต้องคำนึงถึงแรงบิดของมอเตอร์ที่ใช้ในระบบเพื่อให้รถสามารถหมุนได้ตามความเร็วที่ต้องการ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.25) และ (2.26)

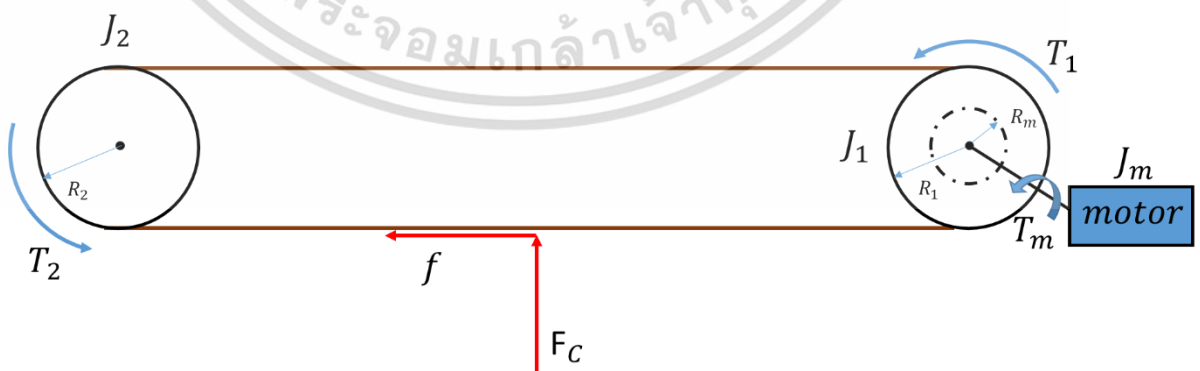
$$P = \frac{2\pi TN}{60} \quad (2.25)$$

หรือ
$$P = Fv \quad (2.26)$$

โดย

P	คือ กำลังของมอเตอร์ (W)
T	คือ แรงบิดของมอเตอร์ (N)
N	คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (RPM)
F	คือ แรงที่กดบนเส้นเชือก (N)
v	คือ ความเร็วของเชือก (m/s)

ในการหาแรงบิดของมอเตอร์จำเป็นต้องพิจารณาภาระโหลดที่เกิดขึ้นจริงกล่าวคือ จะมีโหลดเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างตัวเชือกกับแพนเฮดและแรงเนื่องจากความเฉื่อยของตัวรถ



รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพของแรงและโหลดที่กระทำบนตัวรถซึ่งมีมอเตอร์ขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแรงบิดของมอเตอร์ทางกลจะเป็นไปตามสมการที่ (2.27)

$$T_m = T_L + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.27)$$

โดย T_m คือ แรงบิดของมอเตอร์ (N)
 J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และโหลดรวมกัน ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
 $\frac{d\omega}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ (rad/s^2)

เมื่อพิจารณาบนตัวรอก แรงในเส้นเชือกของรอกที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากัน

$$T_m = T_1 \left(\frac{R_m}{R_1} \right) \quad (2.28)$$

$$T_m = T_1 \left(\frac{R_m}{R_1} \right) \quad (2.29)$$

พิจารณาหาแรงเสียดทานระหว่างเชือกและแพนเฮดในระบบซึ่งสามารถหาแรงเสียดทานได้จากสมการที่ (2.30) และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้จากตารางที่ 2.3

$$f = \mu N \quad (2.30)$$

โดยที่แรงปฏิกิริยาระหว่างเชือกและแพนเฮด คือ

$$N = F_C \quad (2.31)$$

ดังนั้น $f = \mu F_C \quad (2.32)$

โดย f คือ แรงเสียดทานระหว่างเชือกและแพนเฮด (N)
 μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเชือกและแพนเฮด
 F_C คือ แรงสัมผัสระหว่างเชือกและแพนเฮด (N)

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างวัสดุ 2 วัสดุ [8]

Materials	μ_s	μ_k
Steel on steel	0.74	0.57
Aluminum on steel	0.61	0.47
Copper on steel	0.53	0.36
Rubber on concrete (dry)	1.0	0.8
Rubber on concrete (wet)	0.3	0.25
Wood on wood	0.25-0.5	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

Materials	μ_s	μ_k
Glass on glass	0.94	0.4
Teflon on Teflon	0.04	0.04
Teflon on steel	0.04	0.04
Waxed wood on wet snow	0.14	0.1
Waxed wood on dry snow	0.10	0.04
Metal on metal (lubricated)	0,15	0.06
Ice on ice	0.1	0.03
Synovial joints in humans	0.01	0.003
Very rough surfaces	1.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

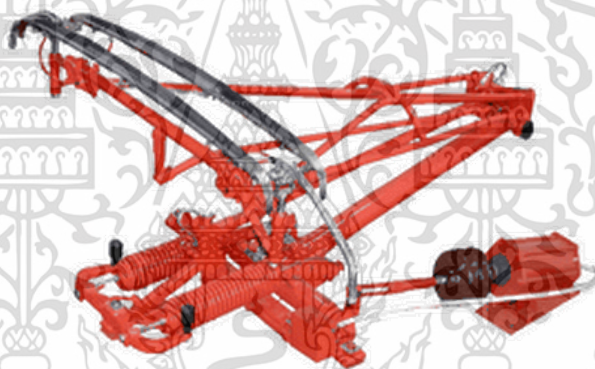
วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงาน เริ่มต้นจากการศึกษาองค์ประกอบของแพนโทกราฟ ขนาดชิ้นส่วนและแรงภายในโครงสร้างชิ้นส่วน จากนั้นนำข้อมูลเหล่านี้มาย่อเป็นแบบจำลอง แล้วออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟและระบบยกแพนโทกราฟด้วยระบบนิวเมติก

3.1 การออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ

3.1.1 ต้นแบบการศึกษาแบบจำลองแพนโทกราฟ

การศึกษานี้ได้นำต้นแบบแพนโทกราฟ TSG3 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.1 มาสร้างแบบจำลอง โดยใช้อัตราส่วน 1:3.33 เพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ



รูปที่ 3.1 แพนโทกราฟ TSG3 [1]

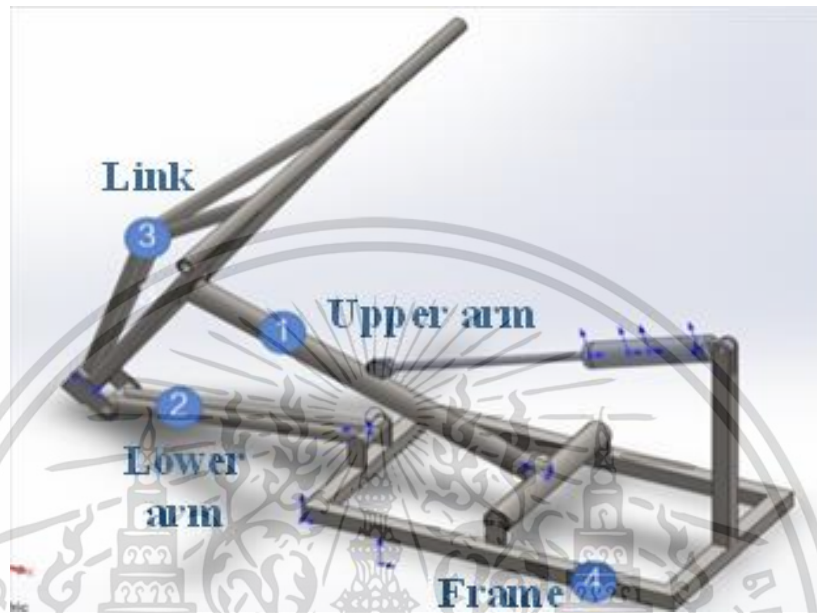
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแพนโทกราฟ TSG3 [1]

หัวข้อ	พารามิเตอร์
แรงดันไฟฟ้า นอมินอล (V)	25
กระแสไฟฟ้า นอมินอล (A)	630 (operation)
แรงสัมผัส (N)	70-120
ระยะเวลาในการยกขึ้น (s)	≤ 8
ระยะเวลาในการพับลง (s)	≤ 7
ตำแหน่งปฏิบัติงานที่สูงสุด (mm)	2000
ตำแหน่งปฏิบัติงานที่ต่ำสุด (mm)	700
มวลแพนโทกราฟ (kg)	≈ 249

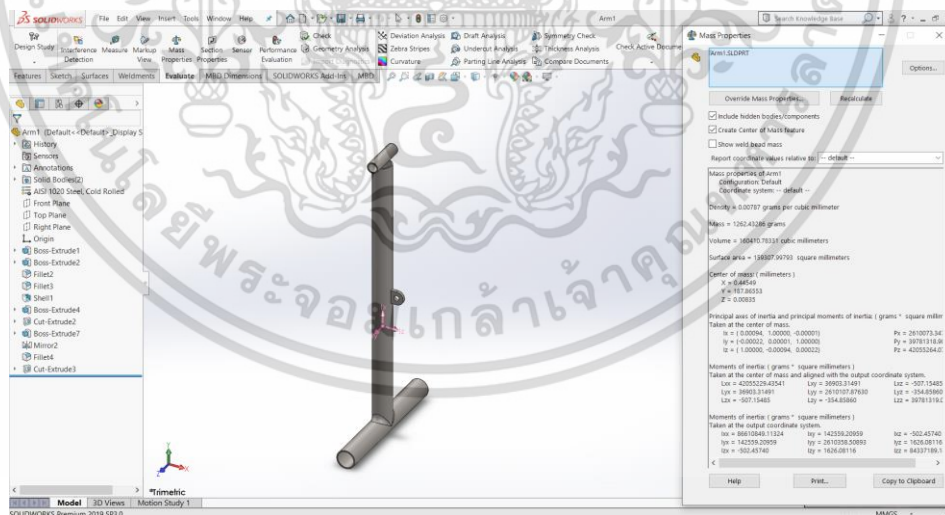
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ

ออกแบบชิ้นส่วนของแบบจำลองแพนโทกราฟด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS จากต้นแบบแพนโทกราฟ TSG3 ซึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์ต่อไป

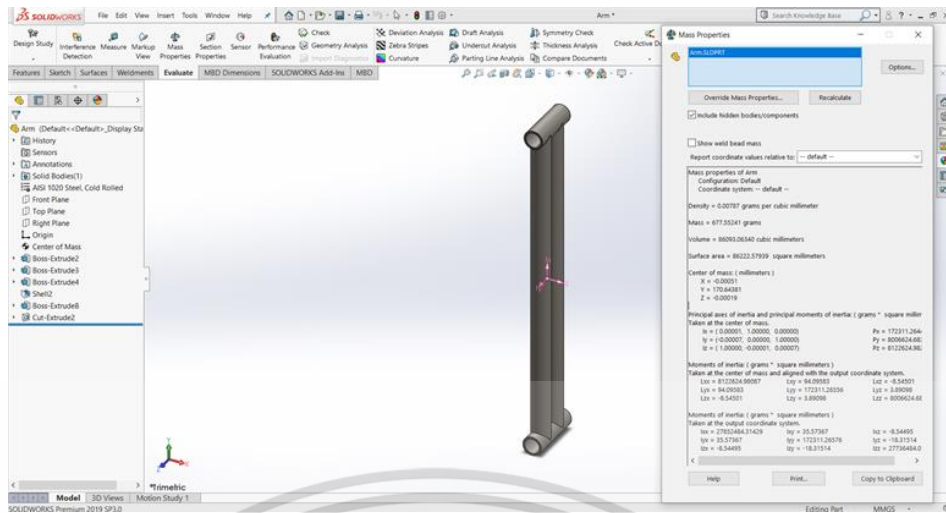


รูปที่ 3.2 แบบจำลองแพนโทกราฟออกแบบด้วย SOLIDWORKS

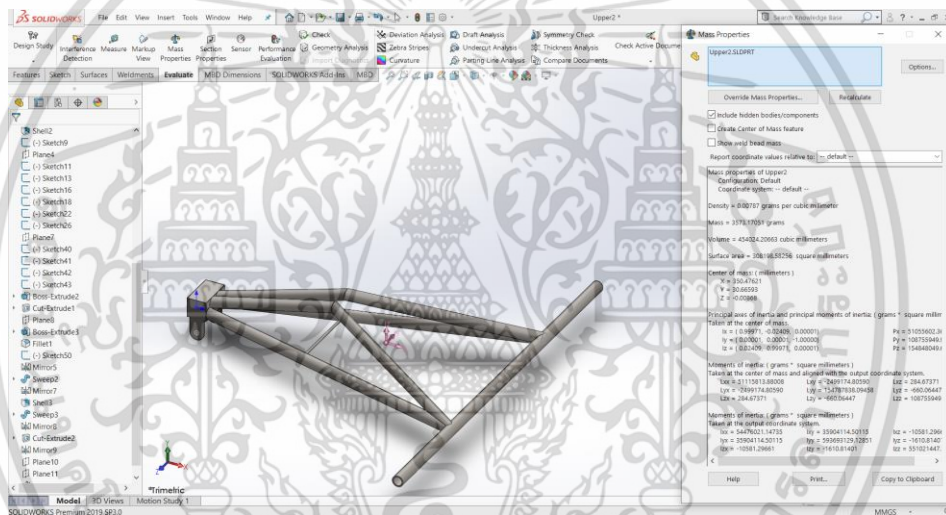


รูปที่ 3.3 ออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ (1)

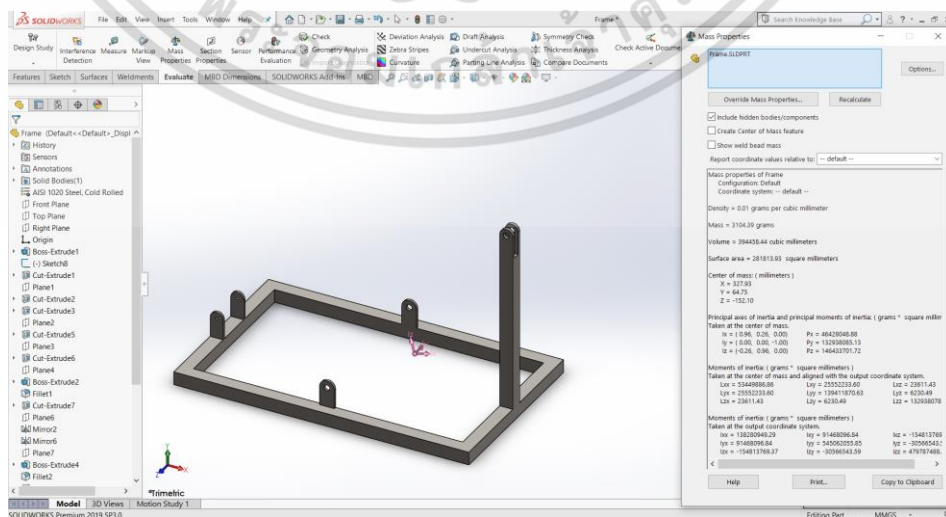
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ (2)



รูปที่ 3.5 ออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ (3)



รูปที่ 3.6 ออกแบบแบบจำลองแพนโทกราฟ (4)

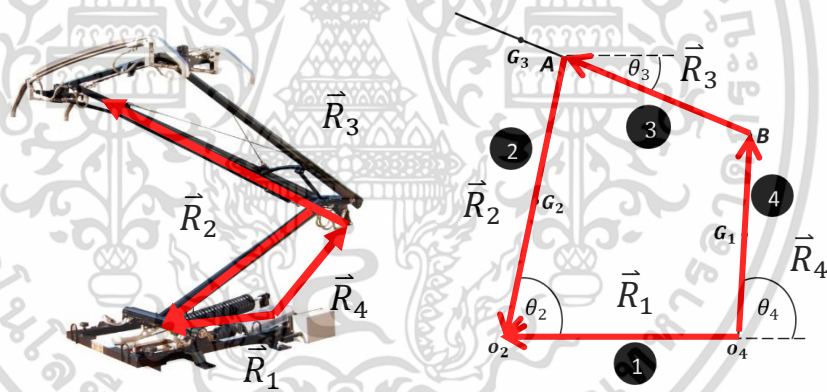
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับอ้างอิงในพิธีกรรพการเท่านั้น โดยผู้ดูแลที่เข้ามาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่การณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละชิ้นส่วนของแบบจำลองแพนโทกราฟ

Parameters	Parts			
	1	2	3	4
Mass (g)	3104.39	1262.43	3573.17	677.55
Density (g/mm ³)	0.00787	0.00787	0.00787	0.00787
Center of mass (mm)				
x	327.92	0.45	350.48	-0.00051
y	64.75	187.87	30.67	170.64
z	-152.09	0.00835	-0.00868	-0.00019
Moments of inertia: (g*mm ²)	53449886	27600000	50000000	551000000

3.2 การวิเคราะห์เชิงพลวัต (Dynamics analysis)

การศึกษาวัตถุที่เกิดการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งโดยใช้ระบบสมการเชิงเส้น ในการหาคำตอบของระบบสมการเชิงเส้นจากระบบสมการพลศาสตร์ (Dynamic equations system)

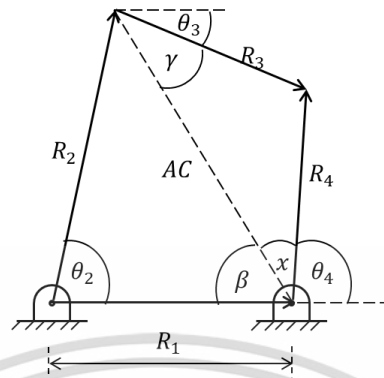


รูปที่ 3.7 แผนภาพอิสระวัตถุ

พิจารณาในส่วนของคิเนเมติกส์ (Kinematics) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ การกระจัด ความเร็วและความเร่ง เนื่องจากวัตถุนั้นมีความสมมาตรจึงสามารถวิเคราะห์ในแนวแกนตั้งฉากและแนวตั้งได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การวิเคราะห์การกระจัดเชิงมุม



รูปที่ 3.8 การวิเคราะห์การกระจัดเชิงมุม

จากรูปที่ 3.8 พิจารณาความสัมพันธ์ความยาวด้านและมุม โดยใช้กฎของโคไซน์

$$AC^2 = R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \theta_2$$

$$AC = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \theta_2} \quad (3.1)$$

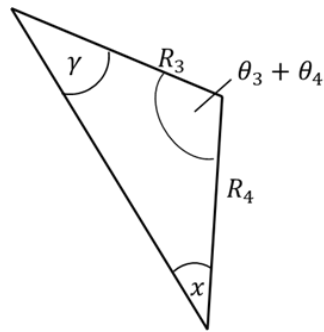
$$R_2^2 = R_1^2 + AC^2 - 2R_1AC \cos \beta$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{R_1^2 + AC^2 - R_2^2}{2R_1AC} \right) \quad (3.2)$$

$$R_4^2 = R_3^2 + AC^2 - 2R_3AC \cos \gamma$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{R_3^2 + AC^2 - R_4^2}{2R_3AC} \right) \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การวิเคราะห์การกระจัดเชิงมุม (2)

จากรูปที่ 3.9 พิจารณาความสัมพันธ์ความยาวด้านและมุม โดยใช้กฎของไซน์

$$\frac{R_3}{\sin x} = \frac{R_4}{\sin \gamma}$$

$$x = \sin^{-1} \left(\frac{R_3}{R_4} \sin \gamma \right) \quad (3.4)$$

$$\gamma + x + \theta_3 + \theta_4 = \pi$$

$$(\gamma + \theta_3) + x + \theta_4 = \pi \quad (3.5)$$

$$\beta = \gamma + \theta_3$$

$$\theta_3 = \beta - \gamma \quad (3.6)$$

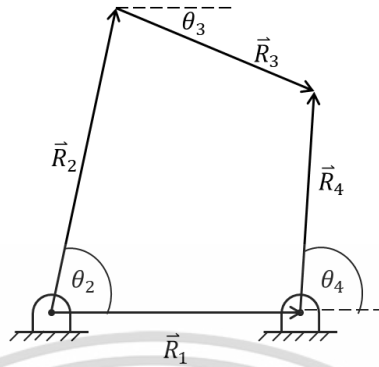
$$\beta + x + \theta_4 = \pi$$

$$\theta_4 = \pi - \beta - x$$

$$\theta_4 = \pi - \beta - \sin^{-1} \left(\frac{R_3}{R_4} \sin \gamma \right) \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การวิเคราะห์ความเร็วเชิงมุม



รูปที่ 3.10 การวิเคราะห์ความเร็วเชิงมุม

พิจารณาจากรูปที่ 3.10 หาผลรวมเวกเตอร์ จะได้

$$\begin{aligned}\vec{R}_2 + \vec{R}_3 &= \vec{R}_1 + \vec{R}_4 \\ r_2 e^{i\theta_2} + r_3 e^{i\theta_3} &= r_1 e^{i\theta_1} + r_4 e^{i\theta_4}\end{aligned}\quad (3.8)$$

หาอนุพันธ์สมการที่ (3.8) เทียบกับเวลา จะได้

$$\omega_3 r_3 e^{i\theta_3} - \omega_4 r_4 e^{i\theta_4} = -\omega_2 r_2 e^{i\theta_2}\quad (3.9)$$

หาค่า ω_3

คูณสมการที่ (3.9) ด้วย $e^{-i\theta_4}$ จะได้

$$\begin{aligned}\omega_3 r_3 e^{i(\theta_3 - \theta_4)} - \omega_4 r_4 e^{i(\theta_4 - \theta_4)} &= -\omega_2 r_2 e^{i(\theta_2 - \theta_4)} \\ \omega_3 r_3 e^{i(\theta_3 - \theta_4)} &= -\omega_2 r_2 e^{i(\theta_2 - \theta_4)}\end{aligned}\quad (3.10)$$

แทนค่า $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ ลงในสมการที่ (3.10) จะได้

$$\omega_3 r_3 [\cos(\theta_3 - \theta_4) + i \sin(\theta_3 - \theta_4)] = -\omega_2 r_2 [\cos(\theta_2 - \theta_4) + i \sin(\theta_2 - \theta_4)]\quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาสมประสิทธิ์ส่วนจินตภาพ จะได้

$$\begin{aligned}\omega_3 r_3 \sin(\theta_3 - \theta_4) &= -\omega_2 r_2 \sin(\theta_2 - \theta_4) \\ \therefore \omega_3 &= \frac{-\omega_2 r_2 \sin(\theta_4 - \theta_2)}{r_3 \sin(\theta_4 - \theta_3)}\end{aligned}\quad (3.12)$$

หาค่า ω_4

คูณสมการที่ (3.9) ด้วย $e^{-i\theta_3}$ แล้วแทนค่า $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ จากนั้นพิจารณาสมประสิทธิ์ส่วนจินตภาพ เช่นเดียวกับการหาค่า ω_3

$$\therefore \omega_4 = \frac{-\omega_2 r_2 \sin(\theta_3 - \theta_2)}{r_4 \sin(\theta_3 - \theta_4)}\quad (3.13)$$

3.2.3 การวิเคราะห์ความเร่งเชิงมุม

หาค่า α_3

หาอนุพันธ์สมการที่ (3.9) เทียบกับเวลา จะได้

$$i\alpha_3 r_3 e^{i\theta_3} - \omega_3^2 r_3 e^{i\theta_3} - i\alpha_4 r_4 e^{i\theta_4} + \omega_4^2 r_4 e^{i\theta_4} = i\alpha_2 r_2 e^{i\theta_2} + \omega_2^2 r_2 e^{i\theta_2}\quad (3.14)$$

คูณสมการที่ (3.14) ด้วย $e^{-i\theta_4}$ จะได้

$$\begin{aligned}i\alpha_2 r_2 e^{i(\theta_2 - \theta_4)} + \omega_2^2 r_2 e^{i(\theta_2 - \theta_4)} \\ = i\alpha_3 r_3 e^{i(\theta_3 - \theta_4)} - \omega_3^2 r_3 e^{i(\theta_3 - \theta_4)} - i\alpha_4 r_4 e^{i(\theta_4 - \theta_4)} + \omega_4^2 r_4 e^{i(\theta_4 - \theta_4)} \\ i\alpha_3 r_3 e^{i(\theta_3 - \theta_4)} - \omega_3^2 r_3 e^{i(\theta_3 - \theta_4)} = i\alpha_2 r_2 e^{i(\theta_2 - \theta_4)} + \omega_2^2 r_2 e^{i(\theta_2 - \theta_4)}\end{aligned}\quad (3.15)$$

แทนค่า $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ ลงในสมการที่ (3.15) จากนั้นพิจารณาสมประสิทธิ์ส่วนจริง จะได้

$$\alpha_3 = \frac{-\alpha_2 r_2 \sin(\theta_4 - \theta_2) + \omega_2^2 r_2 \cos(\theta_4 - \theta_2) + \omega_3^2 r_3 \cos(\theta_4 - \theta_3) - \omega_4^2 r_4}{r_3 \sin(\theta_4 - \theta_3)}\quad (3.16)$$

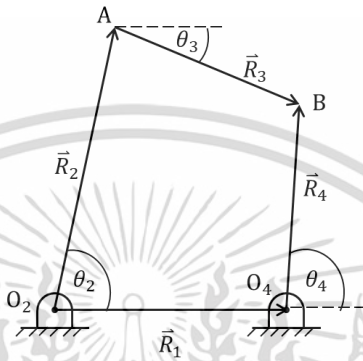
หาค่า α_4

คูณสมการที่ (3.9) ด้วย $e^{-i\theta_3}$ แล้วแทนค่า $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ จากนั้นพิจารณาสมประสิทธิ์ส่วนจริง เช่นเดียวกับการหาค่า α_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_4 = \frac{\alpha_2 r_2 \sin(\theta_3 - \theta_2) - \omega_2^2 r_2 \cos(\theta_3 - \theta_2) + \omega_4^2 r_4 \cos(\theta_3 - \theta_4)}{r_4 \sin(\theta_3 - \theta_4)} \quad (3.17)$$

3.2.4 การวิเคราะห์ความเร่งในพิกัด X Y



รูปที่ 3.11 การวิเคราะห์ความเร่ง

ขั้นตอนที่ 2

พิจารณาความเร่งที่จุด A

$$\vec{a}_A = \vec{a}_{O_2} + \vec{a}_{A/O_2} = \vec{\alpha}_{AO_2} \times \vec{R}_{A/O_2} + \vec{\omega}_{AO_2} \times (\vec{\omega}_{AO_2} \times \vec{R}_{A/O_2})$$

$$\vec{a}_A = \left(\alpha_2 \vec{k} \times R_2 \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \vec{i} \\ \sin \theta_2 \vec{j} \end{bmatrix} \right) + \left(\omega_2 \vec{k} \times \omega_2 \vec{k} \times R_2 \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \vec{i} \\ \sin \theta_2 \vec{j} \end{bmatrix} \right)$$

$$\vec{a}_A = \vec{a}_{A/O_2} = \alpha_2 R_2 \begin{bmatrix} -\sin \theta_2 \vec{i} \\ \cos \theta_2 \vec{j} \end{bmatrix} + \omega_2^2 R_2 \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 \vec{i} \\ -\sin \theta_2 \vec{j} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

ขั้นตอนที่ 4

พิจารณาความเร่งที่จุด B

$$\vec{a}_B = \vec{a}_{O_4} + \vec{a}_{B/O_4}$$

$$\vec{a}_B = \vec{a}_{B/O_4} = \alpha_4 R_4 \begin{bmatrix} -\sin \theta_4 \vec{i} \\ \cos \theta_4 \vec{j} \end{bmatrix} + \omega_4^2 R_4 \begin{bmatrix} -\cos \theta_4 \vec{i} \\ -\sin \theta_4 \vec{j} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วนที่ 3

พิจารณาความเร่งที่จุด B

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{B/A}$$

$$\vec{a}_{B/A} = \vec{a}_B - \vec{a}_A$$

$$a_{2x} = -\alpha_2 R_2 \sin \theta_2 - \omega_2^2 R_2 \cos \theta_2 \quad (3.20)$$

$$a_{2y} = \alpha_2 R_2 \cos \theta_2 - \omega_2^2 R_2 \sin \theta_2 \quad (3.21)$$

$$a_{4x} = -\alpha_4 R_4 \sin \theta_4 - \omega_4^2 R_4 \cos \theta_4 \quad (3.22)$$

$$a_{4y} = \alpha_4 R_4 \cos \theta_4 - \omega_4^2 R_4 \sin \theta_4 \quad (3.23)$$

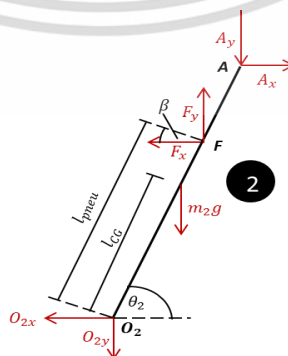
$$a_{3x} = a_{4x} - a_{2x} \quad (3.24)$$

$$a_{3y} = a_{4y} - a_{2y} \quad (3.25)$$

พิจารณาในส่วนของจลศาสตร์ (Kinetics) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แรงที่กระทำบนวัตถุ ซึ่งทำให้วัตถุเคลื่อนที่ โดยใช้ข้อมูลคิเนเมติกส์ (Kinematics) จากสมการด้านบน

โดย	m	คือ มวลของชิ้นส่วน (kg)
	a_x	คือ ความเร่งตามแนวแกน x (m/s^2)
	a_y	คือ ความเร่งตามแนวแกน y (m/s^2)
	α	คือ ความเร่งเชิงมุม (rad/s^2)
	I	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (kg/m^2)

และใช้โปรแกรม Matlab ในการหาค่าแรงลัพธ์ที่เปลี่ยนไปเมื่อวัตถุเกิดการเคลื่อนที่และความเร็วเชิงมุมของชิ้นที่ 2 มีค่าคงที่



รูปที่ 3.12 แผนภาพวัตถุอิสระ ชิ้นส่วนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นส่วนที่ 2 (มีแรงภายนอกกระทำ)

พิจารณาจากรูปที่ 3.12

$$\curvearrowright \quad \Sigma M_{O_2} = I_2 \alpha_2$$

$$-m_2 g l_{2CG} \cos \theta_2 - B_y l_2 \cos \theta_2 - B_x l_2 \sin \theta_2 - F_x l_{pneu} \sin \theta_2 + F_y l_{pneu} \cos \theta_2 = I_2 \alpha_2 \quad (3.26)$$

$$\leftarrow \quad \Sigma F_x = m_2 a_{2x}$$

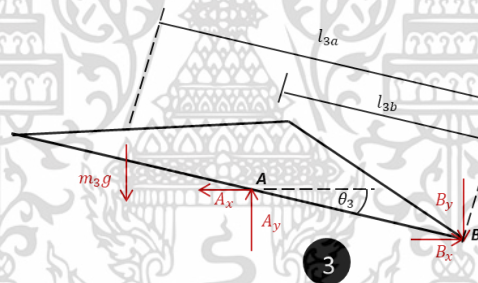
$$O_{2x} - B_x + F_x = m_2 a_{2x} \quad (3.27)$$

$$\downarrow + \quad \Sigma F_y = m_2 a_{2y}$$

$$-O_{2y} + B_y + m_2 g - F_y = m_2 a_{2y} \quad (3.28)$$

ชั้นส่วนที่ 3

พิจารณาจากรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนภาพวัตถุอิสระ ชั้นส่วนที่ 3

$$\curvearrowright \quad \Sigma M_A = I_3 \alpha_3$$

$$m_3 g l_{3a} \cos \theta_3 - B_y l_{3b} \cos \theta_3 + B_x l_{3b} \sin \theta_3 = I_3 \alpha_3 \quad (3.29)$$

$$\leftarrow \quad \Sigma F_x = m_3 a_{3x}$$

$$B_x - A_x = m_3 a_{3x} \quad (3.30)$$

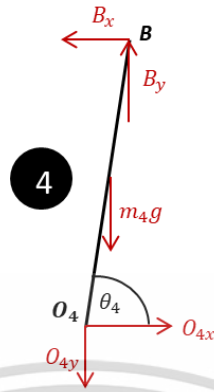
$$\downarrow + \quad \Sigma F_y = m_3 a_{3y}$$

$$-B_y + A_y + m_3 g = m_3 a_{3y} \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วนที่ 4

พิจารณาจากรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพวัตถุอิสระ ชิ้นส่วนที่ 4

$$\begin{aligned} \sum M_{O_4} &= I_4 \alpha_4 \\ -m_4 g \frac{l_4}{4} \cos \theta_4 + A_x l_4 \sin \theta_4 + A_y l_4 \cos \theta_4 &= I_4 \alpha_4 \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} \sum F_x &= m_4 a_{4x} \\ A_x - O_{4x} &= m_4 a_{4x} \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} \sum F_y &= m_4 a_{4y} \\ -A_y + O_{4y} + m_4 g &= m_4 a_{4y} \end{aligned} \quad (3.34)$$

จากสมการ 3.26-3.34 สามารถเขียนระบบสมการพลวัต เพื่อใช้ในการหาแรงลัพธ์ในแต่ละชิ้นส่วนได้ และใช้หาแรงภายนอกสำหรับการยกแผนโทกราฟขึ้น ได้สมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} -0.5 \sin \theta_2 & -0.5 \cos \theta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_{pneu} \sin(\theta_2 + \beta) \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \beta \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -\sin \beta \\ 0.12 \sin \theta_3 & -0.12 \cos \theta_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.34 \sin \theta_4 & -0.34 \cos \theta_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ B_x \\ B_y \\ O_{2x} \\ O_{2y} \\ O_{4x} \\ O_{4y} \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.05 \alpha_2 + 2.2462 \cos \theta_2 \\ 1.231 \alpha_{2x} \\ 1.231 \alpha_{2y} - 12.0761 \\ 0.554 \alpha_3 - 12.2954 \cos \theta_3 \\ 3.581 \alpha_{3x} \\ 3.581 \alpha_{3y} - 35.1296 \\ 0.0276 \alpha_4 + 1.1307 \cos \theta_4 \\ 0.678 \alpha_{4x} \\ 0.678 \alpha_{4y} - 6.6512 \end{bmatrix}$$

รูปที่ 3.15 สมการความสัมพันธ์หาแรงภายในในรูปแบบทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

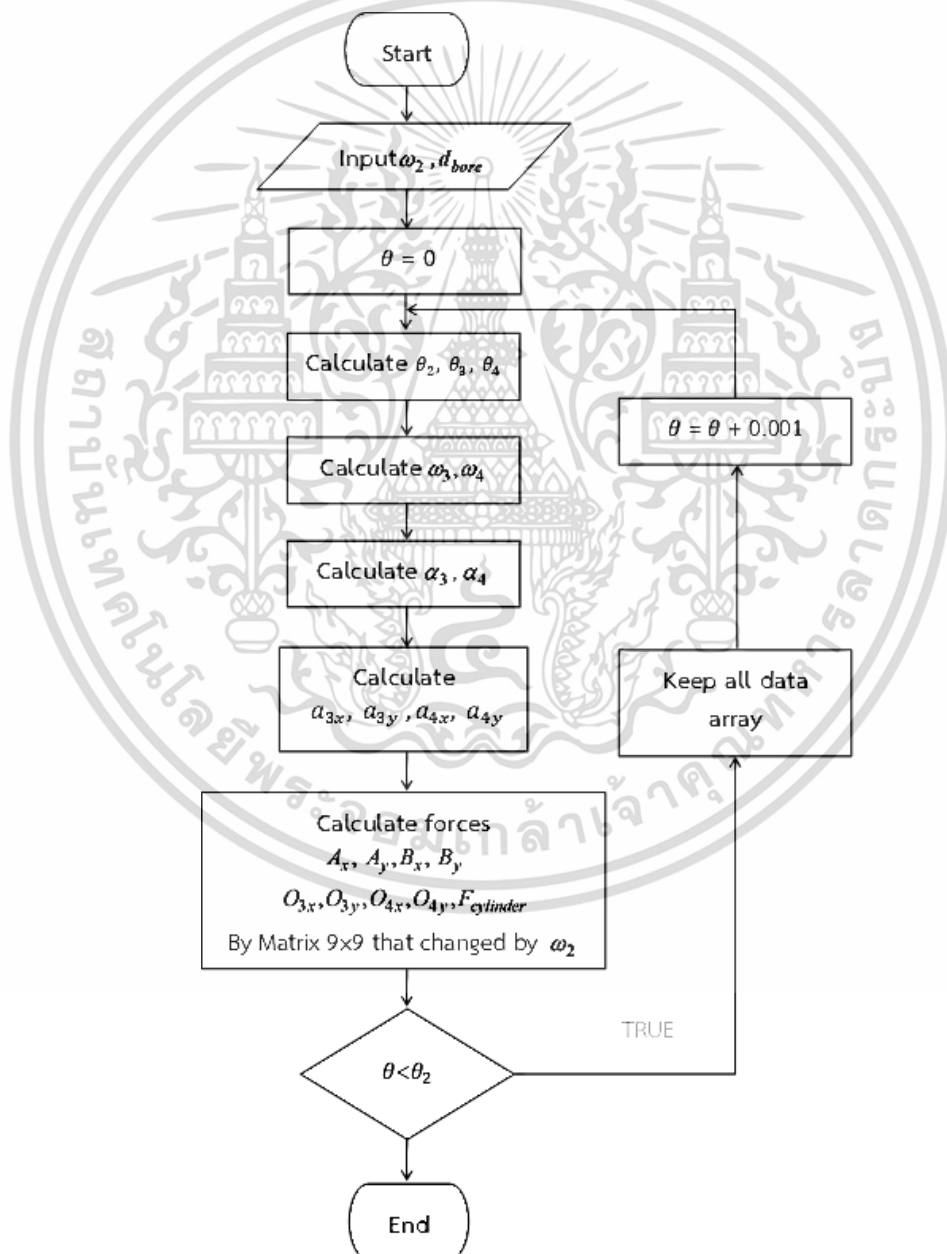
เขียนระบบสมการเป็นรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[A] \times [X] = [B]$$

$$[X] = [B] \times [A]^{-1}$$

โดย [A] คือ เมทริกซ์ค่าคงที่ ขนาด 9×9
 [X] คือ เมทริกซ์แรงลัพธ์ ขนาด 9×1
 [B] คือ เมทริกซ์จลศาสตร์ ขนาด 9×1

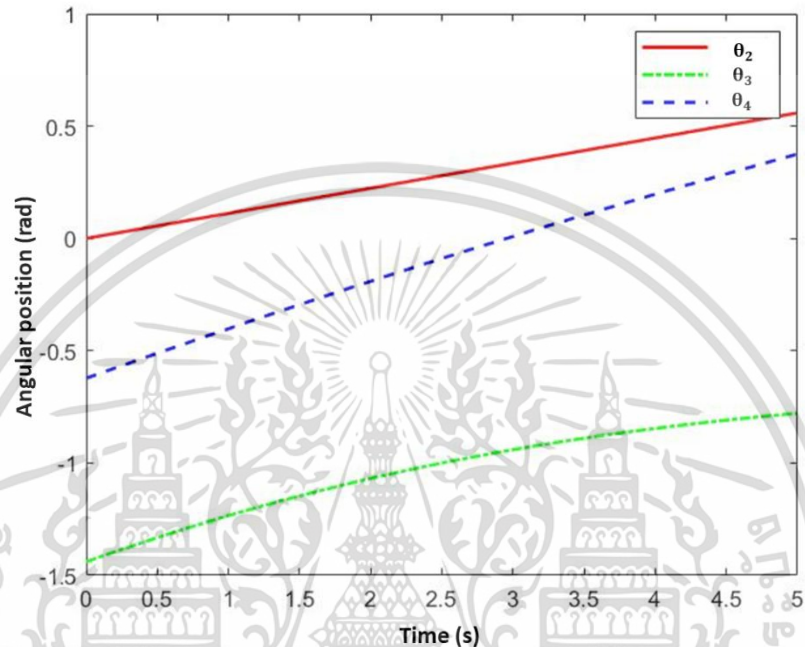
3.3 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆด้วยโปรแกรม Matlab



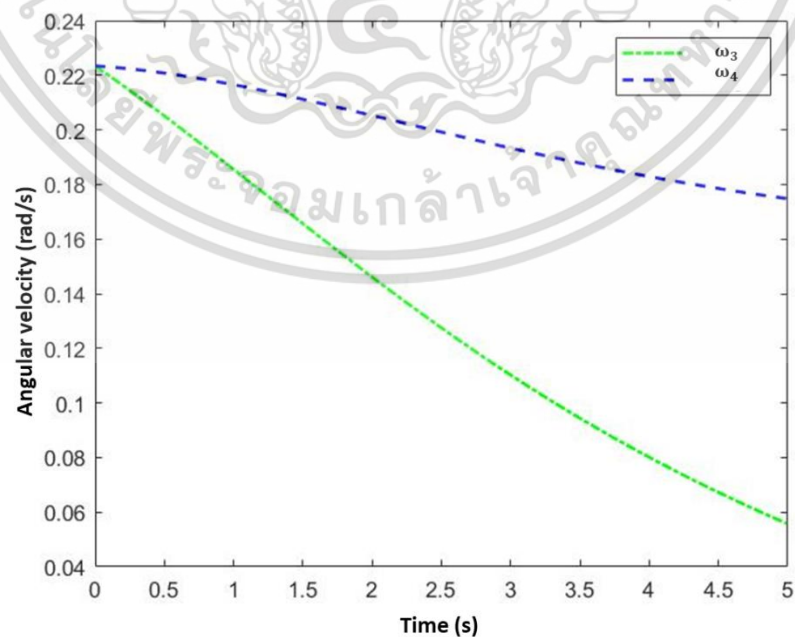
รูปที่ 3.16 แผนภาพแสดงการทำงาน (Flowchart)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.16 Flow chart ของการทำงานโปรแกรม Matlab นั้น จะเห็นได้ว่าในช่วงแรก เป็นการคำนวณด้านคิเนแมติกส์แบบเป็นลำดับและต่อมาคำนวณโคเนติกของแบบจำลองแพนโทกราฟ จากนั้นจะเป็นการทำซ้ำของโปรแกรมโดยให้ มุมที่เปลี่ยนไปที่ละเล็กน้อยของชิ้นส่วนที่ 2 เป็นตัวดำเนินการ ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม Matlab จะได้กราฟและข้อมูล ดังต่อไปนี้

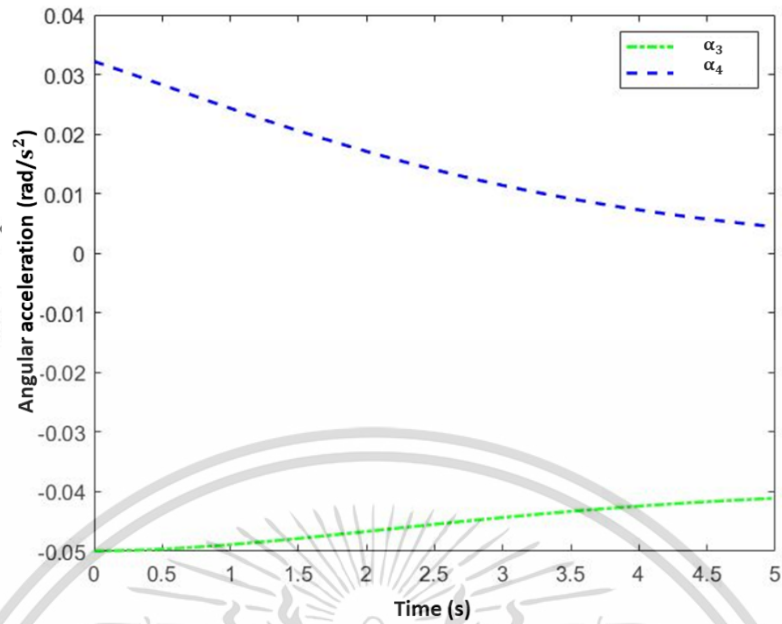


รูปที่ 3.17 กราฟแสดงมุมที่เปลี่ยนไปของแต่ละชิ้นส่วน

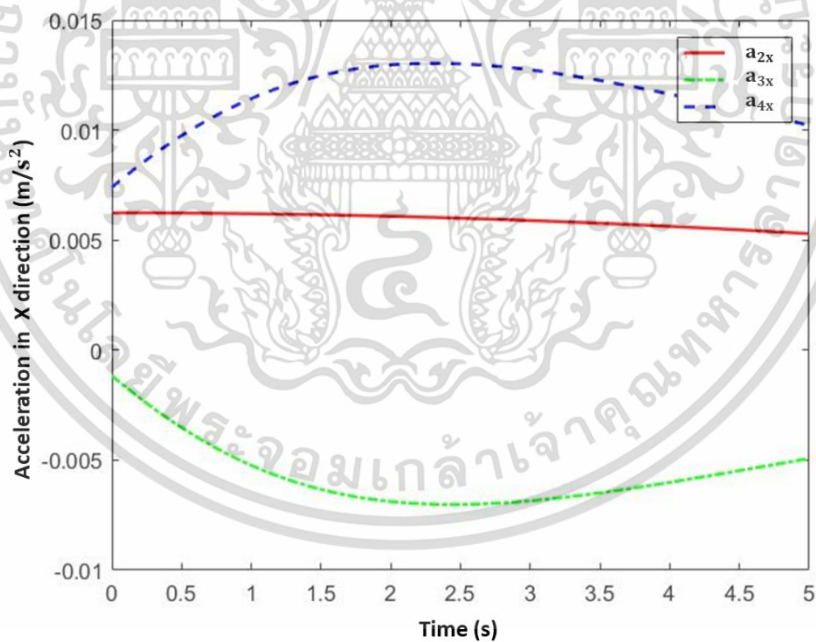


รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความเร็วเชิงมุมที่เปลี่ยนไปของแต่ละชิ้นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

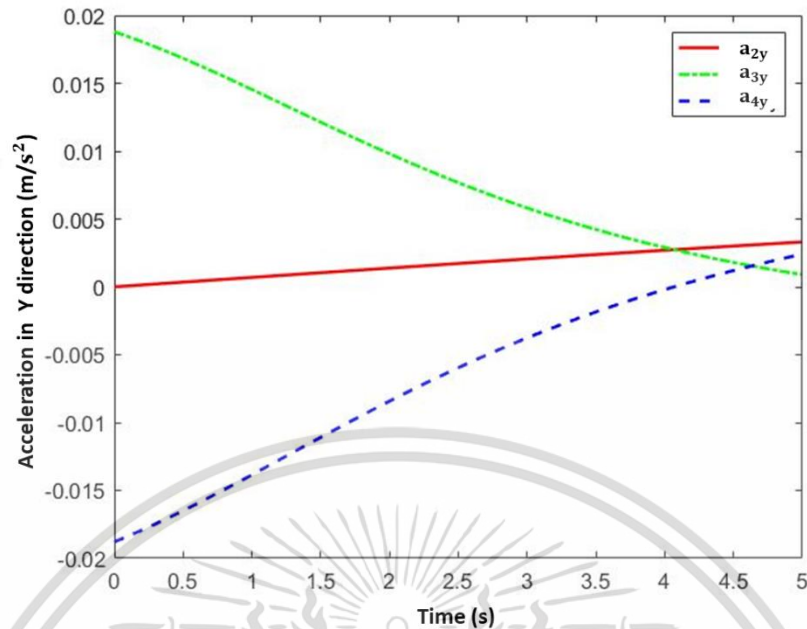


รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความเร่งเชิงมุมที่เปลี่ยนไปของแต่ละชิ้นส่วน



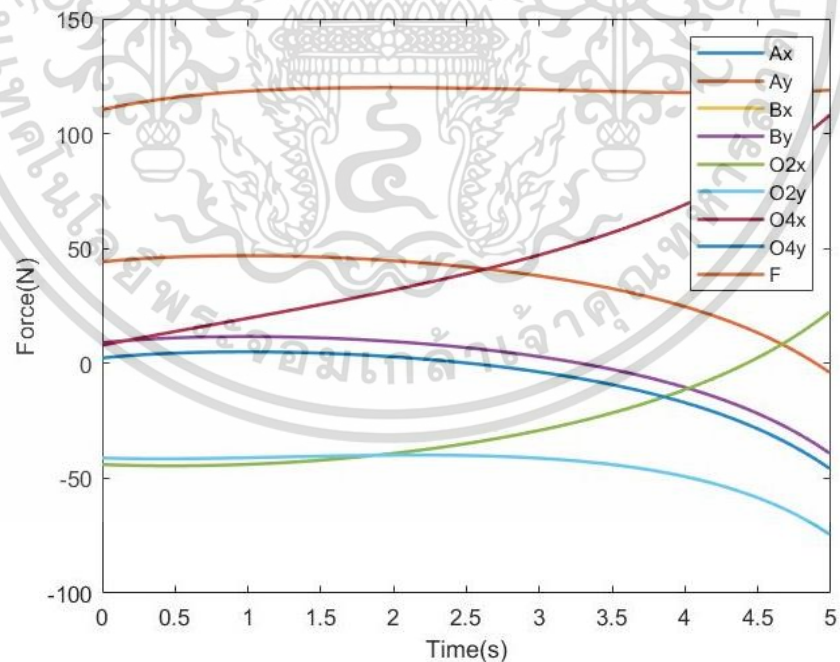
รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความเร่งในแกน x ที่เปลี่ยนไปของแต่ละชิ้นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



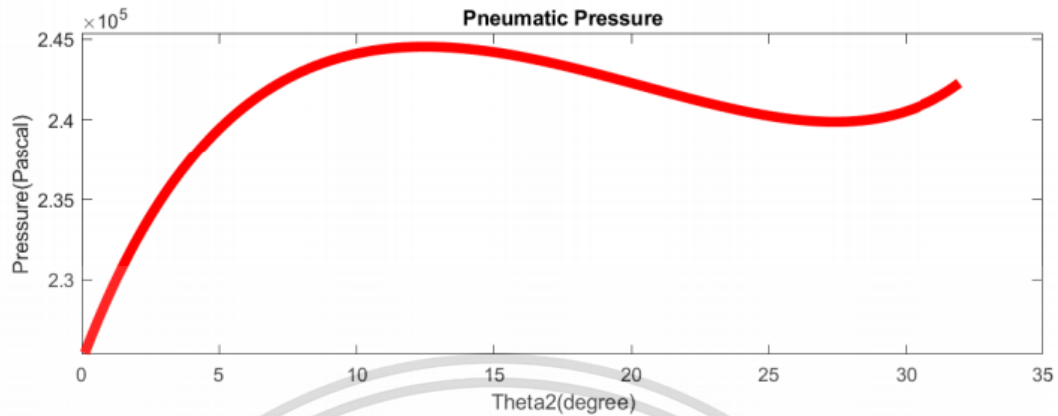
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความเร่งในแกน y ที่เปลี่ยนไปของแต่ละชิ้นส่วน

รูปที่ 3.17-3.21 เป็นผลด้านคิเนเมติกของแต่ละชิ้นส่วน ซึ่งจะถูกใช้ในการหาแรงภายในข้อต่อและแรงที่ใช้สำหรับการยกแพนโทกราฟขึ้น



รูปที่ 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบนข้อต่อกับเวลา แต่ละชิ้นส่วนที่ถูกยกด้วยกระบอกลูกสูบที่กระทำด้วยความเร็วเชิงมุมคงคงที่ที่ชิ้นส่วนที่ 2 และกราฟของแรงที่ใช้ในการยกชิ้นส่วนที่ 2 ขึ้นด้วยมุมที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับมุมของชิ้นส่วนที่ 2 ของกระบอกสูบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm และมีระยะชัก 100 mm

3.4 การจำลองลักษณะของแรงสั่นพ้อง

จากสมการการเคลื่อนที่

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ k_1 f_c(t) \end{bmatrix}$$

สมการในรูปการแปลงลาปลาซ (laplace transform)

$$\begin{bmatrix} m_1 s^2 + k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & m_2 s^2 + k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{x}_1(s) \\ \bar{x}_2(s) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_c(s) \end{Bmatrix}$$

Determinant:

$$D(s) = |Z(s)| \quad (3.35)$$

$$D(s) = m_1 m_2 \omega^4 - (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2) \omega^2 + k_1 k_2 \quad (3.36)$$

จาก cramer's rule หาค่า element ของ $\{\bar{x}(s)\}$ ได้

$$\bar{x}_1(s) = \frac{\begin{vmatrix} 0 & -k_2 \\ F_c(s) & m_2 s^2 + k_2 \end{vmatrix}}{D(s)} = \frac{k_2 F_c(s)}{D(s)} \quad (3.37)$$

$$\bar{x}_2(s) = \frac{\begin{vmatrix} m_1 s^2 + k_1 + k_2 & 0 \\ -k_2 & F_c(s) \end{vmatrix}}{D(s)} = \frac{(m_1 s^2 + k_1 + k_2) F_c(s)}{D(s)} \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ transfer function สองชุด คือ

$$G_1(s) = \frac{\bar{x}_1(s)}{F_c(s)} = \frac{k_2}{D(s)} \quad (3.39)$$

$$G_2(s) = \frac{\bar{x}_2(s)}{F_c(s)} = \frac{m_1 s^2 + k_1 + k_2}{D(s)} \quad (3.40)$$

จาก frequency response แทนค่า $s = i\omega$ แล้วหา $X_1 = F_c |G_1(i\omega)|$, $X_2 = F_c |G_2(i\omega)|$ ได้ solution

$$x_1(t) = X_1 \sin(\omega t + \phi_1), \quad x_2(t) = X_2 \sin(\omega t + \phi_2)$$

$$X_1 = F_c \left| \frac{k_2}{D(s)} \right|_{s=i\omega}, \quad X_2 = F_c \left| \frac{m_1 s^2 + k_1 + k_2}{D(s)} \right|_{s=i\omega}$$

$$D(i\omega) = m_1 m_2 \omega^4 - (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2) \omega^2 + k_1 k_2 \quad (3.41)$$

จะได้

$$X_1 = F_c \frac{k_2}{m_1 m_2 \omega^4 - (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2) \omega^2 + k_1 k_2} \quad (3.42)$$

$$X_2 = F_c \frac{-m_1 \omega^2 + k_1 + k_2}{m_1 m_2 \omega^4 - (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2) \omega^2 + k_1 k_2} \quad (3.43)$$

จากสมการที่ (2.8) ในบทที่ 2 แทนค่าคงที่ที่ทราบค่า

$$m_1 = 3.55 \text{ kg}, m_2 = 0.25 \text{ kg}, k_1 = 10 \text{ N/m}, k_2 = 50 \text{ N/m}$$

$$\text{จะได้} \quad 0.8875 \omega^4 - 88.5 \omega^2 + 1000 = 0 \quad (3.44)$$

และ

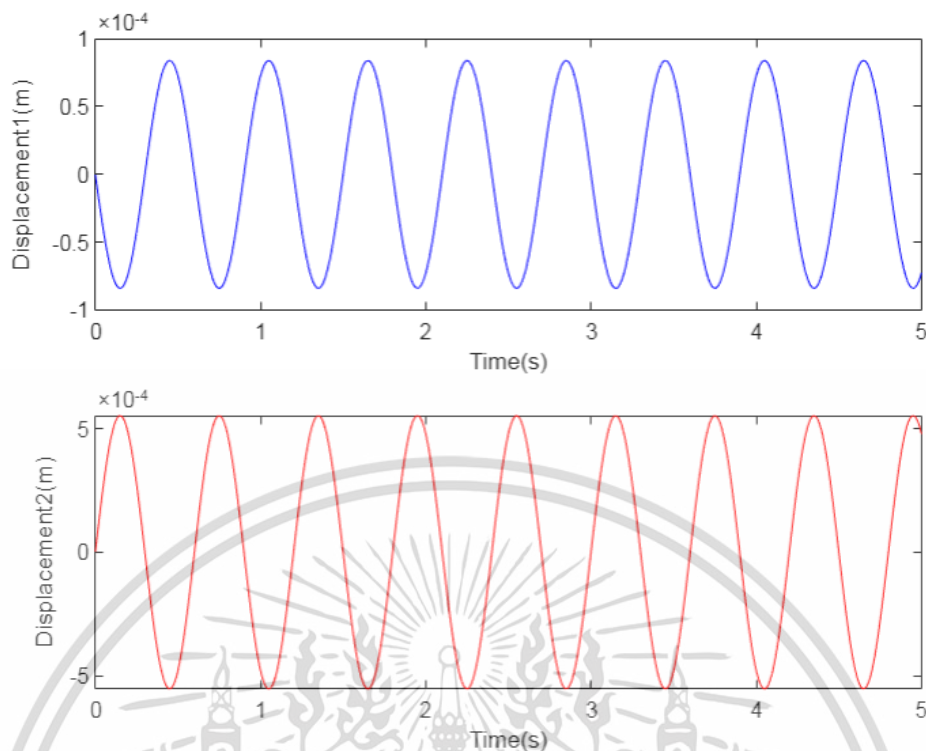
$$\omega^2 = 54.0225, 12.962$$

หรือจะได้ความถี่ธรรมชาติ

$$\omega_1 = 7.35 \text{ rad/s} \quad f_1 = 1.170 \text{ Hz}$$

$$\omega_2 = 3.61 \text{ rad/s} \quad f_2 = 0.583 \text{ Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงการกระจัดของมวลเพนเฮดและมวลของชั้นที่ 3 ที่ความถี่กระตุ้นจากสายไฟ
เหนือหัว 100 RPM

3.5 ระบบนิวเมติก (Pneumatics)

3.5.1 คุณสมบัติกระบอกลูกสูบ

จากการวิเคราะห์โปรแกรม Matlab ระยะชักของลูกสูบมีค่าเท่ากับ 95 mm ดังนั้นจึงเลือกใช้กระบอกลูกสูบที่มีระยะชัก 100 mm เพื่อให้ได้ระยะยกที่สอดคล้องกับการออกแบบ (ระยะชัก 100 mm เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกลูกสูบ 25 mm ความดันสูงสุด 0.7 MPa)

3.5.2 ความดันที่ใช้ในการยก

เมื่อเลือกใช้กระบอกลูกสูบเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm จะสามารถคำนวณความดันที่ใช้ในการยกแพนโทกราฟได้ดังรูปที่ 11 ซึ่งมีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.245 MPa และมีค่าความดันที่ได้จากการคำนวณไม่เกินความดันสูงสุดของกระบอกลูกสูบที่ได้เลือกไว้

3.6 การจัดทำแบบจำลองแพนโทกราฟ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการทำแบบจำลองแพนโทกราฟ ซึ่งมีด้วยกันหลายขั้นตอน ดังนี้

- จัดซื้อเหล็กกล่อง 1”x1” จำนวน 5 เส้น เหล็กกลมกลวง 3 หุน จำนวน 3 เส้น เหล็กกลมกลวง 1 หุน จำนวน 3 เส้น เพลลา 3/16 จำนวน 2 เส้น เพลลา 3/18 เหล็กแผ่นแบน 1” จำนวน 1 เส้น และลูกปืนขนาด 609 และ 604 จำนวนอย่างละ 4 ลูก แล้วนำเหล็กที่ได้จัดซื้อมาวัดความยาวตามส่วนประกอบของแพนโทกราฟที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรม SOLIDWORKS ซึ่งสามารถดูขนาดแต่ละส่วนได้ที่ภาคผนวก
- ตัดเหล็กตามความยาวที่ได้ออกแบบไว้
- นำเหล็กประกอบให้ได้ตามแบบที่เราเขียนโดยผ่านการเชื่อม และพ่นสีให้สวยงาม



รูปที่ 3.25 แบบจำลองแพนโทกราฟ

- จัดซื้อชุดมอเตอร์ปรับความเร็วที่ใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด 12 V สำหรับหมุนแบบจำลองสายไฟเหนือหัว
- ประกอบชุดลงเข้ากับระบบนิวเมติก เพื่อทดลองยกแพนโทกราฟตามที่ได้ออกแบบไว้

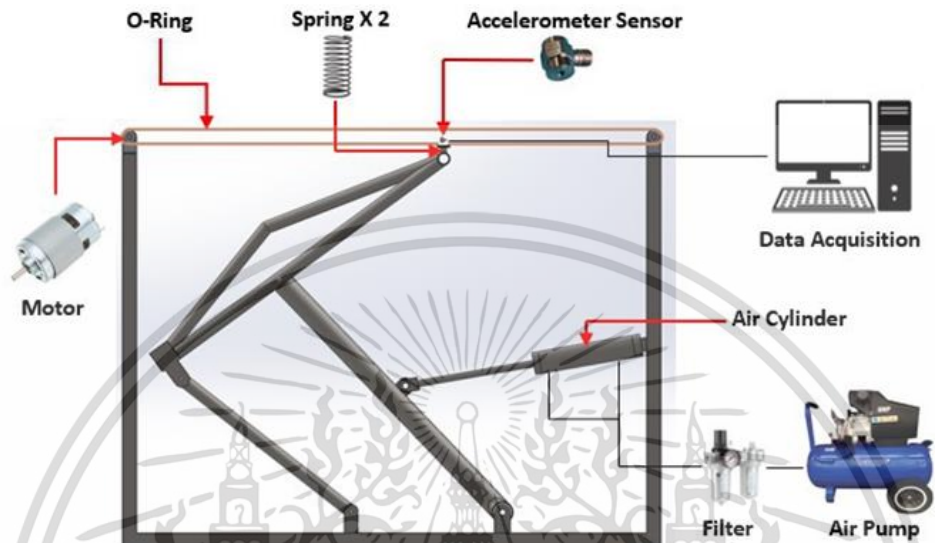
3.7 การติดตั้งแบบจำลองแพนโทกราฟ

เพื่อให้แบบจำลองแพนโทกราฟสามารถทำงานได้ ต้องมีการต่อระบบท่อลมและติดตั้งเซนเซอร์เพื่อวัดแรงสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 3.26 และ 3.27 ตามลำดับ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

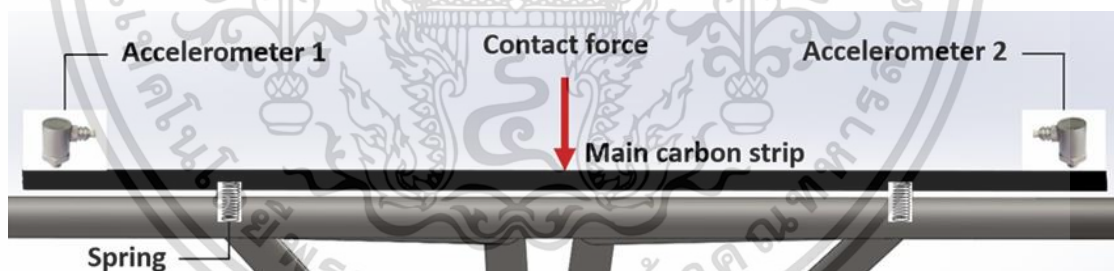
1. กระบอกสูบนิวเมติก 25 mm Bore 100 mm Stroke Mini Double Acting Pneumatic Air Cylinder Light Type 430N
2. ชุดมอเตอร์ปรับความเร็วใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด 12 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เซนเซอร์วัดความเร่งขนาด 10 g
4. โปรแกรม Vibrationshaker.vi (Kinetic.Inc)



รูปที่ 3.26 การต่อระบบท่อลม



รูปที่ 3.27 การติดตั้งเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

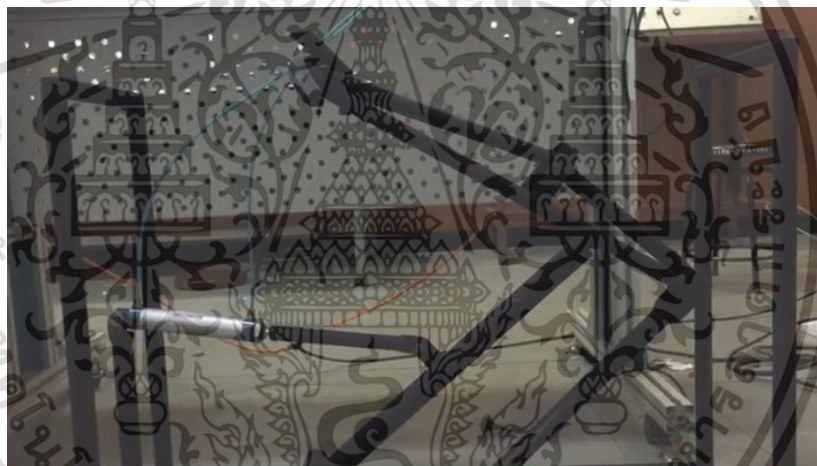
บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลลัพธ์

4.1 การทดสอบการเคลื่อนที่แพนโทกราฟ

การทดลองนี้เป็นการนำแพนโทกราฟที่ประกอบด้วยกระบอกลมต่อเข้ากับระบบนิวเมติก หลังจากนั้นทำการปรับค่าความดันที่ 0.2 MPa, 0.24 MPa, 0.28 MPa เพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของแพนโทกราฟ ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. ต่อท่อลมเข้ากับตัวควบคุมแรงและทิศทางของลม (Regulator) และกระบอกลมที่ติดกับชุดทดลองแพนโทกราฟ
2. ปรับความดันที่ตัวควบคุมแรงและทิศทางของลม (Regulator) ตามที่กำหนดด้านบน จากนั้นเปิดวาล์วและบันทึกผล



รูปที่ 4.1 ชุดแพนโทกราฟที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแบบจำลองแพนโทกราฟ

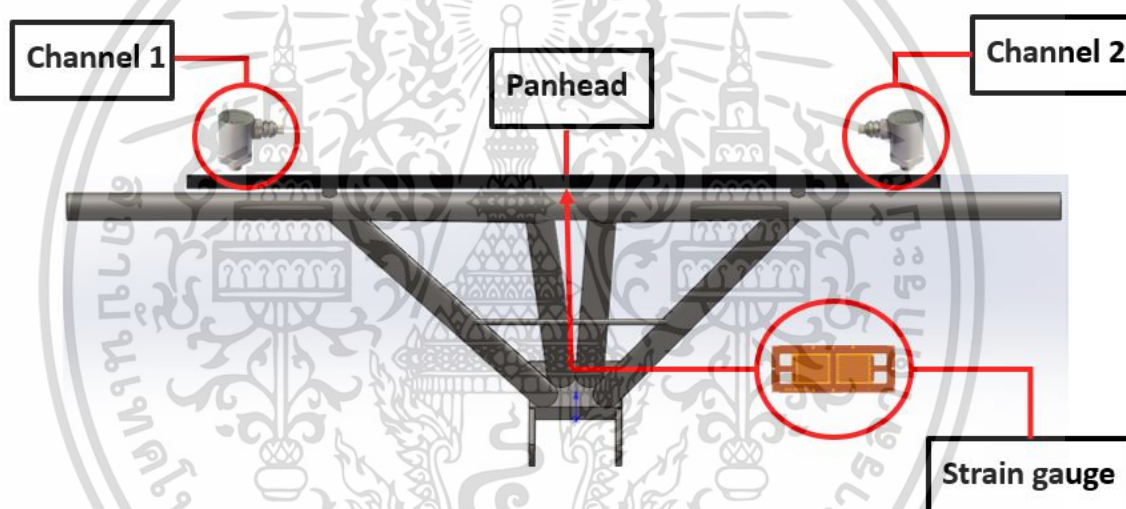
ความดัน (MPa)	ผลลัพธ์		หมายเหตุ
	ขึ้น	ลง	
0.20	ไม่สามารถยกขึ้นได้		
0.24	ยกขึ้นได้ ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เมื่อถึงจุดสูงสุดมีการสั่นเล็กน้อย	ลงด้วยความเร็วพอสมควร	ความดันที่ใกล้เคียงกับความดันต่ำสุดที่ใช้ในการยกที่ทำได้จาก Matlab (0.245 MPa)
0.28	ยกขึ้นได้ ใช้เวลาประมาณ 3 วินาที เมื่อถึงจุดสูงสุดมีการสั่น	ลงด้วยความเร็ว	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 แนวทางการทดสอบการวัดแรงสัมผัส

ในส่วนนี้จะเป็นการเสนอแนวทางการวัดแรงสัมผัสว่าจะทำอย่างไร แต่ไม่มีผลทดลองการทดลองจริงมีเพียงตัวอย่างผลลัพธ์เท่านั้น โดยจะนำมอเตอร์ปรับความเร็วได้ขนาด 12 V ต่อเข้ากับชุดลองแพนโทกราฟเพื่อเป็นตัวขับเคลื่อนรอกให้หมุน และติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งที่ด้านบนของแพนเฮดทั้ง 2 ข้างเพื่อเป็นตัวรับค่า หลังจากนั้นทำการปรับค่าความเร็วรอบเพื่อทดสอบความเร่ง ซึ่งมีแนวทงขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่ง 2 ตำแหน่งได้แก่ บริเวณด้านซ้ายของแพนเฮด (Channel 1) บริเวณด้านขวาของแพนเฮด (Channel 2) ซึ่งจะต่อเข้ากับตัวแปลงสัญญาณ แล้วต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล
2. ติดตั้งสเตรนเกจที่ได้ตำแหน่งตรงกลางของส่วนหัวหรือใต้จุดที่เกิดการสัมผัสกันดังแสดงในรูปที่ 4.2



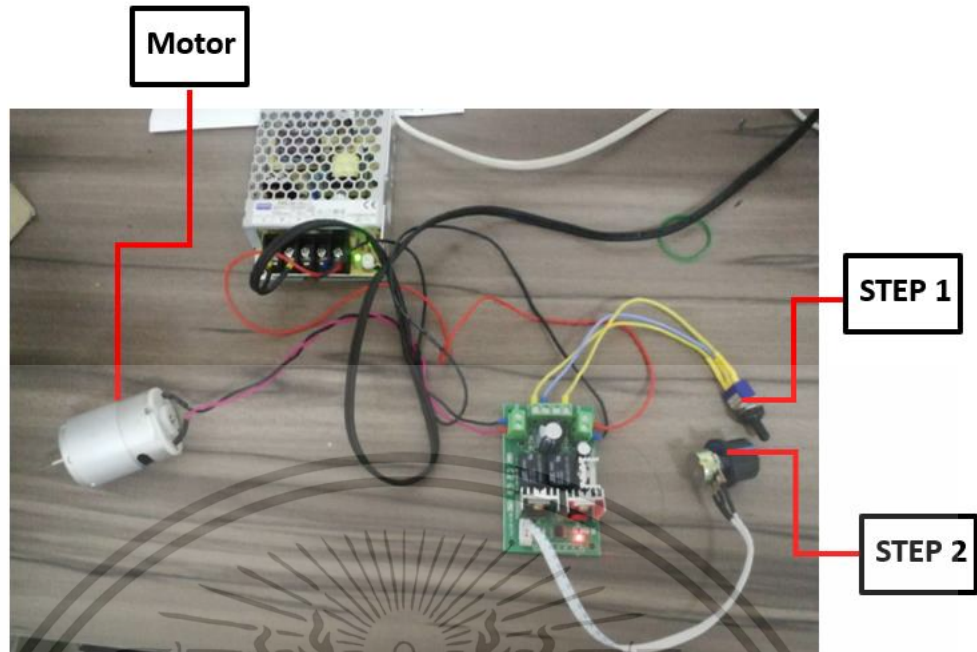
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่ง, สเตรนเกจและช่องสัญญาณที่ใช้ในการเก็บค่าความเร่ง

3. เปิดโปรแกรม Vibrationshaker.vi (Kinetic.Inc)
4. การใช้วงจรปรับความเร็วมีขั้นตอนดังนี้

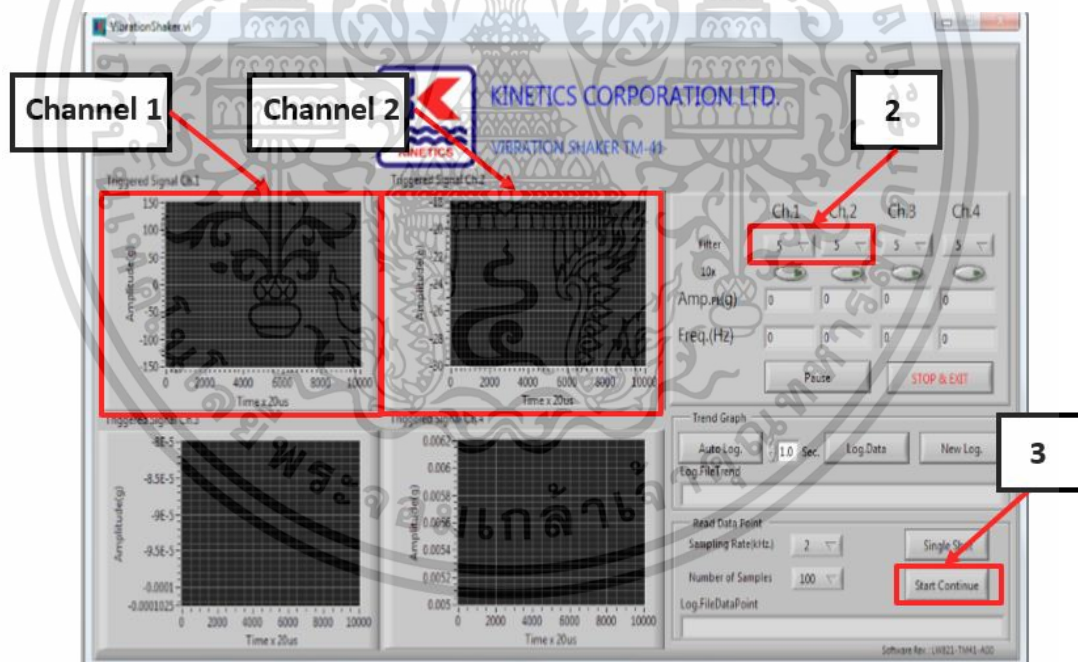
ขั้นตอนที่ 1 : หมุนสวิตช์เพื่อเปิดวงจรปรับความเร็ว

ขั้นตอนที่ 2 : หมุนปุ่มปรับความเร็วตามค่าที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แผงควบคุมและขั้นตอนการปรับความเร็วรอบที่แผงควบคุม



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมรับค่าความเร่งจากเซนเซอร์วัดความเร่ง

5. ตรวจสอบการรับค่าการสั่นจากโปรแกรมและปรับ Filter ที่ช่องหมายเลข 2 ให้เหมาะสม ซึ่งค่าที่ควรใช้ระหว่าง 5-500
6. เมื่อกราฟความเร่งที่ของข้อมูลปรากฏ กดบันทึกโดยกดที่ ช่องหมายเลข 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. บันทึกเป็นไฟล์นามสกุล .xls เป็นเสร็จ

8. เปิดไฟล์ที่บันทึก จะพบว่าข้อมูลความเร็ว โดยค่าที่อ่านได้จากโปรแกรมในแต่ละ Channel มีหน่วยเป็น “g” อยู่ใน Column B กับ C ซึ่งสามารถแปลงเป็นความเร็วด้วยการคูณ 9.81 m/s^2 อยู่ใน Column D กับ E และทำการรวมผลลัพธ์ทั้งหมดใน Column H กับ I แล้วทำการถอดรูทจะได้ a_{rms} ซึ่งอยู่ใน Column J7 กับ K7

No.	Data Ch.1	Data Ch.2	Data Ch.1	Data Ch.2	Data Ch.1	Data Ch.2	Area Ch.1	Area Ch.2	sum Area Ch.1	sum Area Ch.2
	g	g	m/s ²	m/s ²	(m/s ²) ²	(m/s ²) ²	(m/s ²) ² * s	(m/s ²) ² * s	(m/s ²) ² * s	(m/s ²) ² * s
1	0.795924	-0.058254	7.80801444	-0.57147174	60.9650895	0.32657995	0.047805992	0.000723327	68.3461594	66.73864917
2	1.163415	-0.163313	11.41310115	-1.60210053	130.2588779	2.566726108	0.070475679	0.009229093		
3	1.255288	-0.597437	12.31437528	-5.86085697	151.6438385	34.34964442	0.067035773	0.013767223		
4	1.100253	-0.464	10.79348193	-4.55184	116.4992522	20.71924739	0.069423	0.014047169	Ch.1 RMS	Ch.2 RMS
5	1.294207	-0.607097	12.69617067	-5.95562157	161.1927497	35.46942829	0.078093626	0.043165563	8.267173604	8.16937263
6	1.253374	-1.193979	12.29559894	-11.71293399	151.1817533	137.1928227	0.062197508	0.063686682		
7	1.007104	-1.105222	9.87969024	-10.84222782	97.60827924	117.5539041	0.055309768	0.045910341		
8	1.133429	-0.828687	11.11893849	-8.12941947	123.6307931	66.08746092	0.055900734	0.066642634		
9	1.019226	-1.443344	9.99860706	-14.15920464	99.97214314	200.483076	0.041531373	0.066618598		
10	0.8291	-0.828084	8.133471	-8.12350404	66.15335051	65.99131789	0.029591918	0.031514778		
11	0.73659	-0.790045	7.2259479	-7.75034145	52.21432305	60.06779259	0.022720315	0.062571539		
12	0.633871	-1.405909	6.21827451	-13.79196729	38.66693788	190.2183617	0.01329314	0.05944816		
13	0.388239	-0.7031	3.80462459	-6.897411	14.50562127	47.5742785	0.005284867	0.019536476		

รูปที่ 4.5 แสดงข้อมูลตัวอย่างที่ได้รับจากโปรแกรมและการคำนวณ

9. แรงสั่นผัดหาโดยขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : หาแรงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics force) โดย $F_a = C v^2$ โดย C สามารถดูได้จากตาราง 2.2 ในบทที่ 2 และรัศมีของรอกอยู่ที่ 0.05 m

ตารางที่ 4.2 ตารางตัวอย่างการคำนวณ แรงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics force)

Velocity [rev/min]	Velocity [m/s]	C	F_a [N]
100	0.5235	1	0.2741
200	1.0471	1	1.0964
300	1.5707	1	2.4671
400	2.0943	1	4.3861
500	2.6179	1	6.8534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 : หาแรงภายในเนื่องจากสปริงระหว่างระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 (Inner force) โดย $F_b = \sum_{i=1}^2 F_{bs,i}$ ซึ่งจะได้ค่าความเค้นจากสเตรนเกจ ณ ความเร็วรอบที่กำหนด และพื้นที่สัมผัสระหว่างส่วนหัวกับสายไฟเหนือหัวมีค่าเท่ากับ 0.0004 m^2

ตารางที่ 4.3 ตารางตัวอย่างการคำนวณ แรงภายในเนื่องจากสปริงระหว่างระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 (Inner force)

Velocity [rev/min]	Stress [N/m ²]	F_b [N]
100	16.50	0.0066
200	4.652	0.00185
300	2.00	0.0008
400	1.225	0.00049
500	0.75	0.0003

ขั้นตอนที่ 3 : หาแรงเฉื่อย (Inertia force) โดย $F_i = \sum_i m_i a_i$ โดยที่ $m_i = 0.25 \text{ kg}$, a_i คือความเร่งเฉลี่ยระหว่างทั้ง 2 ด้าน

ตารางที่ 4.4 ตารางตัวอย่างการคำนวณ แรงเฉื่อย (Inertia force)

a_{avg} [m/s ²]	F_i [N]
8.2183	2.0546
8.1216	2.0304
8.0974	2.0243
8.3336	2.0834
8.4428	2.1107

ขั้นตอนที่ 4 : หาแรงสัมผัส (Contact force) โดย $F_c = F_b + F_a + F_i$ ซึ่งเป็นดังสมมูลแรงแพนโทกราฟในรูปที่ 2.5 บทที่ 2

ตารางที่ 4.5 ตารางตัวอย่างแสดงผลการวัดค่าความเร่งและแรงสัมผัสที่เกิดขึ้น

ความเร็วรอบ [RPM]	$\int_{t_2}^{t_1} (a(t))^2 dt$ $= \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2 + a_{i+1}^2}{2} (\Delta t)$		$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{(T_2-T_1)} \int_{T_1}^{T_2} (a(t))^2 dt}$		$F_c = F_b + F_a + F_i$
	เซนเซอร์วัด ความเร่งด้านซ้าย [(m/s ²) ² x s]	เซนเซอร์วัด ความเร่งด้านขวา [(m/s ²) ² x s]	เซนเซอร์วัด ความเร่ง ด้านซ้าย [m/s ²]	เซนเซอร์วัด ความเร่ง ด้านขวา [m/s ²]	แรงสัมผัส [N]
100	68.3462	66.7386	8.2672	8.1694	2.3353
200	65.5786	66.3441	8.0981	8.1452	3.12865
300	62.9829	68.2036	7.9362	8.2585	4.5012
400	67.3682	71.5598	8.2078	8.4593	6.46999
500	65.9752	76.7919	8.1225	8.7631	8.9644

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและออกแบบชุดทดลองแพนโทกราฟ พบว่า

1. สามารถเรียนรู้กลไกการทำงานของแบบจำลองแพนโทกราฟ และสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ เช่น ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม และยังหาความดันต่ำสุดที่ใช้ในการยกแพนโทกราฟ โดยใช้โปรแกรม Matlab ในการวิเคราะห์

2. สามารถสร้างแบบจำลองแพนโทกราฟที่ยกขึ้น-ลงได้ด้วยระบบนิวมติก โดยการออกแบบให้แบบจำลองแพนโทกราฟมีขนาดเป็น 1:3.33 ของขนาดของจริงด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

5.2 ปัญหาจากการศึกษาและข้อเสนอแนะ

1. การวัดขนาด เชื่อมและตัดเหล็กชิ้นส่วนต่างๆของแบบจำลองแพนโทกราฟอาจมีความคลาดเคลื่อนจากสายตาของผู้ทำการวัด เชื่อมและตัดเหล็ก

2. ในการวิเคราะห์ทางพลวัตนั้นเป็นการสมมุติค่าความเร็วเชิงมุมของชิ้นส่วนหนึ่งให้คงที่เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ทางพลวัต อาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากความจริงเพราะเนื่องจากค่าแรงดันลัพท์ที่ได้จาก Matlab นั้นเป็นค่าแรงดันที่ไม่คงที่ แต่ในการปฏิบัติจริงนั้นไม่สามารถควบคุมความดันได้ตามแรงดันลัพท์

3. การเปรียบเทียบค่าความดันทางทฤษฎีและจากการทดลองที่ใช้ในการยกแบบจำลองแพนโทกราฟให้สามารถขึ้นได้นั้นอาจมีความคลาดเคลื่อน

4. ในการวัดแรงสัมผัสจริง สามารถทำได้โดยการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งบนแพนเฮดของแบบจำลองแพนโทกราฟและใช้โปรแกรม Kinetic Inc. ในการรับค่าความเร่งจากเซนเซอร์วัดความเร่ง

5. เนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโควิด-19 ทำให้ผู้จัดทำไม่สามารถทดลองวัดค่าความเร่งจริงจากแบบจำลองแพนโทกราฟได้ แต่ได้ให้ข้อเสนอแนะและวิธีในการวัดค่าความเร่งเพื่อหาแรงสัมผัสไว้แล้ว

6. ชุดทดลองแบบจำลองแผนโทกราฟหากสามารถเขียนระบบควบคุมเชิงพลวัตของแรงดันได้ จะได้ผลลัพธ์ของโคเนติกส์และจลศาสตร์ตรงกับการวิเคราะห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

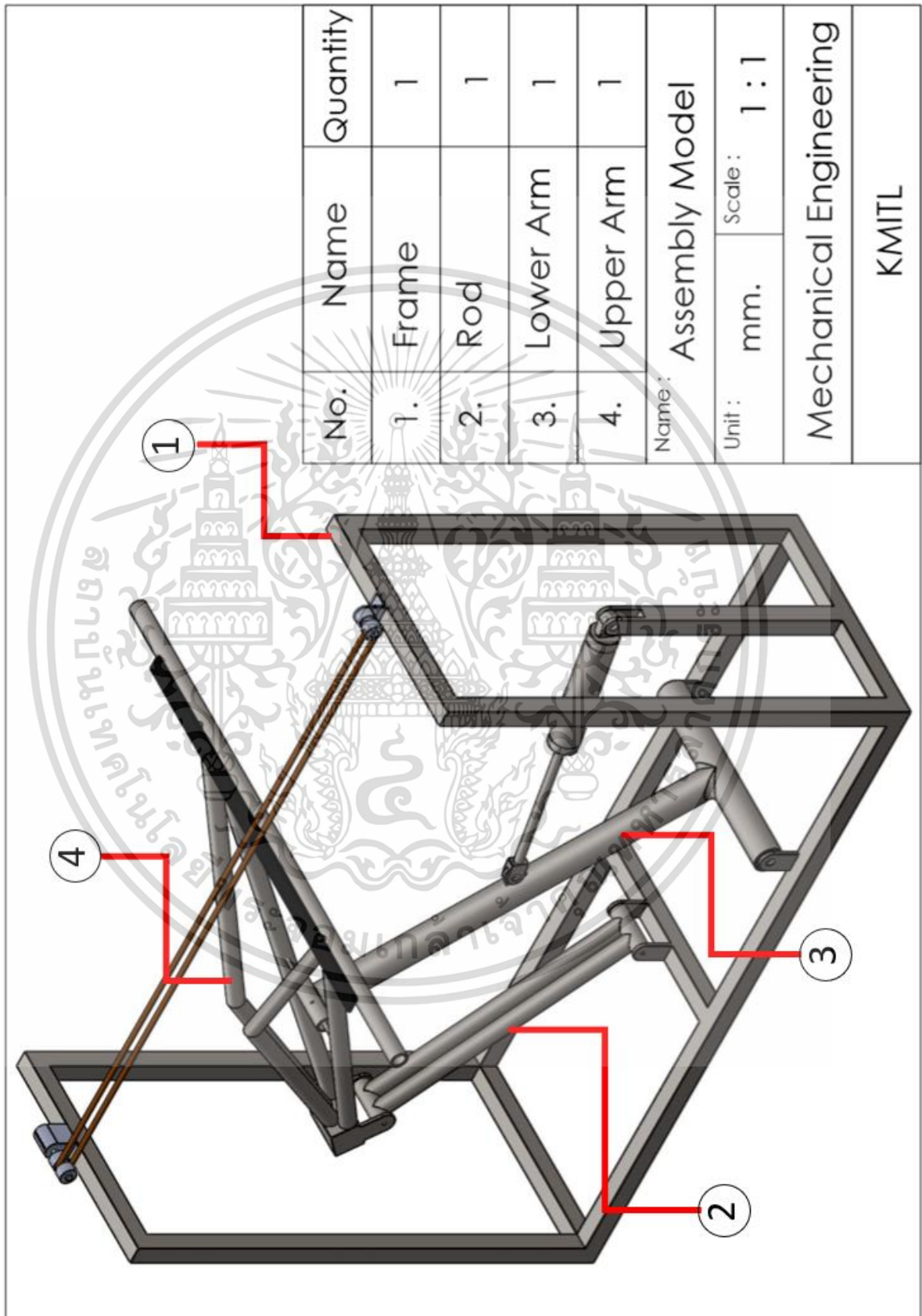


ภาคผนวก

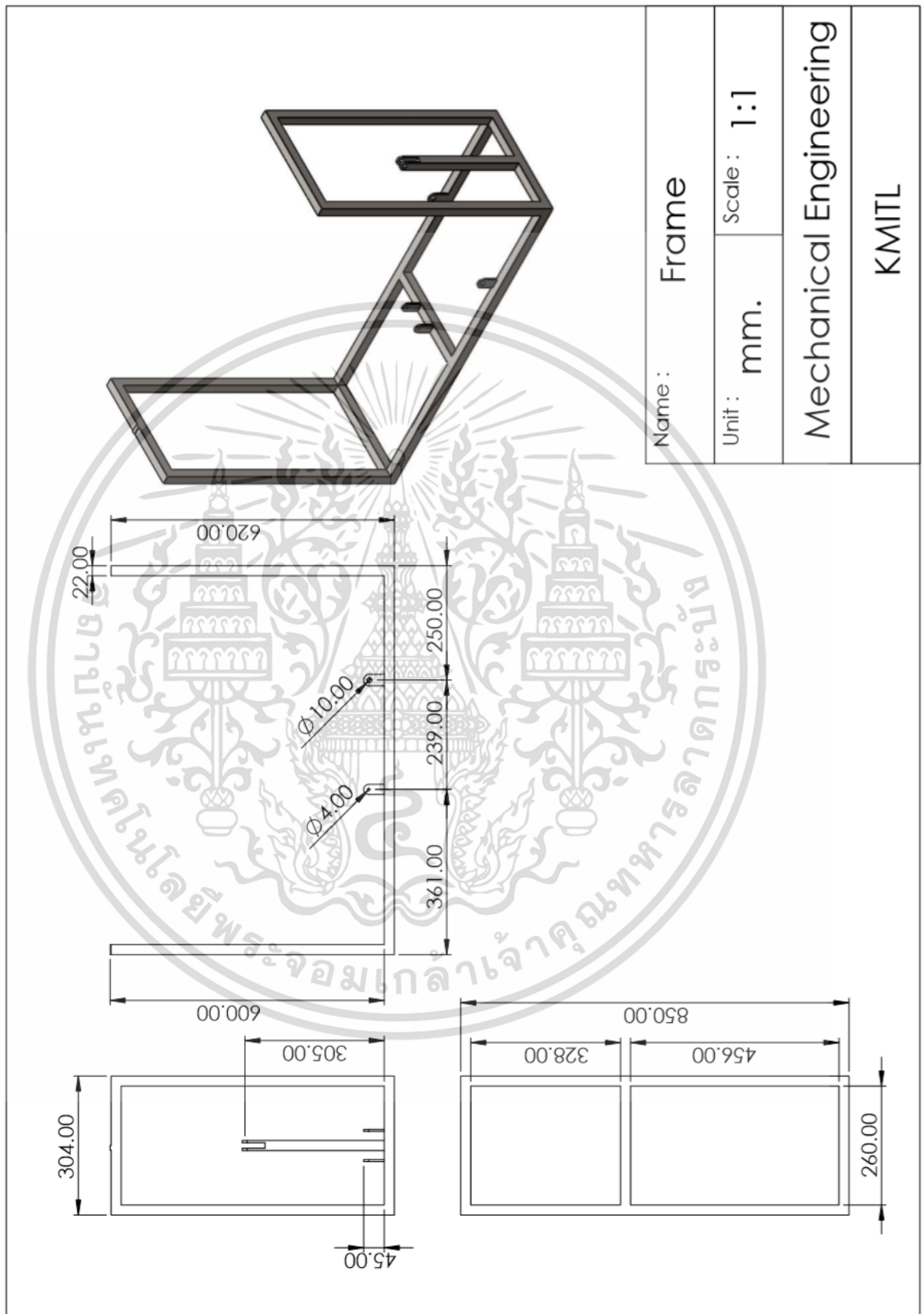
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

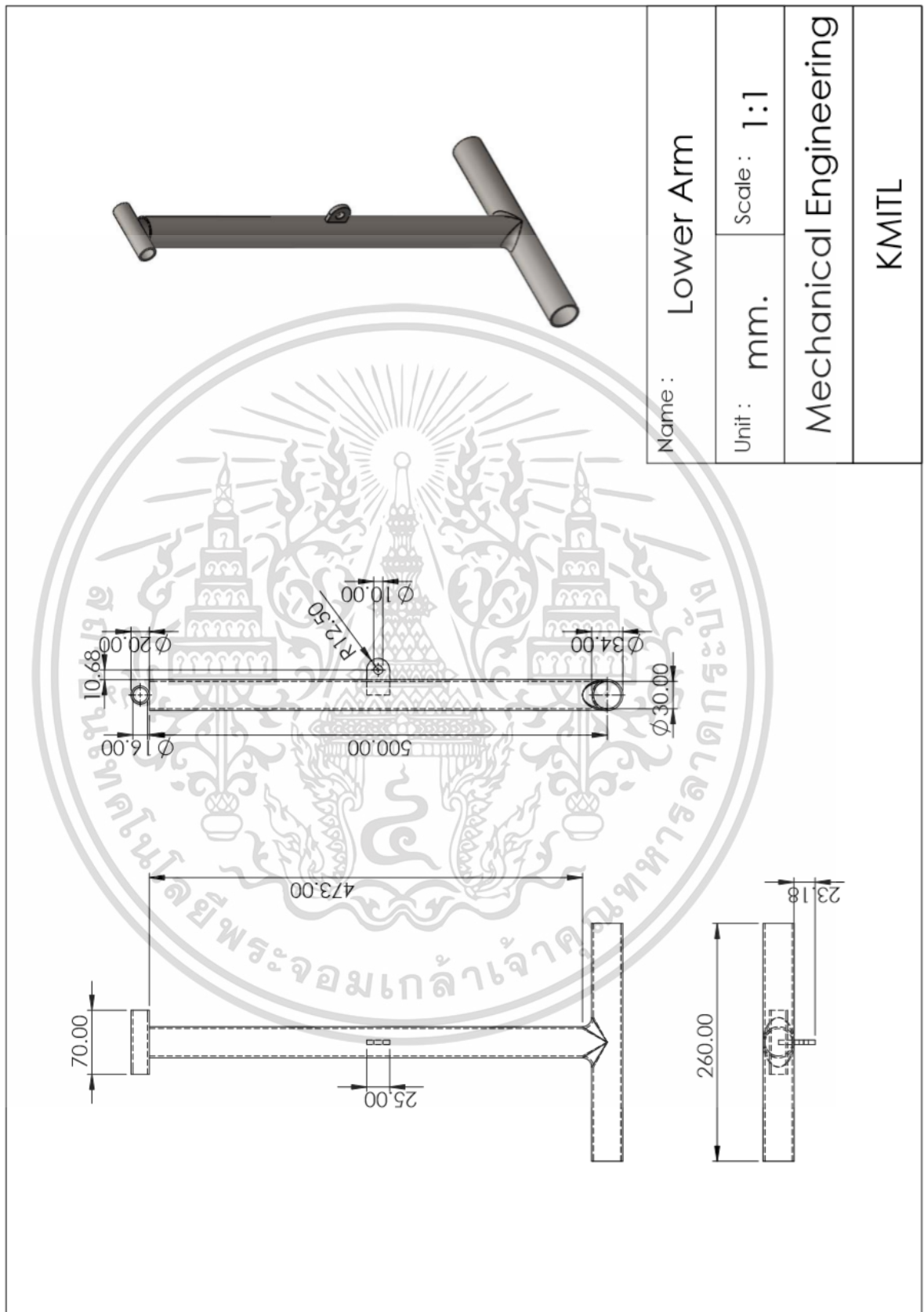
แบบจำลองแพนโทกราฟ (SOLIDWORKS)



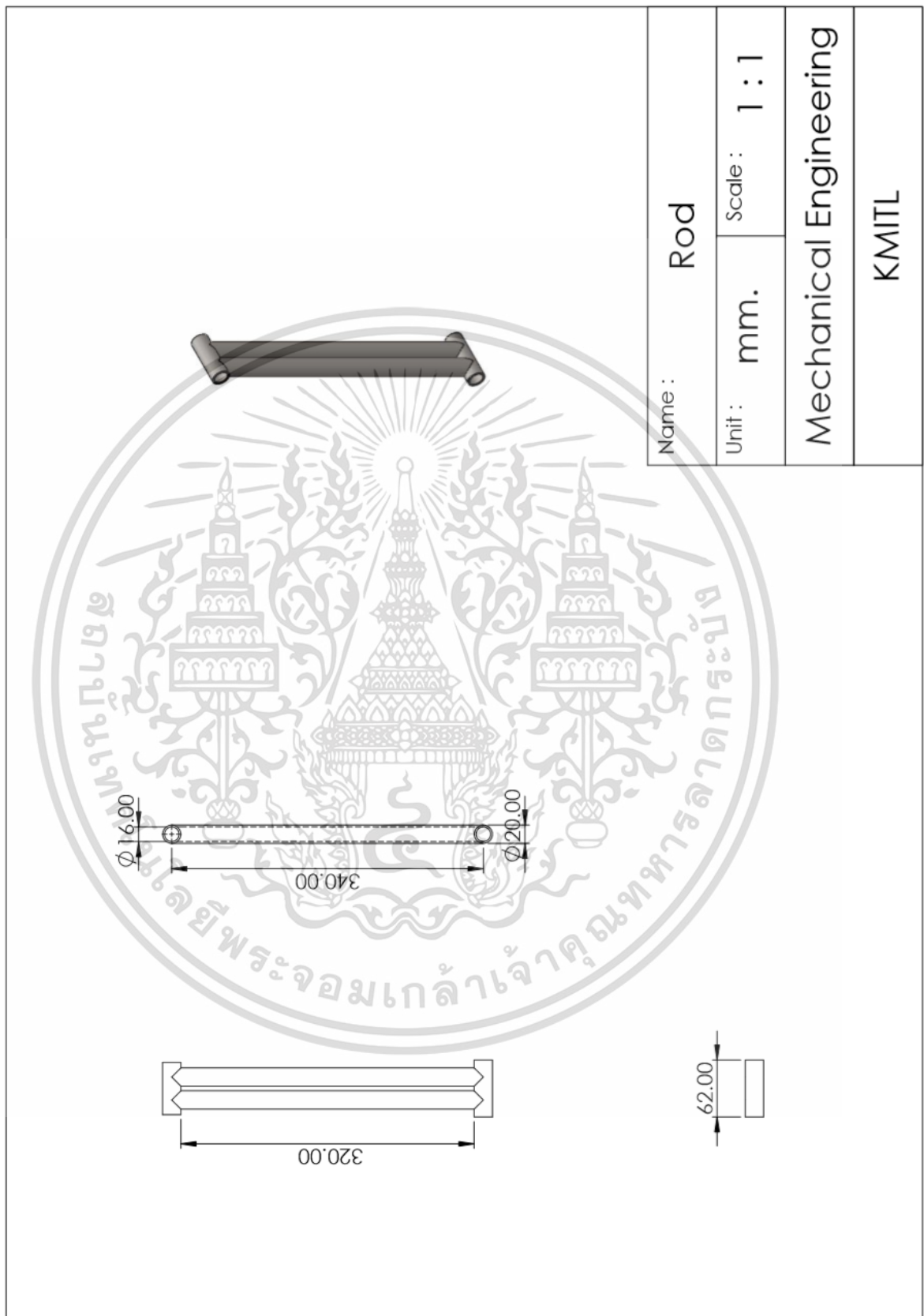
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



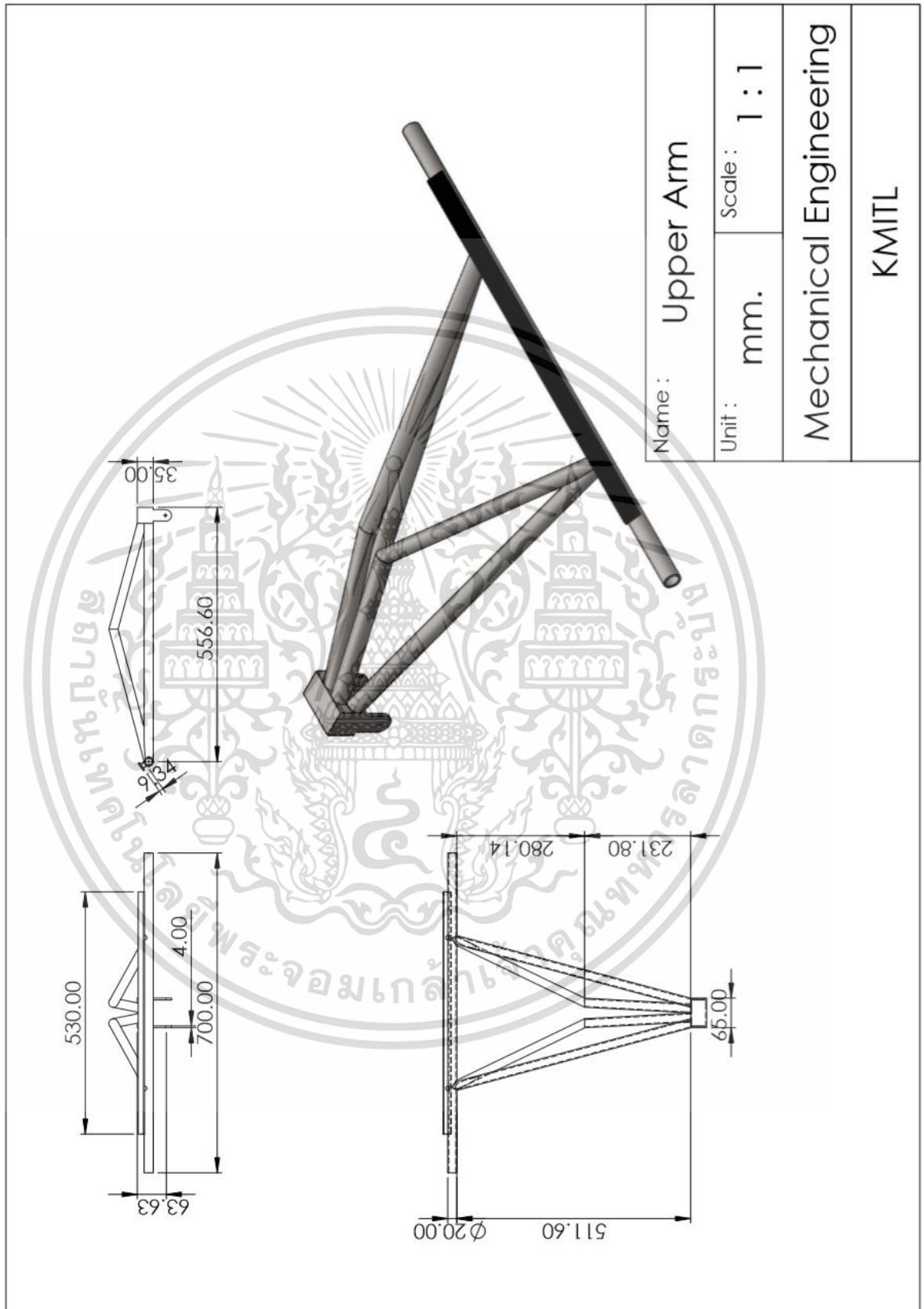
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



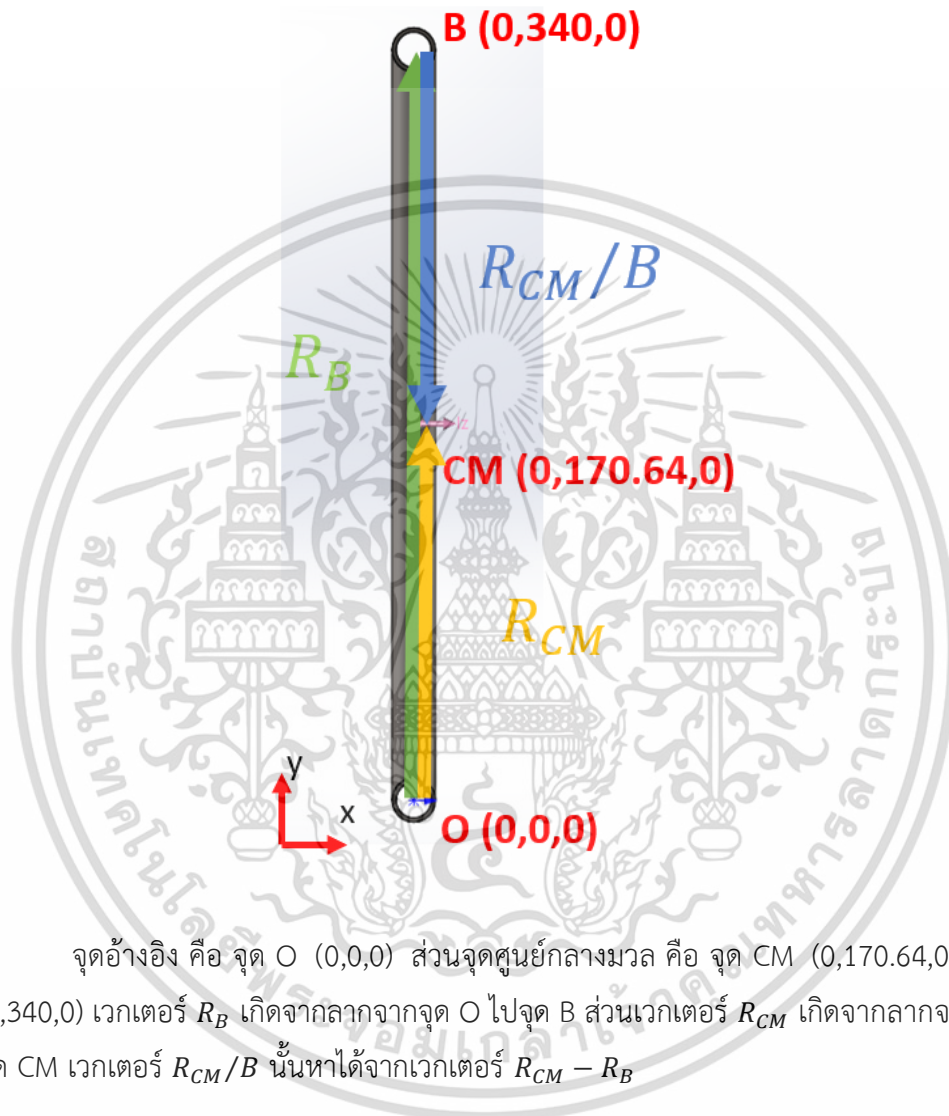
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

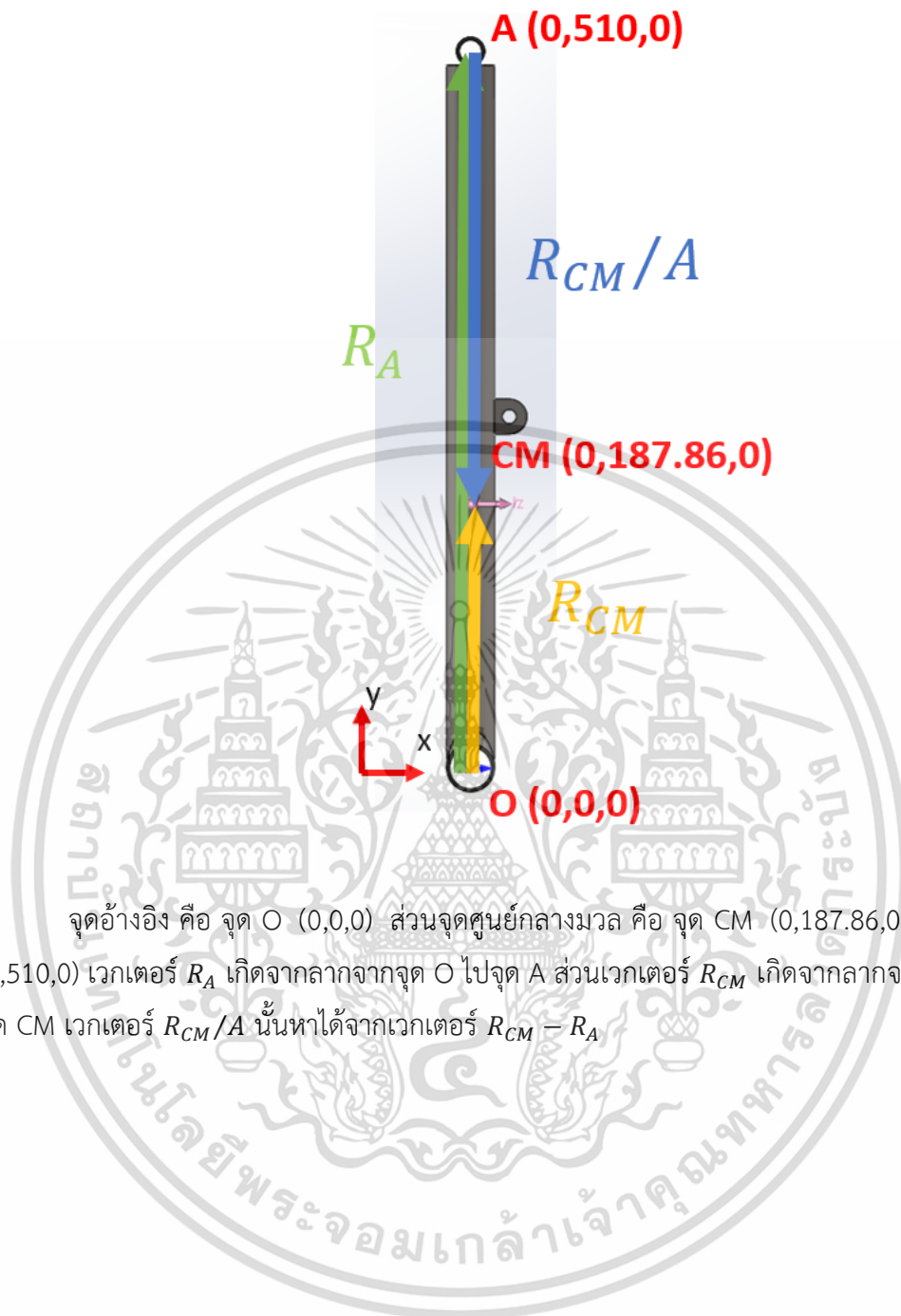
ภาคผนวก ข

วิธีการหาค่าจุดศูนย์กลางมวล ค่ามวล และค่าโมเมนต์เฉื่อยเชิงมวลจากโปรแกรม
SOLIDWORKS



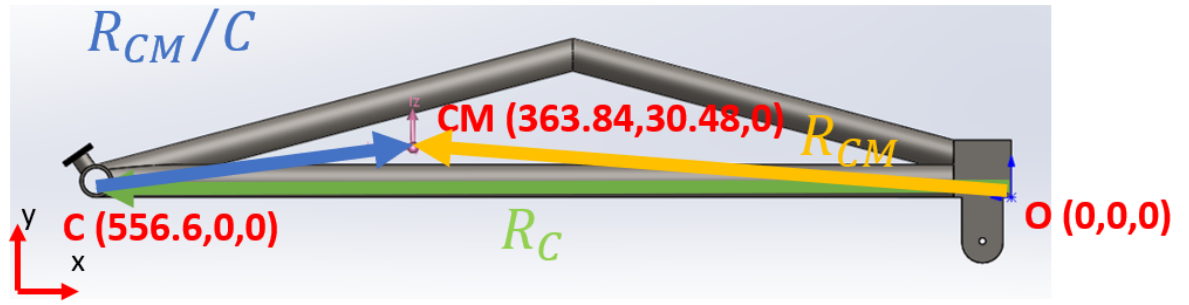
จุดอ้างอิง คือ จุด O $(0,0,0)$ ส่วนจุดศูนย์กลางมวล คือ จุด CM $(0,170.64,0)$ และจุด B $(0,340,0)$ เวกเตอร์ R_B เกิดจากลากจากจุด O ไปจุด B ส่วนเวกเตอร์ R_{CM} เกิดจากลากจากจุด O ไปจุด CM เวกเตอร์ $R_{CM/B}$ นั้นหาได้จากเวกเตอร์ $R_{CM} - R_B$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

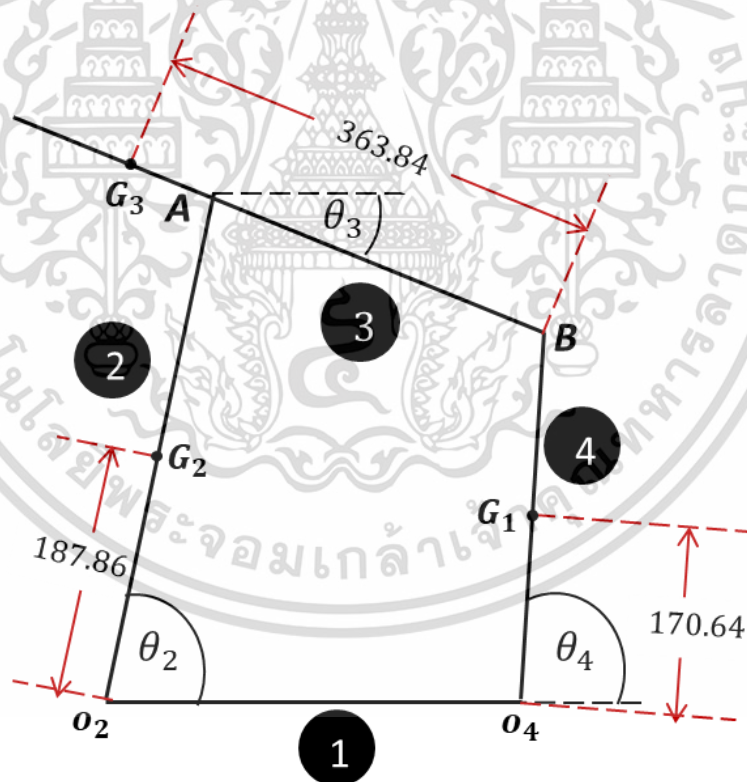


จุดอ้างอิง คือ จุด O (0,0,0) ส่วนจุดศูนย์กลางมวล คือ จุด CM (0,187.86,0) และจุด A (0,510,0) เวกเตอร์ R_A เกิดจากลากจากจุด O ไปจุด A ส่วนเวกเตอร์ R_{CM} เกิดจากลากจากจุด O ไปจุด CM เวกเตอร์ $R_{CM/A}$ นั้นหาได้จากเวกเตอร์ $R_{CM} - R_A$

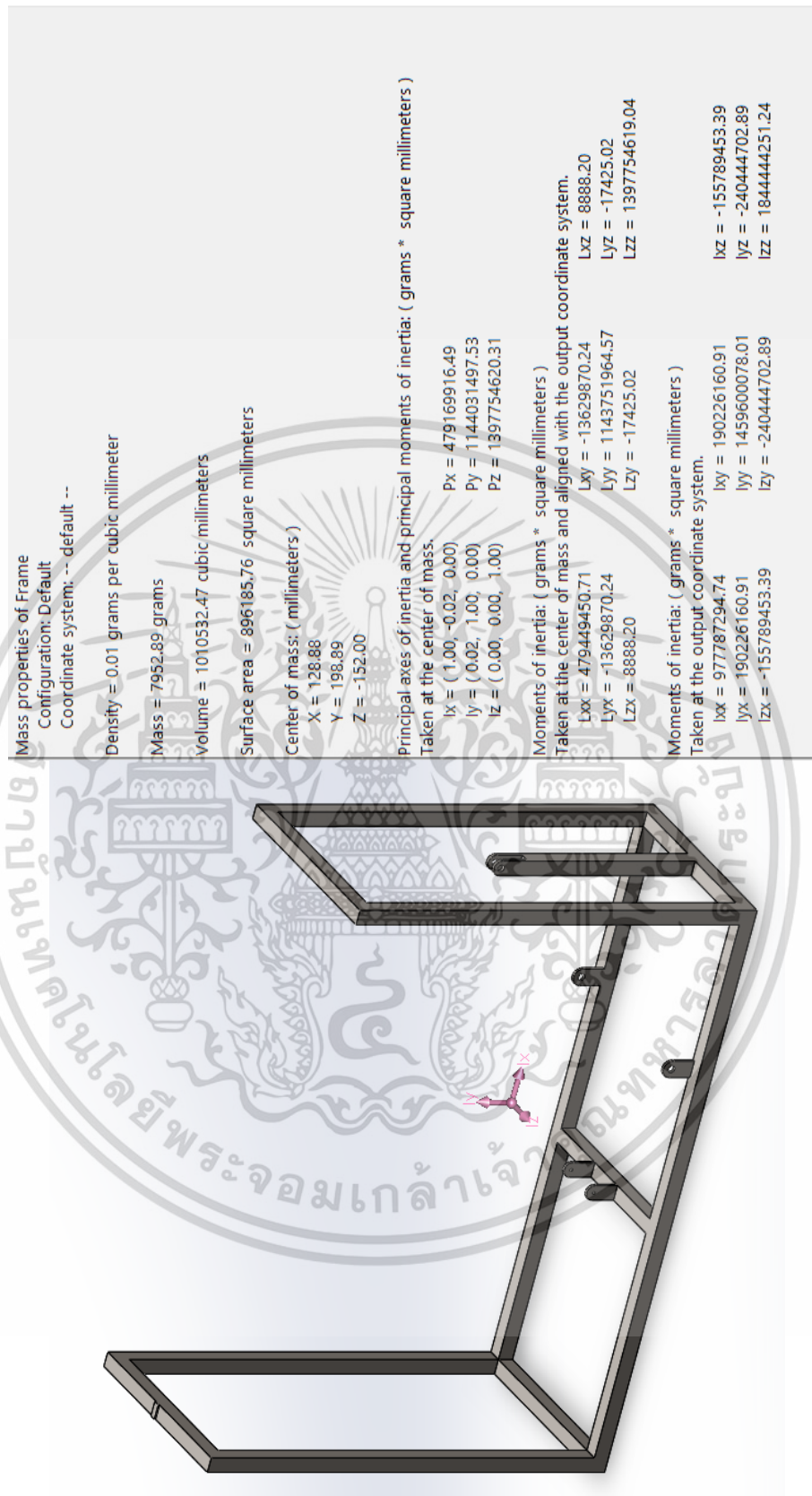
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



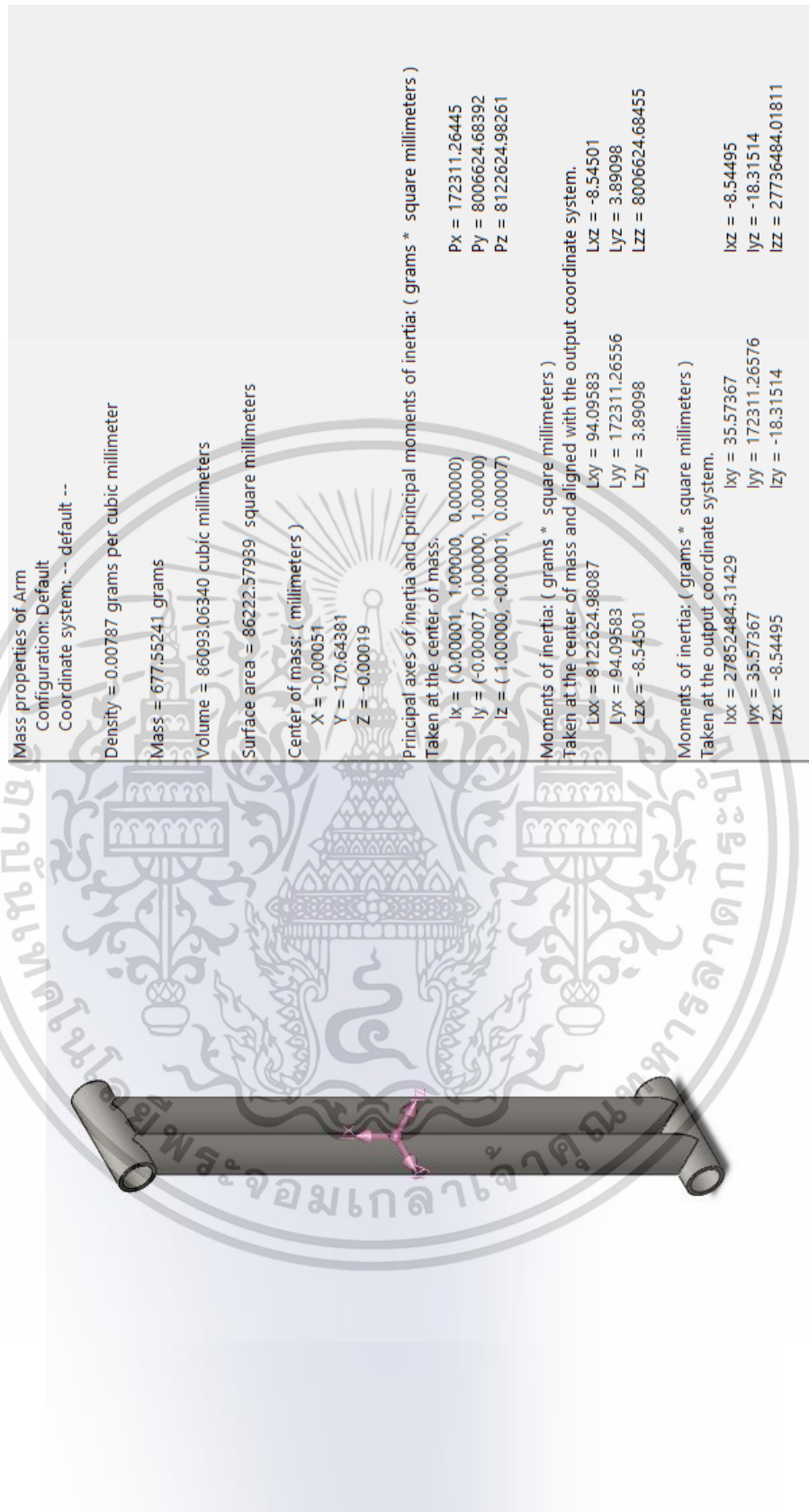
จุดอ้างอิงคือจุด $O (0,0,0)$ ส่วนจุดศูนย์กลางมวลคือจุด $CM (363.84,30.48,0)$ และจุด $C (556.6,0,0)$ เวกเตอร์ R_C เกิดจากลากจากจุด O ไปจุด C ส่วนเวกเตอร์ R_{CM} เกิดจากลากจากจุด O ไปจุด CM เวกเตอร์ R_{CM}/C นั้นหาได้จากเวกเตอร์ $R_{CM} - R_C$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mass properties of Arm
 Configuration: Default
 Coordinate system: -- default --

Density = 0.00787 grams per cubic millimeter

Mass = 677.55241 grams

Volume = 86093.06340 cubic millimeters

Surface area = 86222.57939 square millimeters

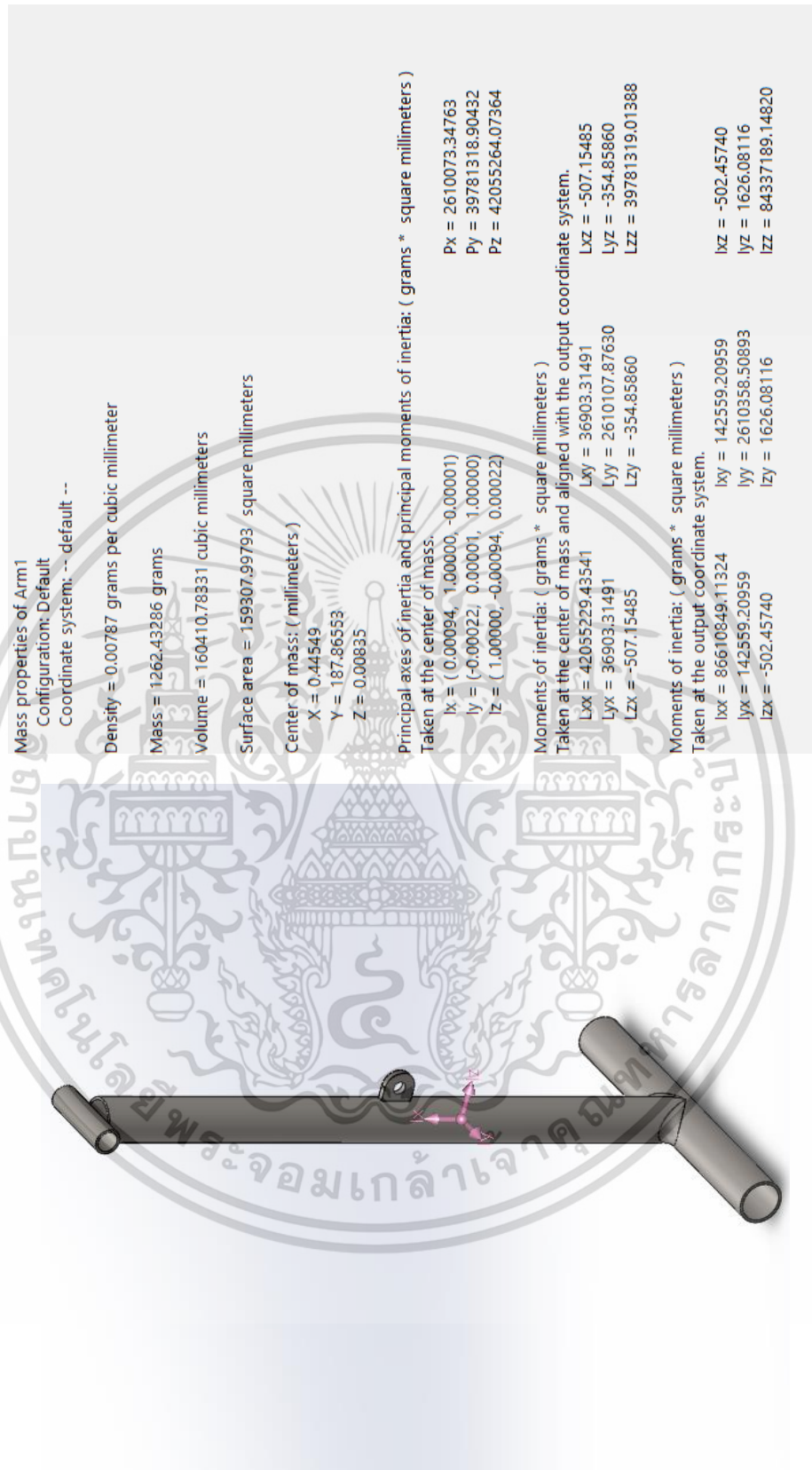
Center of mass: (millimeters)
 X = -0.00051
 Y = 170.64381
 Z = -0.00019

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)
 Taken at the center of mass:
 Ix = (0.00001, 1.00000, 0.00000)
 Iy = (-0.00007, 0.00000, 1.00000)
 Iz = (1.00000, -0.00001, 0.00007)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)
 Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.
 Lxx = 8122624.98087
 Lyy = 94.09583
 Lzz = -8.54501
 Lxy = 172311.26556
 Lyz = 3.89098
 Lzx = 8006624.68455

Moments of inertia: (grams * square millimeters)
 Taken at the output coordinate system.
 Ixx = 27852484.31429
 Iyy = 35.57367
 Izz = -8.54495
 Ixy = 172311.26576
 Iyz = -18.31514
 Izx = -8.54495

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mass properties of Upper2
 Configuration: Default
 Coordinate system: --- default ---

Density = 0.00787 grams per cubic millimeter
 Mass = 3805.71910 grams
 Volume = 483572.94827 cubic millimeters
 Surface area = 332667.63832 square millimeters

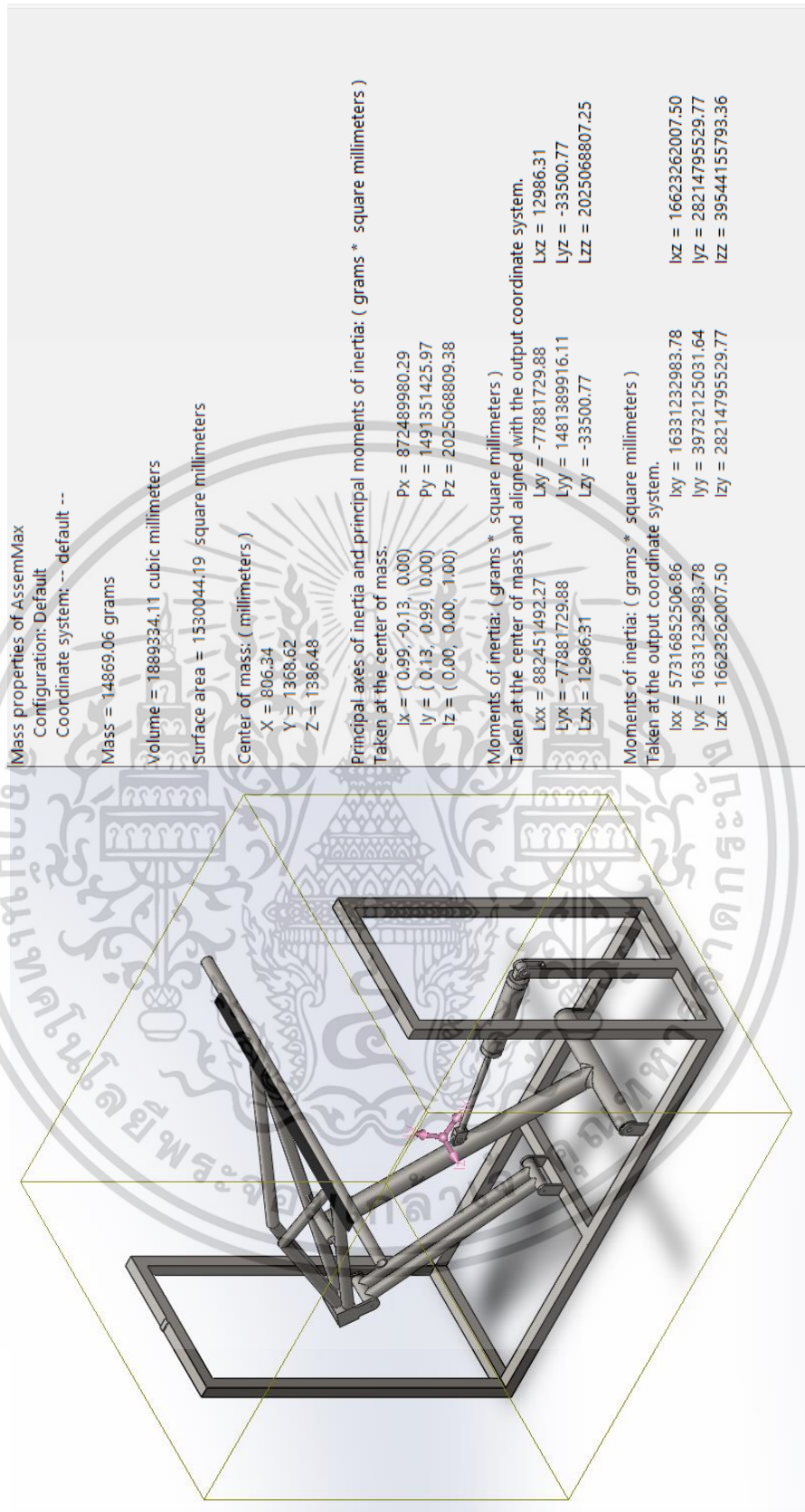
Center of mass: (millimeters)
 X = 363.84202
 Y = 30.48457
 Z = -0.01586

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)
 Taken at the center of mass.
 Ix = (0.99973, -0.02321, -0.00005)
 Iy = (-0.00005, 0.00001, -1.00000)
 Iz = (-0.02321, 0.99973, 0.00001)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)
 Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.
 Lxx = 56529459.05928
 Lyy = -2651533.19110
 Lzz = -2916.61587
 Lxy = -2916.61587
 Lyz = -238.56343
 Lzx = 170656527.41834
 Lzy = -238.56343
 Lzz = 119205598.48675

Moments of inertia: (grams * square millimeters)
 Taken at the output coordinate system.
 Ixx = 60065148.26801
 Iyy = 39559852.60269
 Izz = -24879.10892
 Ixy = 674461490.53700
 Iyz = -2078.69471
 Izx = -2078.69471

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

โปรแกรมคำนวณใน Matlab

คำนวณหาความดันที่ใช้ยกแบบจำลองแพนโทกราฟ

```

%% Input
y = input('Theta = ');
omega2 = input('Omega2 = ');
pneu = input('Pneumatic position = ');
dpneu = input('Distance_pneumatic = ');
hpneu = input('Height_pneumatic = ');
bore = input('bore diameter = ');
dr = 0.001;
rev = round(y*pi/(180*dr),0);
n=0;
for th=0 : dr: y*pi/180
    %% // geometer of pantograph
    a=0.50; c=0.34;
    d=0.25; b=0.2;
    AC=sqrt(a^2+d^2-2*a*d*cos(th));

    %% // find angle th1 th2 th3
    th1=acos((d^2+(AC^2)-a^2)/(2*d*AC));
    th2=acos(((AC^2)+b^2-c^2)/(2*AC*b));
    th3=(th2-th1);
    n=n+1 ;

    %% // data transfer
    theta2(n,1)= th ;
    theta3(n,1)= th3;
    theta4(n,1)= pi-th1- ( asin(b/c*sin(th2)) ) ;

    % generate data animated link
    % plot([0 a*cos(th)], [0 a*sin(th)],'ro-');hold on;
    % plot([a*cos(th) a*cos(th)+b*cos(th3)], [a*sin(th) a*sin(th)+b*sin(th3)], 'ro-'); hold
    on;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% plot([0 d], [0 0], 'ro-'); hold on;
% plot([d a*cos(th)+b*cos(th3)], [0 a*sin(th)+b*sin(th3)], 'ro-');hold off;
% axis([-10 20 -10 10]);
% pause(0.1);
end

%% Pneumatic Link
for plp = 1 : 1 : rev
    h0(plp,1) = hpneu - pneu*sin(theta2(plp,1));
    all_d(plp,1) = h0(plp,1)^2 + (dpneu + pneu*cos(theta2(plp,1)))^2;
    beta(plp,1) = asin( sqrt( h0(plp,1)^2 / all_d(plp,1)^2 ));
    degr(plp,2) = rad2deg(beta(plp,1));
    dL(plp,1) = h0(plp,1) / sin(beta(plp,1));
end

%% // determine omega ,acc XY and alpha
for r = 1 : 1 : rev
    %% omega
    omega3(r,1) = -omega2*a*sin(theta4(r,1)-theta2(r,1))/(b*sin(theta4(r,1)-theta3(r,1)));
    omega4(r,1) = (a*omega2*sin(theta3(r,1)-theta2(r,1)))/(c*sin(theta3(r,1)-theta4(r,1)));

    %% alpha
    alpha3(r,1) = a*omega2^2*cos(theta4(r,1)-theta2(r,1))+b*omega3(r,1)^2*cos(theta4(r,1)-
    theta3(r,1))-c*omega4(r,1)^2/b*sin(theta4(r,1)-theta3(r,1));
    alpha4(r,1) = -a*omega2^2*cos(theta3(r,1)-theta2(r,1))+c*omega4(r,1)^2*cos(theta3(r,1)-
    theta4(r,1))-b*omega3(r,1)^2/c*sin(theta3(r,1)-theta4(r,1));

    %% acc

    a2x(r,1) = -a*omega2^2*-cos(theta2(r,1));
    a2y(r,1) = -a*omega2^2*-sin(theta2(r,1));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a4x(r,1) = -(\alpha4(r,1)*c*\sin(\theta4(r,1)) - c*(\omega4(r,1)^2)*\cos(\theta4(r,1)));$$

$$a4y(r,1) = -(\alpha4(r,1)*c*\cos(\theta4(r,1)) - c*(\omega4(r,1)^2)*\sin(\theta4(r,1)));$$

$$a3x(r,1) = -(a2x(r,1)+a4x(r,1));$$

$$a3y(r,1) = -(a2y(r,1)+a4y(r,1));$$

end

%% // determine variable

qq=1;

for yy = 1 : 1 : rev

force_ans(:,yy) = [(-0.5)*sin(theta2(qq,1)) (-0.5)*cos(theta2(qq,1)) 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000 pneu*sin(theta2(qq,1)+beta(qq,1));

1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 -1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 -
cos(beta(qq,1));

0.0000 -1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 1.0000 0.0000 0.0000
sin(beta(qq,1));

(0.12)*sin(theta3(qq,1)) (-0.12)*cos(theta3(qq,1)) 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000 0;

-1.0000 0.0000 1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0;

0.0000 1.0000 0.0000 -1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0;

0.0000 0.0000 0.34*sin(theta4(qq,1)) 0.34*cos(theta4(qq,1)) 0.0000

0.0000 0.0000 0.0000 0;

0.0000 0.0000 -1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 1.0000 0.0000 0;

0.0000 0.0000 0.0000 1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 -1.0000 0];

kinematic_ans(:,yy)

=[2.2462*cos(theta2(qq,1));1.231*a2x(qq,1);1.231*a2y(qq,1)+12.0761;0.551*alpha3(qq,1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

)-
12.2954*cos(theta3(qq,1));3.581*a3x(qq,1);3.581*a3y(qq,1)+35.1296;0.0276*alpha4(qq,
1)+1.1307*cos(theta4(qq,1));0.678*a4x(qq,1);0.678*a4y(qq,1)+6.6512];

solution_ans(:,:,yy)= inv(force_ans(:,:,yy))* kinematic_ans(:,:,yy);

qq = qq+1;
end

%% // Sent back data
zs=1;
for xs = 1 : 1 : rev
    data_ans(xs,1) = solution_ans(1,1,zs); %Ax
    data_ans(xs,2) = solution_ans(2,1,zs); %Ay
    data_ans(xs,3) = solution_ans(3,1,zs); %Bx
    data_ans(xs,4) = solution_ans(4,1,zs); %By
    data_ans(xs,5) = solution_ans(5,1,zs); %O1X
    data_ans(xs,6) = solution_ans(6,1,zs); %O2Y
    data_ans(xs,7) = solution_ans(7,1,zs); %O4X
    data_ans(xs,8) = solution_ans(8,1,zs); %O4Y
    data_ans(xs,9) = solution_ans(9,1,zs); %F

    pressure(xs,1)= data_ans(zs,9)/(pi/4*0.025^2) ;
    pressure(xs,2)= rad2deg(theta2(zs,1)) ;

    ang(xs,1)=theta2(zs,1);
    ang(xs,2)=theta3(zs,1);
    ang(xs,3)=theta4(zs,1);

    aac(xs,1)= 0;
    aac(xs,2)=alpha3(zs,1);
    aac(xs,3)=alpha4(zs,1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

zs=zs+1;
end
%% plot graph
subplot(2,3,[1,3],'LineWidth',10);
plot( pressure(:, 2), pressure(:, 1),'r');
xlabel('Theta2(degree)');
ylabel('Pressure(Pascal)');
title('Pneumatic Pressure');

subplot(2,3,4);
plot(pressure(:, 2), data_ans(:,9),'b');
xlabel('Theta2(degree)');
ylabel('Force(N)');
title('Force at Pneumatic setting point');

subplot(2,3,[5,6]);
plot( rad2deg(beta(:, 1)),dL(:, 1),'r');
xlabel('beta');
ylabel('dL');
title('pneumaic motion');

คำนวณหา  $F_c$ 

m1 = 3.55;
m2 = 0.25;
k1 = 50 ;
k2 = 50 ;

omega_res = 100*(2*pi/60) ;
Ds = (m1*m2*(omega_res)^4)-(((m1*k1)+(m2*k1)+(m2*k2))*(omega_res)^4)+(k1*k2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X1 = k2/(Ds);$$

$$X2 = ((-m1*(\omega_{res})^2)+k1+k2)/(Ds);$$

$$t = 0: 0.001 :5 ;$$

$$x1 = X1*\sin(\omega_{res}*t);$$

$$x2 = X2*\sin(\omega_{res}*t);$$

```
subplot(2,1,1);
```

```
plot( t, x1,'b');
```

```
xlabel('Time(s)');
```

```
ylabel('Displacement1(m)');
```

```
subplot(2,1,2);
```

```
plot( t, x2,'r');
```

```
xlabel('Time(s)');
```

```
ylabel('Displacement2(m)');
```

คำนวณหา F_b

$$m1 = 3.55;$$

$$m2 = 0.25;$$

$$k1 = 50 ;$$

$$k2 = 50 ;$$

$$\omega_{res} = 100*(2*\pi/60) ;$$

$$Ds = (m1*m2*(\omega_{res})^4)-(((m1*k1)+(m2*k1)+(m2*k2))*(\omega_{res})^4)+(k1*k2);$$

$$X1 = k2/(Ds);$$

$$X2 = ((-m1*(\omega_{res})^2)+k1+k2)/(Ds);$$

$$t = 0: 0.001 :5 ;$$

$$x1 = X1*\sin(\omega_{res}*t);$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
x2 = X2*sin(omega_res*t);
```

```
subplot(2,1,1);  
plot( t, ((k1+k2)*x1)-(k2*x2),'b');  
xlabel('Time(s)');  
ylabel('Fb1') ;
```

```
subplot(2,1,2);  
plot( t, (k2*x2)-(k2*x1),'r');  
xlabel('Time(s)');  
ylabel('Fb2') ;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jiqin Wu, Pantograph and Contact Line System, Elsevier Inc. (2018).
- [2] Joshua K. Pickarda, Juan A. Carretero, Jean-Pierre Merlet, Appropriate Analysis of the Four-Bar Linkage, (2019).
- [3] M. IKEDA, T. USUDA, S. NAGASAKA, A precise contact force measuring method for overhead catenary system, (2003).
- [4] T. USUDA, The Pantograph Contact Force Measurement Method in Overhead Catenary System, (2008).
- [5] Contact wire. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา www.researchgate.net/figure/Sketch-of-the-double-pantograph-catenary-system_fig1_316774477. (10 พฤษภาคม 2563)
- [6] T. Koyama, M. Ikeda, K. Nakamura, S. Tabayashi & M. Niwakawa, Measuring the contact force of a pantograph by image processing technology, (2012).
- [7] Daniel J. Inman, Engineering Vibration, Pearson Education, (2014).
- [8] Friction between solids. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา www.schoolphysics.org/age16-19/mechanics/statics/text/Friction_/index.html. (10 พฤษภาคม 2563)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้