

การออกแบบสายส่งเหนือหัว และวัดแรงสัมผัสของแบบจำลองแพนโทกราฟ
DESIGN AN OVERHEAD TRANSMISSION LINE AND MEASURE THE CONTACT
FORCE OF THE PANTOGRAPH MODEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
หลักสูตรวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AN OVERHEAD TRANSMISSION LINE AND MEASURE THE CONTACT
FORCE OF THE PANTOGRAPH MODEL



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

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบสายส่งเหนือหัว และวัดแรงสัมผัสของแบบจำลองแพนโทกราฟ

DESIGN AN OVERHEAD TRANSMISSION LINE AND MEASURE THE CONTACT FORCE
OF THE PANTOGRAPH MODEL

ผู้จัดทำ

1. นายพลกฤต เวชกุล รหัสประจำตัว 61010703
2. นายภูรินทร์ เอกการวัฒน์ รหัสประจำตัว 61010837
3. นายวัชรวิทย์ ชันธรักษ์ รหัสประจำตัว 61010957



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

การออกแบบสายส่งเหนือหัว และวัดแรงสัมผัสของแบบจำลองแพนโทกราฟ

นายพลกฤต	เวชกุล	61010703
นายภูรินทร์	เอกรวัฒน์	61010837
นายวัชรวิชัย	ชั้นรัชรักษ์	61010957
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2564		

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อทำการศึกษาแรงสัมผัสของแพนโทกราฟ (Pantograph) กับสายส่งเหนือหัว โดยทำการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุม เพื่อวัดแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นและวิเคราะห์ระบบการควบคุมของแบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น TSG 3 แพนโทกราฟ (Pantograph) ที่ใช้ระบบแบบนิวเมติกส์ในการควบคุมการเคลื่อนที่ยกขึ้นและยกลงของแพนโทกราฟ (Pantograph) โดยทำการเลือกใช้อัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศในกระบอกสูบเพื่อให้ระยะเวลาการยกขึ้นและยกลงของแบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) เป็นไปตามค่าพารามิเตอร์ในช่วงที่กำหนด จากการศึกษาพบว่า สามารถหมุนวาล์วเปิด-ปิดควบคุมอัตราการไหลอัตโนมัติไปยังรอบที่ต้องการเพื่อควบคุมอัตราการไหลออกของอากาศในกระบอกสูบให้เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ (Pantograph) เมื่อทำการทดสอบพบว่า การหมุนวาล์วควบคุมอัตราการไหลไปที่ 0.5 รอบ สำหรับการยกขึ้น และ 0.75 รอบสำหรับการยกลง ทำให้การเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ (Pantograph) ไหลลื่น ไม่มีการกระตุก และ ระยะเวลาการยกขึ้นอยู่ที่ 4 วินาที และ ระยะเวลาการยกลงอยู่ที่ 3 วินาที ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม เพื่อให้แบบจำลองมีความเสมือนจริง จึงทำการออกแบบและประยุกต์การติดตั้งสายส่งเหนือหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) โดยตัวสายส่งจะใช้วัสดุที่มีลักษณะและน้ำหนักต่อความยาวตรงกับของจริงในขนาดที่ย่อส่วนลง 1:3.33 เท่าและใช้โหลดเซลล์ในการวัดแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นเมื่อหัวแพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ไปสัมผัสสายส่งในลักษณะความตึงของเส้นลวดที่แตกต่างกัน และบันทึกค่าในแต่ละกรณีว่ามีแรงที่เกิดขึ้นเหมาะสมตามความเป็นจริงและเปรียบเทียบแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองกับแรงสัมผัสในทางทฤษฎี ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนของแรงสัมผัสที่วัดได้ ที่จุดสัมผัสจุดที่ 1 เท่ากับ 19.37%, ที่จุดสัมผัสจุดที่ 2 เท่ากับ 22.562% และ ที่จุดสัมผัสจุดที่ 3 เท่ากับ 23.727%

DESIGN AN OVERHEAD TRANSMISSION LINE AND MEASURE THE CONTACT FORCE OF THE PANTOGRAPH MODEL

PHONLAKRIT	WETCHAKUL	61010703
PHURIN	EKWORAWAT	61010837
WATCHARAVEE	KHANTHALUKS	61010957
Asst.Prof.Dr.MONSAK PIMSARN		Advisor

Year 2021

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study the contact force of pantographs with overhead transmission lines. by designing and develop a control system to measure the tactile force that occurs and analyze pantograph control system in an asymmetric TSG3 pantograph Model using pneumatic system to control movement when lifting and lifting down by choosing flow control valve to control velocity of cylinder for making rising time and falling time of pantograph model within the range specified by the parameter. The study found that can open and close flow control valve to proper automatic control flowrate by revolution of flow control valve for air in cylinder when pantograph moving. When testing, it was found a 0.5 revolution and 0.75 revolution of flow control valve making movement of pantograph flows smoothly, without stroke. The rising time is 4 second and falling time is 3 second which are in the proper range. To make the model more realistic, A pantograph overhead transmission line installation was designed and implemented. The transmission line is made of materials that are similar in appearance and weight per length as the real thing, but it is scaled down by 1:3.33 a load cell is used to measure the contact force produced when the pantograph head touches the transmission line in a different wire tension manner. The contact force comparison of the theoretical and experimental results was carried out. It was found that the percent errors at point 1, 2 and 3, were 19.37%, 22.56% and 23.72%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสารอาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยช่วยให้คำแนะนำ แก้ไข และให้ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณอาจารย์ภาควิศวกรรมเครื่องกล ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิววัฒน์ ผศ.ดร.มธุรส สุชาติะวัฒน์ ผศ.ดร.อนุรัตน์ พิณโสภณ และ ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เตไปวา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้คอยให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้วารสารควบคุมอัตราการไหล



นายพลกฤต

เวชกุล

นายภูรินทร์

เอกรวิวัฒน์

นายวัชรวิชัย

ชั้นธรัักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูปภาพ.....	X
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินวิจัย	2
1.5 ประโยชน์	3
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของแพนโทกราฟ (Pantograph).....	5
2.3.1.1 แพนโทกราฟส่วนหัว.....	6
2.3.1.2 เฟรมของแพนโทกราฟ.....	7
2.3.1.3 ฐาน	12

2.3.1.4 แดมเปอร์ (Damper)	12
2.3.1.5 ระบบควบคุมแผนโทกราฟ	13
2.3.2 แรงสัมผัสในแผนโทกราฟ (Contact Force)	15
2.3.3 สายส่งเหนือหัว	17
2.3.3.1 คุณสมบัติของสายส่งเหนือหัวทองแดงและทองแดงผสมโลหะผสม	17
2.3.4 สายเคเบิล (Cable) ภายใต้แรงกระจายอย่างสม่ำเสมอ	18
2.3.4.1 สมการโดยทั่วไป	18
2.3.4.2 สายเคเบิล (Cable) แบบพาราโบลา	20
2.3.4.3 สายเคเบิล (Cable) แบบแคทีนารี (Catenary)	22
2.3.5 ความสูงของสายส่งเหนือหัว	23
2.3.5.1 การออกแบบความสูงที่ต่ำสุดของสายส่งเหนือหัว	24
2.3.5.2 การออกแบบความสูงที่สูงสุดของสายส่งเหนือหัว	24
2.3.5.3 ความสูงโดยเฉลี่ยของสายส่งเหนือหัว	24
2.3.6 วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)	25
2.3.6.1 หน้าที่ของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) และการติดตั้ง	25
2.3.6.2 การคำนวณวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)	29
2.3.7 ปริมาณลมที่ใช้ (อัตราการไหล)	30
2.3.8 โหลดเซลล์ (Load cell)	30
2.3.8.1 หลักการทำงานของโหลดเซลล์ (Load cell)	30
2.3.8.2 ประเภทของโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ	31
1. โหลดเซลล์แบบแบ่งแรงเฉือน (Shear Beam Load Cell).....	31
2. โหลดเซลล์แบบทรัคสเกล (Truck scale Load cell).....	32
3. โหลดเซลล์แบบจุดเดี่ยว (Single Point Load cell)	32

4. โหลดเซลล์แบบแ่งงอ (Bending Beam Load cell)	33
5. โหลดเซลล์แบบแพนเค้ก (Pancake Load cell).....	33
วิธีการดำเนินงาน	36
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน	36
3.1.1 แบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) TSG3 Pantograph อัตราส่วน 1: 3.33.....	36
3.1.2 วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve).....	38
3.1.3 สายลม.....	39
3.1.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน่ (Arduino microcontroller).....	39
3.2 การออกแบบชุดสายส่งเหนือหัว	41
3.3 การเลือกโหลดเซลล์ (Load cell) ที่เหมาะสมกับระบบและการติดตั้ง	43
3.3.1 การเลือกโหลดเซลล์ (Load cell) ที่เหมาะสม	43
3.3.2 การติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อวัดแรงสัมผัส	45
3.3.3 การออกแบบโครงสร้างสายส่งเหนือหัว	46
3.4 การออกแบบการติดตั้งและการเลือกวาล์วควบคุมอัตราการไหล	48
3.4.1 การเลือกรูปแบบในการติดตั้งวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)	48
3.4.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve).....	50
3.5 การสอบเทียบโหลดเซลล์และการออกแบบกระบวนการวัดแรงสัมผัส	58
3.5.1 กำหนดค่ามวลที่สอบเทียบในโปรแกรม (Program).....	59
3.5.2 ชั่งมวลที่แต่ละน้ำหนัก	59
3.5.3 สรุปผลการสอบเทียบ และแนวโน้มที่ได้จากการสอบเทียบ	60
3.5.4 การออกแบบกระบวนการวัดแรงสัมผัส.....	62
3.5.5 ออกแบบขั้นตอนการทำงานอาดูโน่ (Arduino) ของโหลดเซลล์ (Load cell).....	64
3.6 การคำนวณหาค่าแรงสัมผัส.....	65

3.6.1 การหาความสัมพันธ์ของมุมในกลไก	65
3.6.2 วิเคราะห์ความเร็วเชิงมุม	66
3.6.3 วิเคราะห์ความเร่งเชิงมุม	68
3.6.4 วิเคราะห์หาความเร่งในพิกัด $x y$	69
3.6.5 การวิเคราะห์แรงในกลไก	73
3.6.5 การวิเคราะห์หาเส้นทางการเคลื่อนที่ของโหลดเซลล์เพื่อวิเคราะห์หามุมสัมผัส	74
3.10.5.1 วิเคราะห์หาเส้นทางการเคลื่อนที่ของโหลดเซลล์ (Load cell).....	75
3.10.5.2 หาสมการพาราโบลา (Parabola) ของสายส่งเหนือหัว.....	76
3.10.5.3 หาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ของโหลดเซลล์ (Load cell) และสายส่งเหนือหัวเพื่อหาจุดสัมผัส.....	77
3.6.6 หาแรงสัมผัสแรกที่กระทำบนโหลดเซลล์ (Load cell) โดยวิเคราะห์แรงกระทำบนเชือก ...	79
3.6.7 แรงสัมผัสจากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB	84
3.6.8 หาค่าแรงสัมผัสคงที่เมื่อโหลดเซลล์ (Load cell) อยู่ ณ จุดสูงสุด.....	89
3.10.8.1 คำนวณหาแรงดึงในเส้นเชือกที่กระทำบนโหลดเซลล์ (Load cell)	90
3.10.8.2 การคำนวณหาแรงกดบนโหลดเซลล์ (Load cell) และการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน	92
วิธีการทดลองและผลลัพธ์.....	94
4.1 การทดสอบค่าแรงสัมผัสระหว่างสายส่ง และแพนโทกราฟ (Pantograph).....	94
4.2 แรงสัมผัสของแพนโทกราฟ (Pantograph) ที่ความตึงเชือกสูงสุด	96
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	103
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	103
5.2 ปัญหาจากการศึกษาและข้อเสนอแนะ	103
ภาคผนวก.....	104

ภาคผนวก ก.....	105
ภาคผนวก ข.....	109
ภาคผนวก ค.....	118
ภาคผนวก ง.....	119
บรรณานุกรม.....	122



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบวงจรการควบคุมลมเข้าและลมออกจากกระบอกสูบ.....	28
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสมการกรณีการไหลที่ต่างกันในวาล์วควบคุมอัตราการไหล	29
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของชุดทดลองแพนโทกราฟ(Pantograph).....	37
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน่ (Arduino microcontroller).....	40
ตารางที่ 3.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแพนโทกราฟ (Pantograph) ของจริงและแบบจำลอง	50
ตารางที่ 3.6 แสดงรอบการหมุนของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) และเวลาที่ต่อ แบบควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่งก้านสูบ (Meter in).....	57
ตารางที่ 3.7 แสดงรอบการหมุนของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) และเวลาที่ต่อ แบบควบคุมลมไหลจากฝั่งก้านสูบ (Meter out).....	57
ตารางที่ 3.8 ตารางสรุปค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์ว (Valve) จากการคำนวณและการใช้จริง	58

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแพนโทกราฟแขนเดี่ยว	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเฟรมแขนคู่สี่คานรูปทรงเพชร (Four-cantilever diamond double-arm frames)	7
รูปที่ 2.3 หัวรถจักรไฟฟ้ารุ่น 8G ใช้แพนโทกราฟแขนคู่สองคานรูปทรงเพชร (Four-cantilever diamond double-arm frames)	8
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแพนโทกราฟรุ่น M7 ที่ใช้บนหัวรถจักรไฟฟ้า 6Y2 (มม.)	9
รูปที่ 2.5 เส้นทางเคลื่อนที่ของเฟรมแขนเดี่ยว (Single-arm frame) และส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead)	10
รูปที่ 2.6 แพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น PS207 ที่ติดตั้งปีกควบคุมการไหลบนรถไฟฟ้ายานยนต์ชินชี่รีส์ 700	10
รูปที่ 2.7 แพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น PS200A ใช้บนรถไฟฟ้ายานยนต์ชินชี่รีส์ 0	11
รูปที่ 2.8 แพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น AMDE บนรถไฟฟ้ายานยนต์ TGV-PSE	12
รูปที่ 2.9 แพนโทกราฟ (Pantograph) ของรถไฟความเร็วสูงและแดมเปอร์ (Damper)	13
รูปที่ 2.10 ระบบควบคุมด้วยสปริง	14
รูปที่ 2.11 ระบบควบคุมด้วยลมอัด	15
รูปที่ 2.12 แรงที่กระทำบนแพนโทกราฟ	16
รูปที่ 2.13 แสดงรูปร่างหน้าตัดของสายส่งเหนือหัวและการระบุช่องเสียบแต่ละรูปแบบ	18
รูปที่ 2.14 ตารางแสดงคุณสมบัติและขนาดต่างๆของสายส่งเหนือหัวชนิดทองแดง	18
รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพแรงกระจายบนสายเคเบิล	19
รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของแรงสม่ำเสมอบนสายเคเบิล (Cable)	20
รูปที่ 2.17 แผนภาพส่วนหนึ่งของสายเคเบิล (Cable) ภายใต้แรงสม่ำเสมอ	21
รูปที่ 2.18 แสดงช่วงความสูงของสายส่งเหนือหัวที่สามารถติดตั้งได้	25
รูปที่ 2.19 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) ลมผ่านวาล์วกั้นกลับไม่ได้	25

รูปที่ 2.20 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) ลมไหลผ่านออกได้ ไม่ถูกควบคุม	26
รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve).....	26
รูปที่ 2.22 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) แบบควบคุมลมเข้าบนกระบอกสูบทางเดียว.....	26
รูปที่ 2.23 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) แบบควบคุมลมเข้าบนกระบอกสูบทำงานสองทาง	27
รูปที่ 2.24 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) แบบควบคุมลมออกบนกระบอกสูบทางเดียว [8].....	27
รูปที่ 2.25 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) แบบควบคุมลมออกบนกระบอกสูบทำงานสองทาง	28
รูปที่ 2.26 รูปแสดงหลักการทำงานของสเตรนเกจ (Strain gauge)	31
รูปที่ 2.27 โหลดเซลล์แบบแท่งแรงเฉือนโหลดเซลล์แบบแท่งแรงเฉือน (Shear Beam Load Cell).....	31
รูปที่ 2.28 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบทรัคสเกล (Truck Scale Load cell)	32
รูปที่ 2.29 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบจุดเดียว (Single Point Load cell)	32
รูปที่ 2.30 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบแท่งงอ (Bending Beam Load cell)	33
รูปที่ 2.31 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบแพนเค้ก (Pancake Load cell)	33
รูปที่ 2.32 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบกระป๋อง (Canister Load cell)	34
รูปที่ 2.33 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบเอสบีเอ็ม (S-Beam load cell).....	34
รูปที่ 3.1 แบบจำลองส่วนประกอบของชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph).....	36
รูปที่ 3.2 ชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph).....	36
รูปที่ 3.3 แบบจำลองการทำงานของชุดการทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph).....	37
รูปที่ 3.4 วาล์วควบคุมอัตราการไหล	38
รูปที่ 3.5 สายลม	39
รูปที่ 3.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน่ (Arduino microcontroller).....	40
รูปที่ 3.7 ลวดทองแดงภายในสายไฟซิลิโคน	41
รูปที่ 3.8 สายทองแดงเปลือยภายในสายซิลิโคน.....	41

รูปที่ 3.9	แสดงการพันเกลียวสายทองแดง	42
รูปที่ 3.10	รูปแสดงสายทองแดงเสมือนสายจริง	42
รูปที่ 3.11	ทางปลาทองแดง	42
รูปที่ 3.12	แสดงภาพอย่างง่ายของสายส่งเหนือหัวบนส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead).....	43
รูปที่ 3.13	แผนภาพอิสระของส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead).....	44
รูปที่ 3.14	แสดงการประกอบแผ่นอะคลิลิกเข้ากับฐานโหลดเซลล์ (Load cell).....	45
รูปที่ 3.15	แสดงการประกอบโหลดเซลล์ (Load cell) เข้ากับส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead)....	46
รูปที่ 3.16	การออกแบบแบบจำลองเหล็กกล่อ่งในการยึดรางปรับระดับสายส่งกับโครงแพนโทกราฟ (Pantograph).....	46
รูปที่ 3.17	การออกแบบรางเพื่อปรับระดับความตึงเชือกของสายส่ง	47
รูปที่ 3.18	กระบวนการเจาะรู	47
รูปที่ 3.19	แสดงการประกอบทางปลาเพื่อปรับระดับความตึงเชือกของสายส่ง.....	48
รูปที่ 3.20	แสดงทิศทางของแรงและการเคลื่อนที่ขณะแพนโทกราฟ (Pantograph)เคลื่อนที่ลง	48
รูปที่ 3.21	แสดงทิศทางของแรงและการเคลื่อนที่ขณะแพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ขึ้น	49
รูปที่ 3.22	แสดงภาพรวมของระบบแพนโทกราฟ (Pantograph).....	49
รูปที่ 3.23	แสดงค่าพารามิเตอร์ของแพนโทกราฟ (Pantograph).....	50
รูปที่ 3.24	แสดงภาพรวมกระบอกสูบและวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)	51
รูปที่ 3.25	วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) แบบควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่ง ก้านสูบ (Meter in) และทิศการไหลของลม	51
รูปที่ 3.26	แสดงมุมที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของกระบอกสูบ	52
รูปที่ 3.27	แผนภาพอิสระของกระบอกสูบ	53
รูปที่ 3.28	วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) แบบต่อการควบคุมลมไหลจากฝั่งก้านสูบ (Meter out) และทิศการไหลของลม	54
รูปที่ 3.29	แผนภาพอิสระของกระบอกสูบ	55
รูปที่ 3.30	แสดงการใส่เลขมวลอ้างอิงในโค้ด (Code)	59
รูปที่ 3.31	แสดงวิธีการสอบเทียบโหลดเซลล์ (Load cell) โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน.....	59
รูปที่ 3.32	รูปแสดงกราฟการสอบเทียบโดยใช้มวล 0.1 kg อ้างอิง.....	60

รูปที่ 3.33	รูปแสดงกราฟการสอบเทียบโดยใช้มวล 0.2 kg อ้างอิง.....	60
รูปที่ 3.34	รูปแสดงกราฟการสอบเทียบโดยใช้มวล 0.3 kg อ้างอิง.....	61
รูปที่ 3.35	การออกแบบระบบควบคุมการทำงาน และการวัดแรงสัมผัส	63
รูปที่ 3.36	แผนภาพแสดงการออกแบบระบบควบคุมการทำงาน และการวัดแรงสัมผัส	63
รูปที่ 3.37	ผังงานระบบควบคุมการทำงานของการวัดแรงสัมผัสของโหลดเซลล์ (Load cell)	64
รูปที่ 3.38	รูปแสดงมุมต่างๆภายในกลไก	65
รูปที่ 3.39	เวกเตอร์ (Vector) วิเคราะห์ความเร็วเชิงมุม.....	66
รูปที่ 3.40	แผนภาพอิสระของชิ้นส่วนที่ 2.....	69
รูปที่ 3.41	แผนภาพอิสระของชิ้นส่วนที่ 4.....	70
รูปที่ 3.42	แผนภาพอิสระของชิ้นส่วนที่ 3.....	71
รูปที่ 3.43	แสดงเวกเตอร์ (Vector) ทั้งสามที่เชื่อมระหว่างจุด A B และ CG3	71
รูปที่ 3.44	เมทริกซ์ (Matrix) 9×9	74
รูปที่ 3.45	แสดงการเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุด A และ B.....	74
รูปที่ 3.46	แสดงตำแหน่งจุดปลายและจุดต่ำสุดของสายส่ง.....	76
รูปที่ 3.47	แสดงความสัมพันธ์พิกัดของจุด A B C และ D.....	77
รูปที่ 3.48	แสดงระยะห่างของจุดปลายทั้งสองและระยะหย่อนของเชือก.....	78
รูปที่ 3.49	แสดงจุดตัดกันของเส้นทางการเคลื่อนที่ของโหลดเซลล์ (Load cell) และกราฟพาราโบลา (Parabola) ทั้งสาม.....	78
รูปที่ 3.50	แสดงค่าแรงดึงเชือกในแนวระนาบและแรงดึงในเส้นเชือก.....	80
รูปที่ 3.51	แสดงการสัมผัสของสายส่งและโหลดเซลล์ (Load cell) ที่จุดสัมผัสที่ 1.....	80
รูปที่ 3.52	แสดงแผนภาพอิสระบนสายส่งที่จุดสัมผัสที่ 1.....	81
รูปที่ 3.53	แสดงการสัมผัสของสายส่งและโหลดเซลล์ (Load cell) ที่จุดสัมผัสที่ 2.....	82
รูปที่ 3.54	แสดงแผนภาพอิสระบนสายส่งที่จุดสัมผัสที่ 2.....	82
รูปที่ 3.55	แสดงการสัมผัสของสายส่งและโหลดเซลล์ (Load cell) ที่จุดสัมผัสที่ 3.....	83
รูปที่ 3.56	แสดงแผนภาพอิสระบนสายส่งที่จุดสัมผัสที่ 3.....	83
รูปที่ 3.57	แสดงการหามุมของชิ้นส่วนที่ 2 ขณะสัมผัสสายส่งจุดที่ 1.....	84
รูปที่ 3.58	แสดงการหามุมของชิ้นส่วนที่ 2 ขณะสัมผัสสายส่งจุดที่ 2.....	85

รูปที่ 3.59	แสดงการหามุมของชิ้นส่วนที่ 2 ขณะสัมผัสสายส่งจุดที่ 3.....	85
รูปที่ 3.60	แสดงการวิเคราะห์ความเร็วเชิงมุมของชิ้นที่ 2 ขณะสัมผัสกับสายส่ง.....	85
รูปที่ 3.61	แสดงการวิเคราะห์หาความเร่งเชิงมุมของชิ้นที่ 2 ขณะสัมผัสกับสายส่ง	86
รูปที่ 3.62	ตารางสรุปค่าความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมของทุกจุดสัมผัส	86
รูปที่ 3.63	แสดงค่าแรงกระทำที่จุด C และความเร่งในแนวแกน y	87
รูปที่ 3.64	แสดงแผนภาพอิสระของโหลดเซลล์ (Load cell) ที่กระทำกับจุดสัมผัสที่ 1.....	87
รูปที่ 3.65	แสดงแผนภาพอิสระของโหลดเซลล์ (Load cell) ที่กระทำกับจุดสัมผัสที่ 2.....	88
รูปที่ 3.66	แสดงแผนภาพอิสระของโหลดเซลล์ (Load cell) ที่กระทำกับจุดสัมผัสที่ 3.....	89
รูปที่ 3.67	แสดงสถานะสมดุลของสายส่งบนโหลดเซลล์ (Load cell)	90
รูปที่ 3.68	แสดงภาพอย่างง่ายของสายทั้งสองฝั่งของโหลดเซลล์ (Load cell)	90
รูปที่ 3.69	แสดงแผนภาพอิสระของเชือกที่พาดบนโหลดเซลล์ (Load cell)	90
รูปที่ 3.70	ระยะห่างต่าง ๆ บนสายส่ง.....	91
รูปที่ 3.71	ตารางแสดงค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณ	92
รูปที่ 3.72	แผนภาพอิสระของโหลดเซลล์ (Load cell) ในสถานะสมดุล	92
รูปที่ 3.7	แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง	93
รูปที่ 4.1	การทดสอบค่าแรงสัมผัสระหว่างสายส่ง และแผนโทกราฟ (Pantograph)	94
รูปที่ 4.2	การแสดงผลแรงสัมผัสบนหน้าจอ.....	95
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงผลการทดลองแบบแรงดึงเชือกสูงที่สุด	96
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงผลการทดลองแบบแรงดึงเชือกระดับกลาง	97
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงผลการทดลองแบบแรงดึงเชือกระดับต่ำ	99
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับ.....	100

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันในประเทศไทยนั้นมีระบบการขนส่งทางรางมีอย่างแพร่หลาย และหนึ่งในระบบที่ได้รับความนิยมและมีความสะดวกสบายเข้าถึงง่ายก็คือ รถไฟฟ้าในเขตเมือง อาทิเช่น ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (Bangkok Mass Transit System) รถไฟฟ้ามหานคร (Mass Rapid Transit) รถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (Airport Rail Link) และรถไฟความเร็วสูง (High-speed Rail) จากที่กล่าวมานั้นใช้ระบบไฟฟ้าเป็นหลักในการควบคุม โดยหนึ่งในสิ่งที่กล่าวมาจากข้างต้น กำลังให้ความสนใจอย่างมากและกำลังทำการพัฒนาอย่างก้าวกระโดดในประเทศไทยในตอนนี้ก็คือ รถไฟฟ้าความเร็วสูง ในตอนนี้มีโครงการที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากคือ โครงการรถไฟความเร็วสูงเชื่อม 3 สนามบิน แบบไร้รอยต่อ (ดอนเมือง - สุวรรณภูมิ - อู่ตะเภา) (The High-Speed Rail Linked 3 Airport Project) และอื่นๆ ซึ่งรถไฟความเร็วสูงมีระบบการจ่ายไฟฟ้าแบบ ระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือหัว(Overhead Catenary)

ระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือหัว (Overhead Catenary) เป็นระบบการจ่ายไฟฟ้าให้แก่ทางรถไฟประเภทหนึ่ง ซึ่งระบบนี้ประกอบด้วย สาลี่ (Pantograph) สายส่งเหนือหัว (Catenary Wire) สถานีไฟฟ้าย่อย (Sub-Power-Station) ซึ่งในระบบการจ่ายไฟสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ระบบการควบคุมแพนโทกราฟ (Pantograph) ในการที่จะจ่ายไฟฟ้าให้แก่รถไฟจำเป็นต้องทำการยกแพนโทกราฟ (Pantograph) ขึ้นไปแตะกับสายส่งเหนือหัวก่อนจึงจะทำการจ่ายไฟฟ้าได้ ดังนั้นการควบคุมระบบแพนโทกราฟ (Pantograph) ให้เหมาะสมตามค่าที่กำหนดเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งในแต่ละชนิดแพนโทกราฟ (Pantograph) จะมีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในแต่ละรุ่น อาทิเช่น ค่าแรงสัมผัส (Static Force) ประเภทของระบบขับเคลื่อน (Type of drive system) ระยะเวลาการยกขึ้น (Rising Time) ระยะเวลาการถอยลง (Falling down) และอื่นๆ แพนโทกราฟ (Pantograph) โดยส่วนมากจะมีการติดตั้งไฮดรอลิกแดมเปอร์ระหว่างฐานและเฟรมส่วนล่างของแพนโทกราฟ (Pantograph) เมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ลงแดมเปอร์ (Damper) จะมีการขยายตัวออก และเมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ขึ้นแดมเปอร์ (Damper) จะมีการหดตัว ทำให้แพนโทกราฟ (Pantograph) มีความราบรื่นมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นจึงนำไปสู่การทำแบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น TSG 3 [4] ซึ่งใช้ระบบลมในการควบคุม ซึ่งทำการจำลองการทำงานของแอมป์โดยใช้หลักการควบคุมอัตราการไหลออกของอากาศและใช้วาล์วควบคุมอัตราการไหล จากนั้นจะพัฒนาไปสู่การติดตั้งแบบจำลองสายส่งเหนือหัวรวมไปถึงการวัดแรงสัมผัสต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ออกแบบและพัฒนาการเคลื่อนที่แบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่งเหนือหัวรวมไปถึงพัฒนาระบบการวัดแรงสัมผัส
- 1.2.2 ควบคุมเวลาในการเคลื่อนที่ของชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph) โดยอ้างอิงจากแพนโทกราฟ(Pantograph)ของจริง
- 1.2.3 วัดแรงสัมผัสระหว่างแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่งที่ระดับความตึงสายส่งเหนือหัวต่างกัน

1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 วาล์วควบคุมอัตราการไหล
- 1.3.2 การเขียนโปรแกรมอาดูโน่ (Arduino) เพื่อใช้ไหลตเซลล์ในการวัดแรงสัมผัส
- 1.3.3 ต้นแบบแพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น TGS 3 Pantograph

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลของระบบควบคุมแพนโทกราฟ (Pantograph)
- 1.4.2 ออกแบบและประยุกต์ในการทำแบบจำลองควบคุมการเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ (Pantograph)
- 1.4.3 ออกแบบและประยุกต์ในการทำแบบจำลองการวัดแรงสัมผัสของแพนโทกราฟ (Pantograph)
- 1.4.4 ทดลองวัดแรงสัมผัสของแพนโทกราฟ (Pantograph)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์

- 1.5.1 สามารถเข้าใจถึงระบบการทำงานของแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่ง
- 1.5.2 สามารถออกแบบและประยุกต์ระบบควบคุมของแพนโทกราฟ (Pantograph)
- 1.5.3 สามารถออกแบบและประยุกต์สายส่งเหนือหัว รวมไปถึงพัฒนาระบบวัดแรงสัมผัส



บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะพูดถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพัฒนาและต่อยอดมาจากวิทยานิพนธ์ปี 2563 [3] ทางคณะผู้จัดทำได้นำเอาแบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) ที่ทำขึ้น มาพัฒนาต่อโดยจะมุ่งเน้นไปที่การควบคุมการเคลื่อนที่ของแบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) ให้มีระยะเวลาที่ช้าลงและราบรื่น โดยอาศัยหลักการควบคุมอัตราการไหลออกของอากาศโดยใช้วาล์วควบคุมอัตราการไหล จากนั้นจะพัฒนาไปสู่การติดตั้งแบบจำลองสายส่งเหนือหัวและการวัดแรงสัมผัส

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Balestrino และคณะ [1] ได้เสนอการควบคุมแรงสัมผัสของแพนโทกราฟ (Pantograph) ด้วยระบบควบคุมแบบแอกทีฟ ถึงสี่วิธีซึ่งแต่ละวิธีจะมีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไป ประกอบไปด้วย การควบคุมตำแหน่งส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่ง การควบคุมแรงสัมผัส การควบคุมแบบผสมของแรงและตำแหน่ง และการควบคุมแรงให้คงที่พร้อมชดเชยจากการรบกวนภายนอก วิธีการทดลองต่างๆมีข้อดีคือมีต้นทุนการสร้างที่ต่ำและมีประสิทธิภาพ ผลการจำลองเบื้องต้นเป็นที่น่าสนใจและกำลังถูกดำเนินการสร้างแบบจำลองที่ละเอียดยิ่งขึ้น

B Allotta และคณะ [2] ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองแอกทีฟแพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น T2006 Prototype โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสองกรณีคือ กรณีแรกทำการติดตั้งแอกทูเอเตอร์ (Actuators) เพื่อควบคุมแรงสัมผัสระหว่างส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) และเฟรม (Frame) กรณีที่สองคือติดตั้งแอกทูเอเตอร์ (Actuators) เพื่อควบคุมแรงสัมผัสที่กระบอกสูบลิวเมติกส์ (Pneumatic) ระหว่างฐานและเฟรม (Frame) ส่วนล่าง โดยการศึกษานี้จะมุ่งเน้นศึกษาไปที่กรณีที่สองเนื่องจากการติดตั้งแอกทูเอเตอร์ (Actuators) ด้านล่างจะส่งผลด้านน้ำหนักและแรงต้านอากาศที่น้อยกว่ากรณีหนึ่ง ซึ่งการศึกษานี้ก็ได้รับผลการทดลองที่เป็นไปได้ด้วยดี

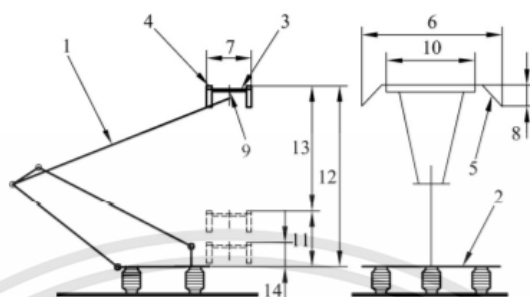
นายนิธินันท์ สิ้นพันธุ์ และคณะ [3] ได้ทำการออกแบบและพัฒนาแบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) แบบไม่สมมาตรสำหรับการวัดแรงสัมผัส เพื่อวิเคราะห์กลไกการทำงานแบบย่อส่วนโดยมีอัตราส่วน 1:3.33 เมื่อเทียบกับต้นแบบ TSG3 Pantograph โดยขั้นแรกจะใช้วิธีการวิเคราะห์กลไก 4 ชั้นส่วนต่อโยง (Four bar linkage) ในการออกแบบโครงสร้างหลักของแบบจำลองและออกแบบผ่านโปรแกรม AutoCAD และ SOLIDWORKS ในลำดับถัดมาจะเป็นการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบของตัวแปรต่างๆของวัตถุที่เคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งโดยใช้ระบบสมการเชิงเส้น และนำมาวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรผ่านโปรแกรม MATLAB เพื่อนำมาออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ (Pantograph) โดยใช้ระบบควบคุมลมอด

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของแพนโทกราฟ (Pantograph)

โครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานของแพนโทกราฟ (Pantograph) ขึ้นอยู่กับความเร็วในการให้บริการ ภาระแรงต่างๆ และ เงื่อนไขในการสัมผัสกับสายส่งเหนือหัว ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในรถไฟฟ้า และอาจมีความหลากหลายจากโรงงานการผลิตที่มีประสิทธิภาพและความชำนาญต่างกันในแต่ละพื้นที่ อย่างไรก็ตาม แพนโทกราฟ (Pantograph) ทุกรุ่นจะต้องประกอบไปด้วย 5 โครงสร้างหลักได้แก่ ส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) เฟรมของแพนโทกราฟ (Pantograph Frame) ฐาน แดมเปอร์ (Damper) และระบบควบคุมแพนโทกราฟ (Pantograph) รูปที่ 2.1 แสดงถึงโครงสร้างของแพนโทกราฟ (Pantograph) แบบแขนเดี่ยว

แพนโทกราฟ (Pantograph) สามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท ในประเภทการทำงานของระบบควบคุมสามารถแบ่งได้เป็น ระบบควบคุมที่ใช้สปริง และ ระบบควบคุมที่ไม่ใช้สปริง ในประเภทของโครงสร้างเฟรม (Frame) สามารถแบ่งได้เป็น แพนโทกราฟ (Pantograph) แขนเดี่ยว แพนโทกราฟ (Pantograph) แขนคู่ และ แพนโทกราฟ (Pantograph) แบบสองชั้น ซึ่งแพนโทกราฟ (Pantograph) แขนคู่สามารถแบ่งออกได้อีกเป็น แพนโทกราฟ (Pantograph) แขนคู่สี่คานรูปทรงเพชร และ แพนโทกราฟ (Pantograph) แขนคู่สองคานรูปทรงเพชร ในประเภทของความเร็วในการให้บริการ สามารถแบ่งได้เป็น แพนโทกราฟ (Pantograph) สำหรับความเร็วสูง โดยจะมีการแบ่งอีกหลายประเภท แต่ประเภทที่แบ่งกันโดยทั่วไปคือ ประเภทของโครงสร้างเฟรม (Frame) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแพนโทกราฟ(Pantograph)แขนเดี่ยว 1,เฟรม (Frame); 2, ฐาน; 3, ส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead); 4, แหนบรับไฟ; 5, ฮอร์น (Horn); 6, ความยาวของแพนโทกราฟส่วนหัว (Panhead); 7, ความกว้างของแพนโทกราฟส่วนหัว (Panhead); 8, ความสูงของแพนโทกราฟส่วนหัว (Panhead); 9, แขนรองรับส่วนหัว; 10, ความยาวของแหนบรับไฟ; 11, ความสูงของแพนโทกราฟ (Pantograph) ขณะอยู่ตำแหน่งต่ำสุด; 12, ความสูงของแพนโทกราฟ (Pantograph) ขณะอยู่ตำแหน่งสูงสุด; 13, ช่วงการเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ (Pantograph); 14, ความสูงของฐานแพนโทกราฟ (Pantograph) [4]

2.3.1.1 แพนโทกราฟส่วนหัว [4]

แพนโทกราฟ (Pantograph) ส่วนหัวเป็นส่วนที่สำคัญของแพนโทกราฟ (Pantograph) และชิ้นส่วนหลักประกอบไปด้วย แหนบรับไฟ ฮอร์น (Horn) และ จุดรองรับส่วนหัว

1. แหนบรับไฟ มีหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แพนโทกราฟ (Pantograph) มีการสัมผัสกับสายส่งโดยตรงและง่ายต่อการสึกหรอ จะมีหลากหลายประเภทเช่น แหนบรับไฟคู่ และ แหนบรับไฟเดี่ยว การทำงานในสถานะที่รุนแรง แหนบรับไฟอาจมีแรงเสียดทานทางกลตามปกติและการเสียดสีทางไฟฟ้า และแม้กระทั่งการชนของกลไกและการกัดเซาะของความร้อนที่รุนแรง เมื่อแหนบรับไฟเกิดความเสียหาย สายส่งจะอยู่ในสถานะอันตราย และการให้บริการของรถไฟฟ้าเกิดอาจเกิดสถานะติดขัด ดังนั้น ในแพนโทกราฟ (Pantograph) ความเร็วสูงจะมีการติดตั้งระบบ ADD (Automatic dropping device) ซึ่งจะคอยตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแหนบรับไฟ และ จะทำการดึงแพนโทกราฟ (Pantograph) ลงมาเมื่อแหนบรับไฟเกิดความเสียหาย

2. ฮอร์น มีรูปทรงเป็นเส้นโค้งอยู่บนสองข้างของแพนโทกราฟ (Pantograph) สามารถทำให้แพนโทกราฟ (Pantograph) มีความราบรื่นขณะที่แพนโทกราฟ (Pantograph) ข้ามไปใช้สายส่ง

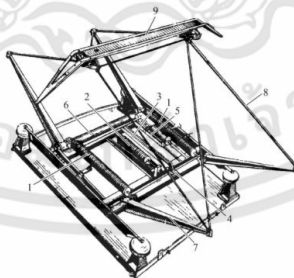
เส้นอื่น เมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) ทำงานที่ความสูงต่ำกว่าภายใต้แรงดันไฟฟ้า ฮอร์นจะต้องทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าเพื่อหลีกเลี่ยงการรั่วไหลของไฟฟ้าขณะที่ด้านปลายของฮอร์นสัมผัสกับหลังคาของรถไฟฟ้า

3. ส่วนรองรับส่วนหัวเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของแพนโทกราฟ (Pantograph) ชิ้นส่วนนี้จะต้องทำให้แน่ใจว่าจะมีการสัมผัสที่ราบรื่นระหว่างแหวนปรับไฟหับสายส่ง และมีความยืดหยุ่นที่สูงกว่าการสั่นของสายส่งที่ความถี่สูงระหว่างการสัมผัสตลอดทางส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) ส่วนมากจะติดอยู่กับเฟรม (Frame) ผ่านสปริงเกลียว แหวนรองรับน้ำหนัก หรือ ยาง

2.3.1.2 เฟรมของแพนโทกราฟ [4]

เฟรมของแพนโทกราฟส่วนมากจะถูกแบ่งเป็นเฟรมส่วนบน (Upper Frame) และเฟรมส่วนล่าง (Lower Frame) ที่เชื่อมต่อกันด้วยจุดหมุน ส่วนที่อยู่เหนือจุดหมุนจะเรียกว่า เฟรมส่วนบน (Upper Frame) และส่วนที่อยู่ต่ำกว่าจะเรียกว่าเฟรมส่วนล่าง (Lower Frame) เฟรม (Frame) สามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆได้ดังนี้

1. เฟรมแขนคู่สี่คานรูปทรงเพชร (Four-cantilever diamond double-arm frames) และ เฟรมแขนคู่สองคานรูปทรงเพชร (Double-cantilever diamond double-arm frames) รูปที่ 2.2 แสดงประเภทของเฟรม (Frame) แขนคู่สี่คานรูปทรงเพชร ประกอบไปด้วย คานสี่คานได้แก่ ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้าย และ ด้านขวา

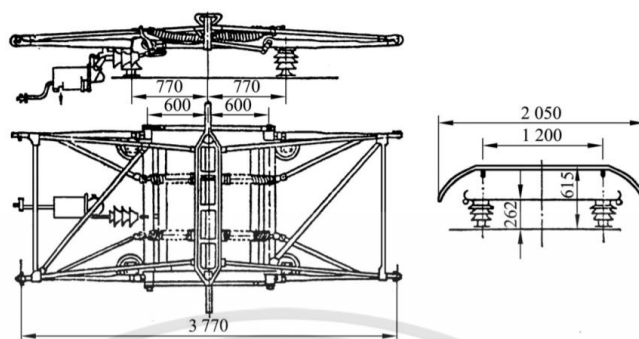


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเฟรมแขนคู่สี่คานรูปทรงเพชร (Four-cantilever diamond double-arm frames) 1, สปริงยก; 2, สปริงหย่อน; 3และ4, กลไกการยก; 5, ถังบรรจุลม; 6, ฐาน; 7, เฟรมส่วนล่าง (Lower Frame); 8,เฟรมส่วนบน (Upper Frame); 9, ส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) [4]



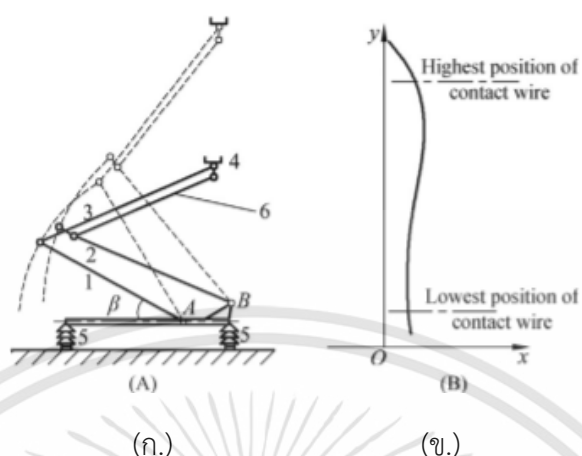
รูปที่ 2.3 หัวรถจักรไฟฟ้ารุ่น 8G ใช้แพนโทกราฟแขนคู่สองคานรูปทรงเพชร (Four-cantilever diamond double-arm frames) [4]

ซึ่งคานก็สามารถแบ่งได้ออกเป็น คานส่วนบนและคานส่วนล่าง ที่เชื่อมต่อกันด้วยจุดหมุนและมีลักษณะสมมาตรกัน ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับรูปทรงของเพชร สามารถเรียกได้ว่า เฟรมแขนคู่สี่คานรูปทรงเพชร (Four-cantilever diamond double-arm frames) หรือเฟรมรูปทรงเพชร (Diamond frames) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างเฟรม (Frame) ทั้งหมด จะมีการติดตั้งโครงแกนระหว่างคานซ้ายและคานขวา (ลำดับ 6 ในรูปที่ 2.2) ข้อดีคือมีความแข็งแรงสูง แต่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแพนโทกราฟ (Pantograph) เมื่อพื้นผิวการติดตั้งไม่เท่ากันหรือฐานเอียงและเฟรม (Frame) ไม่อยู่ในระดับอ้างอิงตามประสบการณ์การปฏิบัติงานและการผลิต นอกจากนี้การปรับแต่งหลังจากการประกอบจะมีความยากมากยิ่งขึ้นบนพื้นฐานของเฟรมรูปเพชรธรรมดา (Diamond frames) นักออกแบบได้สร้างและผลิตโครงสร้างรูปเพชรแบบแขนคู่สองคาน (Double-cantilever diamond double-arm frames) ลักษณะเด่นของเฟรมส่วนล่าง (Lower Frame) ประกอบด้วยคานด้านหน้าและด้านหลัง ส่วนเฟรม (Frame) ส่วนบนประกอบด้วยคานสี่ตัว (ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้าย และด้านขวา) คานด้านซ้ายและด้านขวาซึ่งอยู่ด้านบนของจุดหมุนที่ติดตั้งอยู่ส่วนบนของคานด้านล่าง มีลักษณะเป็นรูปตัว V เฟรม (Frame) ทั้งหมดประกอบด้วยแขนด้านหน้าและด้านหลังที่สมมาตร เมื่อมองจากด้านข้างจะดูเหมือนเพชร เฟรม (Frame) นี้มีโครงสร้างที่เรียบง่ายกว่าและมีน้ำหนักที่เบากว่าและอยู่ภายใต้การกระแทกที่น้อยกว่าของการติดตั้งเมื่อเกิดการเอียง แต่ความแข็งแรงของมันลดลงไม่มากนักน้อย รูปที่ 2.3 แสดงหัวรถจักรไฟฟ้ารุ่น 8G โดยใช้แพนโทกราฟ (Pantograph) แขนคู่สองคานรูปทรงเพชร (Double-cantilever diamond double-arm frames)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น M7 ที่ใช้บนหัวรถจักรไฟฟ้า 6Y2 (มม.) [4]

2. เฟรมแขนเดี่ยว (Single-arm frame) คือการแบ่งครึ่งของเฟรมแขนคู่สองคาน รูปทรงเพชร (Double-cantilever diamond double-arm frames) รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของแพนโทกราฟแบบแขนเดี่ยว (Single-arm frame) เพื่อให้แน่ใจว่ามีการเคลื่อนขึ้นและลงของแพนโทกราฟ (Pantograph) ส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) (ลำดับ 4 ในรูปที่ 2.5 (ก.)) ต้องวางอยู่ในระนาบตั้งฉากกับพื้นระดับ และ เฟรมส่วนล่าง (Lower frame) ต้องมีการติดตั้งเฟรมเสริม (Support lever) (ลำดับ 2 ในรูปที่ 2.5 (ก.)) ควรเลือกความยาวที่เหมาะสมสำหรับคานแต่ละคาน และ ส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) จะต้องมีการลักษณะการเคลื่อนที่ที่แสดงดังในรูปที่ 2.5 (ข.) แกน y คือเส้นทางการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) ผ่านการหมุนรอบจุด A และอ้างอิงถึงความสูงของการเคลื่อนที่ขึ้นของแพนโทกราฟ (Pantograph) แกน x หมายถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ในแนวนอนของส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) ขณะเคลื่อนที่ขึ้น จุดกำเนิด O คือตำแหน่งของจุดหมุน A ยิ่งไปกว่านั้น คานสมดุล (ลำดับ 6 ในรูปที่ 2.5 (ก.)) ยังติดตั้งที่เฟรมส่วนบน (Upper frame) เพื่อให้แน่ใจว่าส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) จะสามารถเคลื่อนที่ในแนวนอนภายในช่วงการทำงานของแพนโทกราฟ (Pantograph) เฟรมแขนเดี่ยว (Single-arm frame) มีลักษณะเฉพาะที่ความไม่ซับซ้อนของโครงสร้าง มีขนาดโดยรวมที่เล็ก และมีน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพไดนามิก (Dynamic) ของแพนโทกราฟ (Pantograph) และ ลดผลกระทบที่เกิดจากความเอียงของส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) อย่างไรก็ตามแพนโทกราฟ (Pantograph) ประเภทนี้ จะมีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ แรงต้านอากาศจะมีผลมากโดยเฉพาะที่ความเร็วสูง ทำให้ควรติดตั้งปีกควบคุมการไหลของอากาศที่ส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) เพื่อให้มีความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพของแรงต้านอากาศจากทั้งสองทิศทาง



รูปที่ 2.5 เส้นทางการเคลื่อนที่ของเฟรมแขนเดี่ยว (Single-arm frame) และส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) 1, เฟรมส่วนล่าง (Lower frame); 2, เฟรมเสริม (Support lever); 3, เฟรมส่วนบน (Upper frame); 4, ส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead); 5, ฉนวนรองรับ; 6, คานสมดุล; A, B, จุดหมุนของเฟรมส่วนล่าง (Lower frame) และเฟรมเสริม (Support lever); β , มุมยกของแพนโทกราฟ [4]

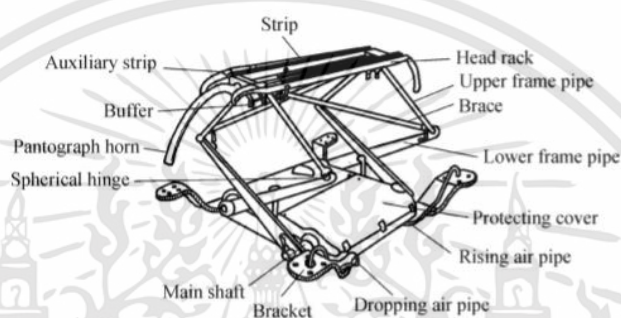


รูปที่ 2.6 แพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น PS207 ที่ติดตั้งปีกควบคุมการไหลบนรถไฟฟ้ายานยนต์เซ็นซีวีส์ 700 [4]

3. เฟรมแขนคู่สี่คานไขว้ (Four-cantilever crossed double-arm frames) ไม่มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างเฟรมแขนคู่สี่คานไขว้ (Four-cantilever crossed double-arm frames) กับเฟรมสี่คานรูปทรงเพชร (Four-cantilever diamond double-arm frames) ยกเว้นคานสี่คานในเฟรมส่วนล่าง (Lower frame) ซึ่งยื่นออกไปและคานด้านหน้าและด้านหลังอยู่ด้านเดียวกันซึ่งไขว้กัน ภายในช่วงการทำงานที่เหมือนกัน พื้นที่ติดตั้งของแพนโทกราฟ (Pantograph) ดังกล่าวจะอยู่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

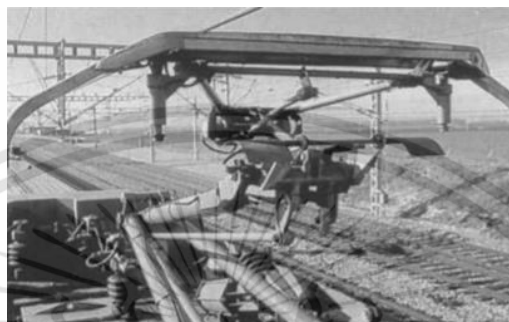
ประมาณสองในสามของแพนโทกราฟรูปทรงเพชร (Pantograph diamond frame) ซึ่งส่งผลให้แพนโทกราฟ (Pantograph) ประเภทนี้ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งบนหลังคาของรถไฟฟ้า รูปที่ 2.7 แสดงแพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น PS200A แพนโทกราฟแขนคู่สี่คานไขว้ (Four-cantilever crossed double-arm frames) ที่ถูกใช้บนรถไฟฟ้าซินคันเซ็นซีรีส์ 0



รูปที่ 2.7 แพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น PS200A ใช้บนรถไฟฟ้าซินคันเซ็นซีรีส์ 0 [4]

4. เฟรมสองชั้น (Double-layer frame) ด้วยการเพิ่มขึ้นของความเร็วของรถไฟฟ้า แรงปฏิกิริยาทางไดนามิก (Dynamic) ระหว่างแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่งจะมีมากขึ้นและซับซ้อนมากขึ้น เฟรมสองชั้น (Double-layer frame) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาี้ แนวคิดพื้นฐานสำหรับแพนโทกราฟ (Pantograph) ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของความสูงของสายส่ง การเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นของสายส่งที่เกิดขึ้นจากความยืดหยุ่นที่ต่างกันของสายส่ง และการสั่นสะเทือนที่มีขนาดเล็กมากที่ความถี่สูงในระบบแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่งระหว่างการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วสูงจะส่งผลต่อคุณภาพการสัมผัสของแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่ง การสั่นสะเทือนขนาดเล็กจะถูกชดเชยประสิทธิภาพทางไดนามิก (Dynamic) ด้วยมวลขนาดเล็กที่ติดอยู่ที่ด้านบนของส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) เฟรม (Frame) ที่มีมวลมากจะไม่มีเคลื่อนที่ตามรูปคลื่นของสายส่ง แพนโทกราฟ (Pantograph) ที่มีเฟรมสองชั้น (Double-layer frame) สามารถใช้เฟรมส่วนล่าง (Lower frame) ในการปรับให้เข้ากับ ความสูงของสายส่งตามการใช้งานได้ ความแปรผันของความสูงของสายส่งมักจะมีมาไม่บ่อยครั้ง เฟรมส่วนบนมีหน้าที่หลักคือชดเชยการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นพื้นฐานที่เกิดจากความยืดหยุ่นที่ต่างกันของสายส่ง มวลขนาดเล็กด้านบนของส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) ใช้ในการชดเชยการสั่นสะเทือนที่มีขนาดเล็กมากของแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่งเหนือหัว แพนโทกราฟที่มีเฟรมสองชั้น (Double-layer frame) มีประสิทธิภาพทางไดนามิก

(Dynamic) ที่ดีและตรงตามความต้องการของแพนโทกราฟ (Pantograph) ความเร็วสูง อย่างไรก็ตามมันมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและค่อนข้างมีต้นทุนที่สูง และใช้ได้กับความเร็วที่สูงมากเท่านั้น รูปที่ 2.8 แสดงถึงแพนโทกราฟ (Pantograph) สองชั้นรุ่น AMDE



รูปที่ 2.8 แพนโทกราฟ (Pantograph) รุ่น AMDE บนรถไฟ TGV-PSE [4]

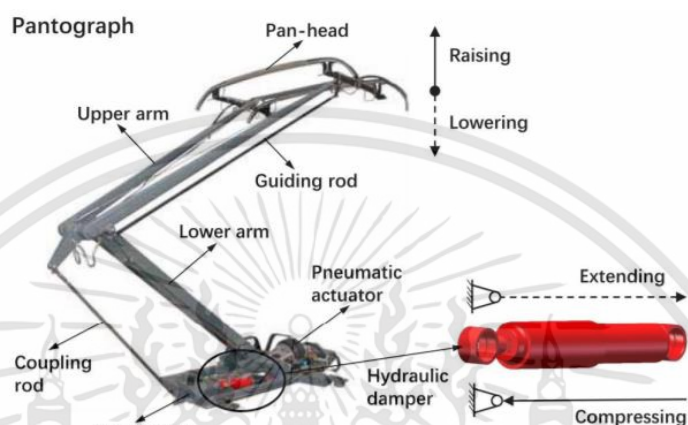
2.3.1.3 ฐาน [4]

ฐานมีหน้าที่รองรับและยึดเฟรม (Frame) ของแพนโทกราฟ (Pantograph) ให้อยู่กับที่ พร้อมทั้งติดตั้งบนฉนวนทางไฟฟ้าฐานโดยส่วนมากสร้างจากเหล็กโปรไฟล์ แผ่นเหล็กที่ผ่านการรีดหรือเหล็กกล่องผ่านการหล่อ ฐานควรจะมี ความแข็งแรงที่มากเพื่อหลีกเลี่ยงการบิดเบี้ยวระหว่างการเคลื่อนย้ายและติดตั้ง ที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของแพนโทกราฟ (Pantograph) มวลของฐานจะมีขนาดที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนอื่นๆ ซึ่งในภายภาคหน้าอาจมีการทำให้มีน้ำหนักที่เบาลงได้ ฐานโดยส่วนมากจะถูกยึดติดเข้ากับหลังคาด้วยจตุรรองรับที่เป็นฉนวนสามหรือสี่จุด ฉนวนที่รองรับของแพนโทกราฟ (Pantograph) จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมการทำงานของแพนโทกราฟ (Pantograph) นอกจาก แสงแดด ลม ฝน และ เศษจากแหนบร๊ับไฟ สิ่งเหล่านี้จะอาจอยู่ภายใต้แรงกระแทกขนาดใหญ่ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุจากแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่ง

2.3.1.4 แดมเปอร์ (Damper) [6]

การออกแบบโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆที่เหมาะสมบนแพนโทกราฟ (Pantograph) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่างแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่ง อีกทั้งยังเพิ่มเสถียรภาพในการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าได้ดีขึ้นด้วย แพนโทกราฟ (Pantograph) โดยส่วนมากจะมีการติดตั้งไฮดรอลิกแดมเปอร์ (Hydraulic Damper) ระหว่างฐานและเฟรมส่วนล่าง (Lower frame) ของแพนโทกราฟ (Pantograph) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เมื่อแพนโทกราฟเคลื่อนที่ลง แดมเปอร์ (Damper) จะมีการขยายตัวออก และเมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ขึ้นแดมเปอร์ (Damper) จะมีการอัด

ตัวไฮดรอลิกแดมเปอร์ (Hydraulic Damper) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองของแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่งอีกทั้งยังทำให้การเคลื่อนที่ขึ้นและลงของแพนโทกราฟ (Pantograph) มีความราบรื่นมากยิ่งขึ้นด้วย

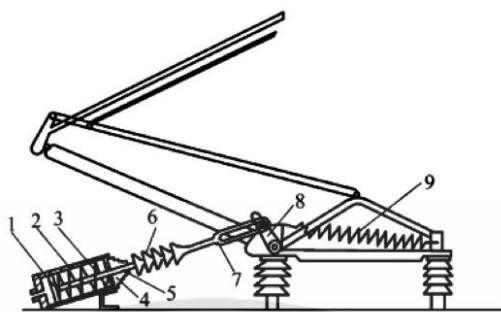


รูปที่ 2.9 แพนโทกราฟ (Pantograph) ของรถไฟความเร็วสูงและแดมเปอร์ (Damper) [6]

2.3.1.5 ระบบควบคุมแพนโทกราฟ [4]

ระบบควบคุมแพนโทกราฟ (Drive System) คือระบบที่ใช้สำหรับการยกหรือลดระดับแพนโทกราฟ (Pantograph) ระบบควบคุมแพนโทกราฟ (Pantograph) ในการรถไฟของประเทศจีนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ ระบบควบคุมด้วยสปริง และ ระบบควบคุมที่ไม่ใช้สปริง

1. ระบบควบคุมด้วยสปริง ถูกแสดงดังรูปที่ 2.10 แพนโทกราฟ (Pantograph) ที่ติดตั้งด้วยระบบนี้จะแบ่งประเภทสปริงออกเป็น 2 ประเภทหลักได้แก่ สปริงยก และ สปริงหย่อน สปริงยกถูกใช้เพื่อเอาชนะแรงต้านจากน้ำหนักของแพนโทกราฟ (Pantograph) แรงต้านจากแรงเสียดทาน และแรงต้านจากแรงสัมผัสจากสายส่ง

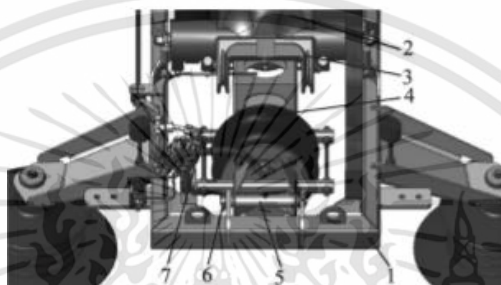


รูปที่ 2.10 ระบบควบคุมด้วยสปริง 1, กระบอกสูบ; 2, ถังบรรจุลม; 3, สปริงหย่อน; 4, ปกค้ำ; 5, ก้านสูบ; 6, ฉนวน; 7, ก้านเชื่อมต่อ; 8, ก้านผลัก; 9, สปริงยก [4]

สปริงหย่อนมีหน้าที่สร้างแรงที่ต้องการในการดึงแพนโทกราฟ (Pantograph) ลงมา ถ้าไม่มีลมอัดเข้าไปถังบรรจุลม แพนโทกราฟ (Pantograph) จะถูกดึงลงมาในตำแหน่งต่ำสุดโดยสปริงหย่อนผ่านก้านสูบ ก้านดึงหุ้มฉนวน ก้านเชื่อมต่อ และก้านผลัก เพื่อที่จะยกแพนโทกราฟ (Pantograph) ลมอัดควรจะถูกส่งเข้าไปในถังบรรจุลมผ่านวาล์วนิวเมติกส์ไฟฟ้า (Electrical pneumatic valve) กระบอกสูบจะถูกผลักไปทางขวาผ่านก้านดึงหุ้มฉนวนเพื่อปล่อยให้แพนโทกราฟ (Pantograph) หมุนตามจุดหมุน ดังนั้นแพนโทกราฟจะ (Pantograph) ถูกยกขึ้นภายใต้การกระทำของสปริงยก การจะดึงแพนโทกราฟ (Pantograph) ลงมาลมอัดจะถูกตัดการเชื่อมต่อจากถังบรรจุลมผ่านวาล์วนิวเมติกส์ไฟฟ้า (Electrical pneumatic valve) และกระบอกสูบจะถูกผลักไปทางด้านซ้ายภายใต้การกระทำของสปริงหย่อน ก้านเชื่อมต่อจะผลักไปทางด้านซ้ายก้านเชื่อมต่อมีหน้าที่ทำให้แพนโทกราฟ (Pantograph) หมุนรอบจุดหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาผ่านก้านผลักเพื่อที่จะยึดสปริงยกและดึงโครงของแพนโทกราฟ (Pantograph) ลงมา

2. ระบบควบคุมที่ไม่ใช้สปริง ระบบควบคุมอื่นๆที่ไม่ใช่ระบบควบคุมด้วยสปริงถูกเรียกว่า ระบบควบคุมที่ไม่ใช้สปริง รูปที่ 2.11 แสดงระบบควบคุมด้วยลมอัดของแพนโทกราฟ (Pantograph) DSA380 การยกขึ้นและการลดระดับลงของแพนโทกราฟ (Pantograph) DSA380 มีการควบคุมหลักคือการควบคุมโดยใช้วงจรมลเมื่อลมอัดเข้าไปในอุปกรณ์นิวเมติกส์ (Pneumatic device) อุปกรณ์นิวเมติกส์ (Pneumatic device) จะขยายตัวและขับเคลื่อนลวดสลิงที่กระทำกับเฟรมส่วนล่าง (Lower frame) ของแพนโทกราฟ (Pantograph) ลวดสลิงจะดึงเฟรมส่วนล่าง (Lower frame) ของแพนโทกราฟ (Pantograph) เพื่อที่จะยกให้ส่วนแขนรับไฟไปสัมผัสกับสายส่ง เมื่ออากาศในอุปกรณ์นิวเมติกส์ (Pneumatic device) ถูกปล่อยออก แรงดึงบนลวดสลิงที่กระทำกับเฟรมส่วนล่าง (Lower frame)

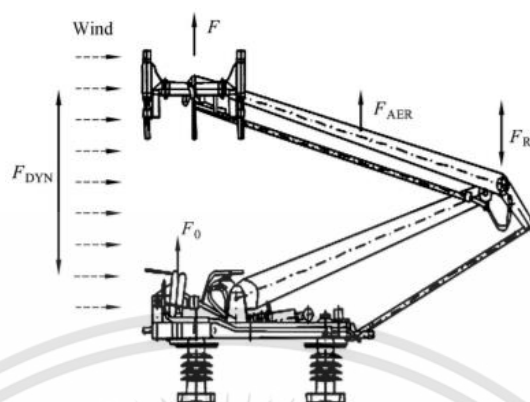
จะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆและหายไป แพนโทกราฟ (Pantograph) จะเคลื่อนที่ลงภายใต้น้ำหนักของมัน หายที่สุดแทนรับไฟจะไปหยุดที่จุดรองรับทางกลที่ติดตั้งอยู่บนฐานของแพนโทกราฟ (Pantograph) เมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) อยู่ในจุดต่ำสุด ระบบขับเคลื่อนจะส่งแรงในแนวตั้งที่มีปริมาณพอดีเพื่อป้องกันแรงกระแทกจากการปล่อยตัวของแพนโทกราฟไม่ให้เกิดการสึกหรอที่มากขึ้นเมื่อพาหนะเคลื่อนที่ในทุกความเร็ว



รูปที่ 2.11 ระบบควบคุมด้วยลมอัด 1, ฐาน; 2, เฟรมส่วนล่าง (Lower frame); 3, ลวดสลิง; 4, อุปกรณ์นิวแมติกส์ (Pneumatic device); 5, หมุด; 6, สปริงต้านแรง; 7, ท่อลมอัด [4]

2.3.2 แรงสัมผัสในแพนโทกราฟ (Contact Force) [4]

แรงในแนวตั้งจากที่แพนโทกราฟ (Pantograph) กระทำกับสายส่งถูกเรียกว่า แรงสัมผัส ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงสัมผัสทุกจุดที่สัมผัสกันระหว่างแพนโทกราฟส่วนหัว (Panhead) และสายส่ง แรงสัมผัสของแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่งเหนือหัวมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาการขับเคลื่อนของรถไฟ ดังนั้น แรงสัมผัสจึงมีอีกชื่อว่า แรงสัมผัสไดนามิก รูปที่ 2.12 แสดงการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับแพนโทกราฟ (Pantograph) F_R คือแรงเสียดทานของข้อต่อบนแพนโทกราฟ (Pantograph) มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ เมื่อแพนโทกราฟส่วนหัว (Panhead) เคลื่อนที่ลง แรงเสียดทานของข้อต่อจะมีทิศทางขึ้น เมื่อแพนโทกราฟส่วนหัว (Panhead) เคลื่อนที่ลง แรงเสียดทานของข้อต่อจะมีทิศทางลง F_{AER} และ F_{DYN} เป็นแรงต้านอากาศและแรงไดนามิก (Dynamic) ของแรงสัมผัส



รูปที่ 2.12 แรงที่กระทำบนแปนโทกราฟ [4]

แรงสัมผัส F ณ เวลาใดๆ มีค่าเท่ากับผลรวมของเวกเตอร์แรงสัมผัสสถิตแรงเสียดทานของข้อต่อ แรงต้านอากาศ และแรงไดนามิก (Dynamic) ของแรงสัมผัสมีสมการแสดงดังนี้

$$F = F_0 + F_R + F_{AER} + F_{DYN} \quad (2.1)$$

โดย F_0 คือ แรงสัมผัสสถิต
 F_R คือ แรงเสียดทานของข้อต่อ
 F_{AER} คือ แรงต้านอากาศ
 F_{DYN} คือ แรงไดนามิกของแรงสัมผัส

ซึ่งสมการแสดงให้เห็นได้ว่าแรงสัมผัสมีปัจจัยหลักขึ้นอยู่กับความเร็วของรถไฟแรงไดนามิก (Dynamic) ของแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งและแปนโทกราฟ (Pantograph) และจำนวนของแปนโทกราฟ (Pantograph) ที่ใช้งาน ณ เวลานั้น

เมื่อส่วนหัวของแปนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ขึ้น F_R และ F_{DYN} จะมีทิศลง โดยปกติแล้ว เมื่อส่วนหัวของแปนโทกราฟ (Panhead) อยู่ในจุดสูงสุดจะมีแรงสัมผัสชั่วขณะที่น้อยที่สุดที่แปนโทกราฟ (Pantograph) กระทำกับสายส่ง ซึ่งสมการของแรงสัมผัสแสดงดังนี้

$$F_{min} = F_0 - |F_R| + F_{AER} - |F_{DYN}| \quad (2.2)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) เคลื่อนที่ลง F_R และ F_{DYN} จะมีทิศขึ้น เมื่อส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) อยู่ในจุดต่ำสุดแรงสัมผัสชั่วขณะจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งสมการของแรงสัมผัสแสดงดังนี้

$$F_{max} = F_0 + |F_R| + F_{AER} + |F_{DYN}| \quad (2.3)$$

เมื่อรถไฟทำความเร็วสูงสุดและพิจารณาพร้อมกับแรงต้านอากาศ แรงสัมผัสระหว่างแพนโทกราฟ (Pantograph) และสายส่งควรอยู่ในช่วงของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด

2.3.3 สายส่งเหนือหัว [4]

สายตามแนวยาวที่รองรับการไถลของแพนโทกราฟ (Pantograph) ถูกเรียกว่าสายส่งเหนือหัว สายส่งเหนือหัวทำหน้าที่สัมผัสติดและไถลและยังส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องไปที่รถไฟผ่านแพนโทกราฟ (Pantograph)

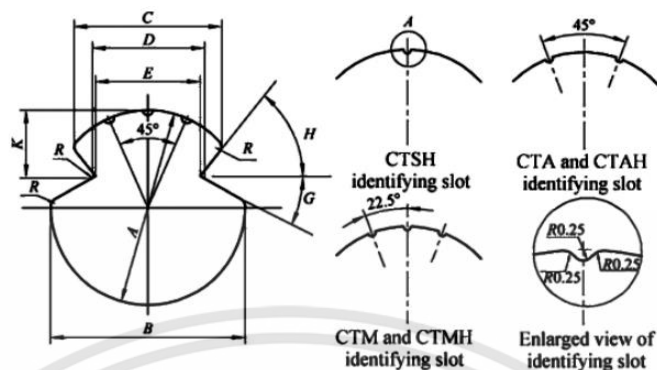
สายส่งเหนือหัวที่มีรูทั้งสองด้านสำหรับหนีบ เรียกว่าสายส่งที่มีช่องเสียบ สายส่งเหนือหัวชนิดและหน้าตัดต่างๆสามารถใช้ได้ขึ้นอยู่กับโอกาสที่แตกต่างกัน สำหรับสายส่งด้านบน หน้าตัดที่ใช้เป็นส่วนใหญ่คือหน้าตัดกลม การเลือกพื้นที่ตัดขวางขึ้นอยู่กับความจุในการนำพากระแสไฟฟ้าของสายส่งเป็นหลัก

เนื่องจากความสามารถในการนำไฟฟ้า ความตึง และความแข็งแรงของทองแดงผสมโลหะผสมและทองแดงที่สูง รวมถึงความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกัดกร่อน ตัวนำไฟฟ้าที่ทำจากทองแดงผสมโลหะผสมและทองแดงจึงได้รับการนำไปใช้อย่างกว้างขวางทั่วโลก

2.3.3.1 คุณสมบัติของสายส่งเหนือหัวทองแดงและทองแดงผสมโลหะผสม [4]

ทองแดงมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีในอุตสาหกรรม ทองแดงบริสุทธิ์มีความทนทานต่อการกัดกร่อนอย่างดี ทองแดงจึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย สายส่งเหนือหัวทองแดงบริสุทธิ์มักทำจากทองแดงที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้า มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99.9% ผ่านการหล่ออย่างต่อเนื่องและการกลึงและลากต่อเนื่องเพื่อทำเป็นสาย สามารถใช้ได้โดยตรงโดยไม่ต้องรีด

การเพิ่มโลหะผสมเช่น เงิน ตะกั่ว หรือแมกนีเซียม เข้าไปในทองแดงบริสุทธิ์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางกล แต่จะลดประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า เงินเป็นธาตุโลหะผสมที่ละลายได้ และยังมีจุดหลอมเหลวที่สูง และความแข็งแรงสูง สามารถเพิ่มเข้าไปยังทองแดงได้



รูปที่ 2.13 แสดงรูปร่างหน้าตัดของสายส่งเหนือหัวและการระบุช่องเสียบแต่ละรูปแบบ [4]

Specifications, Dimensions, Angles, and Unit Reference Masses of Contact Wires											
Spec. (Nominal Cross-Sectional Areas) (mm ²)	Calculated Cross-Sectional Areas (mm ²)	Dimensions and Tolerance (mm)							Angles and Errors		Reference Unit Masses (kg/km)
		A ±1%	B ±2%	C ±2%	D +4% to -2%	E	K	R	G (±1°)	H	
85	86	10.80	10.76	9.40	7.24	6.80	4.60	0.40	27°	51°	769
110	111	12.34	12.34	9.73	7.24	6.80	4.47	0.40	27°	51°	992
120	121	12.90	12.90	9.76	7.24	6.80	4.35	0.40	27°	51°	1082
150	151	14.40	14.40	9.71	7.24	6.80	4.00	0.40	27°	51°	1350

Note: Allowable error of cross-sectional area is ±3% of calculated cross-sectional area. Reference unit mass is calculated based on a density of 8.94 g/cm³.

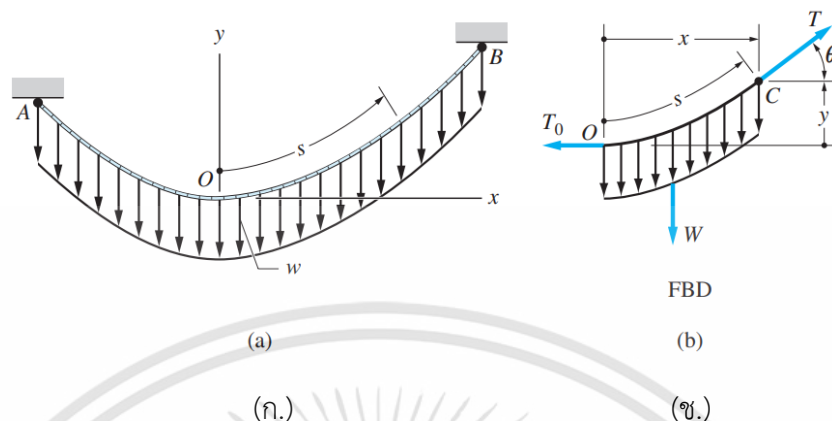
รูปที่ 2.14 ตารางแสดงคุณสมบัติและขนาดต่างๆของสายส่งเหนือหัวชนิดทองแดง [4]

2.3.4 สายเคเบิล (Cable) ภายใต้แรงกระจายอย่างสม่ำเสมอ [5]

2.3.4.1 สมการโดยทั่วไป [5]

สายเคเบิล (Cable) ที่ยึดหยุนได้ถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมมากมาย ตัวอย่างทั่วไป ได้แก่ สายส่งไฟฟ้าและสะพานแขวน คำว่า ยึดหยุน หมายความว่าสายเคเบิล (Cable) ไม่สามารถพัฒนาแรงภายในอื่นนอกเหนือจากความตึงในที่นี่เราพิจารณาผลกระทบของแรงกระจาย เช่น น้ำหนักของสายเคเบิลหรือน้ำหนักของโครงสร้างที่ห้อยลงมาจากสายเคเบิล (Cable)

รูปที่ 2.15(ก.) แสดงสายเคเบิล (Cable) ที่ถูกยึดจากจุดปลาย A และ B เพื่อรองรับการกระจายโหลดของความเข้ม w สายเคเบิล (Cable) ต้องถูกอนุมานว่ามีรูปร่างโค้ง ปรากฏว่าสมการที่อธิบายรูปร่างนี้ง่ายขึ้นถ้าเราวางจุดกำเนิดของระบบพิกัด xy ที่จุดต่ำสุด O ของสายเคเบิล (Cable) ให้เป็นระยะทางที่วัดตามสายเคเบิล (Cable) จาก O โดยทั่วไปรูปร่างของสายเคเบิล (Cable) และตำแหน่งของจุด O จะไม่เป็นที่รู้จักในช่วงเริ่มต้นของการวิเคราะห์



รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพแรงกระจายบนสายเคเบิล [5]

หน่วยของความเข้มโหลด (Load) w คือ lb./ft หรือ N/m สามารถวัดความยาวได้สองวิธี: ตามแกน x แนวนอน (w เป็นฟังก์ชันของ x) หรือตามแนวสายเคเบิล (Cable) (w เป็นฟังก์ชันของ s) แม้ว่าทั้งสองกรณีจะต้องได้รับการวิเคราะห์แยกกัน อันดับแรก เราจะพิจารณาองค์ประกอบของการวิเคราะห์ที่เหมือนกันกับทั้งสองกรณี แผนภาพอิสระของส่วนของสายเคเบิล (Cable) ซึ่งขยายจากจุดต่ำสุด O ไปยังจุด C แสดงในรูปที่ 2.15(ข.) แรงดึงในสายเคเบิล (Cable) ที่ O และ C แสดงโดย T_0 และ T ตามลำดับ W คือผลลัพธ์ของการโหลด (Load) แบบกระจาย และ θ แทนมุมลาดเอียงของสายเคเบิล (Cable) ที่ C สมการสมดุลแรงของส่วนของสายเคเบิล (Cable) คือ

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0 & \rightarrow^+ T \cos \theta - T_0 = 0 \\ \sum F_y = 0 & \uparrow^+ T \sin \theta - W = 0\end{aligned}$$

จะได้

$$T \cos \theta = T_0 \quad T \sin \theta = W \quad (2.4)$$

ตัวแรกของสมการ (2.4) แสดงส่วนประกอบในแนวนอนของแรงเคเบิล (Cable) คือ $T \cos \theta$ เป็นค่าคงที่ตลอดสายผลเฉลยของสมการ (2.4) สำหรับผลเฉลยของ θ และ T คือ

$$\tan \theta = \frac{W}{T_0} \quad T = \sqrt{T_0^2 + W^2} \quad (2.5)$$

โดย T คือ แรงดึงในสายเคเบิล

T_0 คือ แรงดึงในสายเคเบิลในแนวระดับ

W คือ น้ำหนักของสายเคเบิล

θ คือ มุมระหว่างสายเคเบิลและแนวระดับ

2.3.4.2 สายเคเบิล (Cable) แบบพาราโบลา [5]

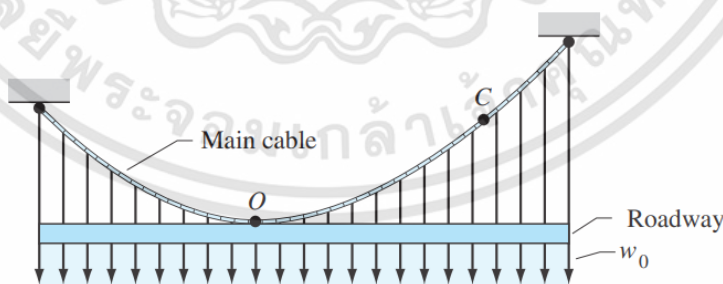
เราวิเคราะห์กรณีพิเศษที่มีการกระจายโหลดอย่างสม่ำเสมอตามแนวนอน นั่นคือ $w(x) = w_0$ โดยที่ w_0 คือความเข้มของโหลดคงที่ กรณีนี้เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ในสายเคเบิล (Cable) หลักของสะพานแขวน [ดูรูปที่ 2.16] โดยที่ w_0 แทนน้ำหนักของถนนต่อความยาวหนึ่งหน่วย สันนิษฐานว่าถนนเชื่อมต่อกับสายเคเบิล (Cable) หลักด้วยสายเคเบิล (Cable) แนวดิ่งจำนวนมากและน้ำหนักของสายเคเบิล (Cable) ทั้งหมดนั้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักของถนน การหาสมการ (2.5) เป็นจุดเริ่มต้น ตอนนี้เราได้สมการที่มีประโยชน์หลายอย่างที่อธิบายเรขาคณิตของสายเคเบิล (Cable) และการแปรผันของแรงดึงภายในสายเคเบิล (Cable)

θ และ T เป็นฟังก์ชันของ x และ T_0 เนื่องจากผลลัพธ์ของการโหลด (Load) ที่แสดงในรูปที่ 2.16(b) คือ $W = w_0x$, สมการที่ (2.5) จะกลายเป็น

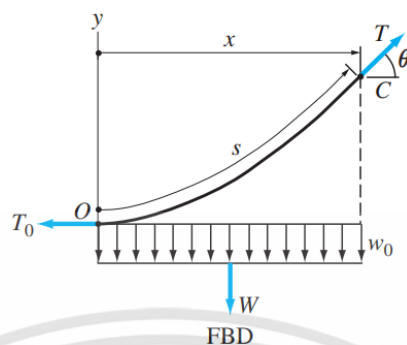
$$\tan \theta = \frac{w_0x}{T_0} \quad T = \sqrt{T_0^2 + (w_0x)^2} \quad (2.6)$$

y เป็นฟังก์ชันของ x และ T_0 แทนแทน $\tan \theta = dy/dx$, ตัวแรกของสมการ (2.6) สามารถเขียนได้เป็น $dy/dx = w_0x/T_0$ เมื่อรวมเข้าด้วยกัน จะได้

$$y = \frac{w_0x^2}{2T_0} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของแรงสม่ำเสมอบนสายเคเบิล (Cable) [5]



รูปที่ 2.17 แผนภาพส่วนหนึ่งของสายเคเบิล (Cable) ภายใต้แรงสม่ำเสมอ [5]

โดยที่ค่าคงที่ของการอินทิเกรต (Integration) ถูกกำหนดให้เท่ากับศูนย์เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไข $y = 0$ เมื่อ $x = 0$ สมการ (2.7) ซึ่งแทนพาราโบลา (Parabola) ที่มีจุดยอดที่ O สามารถหาได้จากสมการสมดุลชั่วขณะโดยใช้ FBD ใน รูปที่ 2.17 s ตามฟังก์ชันของ x และ T_0 บ่อยครั้งจำเป็นต้องคำนวณความยาว s ของสายเคเบิล (Cable) ระหว่างจุด O และ C ในรูปที่ 2.17 ความยาวน้อยที่สุดของสายเคเบิล (Cable) คือ

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (a)$$

แทนที่ $dy/dx = w_0x/T_0$ และทำการอินทิเกรต (Integration) จะได้

$$s(x) = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{w_0x}{T_0}\right)^2} dx \quad (2.8)$$

ดังนั้น ความยาวของสายเคเบิล (Cable) ระหว่างจุด O และ C คือ

$$s(x) = \frac{x}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{w_0x}{T_0}\right)^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{T_0}{w_0}\right) \ln \left[\left(\frac{w_0x}{T_0}\right) + \sqrt{1 + \left(\frac{w_0x}{T_0}\right)^2} \right] \quad (2.9)$$

โดย x คือ ระยะห่างในแนวระดับของจุดปลายไปจนถึงจุดต่างๆบนสายเคเบิล (Cable)

$s(x)$ คือ ความยาวของสายเคเบิล (Cable) ที่ระยะต่างๆ

w_0 คือ น้ำหนักของสายเคเบิล (Cable) ต่อความยาว 1 เมตร

2.3.4.3 สายเคเบิล (Cable) แบบแคทีนารี (Catenary) [5]

พิจารณาสายเคเบิล (Cable) ที่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งไม่มีน้ำหนักบรรทุก ยกเว้นน้ำหนักของมันเอง ในกรณีนี้ การโหลด (Load) จะกระจายไปตามความยาวของสายเคเบิล (Cable) อย่างสม่ำเสมอ นั่นคือ $w(s) = w_0$ โดยที่ w_0 คือน้ำหนักของสายเคเบิล (Cable) ต่อความยาวหน่วย และวัดระยะทาง s ตามสายเคเบิล (Cable) ดังนั้นผลลัพธ์ของโหลด (Load) ที่แสดงในรูปที่ 2.15(b) คือ $W = w_0 s$ ความสัมพันธ์ที่ต่อไปนี้อาจได้มาจากสมการ (2.5) θ และ T เป็นฟังก์ชันของ s และ T_0 แทน $W = w_0 s$ ลงในสมการ (2.5) จะได้

$$\tan \theta = \frac{w_0 s}{T_0} \quad T = \sqrt{T_0^2 + (w_0 s)^2} \quad (2.10)$$

s เป็นฟังก์ชัน (Function) ของ x และ T_0 เราเริ่มด้วยสมการ (a) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น $(dy/dx)^2 = (ds/dx)^2 - 1$ แทนที่ $dy/dx = \tan \theta = w_0 s/T_0$ และแก้หา dx จะได้

$$dx = \frac{ds}{\sqrt{1 + \left(\frac{w_0 s}{T_0}\right)^2}} \quad (b)$$

ใช้ตารางในการหาอินทิกรัล (Integral) ของสมการ (b) จะได้

$$x(s) = \int_0^s dx = \frac{T_0}{w_0} \ln \left[\frac{w_0 s}{T_0} + \sqrt{1 + \left(\frac{w_0 s}{T_0}\right)^2} \right] \quad (2.11)$$

การแก้สมการนี้สำหรับ s จะได้

$$s(x) = \frac{T_0}{w_0} \sinh \frac{w_0 x}{T_0} \quad (2.12)$$

ฟังก์ชัน (Function) $\sinh u$ และ $\cosh u$ เรียกว่า ไฮเปอร์โบลิกไซน์ (Hyperbolic sine) และ ไฮเปอร์โบลิกโคไซน์ (Hyperbolic cosine) ตามลำดับ ถูกกำหนดเป็น

$$\sinh u = \frac{1}{2}(e^u - e^{-u}) \quad \cosh u = \frac{1}{2}(e^u + e^{-u})$$

จะเห็นได้ว่ากฎของอนุพันธ์คือ

$$\frac{d}{du} \sinh u = \cosh u \quad \frac{d}{du} \cosh u = \sinh u$$

y เป็นฟังก์ชัน (Function) ของ x และ T_0 แทนสมการ (2.12) ลงในสมการแรกของสมการ (2.10) ซึ่งให้ผลลัพธ์ $\tan \theta = \sinh(w_0x/T_0)$ ใช้ $\tan \theta = dy/dx$ เราจะได้

$$dy = \tan \theta dx = \sinh \frac{w_0x}{T_0} dx$$

จะได้

$$y(x) = \int_0^x dy = \frac{T_0}{w_0} \left(\cosh \frac{w_0x}{T_0} - 1 \right) \quad (2.13)$$

โค้งที่ถูกอธิบายโดยสมการที่ (2.13) เรียกว่าโค้งแคทีนารี (Catenary)

หากความชันของแคทีนารี (Catenary) มีค่าน้อยทุกจุด แสดงว่าเส้นโค้งแตกต่างจากพาราโบลา (Parabola) น้อยมากสังเกตได้ว่าถ้า $\theta \ll 1$ แล้ว $dx = ds \cos \theta \approx ds$ ดังนั้น $w(s) \approx w(x)$ ซึ่งหมายความว่าน้ำหนักของสายเคเบิล (Cable) อาจถูกประมาณเป็นการกระจายแรงที่สม่ำเสมอตามแนวนอน การประมาณนี้มักจะทำให้การแก้ปัญหาง่ายขึ้น เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว สายเคเบิล (Cable) พาราโบลา (Parabola) จะวิเคราะห์ได้ง่ายกว่าสายเคเบิลแคทีนารี (Cable Catenary)

T เป็นฟังก์ชัน (Function) ของ x และ T_0 ตามสมการ (2.4) ความตึงของสายเคเบิล (Cable) คือ $T = T_0/\cos \theta$ การใช้ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิต $\cos \theta = dx/ds$ จะกลายเป็น $T = T_0 ds/dx$ ในการแทน s จากสมการ (2.12) จะได้

$$T = T_0 \cosh \frac{w_0x}{T_0} \quad (2.14)$$

2.3.5 ความสูงของสายส่งเหนือหัว [4]

สายส่งเหนือหัวถูกติดตั้งอยู่นอกช่วงขอบเขตการวิ่งของรถไฟ ซึ่งขอบเขตการติดตั้งสายส่งเหนือหัวจะถูกพิจารณาอยู่ในช่วงของความสูงที่ต่ำที่สุดและความสูงที่สุดของแพนโทกราฟ (Pantograph) ความสูงของสายส่งเหนือหัวคือระยะห่างในแนวตั้งจากระดับรางถึงพื้นผิวด้านล่างของสายส่งเหนือหัว แต่ในบางพื้นที่ ความสูงของสายส่งเหนือหัวจะถูกวัดที่จุดติดตั้งสายส่ง ตัวห้อยบนสายไฟ และจุดต่ำสุดของสายส่ง เพื่อให้แน่ใจว่าความสูงของสายส่งเหนือหัวอยู่ภายในช่วงที่อนุญาต การออกแบบความสูงขั้นต่ำ การออกแบบความสูงสูงสุด และค่าเฉลี่ยของความสูงของสายส่งจะต้องถูกกำหนดขึ้น

2.3.5.1 การออกแบบความสูงที่ต่ำสุดของสายส่งเหนือหัว [4]

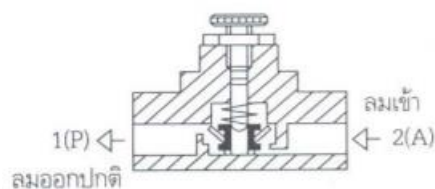
เพื่อให้แน่ใจว่าค่าต่ำสุดของความสูงของสายส่งเหนือหัวมีความเหมาะสม ค่าที่คำนวณตามทฤษฎีของความสูงของสายส่งที่ได้หลังจากพิจารณาปัจจัยที่ไม่พึงประสงค์ที่หลากหลายในการออกแบบสายส่งจะเรียกว่าความสูงขั้นต่ำในการออกแบบของสายส่ง ความสูงขั้นต่ำในการออกแบบของสายส่งนั้นมาจากการพิจารณาปัจจัยที่ไม่เอื้ออำนวยหลายประการที่ทำให้ความสูงของสายส่งลดลงบนพื้นฐานของความสูงขั้นต่ำ ปัจจัยที่ไม่พึงประสงค์ที่มีผลต่อการกำหนดความสูงขั้นต่ำของการออกแบบสายส่ง ได้แก่ ความผิดปกติด้านข้างของราง ข้อผิดพลาดในการก่อสร้างและการติดตั้งของสายส่ง การสั่นสะเทือนของสายส่ง น้ำแข็งปกคลุมบนช่วงล่างของสาย และการเปลี่ยนแปลงความตึงของสายส่งของระบบกันสะเทือน

2.3.5.2 การออกแบบความสูงที่สูงสุดของสายส่งเหนือหัว [4]

ความสูงของสายส่งจะถูกกำหนดหลังจากพิจารณาปัจจัยที่ไม่พึงประสงค์ต่างๆ และไม่เกินตำแหน่งการทำงานของแพนโทกราฟ (Pantograph) จะเรียกว่าความสูงสูงสุดในการออกแบบของสายส่ง ปัจจัยที่ไม่พึงประสงค์ที่มีผลต่อการกำหนดความสูงสูงสุดในการออกแบบสายส่ง ได้แก่ การสั่นของสายส่งภายใต้การกระทำของแพนโทกราฟ (Pantograph) ข้อผิดพลาดในการก่อสร้างและการติดตั้งสายส่ง การยกขึ้นหลังจากการเสียดสีของสายส่ง และการยกของสายส่งอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความตึงของสาย ความสูงสูงสุดของการออกแบบสายส่งขึ้นอยู่กับช่วงการทำงานของแพนโทกราฟ (Pantograph) เมื่อพิจารณาถึงค่าลบสูงสุดที่เป็นไปได้ของสายส่ง และเพื่อให้แน่ใจว่าจำเป็นสำหรับแพนโทกราฟ (Pantograph) และแรงสัมผัสของสายส่งเหนือหัว ความสูงสูงสุดของการออกแบบสายส่งจึงไม่ควรเกิน 6500 มม.

2.3.5.3 ความสูงโดยเฉลี่ยของสายส่งเหนือหัว [4]

ความสูงโดยเฉลี่ยของสายส่งคือระยะห่างในแนวตั้งระหว่างสายส่งที่จุดติดตั้งและระดับราง และสามารถหาค่าได้ระหว่างความสูงขั้นต่ำในการออกแบบของสายส่งและความสูงสูงสุดของการออกแบบของสายส่ง เมื่อกำหนดความสูงของสายส่งได้แล้ว จะพิจารณาการหย่อนของสายส่งต่อไป ที่ความหย่อนในช่วงบวกที่มากที่สุด ความสูงของสายส่งต้องไม่น้อยกว่าความสูงขั้นต่ำของสายส่ง ที่ความหย่อนในช่วงลบที่มากที่สุด ความสูงของสายส่งต้องไม่เกินความสูงสูงสุดของสายส่ง เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าว ค่าความสูงโดยเฉลี่ยของสายส่งจะได้แก่ 5800-6000 มม. ในทางปกติและระหว่างสถานี, 6200 มม. ที่สถานี, 6400-6450 มม. ที่สถานีพิเศษและสถานีขนาดใหญ่ และ 5300 มม. ในทางรถไฟความเร็วสูงที่มีความเร็วมากกว่า 300 กม./ชม.



รูปที่ 2.20 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) ลมไหลผ่านออกได้ ไม่ถูกควบคุม [8]

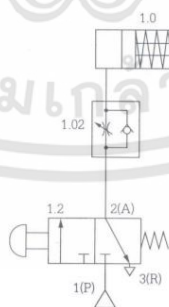


รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) [7]

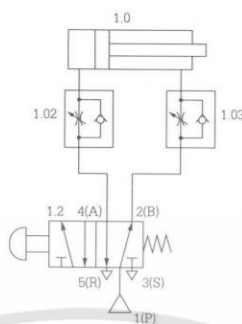
หลักการทำงาน จากรูปที่ 2.17 และ 2.18 เมื่อให้ลมเข้าด้าน 2(A) ลมสามารถดันลิ้นหรือลูกบอลของวาล์ว (Valve) กลับ และผ่านได้สะดวกโดยไม่ถูกควบคุม แต่ถ้าเปลี่ยนให้ลมเข้าด้าน 1(P) ลมจะดันลิ้นหรือลูกบอลให้ปิดทาง ทำให้ลมออกไม่ได้ ลมจึงไหลผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) อย่างช้าๆ ซึ่งจะปรับให้ลมไหลออกช้าๆด้วยมือ การนำไปใช้งาน ใช้กับวงจรที่ต้องการควบคุมให้ลูกสูบทำงานอย่างช้าๆ ซึ่งจะติดตั้งโดยตรงที่ท่อทางเข้าและออกของกระบอกสูบ การติดตั้งมี 2 วิธีคือ

- การติดตั้งแบบควบคุมลมเข้า (Inlet air controlled หรือ Meter in) แสดงได้ดังรูปที่ 2.20

และ 2.21



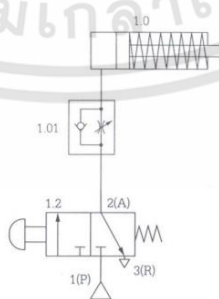
รูปที่ 2.22 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) แบบควบคุมลมเข้าบนกระบอกสูบทางเดียว [8]



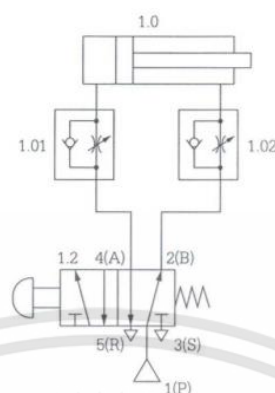
รูปที่ 2.23 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) แบบควบคุมลมเข้าบน
กระบอกสูบทำงานสองทาง [8]

หลักการทำงาน จากรูปที่ 2.20 เมื่อกดวาล์ว (3/2) 1.2 ลมจะไหลจาก 1(P) ไป 2(A) ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล (One way flow control valve) 1.02 ทำให้ปริมาณลมถูกปรับให้น้อยตามต้องการ ลูกสูบจึงเคลื่อนที่ออกอย่างช้าๆ เมื่อปล่อยมือวาล์ว (Valve) (3/2) 1.2 จะเลื่อนกลับโดยสปริง ลมจากกระบอกสูบจึงถูกระบายทิ้งโดยผ่านวาล์ว (Valve) กันกลับจากท่อ 2(A) ไป 3(R) ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับตามปกติด้วยแรงสปริงภายใน จากรูปที่ 2.21 เมื่อกดวาล์ว (Valve) (5/2) 1.2 ลมจะไหลจาก 1(P) ไป 4(A) ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control Valve) 1.02 ทำให้ปริมาณลมถูกปรับให้น้อยตามต้องการ ลูกสูบจึงเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ส่วนทางก้านสูบ ลมจะระบายทิ้งผ่านวาล์ว (Valve) กันกลับ 1.03 โดยไม่ถูกควบคุมลมออก เมื่อปล่อยมือ วาล์ว (Valve) (5/2) 1.2 จะเลื่อนกลับโดยสปริง ลมจึงเข้าจาก 1(P) ไป 2(B) ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) 1.03 ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับอย่างช้าๆ ด้านลูกสูบลมจะระบายทิ้งผ่านวาล์วกันกลับ 1.02 โดยไม่ถูกควบคุมลมออก

- การติดตั้งแบบควบคุมลมออก (Outlet air controlled หรือ Meter out) แสดงได้ดังรูปที่ 2.22 และ 2.23



รูปที่ 2.24 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) แบบควบคุมลมออก
บนกระบอกสูบทางเดียว [8]



รูปที่ 2.25 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเดียว (One way flow control valve) แบบควบคุมลมออก
บนกระบอกสูบทำงานสองทาง [8]

หลักการทำงาน จากรูปที่ 2.22 เมื่อกดวาล์ว (Valve) (3/2) 1.2 ลมจะไหลจาก 1(P) ไป 2(A) ผ่านวาล์ว (Valve) กันกลับ 1.01 และลูกสูบเคลื่อนที่ออกตามปกติ เมื่อปล่อยมือ วาล์ว (Valve) (3/2) 1.2 จะเลื่อนกลับโดยสปริง ลมจากกระบอกสูบจึงระบายทิ้งผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) 1.01 ทำให้ปริมาณลมถูกปรับให้น้อยตามต้องการ ลมจะระบายทิ้งอย่างช้าๆ และลูกสูบเคลื่อนที่กลับอย่างช้าๆ จากรูปที่ 2.23 เมื่อกดวาล์ว (Valve) (5/2) 1.2 ลมจะไหลจาก 1(P) ไป 4(A) ผ่านวาล์ว (Valve) กันกลับ 1.01 และลูกสูบจะเคลื่อนที่ออก แต่ลมที่ระบายทิ้งทางด้านก้านสูบจะถูกควบคุมปริมาณการไหลโดยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) 1.02 ทำให้ลมระบายทิ้งอย่างช้าๆ ลูกสูบจึงเคลื่อนที่ออกอย่างช้าๆ ในทำนองเดียวกัน เมื่อปล่อยมือ วาล์ว (Valve) (5/2) 1.2 จะเลื่อนกลับโดยสปริง ทำให้ลมไหลเข้ากระบอกสูบ โดยผ่านวาล์ว (Valve) กันกลับ 1.02 แต่ลมระบายทิ้งจะถูกควบคุมโดยวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) 1.01 ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับอย่างช้าๆ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบวงจรการควบคุมลมเข้าและลมออกจากกระบอกสูบ [8]

การควบคุมลมเข้า	การควบคุมลมออก
1. ลมไหลเข้ากระบอกสูบช้าๆ ต้องสะสมความดันในการสตาร์ท	1. เมื่อมีลมเข้ากระบอกสูบ ลูกสูบจะเคลื่อนที่ออกทันทีโดยไม่ต้องสะสมความดัน
2. การเคลื่อนที่ลูกสูบไม่สม่ำเสมอ เพราะไม่มี ความดันลมมาต้านทางด้านก้านสูบ	2. การเคลื่อนที่ของลูกสูบจะสม่ำเสมอเพราะมี ความดันลมมาต้านทางด้านก้านสูบ
3. เหมาะสำหรับกระบอกสูบที่มีขนาดเล็กหรือ กระบอกสูบทางเดียว	3. เหมาะสำหรับกระบอกสูบทำงานสองทาง

2.3.6.2 การคำนวณวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) [10]

ค่าสัมประสิทธิ์การไหล (C_v) เป็นสูตรที่ใช้ในการกำหนดการไหลของวาล์วภายใต้สภาวะต่างๆ และเพื่อเลือกวาล์ว (Valve) ที่ถูกต้องสำหรับการใช้งานการไหล ค่า (C_v) ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้กับการไหลของของเหลว โดยแสดงการไหลเป็นแกลลอนต่อนาทีของน้ำ 60°F โดยมีแรงดันตกคร่อมวาล์ว (Valve) 1 psi อย่างไรก็ตาม ค่า (C_v) เดียวกันนี้สามารถใช้เพื่อกำหนดการไหลของก๊าซผ่านวาล์ว (Valve) ได้ สูตรจะซับซ้อนมากขึ้นสำหรับก๊าซ เนื่องจากก๊าซเป็นของเหลวที่อัดได้และได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ นอกจากนี้ ต้องใช้สองสูตรในการประเมินการไหลอย่างแม่นยำ เมื่อแรงดันทางเข้าเท่ากับหรือมากกว่าสองเท่าของแรงดันปลายทาง จะเรียกว่าสถานการณ์ "การไหลแบบสำลัก (Choked Flow)" สิ่งนี้จำเป็นต้องใช้สูตรอัตราไหลวิกฤต (Critical Flow) หากแรงดันทางเข้าน้อยกว่าสองเท่าของแรงดันปลายทาง ควรใช้สูตรการไหลแบบอนุวิกฤต (Sub-Critical Flow)

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสมการกรณีการไหลที่ต่างกันในวาล์วควบคุมอัตราการไหล [10]

การไหลแบบวิกฤต (Critical Flow) เมื่อ $P_1 \geq 2P_2$	การไหลแบบอนุวิกฤต (Sub-Critical Flow) เมื่อ $P_1 < 2P_2$
$C_v = Q_G \frac{\sqrt{S.G. \times T}}{816 \times P_1}$	$C_v = \frac{Q_G}{962} \sqrt{\frac{(S.G. \times T)}{(P_1^2 - P_2^2)}}$
$Q_G = C_v \frac{816 \times P_1}{\sqrt{S.G. \times T}}$	$Q_G = 962 \times C_v \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{(S.G. \times T)}}$

โดย C_v คือ สัมประสิทธิ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหล

Q_G คือ อัตราการไหลในหน่วยมาตรฐานลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง

$S.G.$ คือ ความถ่วงจำเพาะของตัวกลาง ที่อากาศ 70°F และ 14.7 psia = 1.0

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ใน °R (°F + 460)

P_1 คือ ความดันทางเข้า หน่วย psia

P_2 คือ ความดันทางออก หน่วย psia

2.3.7 ปริมาณลมที่ใช้ (อัตราการใช้ลม) [8]

อัตราการใช้ลมที่ต้องใช้ทำให้กระบอกสูบทำงาน สามารถคำนวณได้จากปริมาตรของกระบอกสูบ และปริมาตรของท่อ ปริมาตรของท่อจะแตกต่างกันตามวิธีการเดินท่อ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณปริมาณลมที่ใช้จากปริมาตรของกระบอกสูบดังต่อไปนี้

$$Q_{air} = \frac{(A_1 + A_2) \times L \times \left(\frac{P + 1.033}{1.033} \right) \times n}{1000} \quad (2.15)$$

โดย Q_{air} คือ ปริมาณลมที่ใช้ (ลิตร)

L คือ ช่วงชักกระบอกสูบ (ซม.)

A_1 คือ พื้นที่ลูกสูบด้านลูกสูบ (ตร.ซม.)

A_2 คือ พื้นที่ลูกสูบด้านก้านสูบ (ตร.ซม.)

P คือ ความดันลม (กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)

n คือ จำนวนครั้งที่ลูกสูบเคลื่อนที่ไปกลับต่อนาที

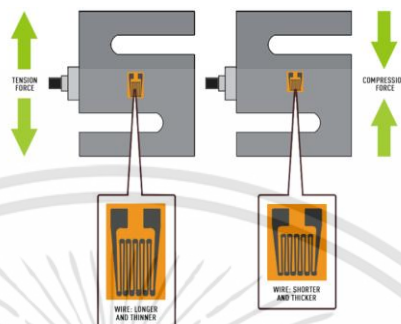
2.3.8 โหลดเซลล์ (Load cell) [9]

โหลดเซลล์ (Load cell) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวโหลด เซลล์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Load cell) เราสามารถนำสัญญาณทางไฟฟ้านี้ไปจ่ายเข้าจอแสดงผล แสดงค่าเป็นน้ำหนักหรือแรงที่กระทำ โดยโหลดเซลล์ส่วนใหญ่ถูกสร้างจากสเตรนเกจ (Strain gauge) (โดยจะมีบางส่วนทำจากไฮดรอลิก (Hydraulic) เพียโซรีซิสทีฟ แมกเนโตสตริกทีฟ (Piezoelectric magnetostrictive) และนิวเมติกส์ (Pneumatic) แต่นิยมใช้แบบสเตรนเกจ (Strain gauge) เนื่องจากรองรับการทำงานได้ดีกว่าและมีต้นทุนที่เหมาะสม) โดยที่จัดเรียงวงจรในรูปแบบวงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ซึ่งสามารถแปลงค่าแรงกด หรือแรงดึงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

2.3.8.1 หลักการทำงานของโหลดเซลล์ (Load cell) [9]

หลักการของโหลดเซลล์ (Load cell) ประเภทนี้ก็คือ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียด จะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ หลักการทำงานของโหลดเซลล์ (Load cell) คือ การใช้แผ่นสเตรนเกจ (Strain gauge) ติดกับแท่งเหล็ก ซึ่งมีปลายด้านหนึ่งของแท่งเหล็กยึดกับพื้น ซึ่งหลักจากรับแรงจากอีกด้านจะทำให้แท่งเหล็กงอ จากแรงที่กระทำนี้ทำให้แผ่นสเตรนเกจยึด

ออก ทำให้เกิดค่าความต้านทานของแผ่นสเตรนเกจ (Strain gauge) มากขึ้น ซึ่งความต้านทานจะแปรผันตรงกับการงอของแท่งเหล็ก



รูปที่ 2.26 รูปแสดงหลักการทำงานของสเตรนเกจ (Strain gauge) [9]

โดยในโหลดเซลล์ (Load cell) จะมีวงจรบริดจ์ (Wheatstone bridge) ที่เกิดจากการนำแผ่นสเตรนเกจ (Strain gauge) 4 ตัวมาต่อกัน โดยจะทำการต่อด้านบนและด้านล่างข้างละ 2 แผ่น โดยสาเหตุที่ต้องใช้สเตรนเกจ (Strain gauge) 4 แผ่น มาจากการที่ใช้สเตรนเกจ (Strain gauge) เพียงแผ่นเดียว จะเกิดค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานที่น้อยเกินไป จึงต้องทำการต่อแบบบริดจ์ (Bridge) เพื่อให้ทำการจัดการเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานได้ง่ายมากขึ้น โดยจะส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์/โวลต์

2.3.8.2 ประเภทของโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ [9]

1. โหลดเซลล์แบบแท่งแรงเฉือน (Shear Beam Load Cell)



รูปที่ 2.27 โหลดเซลล์แบบแท่งแรงเฉือน โหลดเซลล์แบบแท่งแรงเฉือน (Shear Beam Load Cell) [9]

โหลดเซลล์แบบแท่งแรงเฉือน (Shear Beam Load Cell) เป็นโหลดเซลล์ (Load Cell) ที่ใช้งานโดยยึดปลายด้านหนึ่งเข้ากับฐานและนำถึงวางลงบนปลายอีกด้านหนึ่ง เพื่อวัดแรงกด ซึ่งจะใช้ 4 ตัว

ต่อ 1 ถึง นิยมใช้มากในการชั่งน้ำหนักในถัง เช่น การชั่งน้ำหนักหิน ทราวยในถังก่อนปล่อยลงไปผสมกับซีเมนต์และน้ำในแพลนคอนกรีตผสมเสร็จ มีขนาดตั้งแต่ 250 กิโลกรัม ถึง 10 ตัน โดยเป็นสเตรนเกจ (Strain gauge) ประเภทรับแรงกด

2. โหลดเซลล์แบบทรีคสเกล (Truck scale Load cell)



รูปที่ 2.28 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบทรีคสเกล (Truck Scale Load cell) [9]

โหลดเซลล์แบบทรีคสเกล (Truck Scale Load cell) คือ โหลดเซลล์ (Load cell) ที่เหมือนกับนำ โหลดเซลล์แบบแท่งแรงเฉือน (Shear Beam Load Cell) จำนวนสองตัวมารวมกัน ซึ่งจะให้มีจำนวนสเตรนเกจ (Strain gauge) มากขึ้น ทำให้ได้ความละเอียดมากขึ้น การติดตั้งโดยยึดปลายทั้งสองข้างด้วยสกรูติดกับฐาน และนำถังมาวางตรงกลางโดยมีลูกบอล และเบ้ายึดกับถัง และโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อให้ถังสามารถขยับได้แต่ไม่หลุด นิยมใช้ในงานชั่งที่มีน้ำหนักมาก ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้ชั่งถัง หรือไซโลที่มีขนาดใหญ่ จะติดตั้งไว้ที่ขาของถังหรือไซโล (Sรสน) มีขนาดตั้งแต่สิบไปจนถึงห้าสิบลตัน โดยเป็นสเตรนเกจ (Strain gauge) ประเภทรับแรงกด

3. โหลดเซลล์แบบจุดเดียว (Single Point Load cell)



รูปที่ 2.29 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบจุดเดียว (Single Point Load cell) [9]

โหลดเซลล์แบบจุดเดียว (Single Point Load cell) เป็นโหลดเซลล์ (Load cell) ที่ออกแบบมาเพื่อให้ใช้กับแท่นวาง ขนาดเล็ก สำหรับงานชั่งที่น้ำหนักน้อยกว่า 1 ตัน โดยใช้โหลดเซลล์ (Load cell)

เพียงตัวเดียว โดยยึดโหลดเซลล์ (Load cell) เข้าที่จุดศูนย์กลางของแท่นวาง มีขนาดน้ำหนัก ตั้งแต่ 2 กิโลกรัม ถึง 800 กิโลกรัม และยังสามารถชั่งในช่วงน้ำหนักในช่วงที่น้อยกว่า 2 กิโลกรัมได้ โดยในส่วนนี้ นิยมทำเป็นตราชั่ง และวัดแรงกดในชุดทดลอง โดยเป็นสเตรนเกจ (Strain gauge) ประเภทรับแรงกด

4. โหลดเซลล์แบบแท่งงอ (Bending Beam Load cell)



รูปที่ 2.30 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบแท่งงอ (Bending Beam Load cell) [9]

โหลดเซลล์แบบแท่งงอ (Bending Beam Load cell) เป็นโหลดเซลล์ (Load cell) ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการแปลงแรงบิดที่กดที่ปลายด้านหนึ่งและปลายอีกด้านที่ยึดติดกับฐานที่มีลักษณะคล้ายสปริง โดยโหลดเซลล์ (Load cell) แบบแท่งงอประเภทนี้จะให้สัญญาณได้ดีที่ขนาดแรงกดไม่มาก โดยเริ่มตั้งแต่ยี่สิบห้า ไปจนถึงห้าร้อยกิโลกรัม โดยเป็นสเตรนเกจ (Strain gauge) ประเภทรับแรงกด

5. โหลดเซลล์แบบแพนเค้ก (Pancake Load cell)



รูปที่ 2.31 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบแพนเค้ก (Pancake Load cell) [9]

โหลดเซลล์แบบแพนเค้ก (Pancake Load cell) เป็นโหลดเซลล์ (Load cell) ที่มีรูปร่างคล้ายขนมแพนเค้ก (Pancake) สามารถใช้ได้ทั้งแรงกดและแรงดึงมีแม่นยำสูง โดยค่า ความเป็นเส้นตรง และ

ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ในระดับ 0.05% เนื่องจากมีจำนวนสเตรนเกจ (Strain gauge) มากกว่าโหลดเซลล์ (Load cell) ชนิดอื่น นิยมใช้สำหรับงานเครื่องทดสอบแรงกดหรือแรงดึง มีขนาดตั้งแต่ 500 กิโลกรัม ถึง 500 ตัน โดยเป็นสเตรนเกจ (Strain gauge) ประเภทรับแรงกด

6. โหลดเซลล์แบบกระป๋อง (Canister Load cell)



รูปที่ 2.32 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบกระป๋อง (Canister Load cell) [9]

โหลดเซลล์แบบกระป๋อง (Canister Load cell) เป็นโหลดเซลล์ (Load cell) ที่มีรูปร่างคล้ายกระป๋อง โดยเป็นโหลดเซลล์ (Load cell) ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการรับแรงกด ซึ่งค่าที่ได้นั้นยังมีความแม่นยำสูง โดยค่าความเป็นเส้นตรง และฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) อยู่ในระดับ 0.05% โดยทั่วไปนิยมนำมาใช้กับเครื่องชั่งทั่วไปที่ต้องการความแม่นยำสูง และเครื่องชั่งรถบรรทุก ที่มีขนาดตั้งแต่ 200 กิโลกรัม ไปจนถึง 20 ตัน โดยที่แรงดึงนั้นต้องมีขนาดตั้งแต่ 500 กิโลกรัม ไปจนถึง 500 ตัน โดยเป็นสเตรนเกจ (Strain gauge) ประเภทรับแรงกด

7. โหลดเซลล์แบบเอสบีเอ็ม (S-Beam Load cell)



รูปที่ 2.33 รูปแสดงโหลดเซลล์แบบเอสบีเอ็ม (S-Beam load cell) [9]

โหลดเซลล์แบบเอสบีเอ็ม (S-Beam Load cell) เป็นโหลดเซลล์ (Load cell) ที่ใช้งานโดยยึดด้านบนกับโครงสร้างโดยใช้ลูกปืนตาเหล็ก ส่วนด้านล่างใช้แขวนถึงที่ต้องการชั่ง ซึ่งจะช่วยให้ถึงสามารถแกว่งตัวเล็กน้อยได้โดยที่ไม่มีผลกับการชั่ง มีขนาดตั้งแต่ 2 กิโลกรัม ถึง 5 ตัน โดยเป็นสเตรนเกจ (Strain gauge) ประเภทรับแรงดึง

โดยจากโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain gauge load cell) ที่กล่าวมาข้างต้น โหลดเซลล์สเตรนเกจแบบจุดเดียว (Single point strain gauge load cell) เหมาะสมที่จะใช้ในการวัดแรงสัมผัสของสายส่งที่สุดเนื่องจาก คุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแสดงผลแรงที่มีช่วงต่างๆได้ดี รวมไปถึง ใช้งานปกติโหลดเซลล์สเตรนเกจแบบจุดเดียว (Single point strain gauge load cell) นิยมนำไปทำในส่วนของตราชั่ง และวัดแรงกดในชุดทดลอง อีกทั้งรวมถึงความเหมาะสมในการติดตั้งสำหรับในชุดทดลองนี้ โหลดเซลล์สเตรนเกจแบบจุดเดียว (Single point strain gauge load cell) จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกใช้

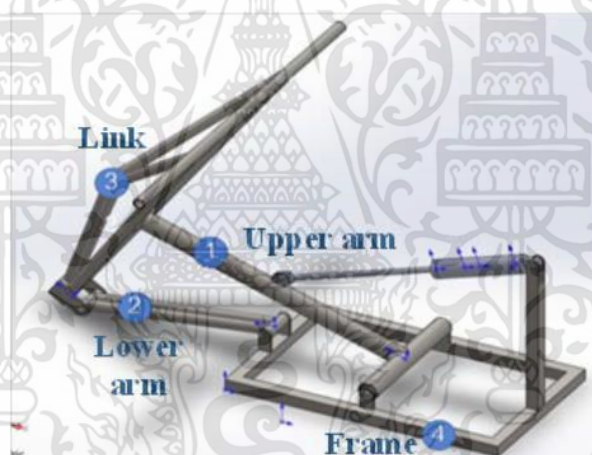
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์และขั้นตอนการทำงาน เริ่มต้นจากการกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน โดยต่อไปทำการศึกษาระบบการทำงานของชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph) ทำการทดลองการทำงานของแพนโทกราฟ (Pantograph) ลักษณะการยกขึ้นยกลงของชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph) จากนั้นทำการออกแบบการควบคุมการทำงานของแพนโทกราฟ (Pantograph) รวมไปถึงจนถึงการแบบระบบอัตโนมัติในการควบคุมการทำงานของแพนโทกราฟ (Pantograph)

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

3.1.1 แบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) TSG3 Pantograph อัตราส่วน 1: 3.33



รูปที่ 3.1 แบบจำลองส่วนประกอบของชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph) [3]



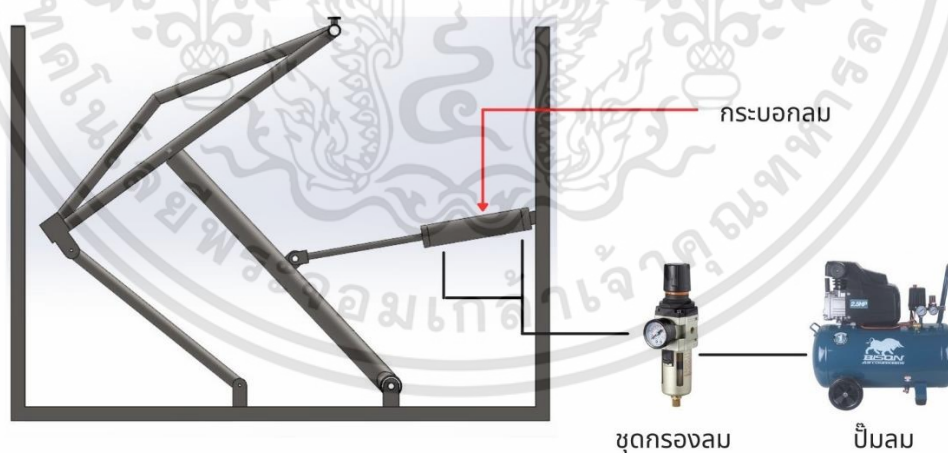
รูปที่ 3.2 ชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph)

พารามิเตอร์	ชิ้นส่วน			
	1. โครง	2. แขนด้านหน้า	3. แขนด้านบน	4. แขนด้านหลัง
มวล (กรัม)	3104.39	1262.43	3573.17	677.55
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร ³)	0.00787	0.00787	0.00787	0.00787
จุดศูนย์กลางมวล (มิลลิเมตร)				
แกน x	327.92	0.45	350.48	-0.00051
แกน y	64.75	187.87	30.67	170.64
แกน z	-152.09	0.00835	-0.00868	-0.00019
โมเมนต์ความเฉื่อย (กรัม × มิลลิเมตร ³)	53449886	50000000	551000000	27600000

โดยระบบการทำงานของชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph) เป็นดังนี้



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการทำงานของชุดการทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph) ที่เคลื่อนที่ยกขึ้นด้วยกระบอกสูบด้วยระบบนิวเมติกส์ (Pneumatic) โดยจะเริ่มยกขึ้นได้ที่ความดัน 0.28 MPa และใช้ความดันที่ 0.28 MPa มาใช้ในการทำงานของชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph)

3.1.2 วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)

นำมาใช้เพื่อควบคุมอัตราการไหลของลม ใช้สำหรับปรับอัตราการไหลของลมในระบบลมโดยเฉพาะ นำมาใช้ในการลดอัตราการไหลของลมที่มาจากชุดกรองลมให้ช้าลง เพื่อให้ชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph) ใช้เวลาในการเคลื่อนที่มากขึ้น



รูปที่ 3.4 วาล์วควบคุมอัตราการไหล

ตัววาล์วควบคุมอัตราการไหลแบบทางเดียว (One Way Flow Control Valve) คือเป็นวาล์ว (Valve) ที่มีลมถูกควบคุมปริมาณการไหลให้ไหลได้ทางเดียว ส่วนอีกทิศทาง ลมจะไหลผ่านวาล์ว (Valve) กลับโดยไม่ถูกควบคุม โดยจะทำการติดตั้งแบบควบคุมลมออก (Outlet air controlled หรือ Meter out) โดยการติดตั้งแบบควบคุมลมออก เนื่องจากเหมาะสมกับกระบอกสูบที่ทำงานสองทาง อีกทั้งยังส่งผลให้การเคลื่อนที่ของลูกสูบจะสม่ำเสมอเพราะมีความดันลมมาต้านทางด้านกันสูบ จึงเหมาะสมกับการใช้กับสิ่งที่ต้องการ คือ การทำให้อัตราการไหลของลมที่มาจากชุดกรองลมให้ช้าลง เพื่อให้ชุดทดลองแพนโทกราฟ ใช้เวลาในการเคลื่อนที่มากขึ้น

3.1.3 สายลม



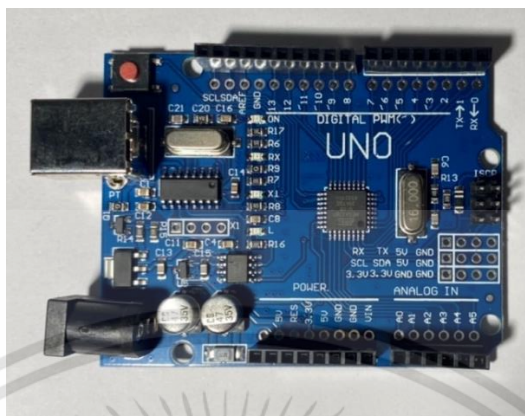
รูปที่ 3.5 สายลม

สายลมทำจากวัสดุโพลีเอทิลีน ซึ่งมีความยืดหยุ่นและนุ่มกว่าสายไนลอน (Nylon) และสายยาง สามารถโค้งงอได้ในองศาที่ค่อนข้างแคบทำให้มีความทนทาน สายวงนอกขนาด 4 มิลลิเมตร และ วงในขนาด 2 มิลลิเมตร เป็นสายที่สามารถต่อจากชุดกรองลมแล้วสามารถเชื่อมต่อกับทุกอุปกรณ์ได้เลย ใช้เป็นทางเดินของลมระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ

3.1.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน่ (Arduino microcontroller)

อาดูโน่ (Arduino) คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นการรวมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) ต่างๆ ประกอบเป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic board) ขนาดเล็ก โดยมีหน้าที่ใช้ติดต่อสื่อสารและควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ด้วยการเขียนโปรแกรมให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมการรับส่งสัญญาณทางไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ ที่เลือกใช้อุปกรณ์นี้ในการควบคุม เพราะเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ง่าย ติดตั้งทุกอย่างมาอยู่แล้ว ใช้โค้ดภาษาซีในการเขียนซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรม

อาดูโน่ (Arduino) ที่เลือกใช้เป็นประเภทเอสเอ็มดี (SMD) ซึ่งมีความสามารถเหมือนกับ Uno R3 ทุกอย่างแต่ราคาถูกกว่า เพราะใช้ IC Atmega328 เป็นแบบเซอร์เฟซเมาส์ (Surface Mouse) และเปลี่ยนตัวส่งการยูเอสบี (USB Driver) เป็น CH340G ซึ่งเป็นชิพรุ่นใหม่ที่ดีกว่า



รูปที่ 3.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน่ (Arduino microcontroller)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน่ (Arduino microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์	ATmega328
แหล่งจ่ายไฟ	5V
ไฟเข้า (แนะนำ)	7-12V
ไฟเข้า (จำกัดไว้ที่)	6-20V
ขาดิจิตอล I/O	14 ขา (6 รองรับเอาต์พุตแบบ PWM)
ขานาล็อกอินพุต	6 ขา
กระแสไฟฟ้า DC ต่อขา I/O	40 mA
กระแสไฟฟ้าออก DC สำหรับขา 3.3V	50 mA
ความจำระยะสั้น	32 KB (ATmega328)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบชุดสายส่งเหนือหัว



รูปที่ 3.7 ลวดทองแดงภายในสายไฟซิลิโคน

การทำสายส่งเหนือหัวทองแดงเสมือนของจริง เพื่อให้ได้น้ำหนักที่เท่ากับของจริงในขนาดย่อส่วนในอัตราส่วน 1:3.33 มากที่สุด จึงทำการนำเส้นทองแดงออกจากสายไฟฟ้าตัวนำทองแดง โดยนำเอาสายทองแดงหน้าตัดขนาด 1x1 มิลลิเมตร ความยาว 1 เมตร และนำเอาตัวฉนวนข้างนอกออก จากนั้นนำเอาเฉพาะทองแดงในสายไฟ โดยต้องการสายทองแดงที่มีน้ำหนักโดยประมาณ 0.4 กิโลกรัมต่อความยาว 1 เมตร



รูปที่ 3.8 สายทองแดงเปลือยภายในสายซิลิโคน

จากการนำเอาทองแดงออกมาจากสายไฟ จะได้น้ำหนักของสายทองแดง 9 กรัม ต่อ 1 เมตร ดังนั้นจึงต้องการทองแดง โดยประมาณ 44 เส้นในการรวมกัน เพื่อให้ได้สายส่งตามน้ำหนักที่ต้องการ



รูปที่ 3.9 แสดงการพันเกลียวสายทองแดง

โดยจะทำการจับคู่พันเกลียวเป็นคู่ โดยรวมตั้งแต่สายเดียวกับสายเดี่ยว สายคู่กับสายคู่ ในขั้นตอนสุดท้าย จะได้สายเกลียว 16 เส้น, 16 เส้น และ 12 เส้น จากนั้นนำทั้งหมดมารวมกันจนครบทุกเส้น จะได้สายทองแดงขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักประมาณ 0.4 กิโลกรัม ต่อ ความยาว 1 เมตร



รูปที่ 3.10 รูปแสดงสายทองแดงเสมือนสายจริง

โดยขั้นตอนสุดท้ายจะทำการติดหางปลาไว้ที่ปลายสายส่งทองแดงทั้ง 2 ข้าง เพื่อใช้ในการยึดเพื่อปรับระดับ ความตึงเชือกไว้ในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 3.11 หางปลาทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเลือกโหลดเซลล์ (Load cell) ที่เหมาะสมกับระบบและการติดตั้ง

3.3.1 การเลือกโหลดเซลล์ (Load cell) ที่เหมาะสม

ในการเลือกใช้โหลดเซลล์ (Load cell) จำเป็นต้องรู้ประเภทแรงที่ต้องการวัดและน้ำหนักโดยรวมของแรง เพื่อทำการเลือกหาโหลดเซลล์ (Load cell) ที่เหมาะสมมาติดตั้งในระบบ โดยเราจะพิจารณาจาก ประเภทแรงที่กระทำ และแรงกระทำโดยรวม

ขั้นตอนแรก พิจารณาจากสายส่งเหนือหัวที่ได้ทำการออกแบบไว้ในหัวข้อก่อนหน้า โดยจะพิจารณาจุดที่จะนำโหลดเซลล์ (Load cell) ไปติดตั้ง ซึ่งจะติดตั้งที่ส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) ดังนั้นเราจะพิจารณาจากแรงที่สายส่งกระทำกับส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) ซึ่งจะพิจารณาได้ว่าแรงที่สายส่งกระทำก็คือแรงในแนวตั้ง ประกอบด้วยน้ำหนักของสายส่งและแรงดึงในสายส่ง

จากนั้นจะทำการคำนวณหาแรงที่กระทำกับส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) โดยจะพิจารณาเป็นแรงที่กระทำกับส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) ด้วยแรงที่มีค่ามากที่สุด



รูปที่ 3.12 แสดงภาพอย่างง่ายของสายส่งเหนือหัวบนส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead)

โดยจะคำนวณแรงดึงในสายส่งโดยใช้สมการของสายเคเบิลแคทีนารี (Cable Catenary)

$$\text{สมการเพื่อหาสมการของสายส่งเหนือหัว} \quad y = ax^2; a = \frac{h}{x^2} \quad (3.1)$$

โดย h คือ ความสูงของเส้นเชือกในแนวตั้ง

x คือ ระยะห่างในแนวระดับของจุดปลายไปจนถึงจุดต่างๆบนสายเคเบิล (Cable)

$$\text{สมการเพื่อหาความยาวของสายส่งเหนือหัว} \quad s(x) = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (3.2)$$

โดย $s(x)$ คือ ความยาวของสายส่งเหนือหัวที่ระยะต่างๆ

$$\text{สมการเพื่อหาแรงดึงในสายส่งเหนือหัวตามแนวระดับ} \quad s(x) = \frac{T_0}{w_0} \sinh \frac{w_0 x}{T_0} \quad (3.3)$$

โดย T_0 คือ แรงดึงในสายเคเบิล (Cable) ในแนวระดับ

w_0 คือ น้ำหนักของสายเคเบิล (Cable) ต่อความยาว 1 เมตร

สมการเพื่อหาแรงตึงในสายส่งเหนือหัว $T = T_0 \cosh \frac{w_0 x}{T_0}$ (3.4)

โดย T คือ แรงตึงในสายส่งเหนือหัว

สมการเพื่อหามุมระหว่างแรงตึงในสายส่งเหนือหัวและแนวระดับ $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{w_0 s(x)}{T_0} \right)$ (3.5)

โดย θ คือ มุมระหว่างสายส่งเหนือหัวและแนวระดับ

ทำการคำนวณหาแรงตึงในสายส่งเหนือหัวโดยมีตัวแปรที่ทราบค่าดังนี้

h มีค่าเท่ากับ 0.05 เมตร

x มีค่าเท่ากับ 0.1665 เมตร

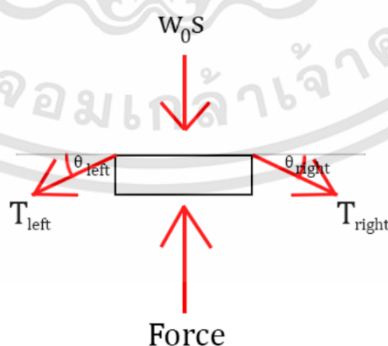
$$s = \int_0^{0.1665} \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 0.05}{0.1665^2} x \right)^2} dx, \quad s = 0.176 \text{ m}$$

$$0.176 = \frac{T_0}{3.7} \sinh \left(\frac{3.7 \cdot 0.1665}{T_0} \right), \quad T_0 = 1.06179 \text{ N}$$

$$T = 1.06179 \cdot \cosh \left(\frac{3.7 \cdot 0.1665}{1.06179} \right), \quad T = 1.2455 \text{ N}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{3.7 \cdot 0.176}{1.06179} \right), \quad \theta = 31.521^\circ$$

เมื่อทราบแรงตึงในสายส่งเหนือหัวและมุมของแรงตึงแล้ว ทำการหาแรงกระทำบนส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead)



รูปที่ 3.13 แผนภาพอิสระของส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead)

$$+\uparrow \sum F = 0$$

$$Force - T_{left} \sin \theta_{left} - T_{right} \sin \theta_{right} - W = 0$$

เมื่อแรงดึงในสายส่งเหนือหัวฝั่งซ้ายและขวามีค่าเท่ากัน เนื่องจากมีลักษณะ ความสูงและความยาวที่เท่ากัน

$$Force = 2T \sin \theta + w_0 s \quad (3.6)$$

โดย w_0 มีค่าเท่ากับ 3.7 N/m

s มีค่าเท่ากับ 0.03 เมตร

$$Force = (2 \times 1.2455 \sin 31.521^\circ) + (3.7 \times 0.03) = 0.144 \text{ kg}$$

ซึ่งการคำนวณเป็นการคำนวณที่อยู่ในสภาวะสมดุล ในทางปฏิบัติ โหลดเซลล์ (Load cell) จะถูกนำมาใช้ในสภาวะไดนามิกด้วย (Dynamic) ดังนั้นจึงต้องทำการคูณผลลัพธ์เพื่อไปที่ 3 เท่าของผลลัพธ์

$$Loadcell \text{ specs} = 0.144 \times 3 = 0.432 \text{ kg}$$

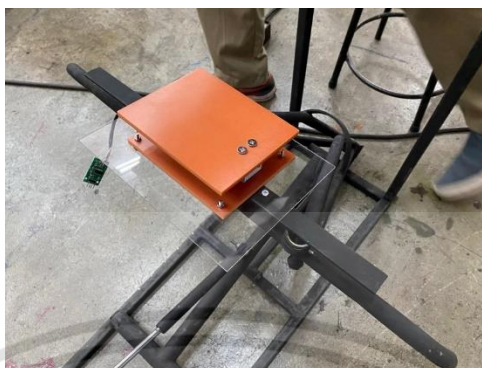
3.3.2 การติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อวัดแรงสัมผัส

การติดตั้งโหลดเซลล์สำหรับวัดแรงสัมผัส (Load cell) จะทำการติดโหลดเซลล์ (Load cell) ไว้ที่ส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph)



รูปที่ 3.14 แสดงการประกอบแผ่นอะคริลิกเข้ากับฐานโหลดเซลล์ (Load cell)

โดยขั้นตอนแรกนำแผ่นอะคริลิก (Acrylic) เจาะรูเพื่อใช้ประกอบยึดเข้ากับฐานของโหลดเซลล์ และทำการเจาะรูด้านข้างไว้เพื่อไว้ในส่วนของการนำไปยึดกับส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph)



รูปที่ 3.15 แสดงการประกอบโหลดเซลล์ (Load cell) เข้ากับส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead)

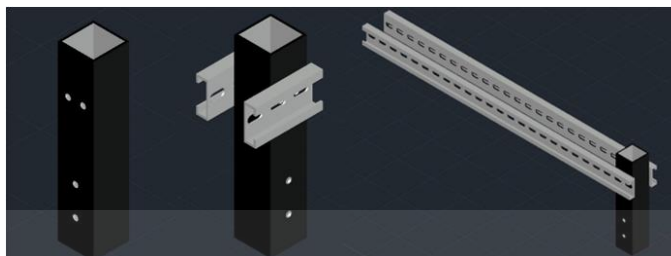
เจาะรูส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Panhead) ให้มีระยะเท่ากับรูที่เจาะไว้ของแผ่นอะคริลิก (Acrylic) โดยนำเอาสกรูและน็อต ยึดส่วนหัวของแพนโทกราฟ (Pantograph) และโหลดเซลล์ (Load cell) เข้าไว้ด้วยกัน

3.3.3 การออกแบบโครงสร้างสายส่งเหนือหัว



รูปที่ 3.16 การออกแบบแบบจำลองเหล็กกล่องในการยึดรางปรับระดับสายส่งกับโครงแพนโทกราฟ (Pantograph)

โดยการออกแบบ เนื่องจากกำหนดให้ความสูงของแบบจำลองสายส่ง อยู่ในระยะการออกแบบสายส่งสูงสุด และต่ำสุด จึงทำการต่อแท่งเหล็กกล่องสูงจากโครงแพนโทกราฟ 120 มิลลิเมตร ติดตั้งกับโครงของแพนโทกราฟ (Pantograph) โดยการเจาะรูบนโครงของแพนโทกราฟและเหล็กกล่อง จากนั้นวางแผนทำการยึดด้วยเหล็กฉากและสกรู โดยจะทำทั้งสองฝั่งของโครงแพนโทกราฟ (Pantograph)



รูปที่ 3.17 การออกแบบรางเพื่อปรับระดับความตึงเชือกของสายส่ง

ในส่วนของการปรับระดับความตึงเชือกของสายส่งแพนโทกราฟ (Pantograph) จะทำการเจาะรูแท่งเหล็กกล่อ่งให้มีความสูง 90 มิลลิเมตร จากด้านบนของโครงแพนโทกราฟ (Pantograph) ทั้งสองฝั่ง โดยนำเอารางอลูมิเนียม (Aluminium) ที่มีรูมายึดติดกับเหล็กกล่อ่งเพื่อที่จะยึดสายส่งด้วยสกรูผ่านทางปลา และสามารถปรับระดับได้ โดยทางฝั่งทางด้านหัวแพนโทกราฟ (Pantograph) (ด้านตรงข้ามกับลูกสูบ) ออกแบบเป็นรางยาวออกยื่นออกมา ในรางมีรูหลายระดับ เพื่อที่จะปรับระดับความตึงเชือกของสายส่ง ในส่วนของฝั่งลูกสูบ ออกแบบเป็นการให้มีรางยื่นออกมาเพียงรูเดียว เพื่อที่จะใช้เพื่อในการยึดสายส่งกับในส่วนของราง



รูปที่ 3.18 กระบวนการเจาะรู

ทำการเจาะรูตามที่ได้ออกแบบไว้ ในส่วนของเหล็กกล่อ่งที่ใช้เป็นเสาตั้งของสายส่ง และในส่วนของโครงแพนโทกราฟเดิม จากนั้นใช้เหล็กฉากยึดทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน



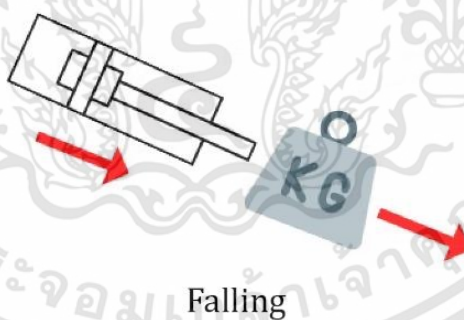
รูปที่ 3.19 แสดงการประกอบทางปลาเพื่อปรับระดับความตึงเชือกของสายส่ง

โดยจากการติดทางปลาไว้กับแบบจำลองสายส่งเหนือหัว สามารถปรับระดับความตึงเชือกได้โดยการนำสกรูสอดเข้าไประหว่างรูทางปลาและรางโดยยึดให้คงสภาพเดิมไว้ด้วยนัท

3.4 การออกแบบการติดตั้งและการเลือกวาล์วควบคุมอัตราการไหล

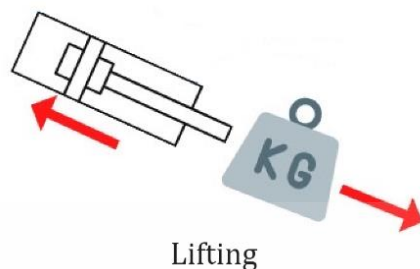
3.4.1 การเลือกรูปแบบในการติดตั้งวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)

การติดตั้งวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) จะพิจารณาจากทิศทางของแรงในกระบอกสูบและทิศทางการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบโดยพิจารณาเป็นสองช่วงคือ ช่วงขาขึ้น และ ช่วงขาลง



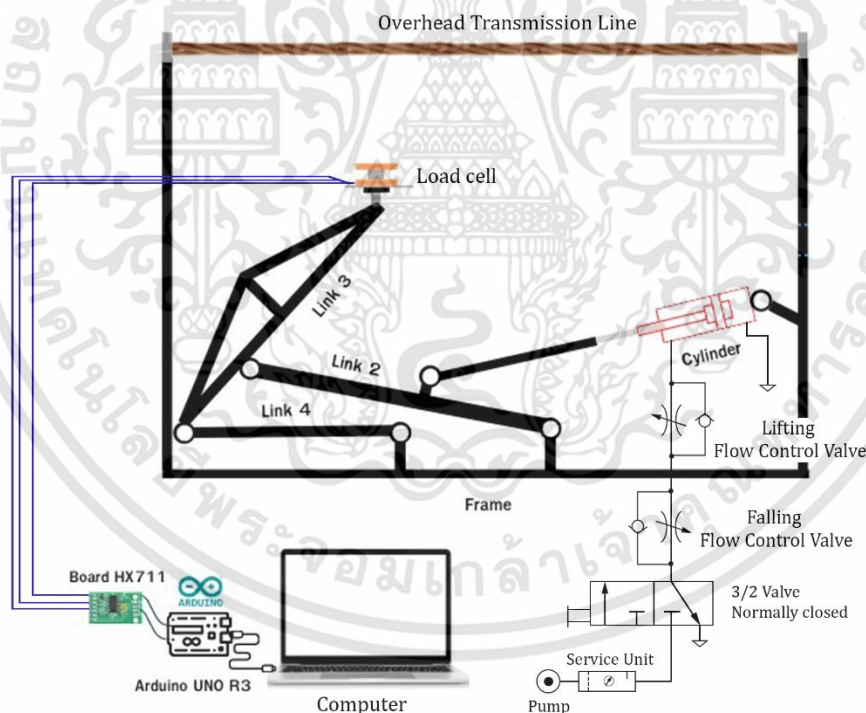
รูปที่ 3.20 แสดงทิศทางของแรงและการเคลื่อนที่ขณะแพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ลง

จากรูปที่ 3.20 แสดงภาพขณะแพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ลง โดยจะเป็นการตกลงแบบอิสระ ไม่มีการป้อนลมเข้าไปทางกระบอกสูบฝั่งลูกสูบ ทิศทางของการเคลื่อนที่ของลูกสูบจะมีทิศทางเดียวกับทิศทางของแรงหรือภาระ ซึ่งจะเรียกว่าเนกาทีฟโหลด (Negative Load) โดยแรงประเภทนี้จะเหมาะสมกับการต่อวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) ซึ่งจะเป็นการควบคุมลมที่ไหลออกจากฝั่งก้านสูบ (Meter out)



รูปที่ 3.21 แสดงทิศทางของแรงและการเคลื่อนที่ขณะแพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ขึ้น

จากรูปที่ 3.21 แสดงภาพขณะแพนโทกราฟเคลื่อนที่ขึ้น โดยจะมีการป้อนลมเข้าไปในกระบอกสูบฝั่งก้านสูบ ทิศทางของการเคลื่อนที่ของลูกสูบจะมีทิศสวนทางกับทิศทางของแรงหรือภาระ ซึ่งจะเรียกว่า โพลสิทีฟ โหลด (Positive Load) โดยแรงประเภทนี้จะเหมาะสมกับการต่อวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) ซึ่งจะเป็นการควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่งก้านสูบ (Meter in)

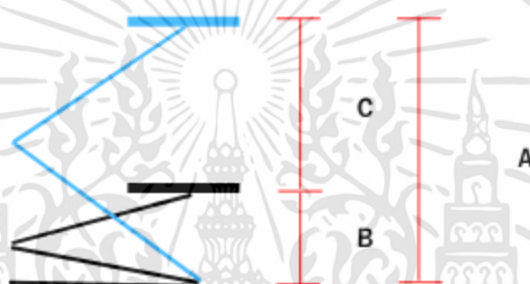


รูปที่ 3.22 แสดงภาพรวมของระบบแพนโทกราฟ (Pantograph)

จากรูปที่ 3.22 จะแสดงการต่อป้อนลมเข้าสู่ชุดบริการลมอัดเพื่อกำหนดความดันเปิดของระบบแพนโทกราฟ (Pantograph) ที่ 2.8 bar จากนั้นต่อเข้าวาล์ว 3/2 เพื่อสามารถให้ลมจ่ายเข้าไปยังกระบอกสูบฝั่งก้านสูบ

ขณะแพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ขึ้นได้ และให้ลมจากฝั่่งก้านสูบสามารถถ่ายออกสู่บรรยากาศ
 ขณะแพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่ลงได้ โดยจะมีวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) ที่ต่อแบบควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่่งก้านสูบ (Meter in) และ การควบคุมลมไหลจากฝั่่งก้านสูบ (Meter out) ที่ทางฝั่่งก้านสูบ และการปิดระบบแพนโทกราฟ (Pantograph) ทำได้โดยการหยุดจ่ายลมเข้าไปในระบบและให้แพนโทกราฟ (Pantograph) ตกลงอย่างอิสระภายใต้น้ำหนักของแพนโทกราฟ (Pantograph)

3.4.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)



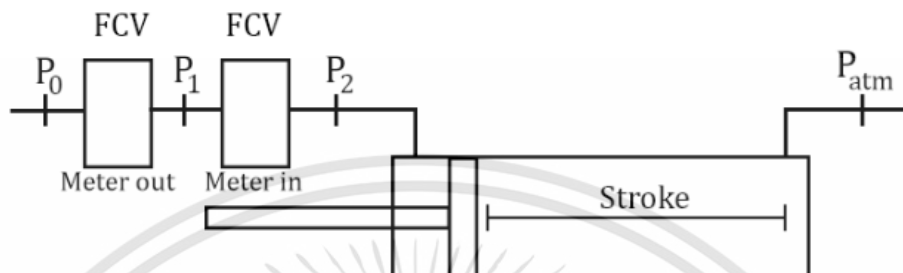
รูปที่ 3.23 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแพนโทกราฟ (Pantograph)

จากรูปที่ 3.23 แสดงตำแหน่งพารามิเตอร์บนแพนโทกราฟ (Pantograph) เพื่อนำมาหาเป้าหมายเวลาของแบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) โดยจะสามารถเขียนเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแพนโทกราฟ (Pantograph) ของจริงและแบบจำลอง

Item	Pantograph TSG 3	Model TSG3
Height at upper operating position (mm) (A)	2000	698
Height at lower operating position (mm) (B)	700	534
Operating height (mm) (C)	1300	164
Operating distance of panhead (mm)	1300	600
Rising time (s)	8	3.69
Falling time (s)	7	3.23

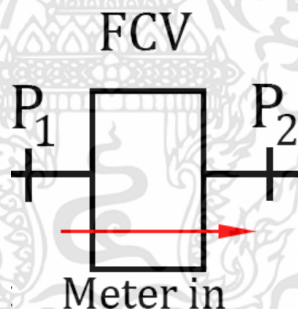
จากการออกแบบระบบให้หัวข้อก่อนหน้า สามารถแสดงภาพอย่างง่ายระหว่างกระบอกสูบและวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) ได้ดังนี้



รูปที่ 3.24 แสดงภาพรวมกระบอกสูบและวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)

โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์ของวาล์ว (Flow control valve) จะคำนวณโดยพิจารณาความดันที่ทางเข้าและทางออกของวาล์ว (Valve)

หาค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) ที่ต่อแบบควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่งก้านสูบ (Meter in)



รูปที่ 3.25 วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) แบบควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่งก้านสูบ (Meter in) และทิศการไหลของลม

กำหนดให้อัตราการไหลที่ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) มีค่าเท่ากับอัตราการไหลของกระบอกสูบ

$$\text{จากสมการอัตราการไหล } Q_{MI} = A_{RE} \times v = A_{RE} \times \frac{\text{Stroke}}{\text{Time}} \quad (3.7)$$

โดย Q_{MI} คือ อัตราการไหลที่ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลหน่วยมาตรฐานลูกบาศก์ฟุตต่อ

ชั่วโมง

A_{RE} คือ พื้นที่หน้าตัดฝั่งก้านสูบ

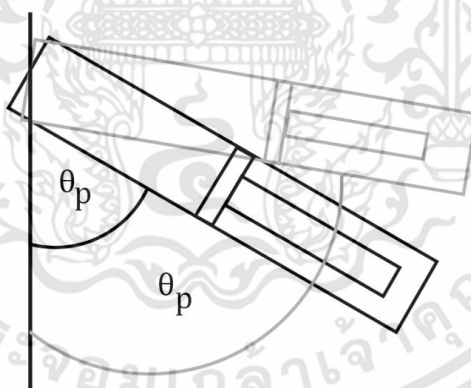
$Stroke$ คือ ระยะชักของกระบอกสูบ

$Time$ คือ ระยะเวลาการเคลื่อนที่ทั้งหมดของลูกสูบขณะเคลื่อนที่ขึ้นโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ

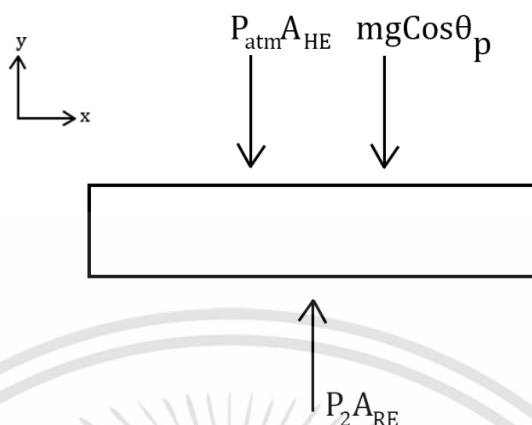
3.7 วินาที

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ } Q_{MI} &= A_{RE} \cdot v = A_{RE} \cdot \frac{Stroke}{time} \\
 &= \frac{\pi}{4} \cdot (0.025^2 - 0.01^2) \cdot \frac{0.1}{3.7} \\
 &= 1.114 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} \\
 &= 1.416 \text{ SCFH}
 \end{aligned}$$

ความดันที่จุด 1 คือความดันที่จ่ายเข้าระบบมีค่า 0.28 MPa ทำการหาค่าความดันที่จุด 2 ผ่านสมการสมดุลแรงที่ลูกสูบ แต่เนื่องด้วยกระบอกสูบมีการเปลี่ยนแปลงมุม แรงหรือภาระที่กระทำจึงมีการเปลี่ยน ดังนั้นจะพิจารณาความดันที่จุด 2 โดยใช้มุมเฉลี่ย



รูปที่ 3.26 แสดงมุมที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของกระบอกสูบ



รูปที่ 3.27 แผนภาพอิสระของกระบอกสูบ

$$\uparrow \sum F = 0$$

$$P_2 A_{RE} - P_{atm} A_{HE} - mg \cos \theta_p = 0$$

$$P_2 = \frac{P_{atm} A_{HE} + mg \cos \theta_p}{A_{RE}}$$

(3.8)

- โดย P_2 คือ ความดันทางออกของวาล์ว (Valve)
 P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ มีค่า 1.013×10^5 Pa
 m คือ มวลรวมของระบบ มีค่า 6.393 กิโลกรัม
 θ_p คือ มุมเฉลี่ยของกระบอกสูบ มีค่า 76 องศา
 d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ มีค่า 25 มิลลิเมตร
 d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ มีค่า 10 มิลลิเมตร

จากค่าที่กล่าวไปข้างต้น จะสามารถหาความดันที่จุด 2 จะได้ $P_2 = 157391.16$ Pa หรือ 22.83 psia เมื่อพิจารณาที่วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) จะพบว่าวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) จะอยู่ในกรณีการไหลแบบอนุวิฤต ($P_1 < 2P_2$)

จากสมการค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์วในการไหลแบบอนุวิกฤต

$$C_{v,MI} = \frac{Q_{MI}}{962} \sqrt{\frac{(S.G. \times T)}{(P_1 - P_2)}} \quad (3.9)$$

โดย $C_{v,MI}$ คือ สัมประสิทธิ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) ต่อแบบควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่งก้านสูบ (Meter in)

Q_{MI} คือ อัตราการไหลในหน่วยมาตรฐานลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง มีค่า 1.416 SCFH

$S.G.$ คือ ความถ่วงจำเพาะของตัวกลาง ที่อากาศ 70°F และ 14.7 psia = 1.0

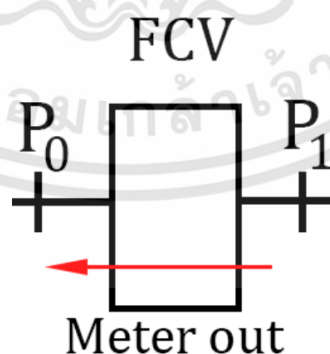
T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ใน °R (°F + 460) มีค่า 536.67 °R

P_1 คือ ความดันทางเข้าวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) หน่วย psia มีค่า 40.61 psia

P_2 คือ ความดันทางออกวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) หน่วย psia มีค่า 22.83 psia

เมื่อนำค่าดังกล่าวมาแทนลงในสมการจะได้ค่า $C_{v,MI}$ ที่ 1.015×10^{-3} ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) ที่ต่อแบบควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่งก้านสูบ (Meter in)

หาค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหลแบบต่อการควบคุมลมไหลจากฝั่งก้านสูบ (Meter out)



รูปที่ 3.28 วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) แบบต่อการควบคุมลมไหลจากฝั่งก้านสูบ (Meter out) และทิศการไหลของลม

กำหนดให้อัตราการไหลที่ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) มีค่าเท่ากับอัตราการไหลของกระบอกสูบ

$$\text{จากสมการอัตราการไหล } Q_{MO} = A_{RE} \times v = A_{RE} \times \frac{\text{Stroke}}{\text{Time}}$$

โดย Q_{MO} คือ อัตราการไหลที่ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) หน่วยมาตรฐานลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง

A_{RE} คือ พื้นที่หน้าตัดฝั่งก้านสูบ

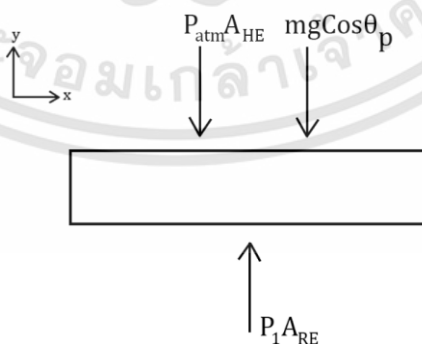
Stroke คือ ระยะชักของกระบอกสูบ

Time คือ ระยะเวลาการเคลื่อนที่ทั้งหมดของลูกสูบขณะเคลื่อนที่ขึ้นโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ

3.2 วินาที

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } Q_{MO} &= A_{RE} \cdot v = A_{RE} \cdot \frac{\text{Stroke}}{\text{time}} \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (0.025^2 - 0.01^2) \cdot \frac{0.1}{3.2} \\ &= 1.288 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \\ &= 1.637 \text{ SCFH} \end{aligned}$$

ความดันที่จุด 0 คือความดันที่บรรยากาศมีค่า $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ทำการหาค่าความดันที่จุด 1 ผ่านสมการสมดุลแรงที่ลูกสูบ



รูปที่ 3.29 แผนภาพอิสระของกระบอกสูบ

$$\uparrow \sum F = 0$$

$$P_1 A_{RE} - P_{atm} A_{HE} - mg \cos \theta_p = 0$$

$$P_1 = \frac{P_{atm} A_{HE} + mg \cos \theta_p}{A_{RE}} \quad (3.10)$$

โดย P_1 คือ ความดันทางเข้าของวาล์ว (Valve)

P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ มีค่า 1.013×10^5 Pa

m คือ มวลรวมของระบบ มีค่า 6.393 กิโลกรัม

θ_p คือ มุมเฉื่อยของกระบอกสูบ มีค่า 76 องศา

d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ มีค่า 25 มิลลิเมตร

d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ มีค่า 10 มิลลิเมตร

จากค่าที่กล่าวไปข้างต้น จะสามารถหาความดันที่จุด 1 ได้ $P_1 = 157391.16$ Pa หรือ 22.83 psia
เมื่อพิจารณาที่วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) จะพบว่าวาล์วควบคุมอัตราการไหล
(Flow control valve) จะอยู่ในกรณีการไหลแบบอนุวิภาค ($P_1 < 2P_0$)

จากสมการค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์วในการไหลแบบอนุวิภาค

$$C_{v,MO} = \frac{Q_{MO}}{962} \sqrt{\frac{(S.G. \times T)}{(P_1^2 - P_0^2)}} \quad (3.11)$$

โดย $C_{v,MO}$ คือ สัมประสิทธิ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) แบบการ
ควบคุมลมไหลจากฝั่งก้านสูบ (Meter out)

Q_{MO} คือ อัตราการไหลในหน่วยมาตรฐานลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง มีค่า 1.637 SCFH

$S.G.$ คือ ความถ่วงจำเพาะของตัวกลาง ที่อากาศ 70°F และ 14.7 psia = 1.0

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ใน °R (°F + 460) มีค่า 536.67 °R

P_1 คือ ความดันทางเข้าวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) หน่วย psia
มีค่า 22.83 psia

P_0 คือ ความดันทางออกวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) หน่วย psia มีค่า 14.6959 psia

เมื่อนำค่าดังกล่าวมาแทนลงในสมการจะได้ค่า $C_{v,MO}$ ที่ 2.256×10^{-3} ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหลที่ต่อแบบ Meter out

เนื่องจากระบบแพนโทกราฟ (Pantograph) ใช้ลมในการทำงาน ซึ่งเป็นของไหลที่มีการอัดตัวได้ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) ที่คำนวณได้จึงกำหนดให้เป็นขั้นต่ำของวาล์ว (Valve) ที่ต้องการเลือกซื้อ และต้องนำวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) มาปรับค่าที่เหมาะสมเพื่อให้เป็นไปตามเป้าที่กำหนด

ตารางที่ 3.4 แสดงรอบการหมุนของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) และเวลาที่ต่อแบบควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่งก้านสูบ (Meter in)

รอบการหมุน(รอบ)	เวลา(วินาที)
6	1.0390
5	1.1440
4	1.1240
3	1.3056
2	1.4167
1	2.4000
0.75	3.7330
0.5	5.7611
0.25	17.1444

ตารางที่ 3.5 แสดงรอบการหมุนของวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) และเวลาที่ต่อแบบควบคุมลมไหลจากฝั่งก้านสูบ (Meter out)

รอบการหมุน(รอบ)	เวลา(วินาที)
6	0.8556
5	0.9444

4	1.222
3	1.6778
2	1.9278
1	2.5432
0.75	2.8235
0.5	3.2311

จากตารางที่ 3.6 และ 3.7 จะสรุปได้ว่า ต้องหมุนวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) ที่ต่อแบบควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่งก้านสูบ (Meter in) ไปที่ 0.75 รอบ และหมุนวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) ที่ต่อแบบควบคุมลมไหลจากฝั่งก้านสูบ (Meter out) ไปที่ 0.5 รอบ ถึงจะสามารถบรรลุเป้าหมายเวลาเคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ลงตามที่กำหนดไว้ได้

ตารางที่ 3.6 ตารางสรุปค่าสัมประสิทธิ์ของวาล์ว (Valve) จากการคำนวณและการใช้จริง

Connection Type	Revolution of Needle	Flow rate (SCFH)	Coefficient value of valve Calculated (C_v)	Coefficient value of valve (C_v)
Meter In	0.75	7.42	1.015×10^{-3}	5.32×10^{-3}
Meter Out	0.5	8.48	2.256×10^{-3}	1.17×10^{-2}

3.5 การสอบเทียบโหลดเซลล์และการออกแบบกระบวนการวัดแรงสัมผัส

เป็นกระบวนการที่ทำเพื่อยืนยันว่าโหลดเซลล์ (Load cell) มีความสามารถในการวัดแรงสัมผัสนั้นเที่ยงตรง โดยจะทำการสอบเทียบโหลดเซลล์ (Load cell) โดยการใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานสำหรับสอบเทียบเครื่องชั่ง โดยการใช้งานโหลดเซลล์ (Load cell) จะต้องทำการใช้มวลสำหรับการสอบเทียบในโปรแกรมอาดูโน่ (Arduino) เป็นตัวเทียบในน้ำหนักค่าหนึ่ง ก่อนที่จะทำการวัดแรงจริงที่กระทำต่อโหลดเซลล์ (Load cell) โดยจะแบ่งการสอบเทียบออกเป็น 3 ช่วง คือ สอบเทียบโดยใช้มวล 100 กรัม , สอบเทียบโดยใช้มวล 200 กรัม , สอบเทียบโดยใช้มวล 300 กรัม โดยการสอบเทียบแต่ละครั้งจะทดสอบซึ่ง

มวล 0 กรัม, 20 กรัม, 50 กรัม, 70 กรัม, 100 กรัม, 150 กรัม, 170 กรัม, 200 กรัม, 250 กรัม, 300 กรัม, 350 กรัม เพื่อดูแนวโน้มในการสอบเทียบว่าเที่ยงตรงเพียงใด

3.5.1 กำหนดค่ามวลที่สอบเทียบในโปรแกรม (Program)

```
#include "HX711.h"
#include <Wire.h>

#define DOUT A3
#define CLK A2

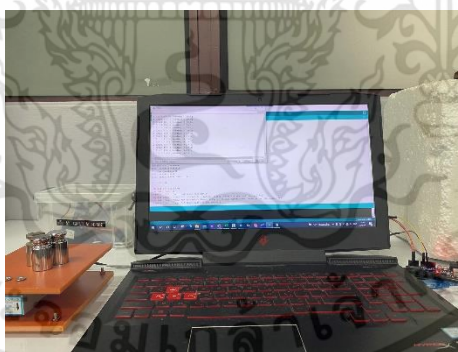
#define DEC_POINT 2
#define STABLE 1

float offset=0;
float calibration factor = 1;
float real_weight = 0.1;
```

รูปที่ 3.30 แสดงการใส่เลขมวลอ้างอิงในโค้ด (Code)

ขั้นตอนนี้เป็นกรใส่ค่ามวลที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงในการสอบเทียบ โดยจะเป็นการสั่งการให้ตัวโหลดเซลล์ (Load cell) และอาดูโน่ (Arduino) จดจำว่าน้ำหนักที่ใส่ไปมีค่าเป็นเท่าใด

3.5.2 ชั่งมวลที่แต่ละน้ำหนัก

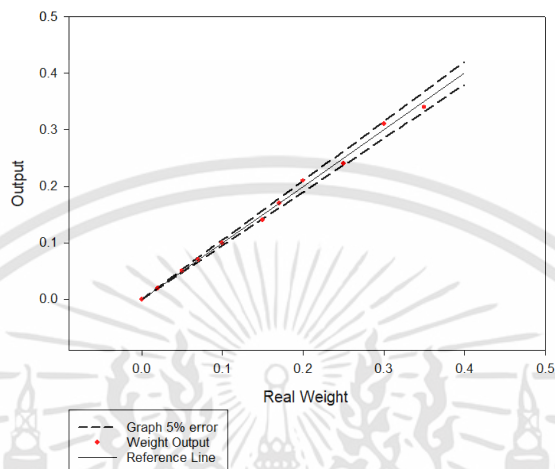


รูปที่ 3.31 แสดงวิธีการสอบเทียบโหลดเซลล์ (Load cell) โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน

ทำการชั่งมวลที่ 0 กรัม, 20 กรัม, 50 กรัม, 70 กรัม, 100 กรัม, 150 กรัม, 170 กรัม, 200 กรัม, 250 กรัม, 300 กรัม และ 350 กรัม โดยแต่ละน้ำหนักจะทำการชั่งทั้งหมด 3 ครั้ง จากนั้นนำค่าที่โหลดเซลล์ (Load cell) อ่านได้มาเฉลี่ยแล้วบันทึกผล

3.5.3 สรุปผลการสอบเทียบ และแนวโน้มที่ได้จากการสอบเทียบ

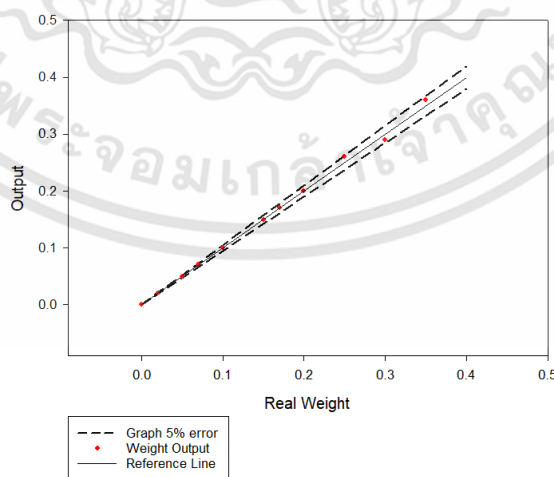
Calibration 0.1 kg



รูปที่ 3.32 รูปแสดงกราฟการสอบเทียบโดยใช้มวล 0.1 kg อ้างอิง

จากกราฟ จะแสดงให้เห็นว่าจากการสอบเทียบอ้างอิงที่มวล 0.1 kg หากทำการชั่งน้ำหนักตั้งแต่มวล 0-0.1 kg ค่าที่อ่านได้จะอ่านได้ค่าที่เที่ยงตรง มีความแม่นยำสูง หากทำการชั่งมวลที่มีค่ามากกว่า 0.1 kg ค่าที่อ่านได้จะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย อยู่ความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$ (เส้นประที่แสดงดังกราฟ คือ เส้นแสดงร้อยละความผิดพลาด)

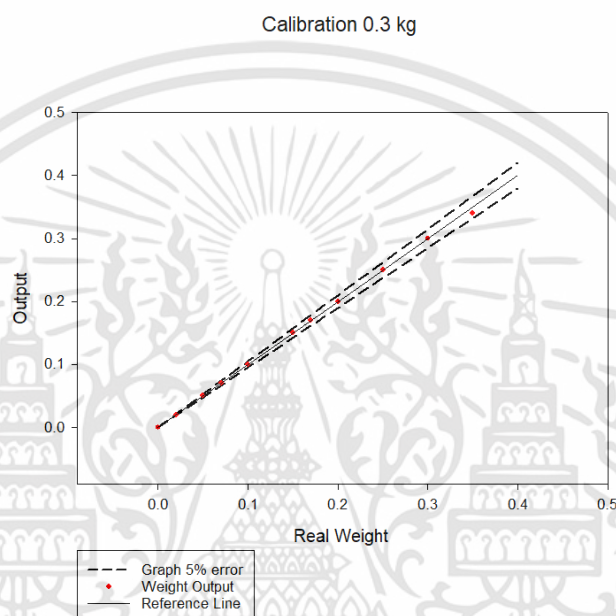
Calibration 0.2 kg



รูปที่ 3.33 รูปแสดงกราฟการสอบเทียบโดยใช้มวล 0.2 kg อ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ จะแสดงให้เห็นว่าจากการสอบเทียบอ้างอิงที่มวล 0.2 kg หากทำการชั่งน้ำหนักตั้งแต่มวล 0-0.2 kg ค่าที่อ่านได้จะอ่านได้ค่าที่เที่ยงตรง มีความแม่นยำสูง หากทำการชั่งมวลที่มีค่ามากกว่า 0.2 kg ค่าที่อ่านได้จะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย อยู่ความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$ (เส้นประที่แสดงดังกราฟ คือ เส้นแสดงร้อยละความผิดพลาด)



รูปที่ 3.34 รูปแสดงกราฟการสอบเทียบโดยใช้มวล 0.3 kg อ้างอิง

จากกราฟ จะแสดงให้เห็นว่าจากการสอบเทียบอ้างอิงที่มวล 0.3 kg หากทำการชั่งน้ำหนักตั้งแต่มวล 0-0.3 kg ค่าที่อ่านได้จะอ่านได้ค่าที่เที่ยงตรง มีความแม่นยำสูง หากทำการชั่งมวลที่มีค่ามากกว่า 0.3 kg ค่าที่อ่านได้จะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย อยู่ความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$ (เส้นประที่แสดงดังกราฟ คือ เส้นแสดงร้อยละความผิดพลาด)

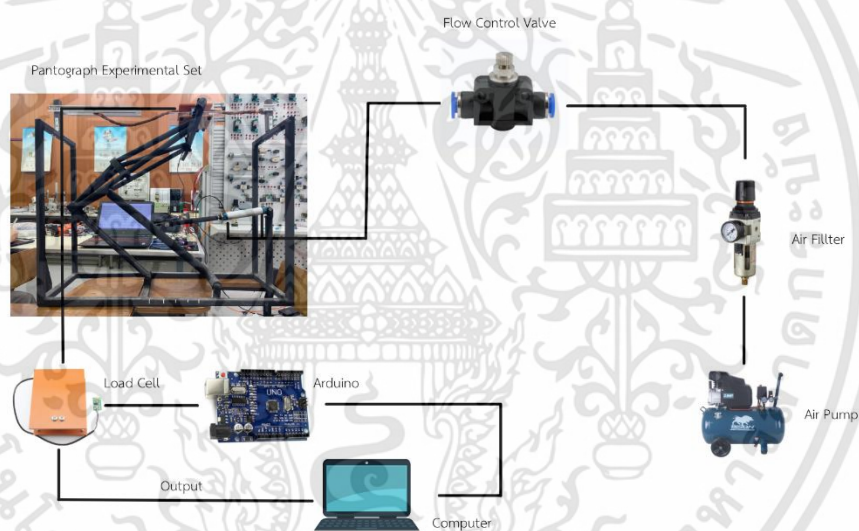
โดยจากผลการทดลองแสดงในกราฟ จะเห็นว่าน้ำหนักจะให้ความแม่นยำสูงที่สุดในช่วงใส่มวล น้ำหนักไม่เกินน้ำหนักที่ทำการสอบเทียบไว้ในโปรแกรม (Program) หากทำการใส่น้ำหนักในช่วงที่มี น้ำหนักมากกว่าที่ทำการสอบเทียบไว้ จะแสดงผลน้ำหนักมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากน้ำหนักมวล จริง

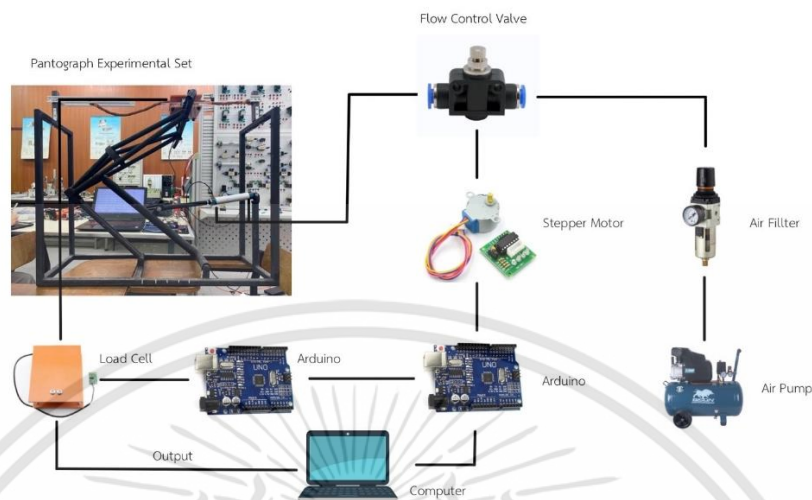
จากการสอบเทียบสรุปได้ว่าการวัดแรงของโหลดเซลล์ (Load cell) มีความเที่ยงตรงที่สุดเมื่อ ใช้ มวลสอบเทียบที่มีค่ามากกว่าน้ำหนักที่จะทำการทดสอบ หรือแรงที่กระทำ การใช้โหลดเซลล์ (Load cell)

วัดน้ำหนักหรือวัดแรงที่มีขนาดมากกว่าน้ำหนักที่ทำการสอบเทียบจะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย จากการคำนวณแรงที่แพนโทกราฟ (Pantograph) จะขึ้นไปแต่ละสายส่งจะมีค่าน้ำหนักสายมากที่สุด 295 กรัม จึงเลือกทำการสอบเทียบที่ 300 กรัม

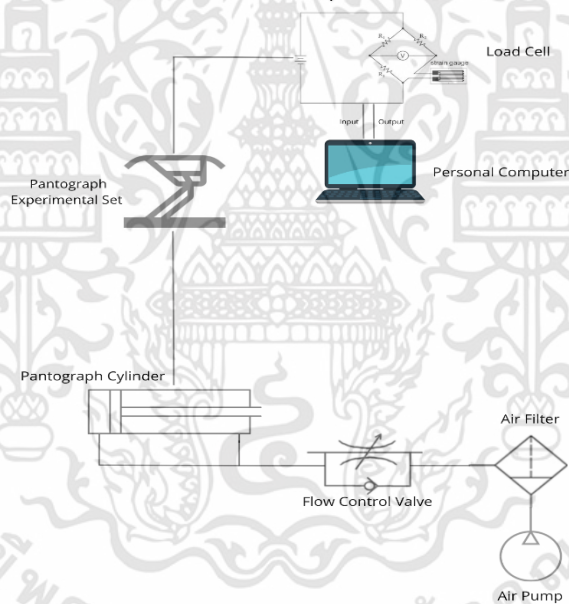
3.5.4 การออกแบบกระบวนการวัดแรงสัมผัส

จากการทำแบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) เสมือนจริง เพื่อวัดแรงสัมผัสของแพนโทกราฟ (Pantograph) ในการหาแรงสัมผัสเมื่อ แพนโทกราฟ (Pantograph) ขึ้นไปสัมผัสกับสายส่งเหนือหัว หลังจากการออกแบบการเคลื่อนที่แพนโทกราฟ (Pantograph) ที่ผ่านมา ผลลัพธ์ที่ได้คือ เวลาในการเคลื่อนที่เสมือนของจริง ขึ้นตอนต่อไปคือการออกแบบวัดแรงสัมผัสโดยการออกแบบในส่วนของสายส่งเหนือหัว และใช้โหลดเซลล์เพื่อวัดแรงสัมผัส





รูปที่ 3.35 การออกแบบระบบควบคุมการทำงาน และการวัดแรงสัมพัทธ์



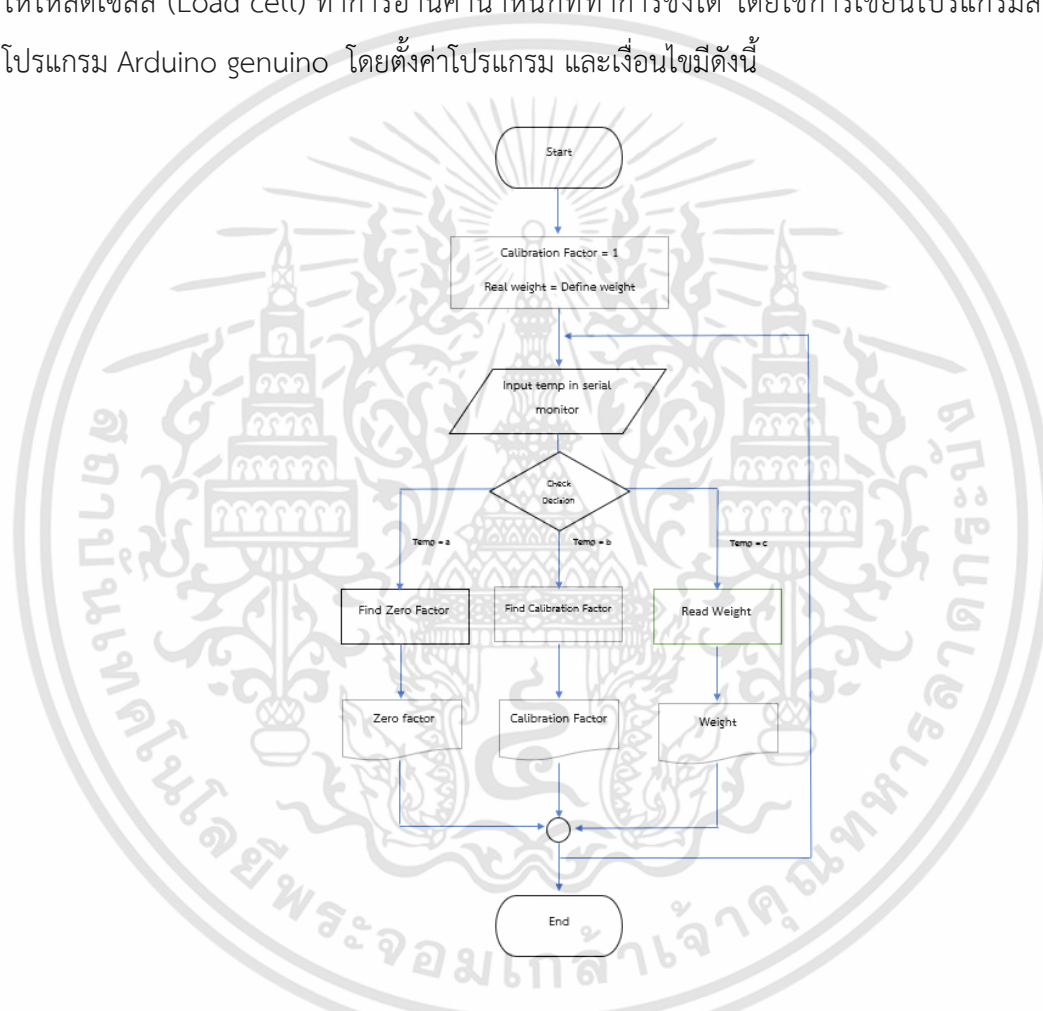
รูปที่ 3.36 แผนภาพแสดงการออกแบบระบบควบคุมการทำงาน และการวัดแรงสัมพัทธ์

จากแผนภาพการออกแบบข้างต้นในแนวทางเดิม จากการทำงานในตอนแรกที่ลมจากปั๊ม (Pump) จะเข้าสู่ชุดกรอง และจะส่งลมต่อไปที่ชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph) โดยตรง โดยจึงได้ทำการใช้ วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) เพื่อปรับความเร็วลมของการไหลให้ช้าลง เพื่อหน่วงเวลาในการยกขึ้น และยกลงของแพนโทกราฟ (Pantograph) ให้การเคลื่อนที่มีความราบเรียบขึ้น และได้ ออกแบบระบบเปิด/ปิดวาล์ว โดยจะทำการติดตั้งในส่วนของโหลดเซลล์ (Load cell) เข้าไปที่ส่วนหัวของ

แพนโทกราฟ (Pantograph) โดยควบคุมผ่านแผงควบคุมอาดูโน่ (Arduino) เพื่อวัดแรงสัมผัส จากนั้นให้แสดงผลของแรงสัมผัส มายังหน้าจอคอมพิวเตอร์ (Computer)

3.5.5 ออกแบบขั้นตอนการทำงานอาดูโน่ (Arduino) ของโหลดเซลล์ (Load cell)

การออกแบบขั้นตอนมีจุดหมายเพื่อต้องการสั่งการให้โหลดเซลล์ (Load cell) วัดแรงสัมผัส โดยการให้โหลดเซลล์ (Load cell) ทำการอ่านค่าน้ำหนักที่ทำการชั่งได้ โดยใช้การเขียนโปรแกรมสั่งการผ่านโปรแกรม Arduino genuino โดยตั้งค่าโปรแกรม และเงื่อนไขมีดังนี้

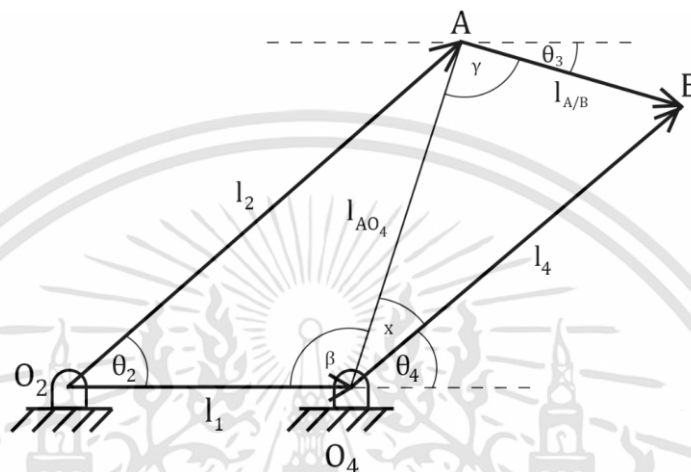


รูปที่ 3.37 ผังงานระบบควบคุมการทำงานของการวัดแรงสัมผัสของโหลดเซลล์ (Load cell)

จากรูปภาพผังงานข้างต้น เป็นรูปแบบคำสั่งการทำงาน โดยการทำงาน เริ่มจากการนำค่ามวลที่เที่ยงตรงมาทำการสอบเทียบ เพื่อให้เป็นมวลอ้างอิง ทำการใส่ข้อมูลน้ำหนักไปในระบบ โดยทำการให้โหลดเซลล์ (Load cell) ทำการเรียนรู้ถึงแรงกดของน้ำหนักที่ใส่ไป หลังจากระบบจะให้ผลลัพธ์ตัวประกอบสอบเทียบออกมา สำหรับใช้ในการใส่ค่า เพื่อใช้ในการชั่งน้ำหนัก

3.6 การคำนวณหาค่าแรงสัมผัส

3.6.1 การหาความสัมพันธ์ของมุมในกลไก [3]



รูปที่ 3.38 รูปแสดงมุมต่างๆภายในกลไก

จากกฎของโคไซน์ (Cosine) และกฎของไซน์ (Sine) จะสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของมุมต่างๆได้ ดังนี้

$$l_{AO_4}^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos \theta_2$$

$$l_{AO_4} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos \theta_2} \quad (3.12)$$

$$l_2^2 = l_1^2 + l_{AO_4}^2 - 2l_1l_{AO_4} \cos \beta$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_{AO_4}^2 - l_2^2}{2l_1l_{AO_4}} \right) \quad (3.13)$$

$$l_4^2 = l_{A/B}^2 + l_{AO_4}^2 - 2l_{A/B}l_{AO_4} \cos \gamma$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{l_{A/B}^2 + l_{AO_4}^2 - l_4^2}{2l_{A/B}l_{AO_4}} \right) \quad (3.14)$$

$$\frac{l_{A/B}}{\sin x} = \frac{l_4}{\sin \gamma}$$

$$x = \sin^{-1} \left(\frac{l_{A/B}}{l_4} \sin \gamma \right) \quad (3.15)$$

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

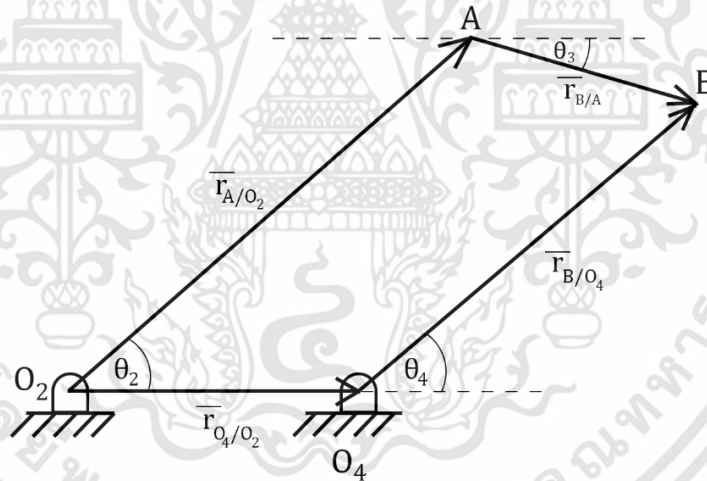
$$\theta_3 = \beta - \gamma \quad (3.16)$$

จากจุด O_4 ผลรวมมุม β , x และ θ_4 มีค่าเท่ากับ 180° ดังนั้น

$$180^\circ - \beta - x = \theta_4 \quad (3.17)$$

3.6.2 วิเคราะห์ความเร็วเชิงมุม [3]

พิจารณาจากรูปที่ 3.38 หาผลรวมเวกเตอร์ (Vector) จะได้



รูปที่ 3.39 เวกเตอร์ (Vector) วิเคราะห์ความเร็วเชิงมุม

$$\vec{r}_{A/O_2} + \vec{r}_{B/A} = \vec{r}_{O_4/O_2} + \vec{r}_{B/O_4}$$

$$r_{A/O_2} e^{i\theta_2} + r_{B/A} e^{i\theta_3} = r_{O_4/O_2} e^{i\theta_1} + r_{B/O_4} e^{i\theta_4}$$

เมื่อ $r_{A/O_2} = l_2$, $r_{B/A} = l_{A/B}$, $r_{O_4/O_2} = l_1$, $r_{B/O_4} = l_4$

$$l_2 e^{i\theta_2} + l_{A/B} e^{i\theta_3} = l_1 e^{i\theta_1} + l_4 e^{i\theta_4} \quad (3.18)$$

หาอนุพันธ์สมการที่ (3.18) เทียบกับเวลาจะได้

$$i\omega_3 l_{A/B} e^{i\theta_3} - i\omega_4 l_4 e^{i\theta_4} = 0 - i\omega_2 l_2 e^{i\theta_2} \quad (3.19)$$

หาค่า ω_3 โดยคูณสมการที่ (3.19) ด้วย $e^{-i\theta_4}$ จะได้

$$\begin{aligned} i\omega_3 l_{A/B} e^{i(\theta_3 - \theta_4)} - i\omega_4 l_4 e^{i(\theta_4 - \theta_4)} &= -i\omega_2 l_2 e^{i(\theta_2 - \theta_4)} \\ i\omega_3 l_{A/B} e^{i(\theta_3 - \theta_4)} - i\omega_4 l_4 &= -i\omega_2 l_2 e^{i(\theta_2 - \theta_4)} \end{aligned} \quad (3.20)$$

แทนค่า $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ ลงในสมการที่ (3.2) จะได้

$$i\omega_3 l_{A/B} [\cos(\theta_3 - \theta_4) + i \sin(\theta_3 - \theta_4)] - i\omega_4 l_4 = -i\omega_2 l_2 [\cos(\theta_2 - \theta_4) + i \sin(\theta_2 - \theta_4)] \quad (3.21)$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์ส่วนจริง จะได้

$$\begin{aligned} -\omega_3 l_{A/B} \sin(\theta_3 - \theta_4) &= \omega_2 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_4) \\ \therefore \omega_3 &= \frac{-\omega_2 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_4)}{l_{A/B} \sin(\theta_3 - \theta_4)} \end{aligned} \quad (3.22)$$

หาค่า ω_4 โดยคูณสมการที่ (3.19) ด้วย $e^{-i\theta_3}$ แล้วแทนค่า $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ จากนั้นพิจารณาสัมประสิทธิ์ส่วนจริง เช่นเดียวกับการหาค่า ω_3

$$\therefore \omega_4 = \frac{-\omega_2 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_3)}{l_4 \sin(\theta_4 - \theta_3)} \quad (3.23)$$

โดย ω_2 คือ ความเร็วเชิงมุมของชิ้นส่วนที่ 2

ω_3 คือ ความเร็วเชิงมุมของชิ้นส่วนที่ 3

ω_4 คือ ความเร็วเชิงมุมของชิ้นส่วนที่ 4

θ_2 คือ มุมของชิ้นส่วนที่ 2

θ_3 คือ มุมของชิ้นส่วนที่ 3

θ_4 คือ มุมของชิ้นส่วนที่ 4

l_2 คือ ความยาวของชิ้นส่วนที่ 2

$l_{A/B}$ คือ ความยาวจากจุด A ไป B

l_4 คือ ความยาวของชิ้นส่วนที่ 4

3.6.3 วิเคราะห์ความเร่งเชิงมุม [3]

หาค่า α_3 โดยการหาอนุพันธ์สมการที่ (3.19) เทียบกับเวลาจะได้

$$i\alpha_3 l_{A/B} e^{i\theta_3} - \omega_3^2 l_{A/B} e^{i\theta_3} - i\alpha_4 l_4 e^{i\theta_4} + \omega_4^2 l_4 e^{i\theta_4} = -i\alpha_2 l_2 e^{i\theta_2} + \omega_2^2 l_2 e^{i\theta_2} \quad (3.24)$$

คูณสมการที่ (3.24) ด้วย $e^{-i\theta_4}$ จะได้

$$\begin{aligned} & -i\alpha_2 l_2 e^{i(\theta_2-\theta_4)} + \omega_2^2 l_2 e^{i(\theta_2-\theta_4)} \\ & = i\alpha_3 l_{A/B} e^{i(\theta_3-\theta_4)} - \omega_3^2 l_{A/B} e^{i(\theta_3-\theta_4)} - i\alpha_4 l_4 e^{i(\theta_4-\theta_4)} + \omega_4^2 l_4 e^{i(\theta_4-\theta_4)} \\ & i\alpha_3 l_{A/B} e^{i(\theta_3-\theta_4)} - \omega_3^2 l_{A/B} e^{i(\theta_3-\theta_4)} - i\alpha_4 l_4 + \omega_4^2 l_4 = -i\alpha_2 l_2 e^{i(\theta_2-\theta_4)} + \omega_2^2 l_2 e^{i(\theta_2-\theta_4)} \quad (3.25) \end{aligned}$$

แทนค่า $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ ลงในสมการที่ (3.25) จากนั้นพิจารณาสัมประสิทธิ์ส่วนจริงจะได้

$$\alpha_3 = \frac{-\alpha_2 l_2 \sin(\theta_2-\theta_4) - \omega_2^2 l_2 \cos(\theta_2-\theta_4) - \omega_3^2 l_{A/B} \cos(\theta_3-\theta_4) + \omega_4^2 l_4}{l_{A/B} \sin(\theta_3-\theta_4)} \quad (3.26)$$

หาค่า α_4 โดยคูณสมการที่ (3.24) ด้วย $e^{-i\theta_3}$ แล้วแทนค่า $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ จากนั้นพิจารณาสัมประสิทธิ์ส่วนจริง เช่นเดียวกับการหาค่า α_3

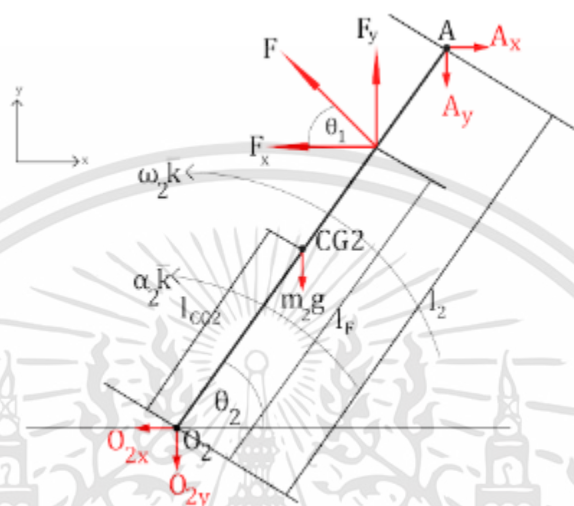
$$\alpha_4 = \frac{\alpha_2 l_2 \sin(\theta_2-\theta_3) + \omega_2^2 l_2 \cos(\theta_2-\theta_3) - \omega_4^2 l_4 \cos(\theta_4-\theta_3) + \omega_3^2 l_{A/B}}{l_4 \sin(\theta_4-\theta_3)} \quad (3.27)$$

โดย α_2 คือ ความเร่งเชิงมุมของชิ้นส่วนที่ 2

α_3 คือ ความเร่งเชิงมุมของชิ้นส่วนที่ 3

α_4 คือ ความเร่งเชิงมุมของชิ้นส่วนที่ 4

3.6.4 วิเคราะห์หาความเร่งในพิกัด x y



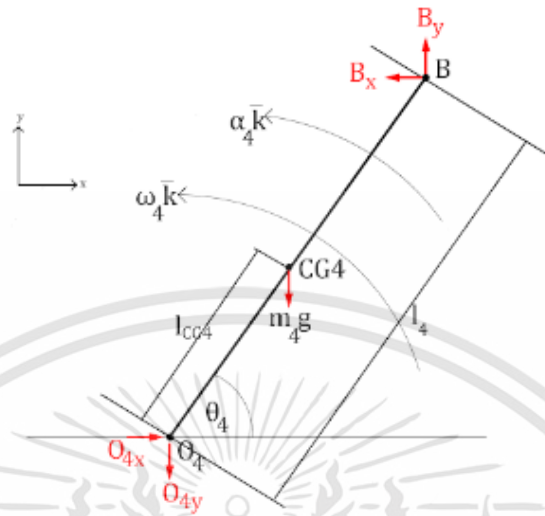
รูปที่ 3.40 แผนภาพอิสระของชิ้นส่วนที่ 2

หาความเร่งที่จุดศูนย์กลางมวลชิ้นที่ 2 (\bar{a}_{CG2})

$$\begin{aligned}\bar{a}_{CG2} &= \bar{a}_{O2} + \bar{\alpha}_2 \times \bar{r}_{CG2/O2} - \omega_2^2 \times \bar{r}_{CG2/O2} \\ &= 0 + (\alpha_2 \bar{k}) \times l_{CG2}(\cos \theta_2 \bar{i} + \sin \theta_2 \bar{j}) - \omega_2^2 \times l_{CG2}(\cos \theta_2 \bar{i} + \sin \theta_2 \bar{j}) \\ &= -(\alpha_2 l_{CG2} \sin \theta_2 + \omega_2^2 l_{CG2} \cos \theta_2) \bar{i} + (\alpha_2 l_{CG2} \cos \theta_2 - \omega_2^2 l_{CG2} \sin \theta_2) \bar{j} \quad (3.28)\end{aligned}$$

หาความเร่งที่จุด A (\bar{a}_A)

$$\begin{aligned}\bar{a}_A &= \bar{a}_{O2} + \bar{\alpha}_2 \times \bar{r}_{A/O2} - \omega_2^2 \times \bar{r}_{A/O2} \\ &= 0 + (\alpha_2 \bar{k}) \times l_2(\cos \theta_2 \bar{i} + \sin \theta_2 \bar{j}) - \omega_2^2 \times l_2(\cos \theta_2 \bar{i} + \sin \theta_2 \bar{j}) \\ &= -(\alpha_2 l_2 \sin \theta_2 + \omega_2^2 l_2 \cos \theta_2) \bar{i} + (\alpha_2 l_2 \cos \theta_2 - \omega_2^2 l_2 \sin \theta_2) \bar{j} \quad (3.29)\end{aligned}$$



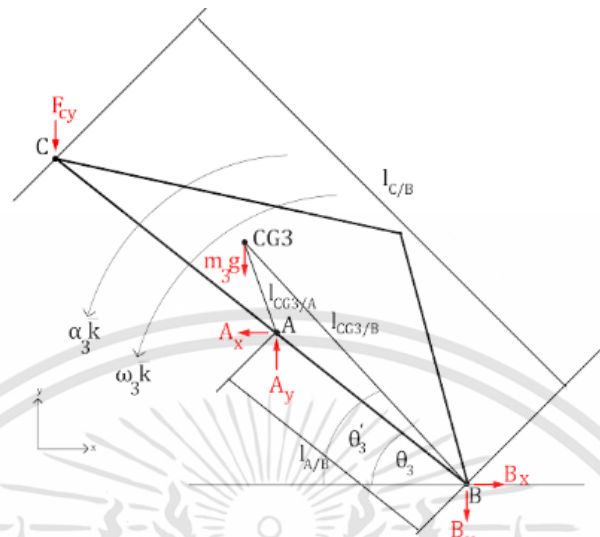
รูปที่ 3.41 แผนภาพอิสระของชิ้นส่วนที่ 4

หาความเร่งที่จุดศูนย์กลางมวลชิ้นที่ 4 (\bar{a}_{CG4})

$$\begin{aligned}
 \bar{a}_{CG4} &= \bar{a}_{O4} + \bar{\alpha}_4 \times \bar{r}_{CG4/O4} - \omega_4^2 \times \bar{r}_{CG4/O4} \\
 &= 0 + (\alpha_4 \bar{k}) \times l_{CG4}(\cos \theta_4 \bar{i} + \sin \theta_4 \bar{j}) - \omega_4^2 \times l_{CG4}(\cos \theta_4 \bar{i} + \sin \theta_4 \bar{j}) \\
 &= \alpha_4 l_{CG4} \cos \theta_4 \bar{j} - \alpha_4 l_{CG4} \sin \theta_4 \bar{i} - \omega_4^2 l_{CG4} \cos \theta_4 \bar{i} - \omega_4^2 l_{CG4} \sin \theta_4 \bar{j} \\
 &= -(\alpha_4 l_{CG4} \sin \theta_4 + \omega_4^2 l_{CG4} \cos \theta_4) \bar{i} + (\alpha_4 l_{CG4} \cos \theta_4 - \omega_4^2 l_{CG4} \sin \theta_4) \bar{j} \quad (3.30)
 \end{aligned}$$

หาความเร่งที่จุด B (\bar{a}_B)

$$\begin{aligned}
 \bar{a}_B &= \bar{a}_{O4} + \bar{\alpha}_4 \times \bar{r}_{B/O4} - \omega_4^2 \times \bar{r}_{B/O4} \\
 &= 0 + (\alpha_4 \bar{k}) \times l_4(\cos \theta_4 \bar{i} + \sin \theta_4 \bar{j}) - \omega_4^2 \times l_4(\cos \theta_4 \bar{i} + \sin \theta_4 \bar{j}) \\
 &= \alpha_4 l_4 \cos \theta_4 \bar{j} - \alpha_4 l_4 \sin \theta_4 \bar{i} - \omega_4^2 l_4 \cos \theta_4 \bar{i} - \omega_4^2 l_4 \sin \theta_4 \bar{j} \\
 &= -(\alpha_4 l_4 \sin \theta_4 + \omega_4^2 l_4 \cos \theta_4) \bar{i} + (\alpha_4 l_4 \cos \theta_4 - \omega_4^2 l_4 \sin \theta_4) \bar{j} \quad (3.31)
 \end{aligned}$$

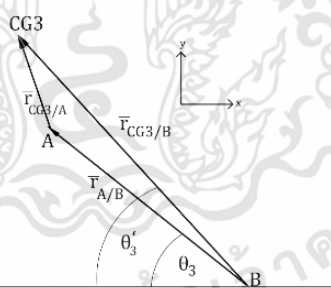


รูปที่ 3.42 แผนภาพอิสระของชิ้นส่วนที่ 3

หาความเร่งที่จุดศูนย์กลางมวลชิ้นที่ 3 (\bar{a}_{CG3})

$$\bar{a}_{CG3} = \bar{a}_A + \bar{\alpha}_3 \times \bar{r}_{CG3/A} - \omega_3^2 \times \bar{r}_{CG/A} \quad (3.32)$$

เวกเตอร์ (Vector) $\bar{r}_{CG/A}$ สามารถหาได้โดย



รูปที่ 3.43 แสดงเวกเตอร์ (Vector) ทั้งสามที่เชื่อมระหว่างจุด A B และ CG3

$$\bar{r}_{CG3/B} = \bar{r}_{A/B} + \bar{r}_{CG3/A}$$

$$\bar{r}_{CG3/A} = \bar{r}_{CG3/B} - \bar{r}_{A/B}$$

$$= l_{CG3/B}(-\cos \theta'_3 \bar{i} + \sin \theta'_3 \bar{j}) - l_{A/B}(-\cos \theta_3 \bar{i} + \sin \theta_3 \bar{j})$$

$$\bar{r}_{CG3/A} = (-l_{CG3/B} \cos \theta'_3 + l_{A/B} \cos \theta_3) \bar{i} + (l_{CG3/B} \sin \theta'_3 - l_{A/B} \sin \theta_3) \bar{j} \quad (3.33)$$

นำสมการ (3.29) และ (3.33) กลับไปแทนในสมการที่ (3.32) จะได้

$$\begin{aligned}\bar{a}_{CG3} &= -(\alpha_2 l_2 \sin \theta_2 + \omega_2^2 l_2 \cos \theta_2) \bar{i} + (\alpha_2 l_2 \cos \theta_2 - \omega_2^2 l_2 \sin \theta_2) \bar{j} \\ &\quad + (\alpha_3 \bar{k}) [(-l_{CG3/B} \cos \theta'_3 + l_{A/B} \cos \theta_3) \bar{i} + (l_{CG3/B} \sin \theta'_3 - l_{A/B} \sin \theta_3) \bar{j}] \\ &\quad - \omega_3^2 [(-l_{CG3/B} \cos \theta'_3 + l_{A/B} \cos \theta_3) \bar{i} + (l_{CG3/B} \sin \theta'_3 - l_{A/B} \sin \theta_3) \bar{j}] \\ \bar{a}_{CG3X} &= -(\alpha_2 l_2 \sin \theta_2 + \omega_2^2 l_2 \cos \theta_2) - \alpha_3 l_{CG3/B} \sin \theta'_3 + \alpha_3 l_{A/B} \sin \theta_3 \\ &\quad + \omega_3^2 l_{CG3/B} \cos \theta'_3 - \omega_3^2 l_{A/B} \cos \theta_3\end{aligned}\quad (3.34)$$

$$\begin{aligned}\bar{a}_{CG3Y} &= \alpha_2 l_2 \cos \theta_2 - \omega_2^2 l_2 \sin \theta_2 - \alpha_3 l_{CG3/B} \cos \theta'_3 + \alpha_3 l_{A/B} \cos \theta_3 \\ &\quad - \omega_3^2 l_{CG3/B} \sin \theta'_3 + \omega_3^2 l_{A/B} \sin \theta_3\end{aligned}\quad (3.35)$$

หาความเร่งที่จุด C (\bar{a}_C)

$$\bar{a}_C = \bar{a}_B + \bar{\alpha}_3 \times \bar{r}_{C/B} - \omega_3^2 \times \bar{r}_{C/B}\quad (3.36)$$

นำสมการที่ (3.31) มาแทนในสมการที่ (3.36) จะได้

$$\begin{aligned}\bar{a}_C &= -(\alpha_4 l_4 \sin \theta_4 + \omega_4^2 l_4 \cos \theta_4) \bar{i} + (\alpha_4 l_4 \cos \theta_4 - \omega_4^2 l_4 \sin \theta_4) \bar{j} \\ &\quad + (\alpha_3 \bar{k}) l_{C/B} (-\cos \theta_3 \bar{i} + \sin \theta_3 \bar{j}) - \omega_3^2 l_{C/B} (-\cos \theta_3 \bar{i} + \sin \theta_3 \bar{j}) \\ \bar{a}_C &= (-\alpha_4 l_4 \sin \theta_4 - \omega_4^2 l_4 \cos \theta_4 - \alpha_3 l_{C/B} \sin \theta_3 + \omega_3^2 l_{C/B} \cos \theta_3) \bar{i} \\ &\quad + (\alpha_4 l_4 \cos \theta_4 - \omega_4^2 l_4 \sin \theta_4 - \alpha_3 l_{C/B} \cos \theta_3 + \omega_3^2 l_{C/B} \sin \theta_3) \bar{j}\end{aligned}\quad (3.37)$$

โดย l_{CG2} คือ ระยะห่างของจุดศูนย์กลางมวลของชิ้นส่วนที่ 2

$l_{CG3/B}$ คือ ระยะห่างของจุดศูนย์กลางมวลของชิ้นส่วนที่ 3 เทียบกับจุด B

l_{CG4} คือ ระยะห่างของจุดศูนย์กลางมวลของชิ้นส่วนที่ 4

$l_{C/B}$ คือ ระยะห่างของจุด C และ B

θ'_3 คือ มุมระหว่าง $l_{CG3/B}$ กับ แนวระดับ

3.6.5 การวิเคราะห์แรงในกลไก

สมการโมเมนต์ (Moment) บนชิ้นส่วนที่ 2 จากรูปที่ 3.40 สามารถคำนวณแรงบนกลไกได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \curvearrowright \sum M_{O_2} &= I_{O_2} \alpha_2 \\ -m_2 g l_{CG2} \cos \theta_2 - A_y l_2 \cos \theta_2 - A_x l_2 \sin \theta_2 + F \cos \theta_1 l_F \sin \theta_2 + F \sin \theta_1 l_F \cos \theta_2 \\ &= (I_{CG2} + m_2 l_{CG2}^2) \alpha_2 \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\rightarrow \sum F_x = m_2 a_{CG2x} \quad A_x - F_x - O_{2x} = m_2 a_{CG2x} \quad (3.39)$$

$$\uparrow \sum F_y = m_2 a_{CG2y} \quad F_y - m_2 g - A_y - O_{2y} = m_2 a_{CG2y} \quad (3.40)$$

สมการโมเมนต์ (Moment) บนชิ้นส่วนที่ 4 จากรูปที่ 3.41 สามารถคำนวณแรงบนกลไกได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \curvearrowright \sum M_{O_4} &= I_{O_4} \alpha_4 \\ B_x l_4 \sin \theta_4 + B_y l_4 \cos \theta_4 - m_4 g l_{CG4} \cos \theta_4 &= (I_{CG4} + m_4 l_{CG4}^2) \alpha_4 \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\rightarrow \sum F_x = m_4 a_{CG4x} \quad O_{4x} - B_x = m_4 a_{CG4x} \quad (3.42)$$

$$\uparrow \sum F_y = m_4 a_{CG4y} \quad B_y - m_4 g - O_{4y} = m_4 a_{CG4y} \quad (3.43)$$

สมการโมเมนต์ (Moment) บนชิ้นส่วนที่ 3 จากรูปที่ 3.42 สามารถคำนวณแรงบนกลไกได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \curvearrowright \sum M_B &= I_{B3} \alpha_3 \\ F_{cy} l_{C/B} \cos \theta_3 + m_3 g l_{CG3/B} \cos \theta'_3 - A_y l_{A/B} \cos \theta_3 + A_x l_{A/B} \sin \theta_3 \\ &= (I_{CG3} + m_3 l_{CG3}^2) \alpha_3 \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$\rightarrow \sum F_x = m_3 a_{CG3x} \quad B_x - A_x = m_3 a_{CG3x} \quad (3.45)$$

$$\uparrow \sum F_y = m_3 a_{3y} \quad A_y - m_3 g - B_y - F_{cy} = m_3 a_{CG3y} \quad (3.46)$$

โดย I_{CG2} คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ที่จุดศูนย์กลางมวลของชิ้นส่วนที่ 2

I_{CG3} คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ที่จุดศูนย์กลางมวลของชิ้นส่วนที่ 3

I_{CG4} คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ที่จุดศูนย์กลางมวลของชิ้นส่วนที่ 4

l_F คือ ระยะห่างของแรงยก

F คือ แรงยกจากกระบอกสูบ

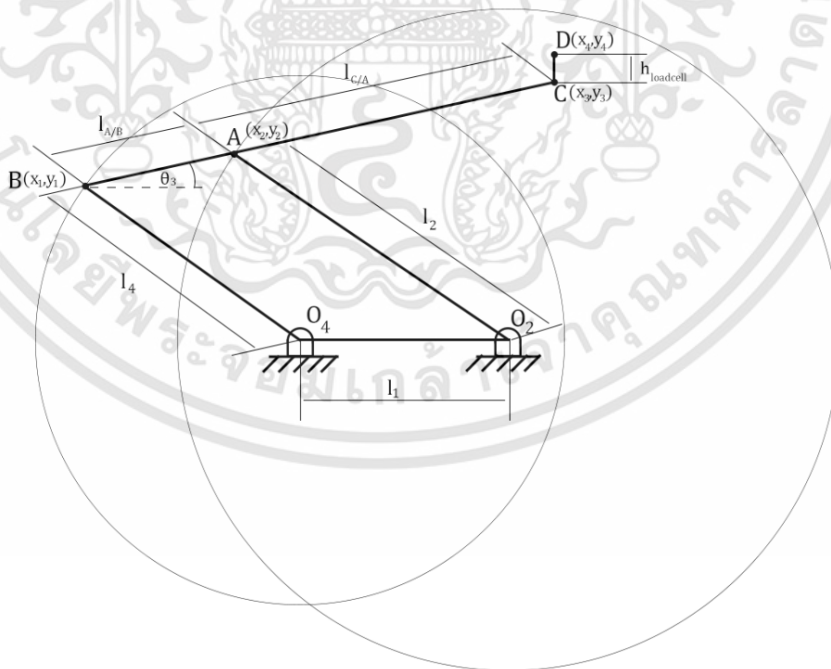
θ_1 คือ มุมระหว่างแรงยกและแนวระดับ

เมื่อนำสมการ (3.38) ถึง (3.46) มาเขียนในรูปเมทริกซ์ จะได้

$$\begin{bmatrix} -l_2 \sin \theta_2 & -l_2 \cos \theta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ l_{A/B} \sin \theta_3 & -l_{A/B} \cos \theta_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_{C/B} \cos \theta_3 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & l_4 \sin \theta_4 & l_4 \cos \theta_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ B_x \\ B_y \\ O_{2x} \\ O_{2y} \\ O_{4x} \\ O_{4y} \\ F_{cy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_{CG2} + m_2 l_{CG2}^2) \alpha_2 + m_2 g l_{CG2} \cos \theta_2 + F l_F (\sin \theta_1 + \theta_2) \\ m_2 a_{CG2x} + F \cos \theta_1 \\ m_2 a_{CG2y} + m_2 g - F \sin \theta_1 \\ (I_{CG3} + m_3 l_{CG3/B}^2) \alpha_3 - m_3 g l_{CG3/B} \cos \theta_3' \\ m_3 a_{CG3x} \\ m_3 a_{CG3y} + m_3 g \\ (I_{CG4} + m_4 l_{CG4}^2) \alpha_4 + m_4 g l_{CG4} \cos \theta_4 \\ m_4 a_{CG4x} \\ m_4 a_{CG4y} + m_4 g \end{bmatrix}$$

รูปที่ 3.44 เมทริกซ์ (Matrix) 9x9

3.6.5 การวิเคราะห์หาเส้นทางการเคลื่อนที่ของโหลดเซลล์เพื่อวิเคราะห์หามุมสัมผัส



รูปที่ 3.45 แสดงการเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุด A และ B

3.10.5.1 วิเคราะห์หาเส้นทางการเคลื่อนที่ของโหลดเซลล์ (Load cell)

จากรูปที่ 3.45 ต้องการหาพิกัดของจุด A เมื่อทราบค่าพิกัดของจุด B สามารถหาได้จากสมการระยะห่างของจุด

$$l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

จะได้

$$l_{A/B} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3.47)$$

สามารถหาความสัมพันธ์ของพิกัด x และ y ของจุด A และ B ได้จากสมการวงกลม

$$(y - b)^2 + (x - a)^2 = r^2$$

เมื่อกำหนดให้จุด O_4 เป็นจุดกำเนิด จะได้ความสัมพันธ์ของพิกัด x_1 และ y_1 ดังนี้

$$\begin{aligned} (y_1 - 0)^2 + (x_1 - 0)^2 &= l_4^2 \\ y_1 &= \sqrt{l_4^2 - x_1^2} \end{aligned} \quad (3.48)$$

และจะได้ความสัมพันธ์ของพิกัด x_2 และ y_2 ดังนี้

$$\begin{aligned} (y_2 - 0)^2 + (x_2 - l_1)^2 &= l_2^2 \\ y_2 &= \sqrt{l_2^2 - (x_2 - l_1)^2} \end{aligned} \quad (3.49)$$

นำสมการ (3.48) และ (3.49) แทนกลับลงในสมการที่ (3.47) จะได้สมการในการหาค่า x_2

$$l_{A/B} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + \left(\sqrt{l_4^2 - x_1^2} - \sqrt{l_2^2 - (x_2 - l_1)^2}\right)^2} \quad (3.50)$$

จากนั้นนำค่า x_2 ที่ได้ แทนกลับลงในสมการที่ (3.49) เพื่อหาค่า y_2 และนำค่าพิกัดของจุด A และ B มาหามุม θ_3 โดยใช้ตรีโกณมิติ

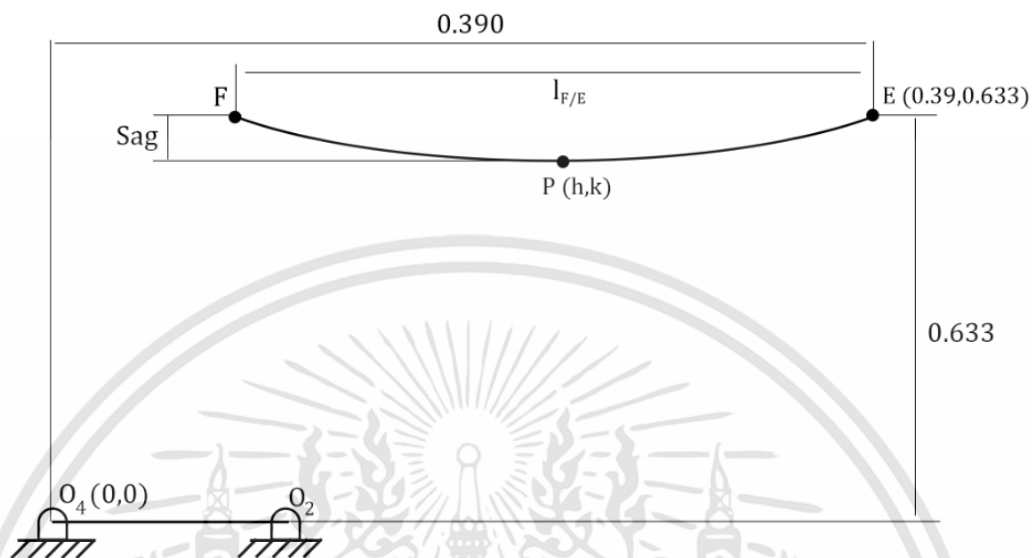
$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (3.51)$$

หาพิกัดของจุด D โดยใช้พิกัดจุด B

$$x_4 = x_3 = x_2 + l_{C/A} \cos \theta_3 \quad (3.52)$$

$$y_4 = y_3 + h_{loadcell} = y_2 + l_{C/A} \sin \theta_3 + h_{loadcell} \quad (3.53)$$

3.10.5.2 ทาสมาการพาราโบลา (Parabola) ของสายส่งเหนือหัว



รูปที่ 3.46 แสดงตำแหน่งจุดปลายและจุดต่ำสุดของสายส่ง
จากสมการพาราโบลา (Parabola)

$$(y - k) = a(x - h)^2$$

จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสมการพาราโบลา (Parabola) กับความยาวและระยะหย่อนของสายส่งได้ดังนี้

$$h = 0.39 - \frac{l_{F/E}}{2} \quad (3.54)$$

$$k = 0.633 - sag \quad (3.55)$$

เมื่อระยะ $l_{F/E}$ และ s เป็นระยะห่างของจุดปลายทั้งสองของเชือกและระยะหย่อนตามลำดับ จะได้สมการพาราโบลา (Parabola) ดังนี้

$$(y - 0.633 + sag) = a \left(x - 0.39 + \frac{l_{F/E}}{2} \right)^2 \quad (3.56)$$

เมื่อได้พิกัดของจุดต่ำสุดแล้วนำมาแทนและนำจุด E มาแทนลงในสมการเพื่อหาค่า a

จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดไปพล็อตลงในกราฟ โดยนำจุดการเคลื่อนที่ของโหนดเซลล์ที่มีการตัดกับเส้นพาราโบลามา (Parabola) ทาสมาการเส้นตรงโดยใช้สมการ

$$y - y_4 = m(x - x_4) \quad (3.57)$$

โดยความชันหาได้จากสมการ

$$m = \frac{y_{4_2} - y_{4_1}}{x_{4_2} - x_{4_1}} \quad (3.58)$$

จากนั้นนำสมการพาราโบลา (Parabola) ที่ตัดกับสมการเส้นตรงมาหาพิกัดที่ตัดกัน และทำการหาอนุพันธ์ของสมการพาราโบลา (Parabola) โดยใช้พิกัดที่ตัดกันเพื่อหามุมที่แรงดึงของสายส่งตกลงบนโหลดเซลล์ (Loadcell)

3.10.5.3 หาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ของโหลดเซลล์ (Load cell) และสายส่งเหนือหัวเพื่อหาจุดสัมผัส

จากการคำนวณในหัวข้อ 3.10.5.1 โดยเริ่มให้พิกัดของจุด B มีค่าเท่ากับ (-0.34,0) จนถึงที่พิกัด (-0.15,0) โดยเพิ่มระยะ x ครั้งละ 0.01 จะได้พิกัดของจุด D เป็นไปดังนี้

x1	x2	y1	y2	theta3	x3	y3	x4	y4
-0.34	-0.231	0	0.167806	56.99394	-0.03708	0.466353	-0.03708	0.512353
-0.33	-0.20134	0.081854	0.23498	49.96316	0.027664	0.507544	0.027664	0.553544
-0.32	-0.18537	0.114891	0.262793	47.68953	0.054271	0.526058	0.054271	0.572058
-0.31	-0.17154	0.139642	0.283963	46.18722	0.07492	0.540854	0.07492	0.586854
-0.3	-0.15877	0.16	0.301633	45.08164	0.092601	0.553721	0.092601	0.599721
-0.29	-0.14668	0.177482	0.316984	44.2264	0.108426	0.565292	0.108426	0.611292
-0.28	-0.13504	0.192873	0.330674	43.54959	0.122981	0.575951	0.122981	0.621951
-0.27	-0.12375	0.20664	0.343058	43.00717	0.136586	0.585882	0.136586	0.631882
-0.26	-0.11271	0.219089	0.354392	42.57162	0.149457	0.59523	0.149457	0.641223
-0.25	-0.10189	0.230434	0.364844	42.22372	0.161737	0.604086	0.161737	0.650086
-0.24	-0.0912	0.240832	0.374575	41.9496	0.173569	0.612553	0.173569	0.658553
-0.23	-0.08076	0.2504	0.383553	41.73967	0.184879	0.620559	0.184879	0.666559
-0.22	-0.0704	0.25923	0.391984	41.58581	0.195875	0.628276	0.195875	0.674276
-0.21	-0.06017	0.267395	0.399874	41.48261	0.206532	0.635686	0.206532	0.681686
-0.2	-0.05	0.274955	0.407308	41.42383	0.216942	0.642846	0.216942	0.688846
-0.19	-0.04	0.281957	0.414246	41.4099	0.226999	0.649719	0.226999	0.695719
-0.18	-0.03	0.288444	0.420833	41.43128	0.236911	0.656405	0.236911	0.702405
-0.17	-0.0202	0.294449	0.426961	41.49589	0.246445	0.662835	0.246445	0.708835
-0.16	-0.0104	0.3	0.432782	41.59152	0.255851	0.6691	0.255851	0.7151
-0.15	-0.00073	0.305123	0.438234	41.72489	0.26497	0.675172	0.26497	0.721172

รูปที่ 3.47 แสดงความสัมพันธ์พิกัดของจุด A B C และ D

นำสายส่งไปติดตั้งกับแบบจำลองเพื่อหาระยะห่างของจุดปลายทั้งสองและระยะหย่อนของเชือก ได้ค่าดังนี้

Tension	$L_{F/E}$ (m)	Sag (m)
High	0.695	0.025
Mid	0.681	0.064
Low	0.666	0.086

รูปที่ 3.48 แสดงระยะห่างของจุดปลายทั้งสองและระยะหย่อนของเชือก

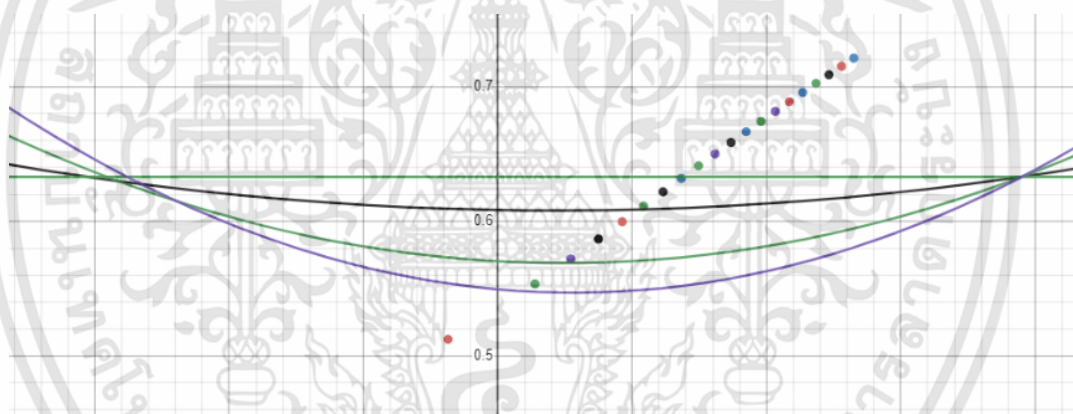
จะได้สมการพาราโบลา (Parabola) ทั้งหมดสามสมการดังนี้

$$y - 0.608 = 0.207(x - 0.0423)^2$$

$$y - 0.569 = 0.552(x - 0.0495)^2$$

$$y - 0.547 = 0.775(x - 0.57)^2$$

นำข้อมูลจากรูปที่ 3.47 และสมการพาราโบลา (Parabola) ทั้งสามไปพล็อตกราฟเพื่อหาจุดตัด



รูปที่ 3.49 แสดงจุดตัดกันของเส้นทางการเคลื่อนที่ของโหลดเซลล์ (Load cell) และกราฟพาราโบลา (Parabola) ทั้งสาม

เมื่อเส้นพาราโบลา (Parabola) สีดำมีสมการ $y - 0.608 = 0.207(x - 0.0423)^2$

เส้นพาราโบลา (Parabola) สีเขียวมีสมการ $y - 0.569 = 0.552(x - 0.0495)^2$

และเส้นพาราโบลา (Parabola) สีม่วงมีสมการ $y - 0.547 = 0.775(x - 0.057)^2$

จุดตัดของพาราโบลา (Parabola) สีดำอยู่ระหว่างจุด (0.1084, 0.6113) และ (0.0926, 0.5997)

ดังนั้น สมการเส้นตรงของสองจุดนี้คือ $y = 0.734x + 0.5317$

หาจุดตัดของทั้งสองสมการจะได้ $x = 0.105$ ทำการหาอนุพันธ์ของสมการพาราโบลา (Parabola)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dy}{dx} = \frac{d(0.207(x - 0.0423)^2 + 0.608)}{dx}$$

$$\frac{dy}{dx} = 0.414x - 0.0175$$

เมื่อนำพิกัด $x = 0.105$ แทนลงในสมการเพื่อหาความชันจะได้ 0.02597 หรือจะได้มุมสัมผัส ($\theta_{contact1}$) เท่ากับ 1.4876 องศา

จุดตัดของพาราโบลา (Parabola) สีเขียวอยู่ระหว่างจุด $(0.0543, 0.5721)$ และ $(0.0277, 0.5535)$ ดังนั้น สมการเส้นตรงของสองจุดนี้คือ $y = 0.699x + 0.5341$

หาจุดตัดของทั้งสองสมการจะได้ $x = 0.0499$ ทำการหาอนุพันธ์ของสมการพาราโบลา (Parabola)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{d(0.552(x - 0.0495)^2 + 0.569)}{dx}$$

$$\frac{dy}{dx} = 1.104x - 0.0546$$

เมื่อนำพิกัด $x = 0.0499$ แทนลงในสมการเพื่อหาความชันจะได้ 0.0004896 หรือจะได้มุมสัมผัส ($\theta_{contact2}$) เท่ากับ 0.028 องศา

จุดตัดของพาราโบลา (Parabola) สีดำอยู่ระหว่างจุด $(0.0277, 0.5535)$ และ $(-0.0371, 0.5123)$ ดังนั้น สมการเส้นตรงของสองจุดนี้คือ $y = 0.635x + 0.5358$

หาจุดตัดของทั้งสองสมการจะได้ $x = 0.01936$ ทำการหาอนุพันธ์ของสมการพาราโบลา (Parabola)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{d(0.775(x - 0.057)^2 + 0.547)}{dx}$$

$$\frac{dy}{dx} = 1.55x - 0.0883$$

เมื่อนำพิกัด $x = 0.01936$ แทนลงในสมการเพื่อหาความชันจะได้ -0.0583 หรือจะได้มุมสัมผัส ($\theta_{contact3}$) เท่ากับ 3.33 องศา

3.6.6 หาแรงสัมผัสแรกที่กระทำบนโหลดเซลล์ (Load cell) โดยวิเคราะห์แรงกระทำบนเชือก

จากสมการระยะหย่อนและแรงดึงของเชือกภายใต้แรงกระจายตัวสม่ำเสมอ

$$y(x) = \int_0^x dy = \frac{T_0}{w_0} \left(\cosh \frac{w_0 x}{T_0} - 1 \right) \quad (3.59)$$

$$T = T_0 \cosh \frac{w_0 x}{T_0} \quad (3.60)$$

เมื่อนำข้อมูลจากรูป 3.48 มาแทนกลับลงในสมการ โดยให้ $y(x) = s$ และ $\frac{L_{F/E}}{2} = x$ โดยมีน้ำหนักของสายส่งอยู่ที่ (w_0) เท่ากับ 3.7 N/m แทนลงในสมการ (3.56) จะได้แรงดึงเชือกในแนวระนาบ (T_0) และนำค่าแรงดึงเชือกที่มากที่สุดแทนกลับลงในสมการที่ (3.57) เพื่อหาค่าแรงดึงในเส้นเชือก (T) จะได้ค่าดังนี้

Tension	T_0 (N)	T (N)
High	8.95134	9.04384
Mid	3.39	3.62681
Low	2.436	2.7543

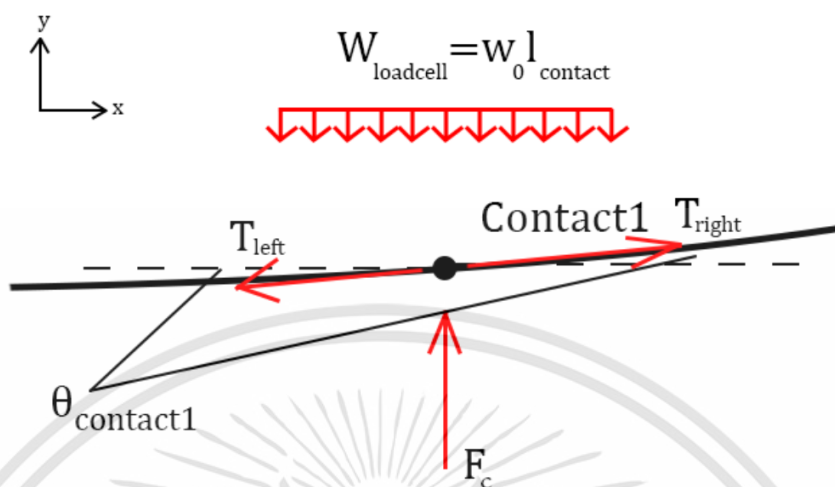
รูปที่ 3.50 แสดงค่าแรงดึงเชือกในแนวระนาบและแรงดึงในเส้นเชือก

นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์แรงสัมผัสโดยคำนวณบนแผนภาพอิสระของเส้นเชือก

วิเคราะห์แรงสัมผัส ณ แรงดึงเชือกระดับที่ 1



รูปที่ 3.51 แสดงการสัมผัสของสายส่งและโหลดเซลล์ (Load cell) ที่จุดสัมผัสที่ 1



รูปที่ 3.52 แสดงแผนภาพอิสระบนสายส่งที่จุดสัมผัสที่ 1

เมื่อน้ำหนักของสายส่งมีค่า (w_0) เท่ากับ 3.7 N/m ค่าแรงตึงในเส้นเชือกอยู่ที่ 9.043 N และมีพื้นที่สัมผัสกับโหลดเซลล์ (Load cell) อยู่ 100 มิลลิเมตร

$$\rightarrow \sum F_x = 0$$

$$-T_{left} \cos \theta_{contact1} + T_{right} \cos \theta_{contact1} = 0$$

$$T_{left} \cos \theta_{contact1} = T_{right} \cos \theta_{contact1}$$

$$T_{left} = T_{right}$$

$$\uparrow \sum F_y = 0$$

$$F_c + T_{right} \cos \theta_{contact1} - T_{left} \cos \theta_{contact1} - w_0 l_{contact} = 0$$

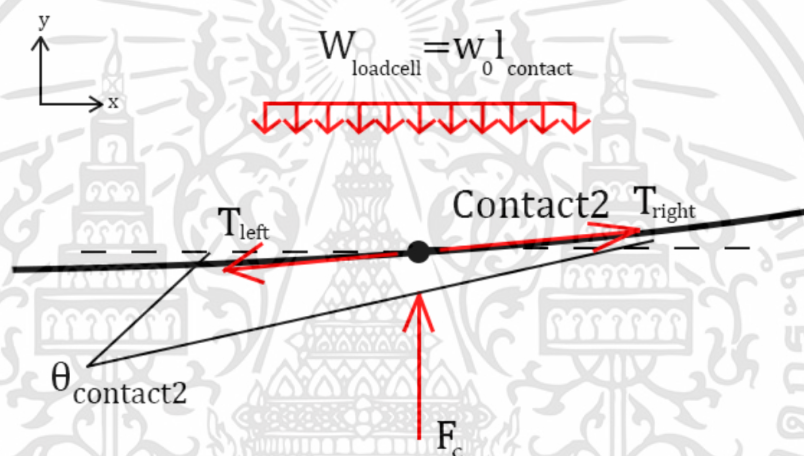
$$F_c = 3.7 \times 0.1$$

$$F_c = 0.37 \text{ N}$$

วิเคราะห์แรงสัมผัส ณ แรงดึงเชือกครั้งที่ 2



รูปที่ 3.53 แสดงการสัมผัสของสายส่งและโหลดเซลล์ (Load cell) ที่จุดสัมผัสที่ 2



รูปที่ 3.54 แสดงแผนภาพอิสระบนสายส่งที่จุดสัมผัสที่ 2

เมื่อน้ำหนักของสายส่งมีค่า (w_0) เท่ากับ 3.7 N/m ค่าแรงดึงในเส้นเชือกอยู่ที่ 3.626 N และมีพื้นที่สัมผัสกับโหลดเซลล์ (Load cell) อยู่ 60 มิลลิเมตร

$$\rightarrow \sum F_x = 0$$

$$-T_{left} \cos \theta_{contact2} + T_{right} \cos \theta_{contact2} = 0$$

$$T_{left} \cos \theta_{contact2} = T_{right} \cos \theta_{contact2}$$

$$T_{left} = T_{right}$$

$$\uparrow \sum F_y = 0$$

$$F_c + T_{right} \cos \theta_{contact2} - T_{left} \cos \theta_{contact2} - w_0 l_{contact} = 0$$

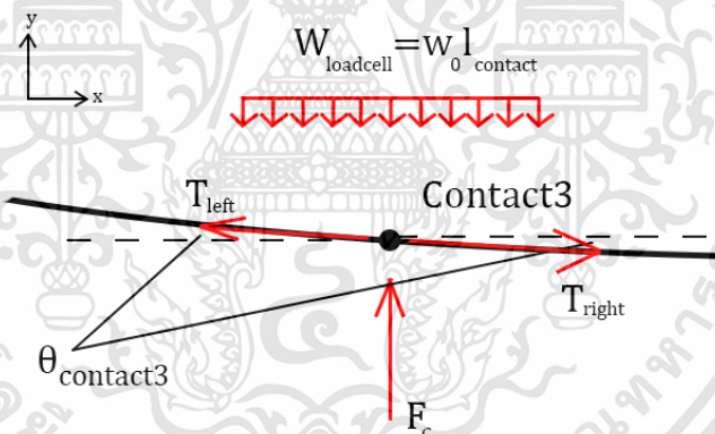
$$F_c = 3.7 \times 0.09$$

$$F_c = 0.333 \text{ N}$$

วิเคราะห์แรงสัมผัส ณ แรงดึงเชือกระดับที่ 3



รูปที่ 3.55 แสดงการสัมผัสของสายส่งและโหลดเซลล์ (Load cell) ที่จุดสัมผัสที่ 3



รูปที่ 3.56 แสดงแผนภาพอิสระบนสายส่งที่จุดสัมผัสที่ 3

เมื่อน้ำหนักของสายส่งมีค่า (w_0) เท่ากับ 3.7 N/m ค่าแรงดึงในเส้นเชือกอยู่ที่ 2.7543 N และมีพื้นที่สัมผัสกับโหลดเซลล์ (Load cell) อยู่ 60 มิลลิเมตร

$$\rightarrow \sum F_x = 0$$

$$-T_{left} \cos \theta_{contact3} + T_{right} \cos \theta_{contact3} = 0$$

$$T_{left} \cos \theta_{contact3} = T_{right} \cos \theta_{contact3}$$

$$T_{left} = T_{right}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\uparrow \sum F_y = 0$$

$$F_c + T_{left} \cos \theta_{contact3} - T_{right} \cos \theta_{contact3} - w_0 l_{contact} = 0$$

$$F_c = 3.7 \times 0.1$$

$$F_c = 0.37 \text{ N}$$

3.6.7 แรงสัมผัสจากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB

จากรูปที่ 3.44 ในหัวข้อ 3.10.4 สามารถนำเมทริกซ์ (Matrix) 9×9 มาหาค่าอินเวอร์ส (Inverse) ในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าแรงยกที่แพนโทกราฟ (Pantograph) กระทำกับโหลดเซลล์ (Load cell) ได้โดยจะเขียนโค้ดที่ต้องใส่ค่าอินพุต (Input) เป็นค่าความเร็วเชิงมุมของชิ้นส่วนที่ 2 (ω_2), ค่าความเร่งเชิงมุมของชิ้นส่วนที่ 2 (α_2) และค่ามุมของชิ้นส่วนที่ 2 (θ_2) เมื่อความเร็วเชิงมุม ค่าความเร่งเชิงมุม และมุม หาได้โดยใช้วิธีการนับเฟรมเรท (Frame rate) ในคลิปลีวิติโอ (VDO) โดยจะวัดค่าเมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) เริ่มสัมผัสกับสายส่ง

การวิเคราะห์หามุมของชิ้นส่วนที่ 2 (θ_2)



รูปที่ 3.57 แสดงการหามุมของชิ้นส่วนที่ 2 ขณะสัมผัสสายส่งจุดที่ 1



รูปที่ 3.58 แสดงการหามุมของชิ้นส่วนที่ 2 ขณะสัมผัสสายส่งจุดที่ 2



รูปที่ 3.59 แสดงการหามุมของชิ้นส่วนที่ 2 ขณะสัมผัสสายส่งจุดที่ 3

การวิเคราะห์หาค่าความเร็วเชิงมุมของชิ้นส่วนที่ 2 (ω_2)



รูปที่ 3.60 แสดงการวิเคราะห์ความเร็วเชิงมุมของชิ้นที่ 2 ขณะสัมผัสกับสายส่ง

$$\Delta\theta_2 = 5^\circ = 0.08726 \text{ rad}, \Delta t_2 = 0.75$$

$$\omega_{2_2} = \frac{\Delta\theta_2}{\Delta t_2} = \frac{0.08726}{0.75} = 0.116 \text{ rad/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์หาค่าความเร่งเชิงมุมของชั้นส่วนที่ 2 (α_2)



รูปที่ 3.61 แสดงการวิเคราะห์หาค่าความเร่งเชิงมุมของชั้นที่ 2 ขณะสัมผัสกับสายส่ง

$$\Delta\theta_{1,2} = 5^\circ = 0.08726 \text{ rad}$$

$$\Delta t_1 = 0.7083, \Delta t_2 = 0.75$$

$$\omega_{2_1} = \frac{\Delta\theta_1}{\Delta t_1} = \frac{0.08726}{0.7083}$$

$$\omega_{2_2} = \frac{\Delta\theta_2}{\Delta t_2} = \frac{0.08726}{0.75}$$

$$\alpha_2 = \frac{\omega_{2_2} - \omega_{2_1}}{\Delta t} = \frac{\frac{\Delta\theta_2}{\Delta t_2} - \frac{\Delta\theta_1}{\Delta t_1}}{\Delta t} = \frac{\frac{0.08726}{0.75} - \frac{0.08726}{0.7083}}{0.75} = -0.0913 \text{ rad/s}^2$$

จะได้ค่าความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม และ มุม ของชั้นส่วนที่ 2 ได้ดังนี้

Tension	frame rate 1	frame rate 2	Δt_1 (s)	Δt_2 (s)	ω_{2_1} (rad/s)	ω_{2_2} (rad/s)	α_2 (rad/s ²)	θ_2 (degree)
High	17	18	0.7083	0.75	0.123	0.116	-0.0091	40.679
Mid	14	15	0.5833	0.625	0.149	0.139	-0.01597	30.493
Low	12	13	0.5	0.5416	0.174	0.161	-0.0247	26.906

รูปที่ 3.62 ตารางสรุปค่าความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมของทุกจุดสัมผัส

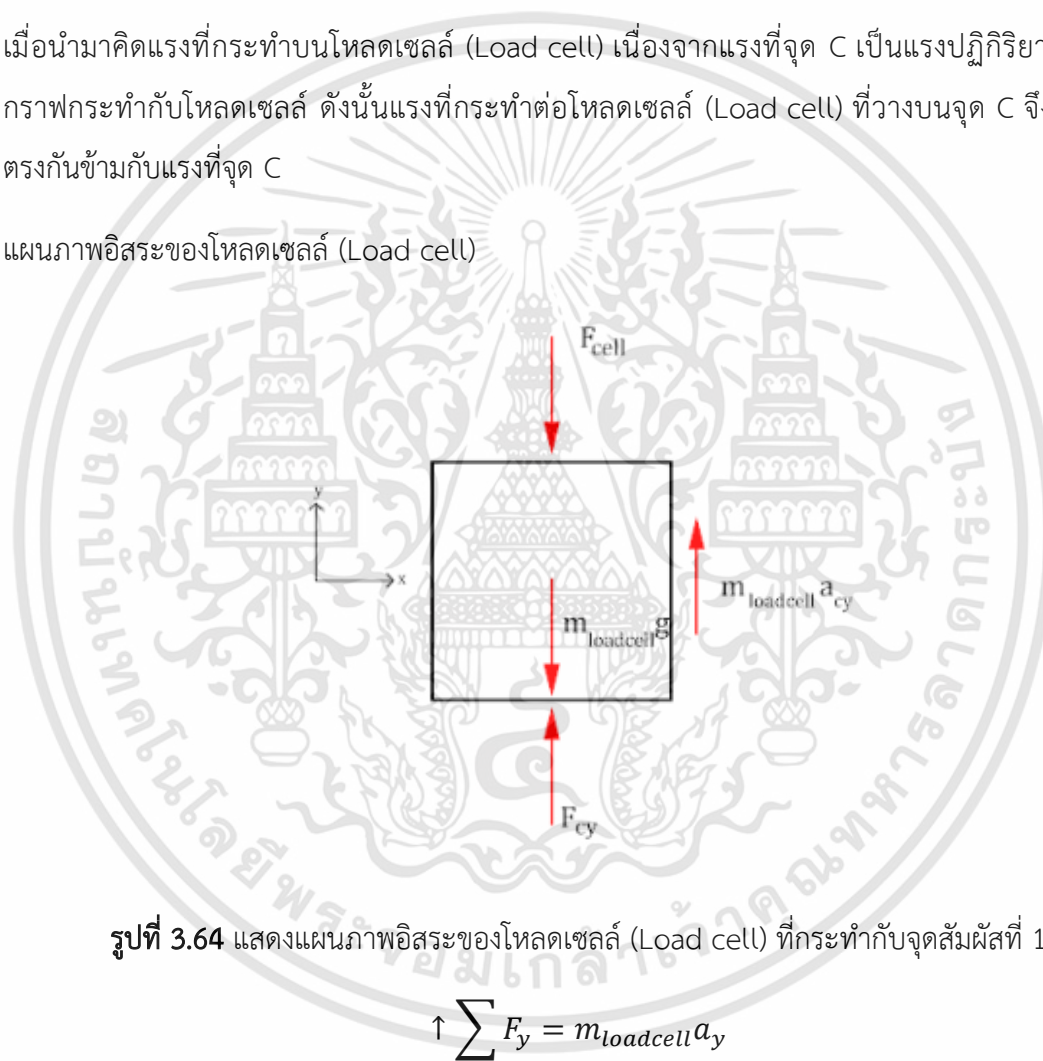
เมื่อได้ค่า ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม และ มุม ของชั้นส่วนที่ 2 แล้วนำมาแทนในโปรแกรม MATLAB จะได้ค่าแรงที่กระทำแกน y ณ จุด C ของ link3 โดยมีค่าทั้งหมดดังนี้

Tension	F_{cy} (N)	a_{cy} (m/s ²)
High	6.6238	0.0666
Mid	6.6387	-0.0097
Low	6.6377	-0.0226

รูปที่ 3.63 แสดงค่าแรงกระทำที่จุด C และความเร่งในแนวแกน y

เมื่อนำมาคิดแรงที่กระทำบนโหลดเซลล์ (Load cell) เนื่องจากแรงที่จุด C เป็นแรงปฏิกิริยาที่แพนโทกราฟกระทำกับโหลดเซลล์ ดังนั้นแรงที่กระทำต่อโหลดเซลล์ (Load cell) ที่วางบนจุด C จึงมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงที่จุด C

แผนภาพอิสระของโหลดเซลล์ (Load cell)



รูปที่ 3.64 แสดงแผนภาพอิสระของโหลดเซลล์ (Load cell) ที่กระทำกับจุดสัมผัสที่ 1

$$\uparrow \sum F_y = m_{loadcell} a_y$$

$$F_{cy} - m_{loadcell} g - F_{cell} = m_{loadcell} a_{cy}$$

$$6.6238 - 0.63(9.81) - F_{cell} = 0.63(0.0666)$$

$$F_{cell} = 0.4015 \text{ N หรือประมาณ } 0.041 \text{ kg}$$

โดย $m_{loadcell}$ คือ มวลของโหลดเซลล์ (Load cell) โดยมีค่า 0.63 กิโลกรัม

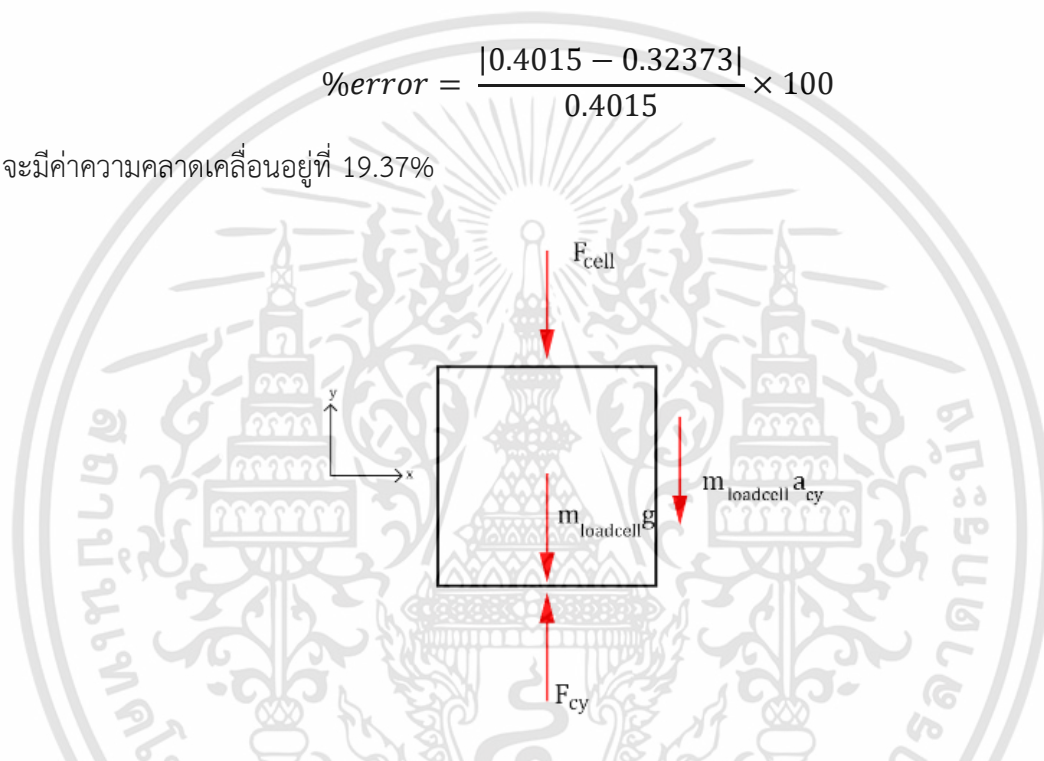
เมื่อหาความคลาดเคลื่อนโดยใช้สมการ

$$\%error = \frac{|theory - experimental|}{theory} \times 100$$

ซึ่งค่าจากทฤษฎี หรือค่าที่ได้ที่ได้จาก MATLAB มีค่า 0.4015 N และค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจริงมีค่า 0.32373 N นำมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนจะได้

$$\%error = \frac{|0.4015 - 0.32373|}{0.4015} \times 100$$

จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 19.37%



รูปที่ 3.65 แสดงแผนภาพอิสระของโหลดเซลล์ (Load cell) ที่กระทำกับจุดสัมผัสที่ 2

$$\downarrow \sum F_y = m_{loadcell} a_y$$

$$-F_{cy} + m_{loadcell} g + F_{cell} = m_{loadcell} a_{cy}$$

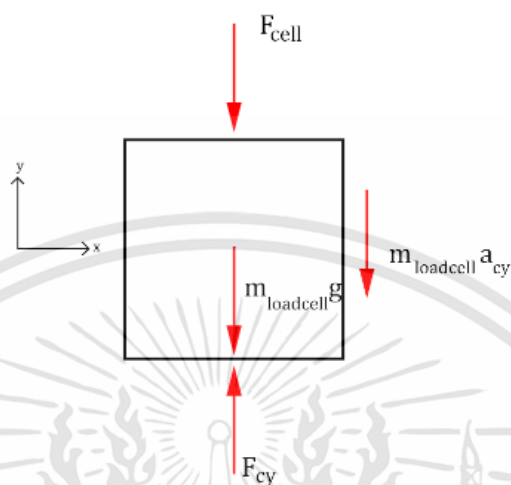
$$-6.6387 + 0.63(9.81) + F_{cell} = 0.63(0.0097)$$

$$F_{cell} = 0.4645 \text{ N หรือประมาณ } 0.0473 \text{ kg}$$

ซึ่งค่าจากทฤษฎี หรือค่าที่ได้ที่ได้จาก MATLAB มีค่า 0.4645 N และค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีค่า 0.3597 N นำมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนจะได้

$$\%error = \frac{|0.4645 - 0.3597|}{0.4645} \times 100$$

จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 22.562%



รูปที่ 3.66 แสดงแผนภาพอิสระของโหลดเซลล์ (Load cell) ที่กระทำกับจุดสัมผัสที่ 3

$$\downarrow \sum F_y = m_{loadcell} a_y$$

$$-F_{cy} + m_{loadcell}g + F_{cell} = m_{loadcell}a_{cy}$$

$$-6.6377 + 0.63(9.81) + F_{cell} = 0.63(0.0226)$$

$$F_{cell} = 0.4716 \text{ N หรือประมาณ } 0.048 \text{ kg}$$

ซึ่งค่าจากทฤษฎี หรือค่าที่ได้ที่ได้จาก MATLAB มีค่า 0.4716 N และค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีค่า 0.3597 N นำมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนจะได้

$$\%error = \frac{|0.4716 - 0.3597|}{0.4716} \times 100$$

จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 23.727%

3.6.8 หาค่าแรงสัมผัสคงที่เมื่อโหลดเซลล์ (Load cell) อยู่ ณ จุดสูงสุด

เนื่องจาก ณ จุดสูงสุด หรือจุดที่โหลดเซลล์ (Load cell) ไม่มีการเคลื่อนที่ แรงที่สายส่งกระทำกับ โหลดเซลล์ (Load cell) จึงเป็นแรงในสภาวะสมดุล เมื่อวิเคราะห์จากรูป



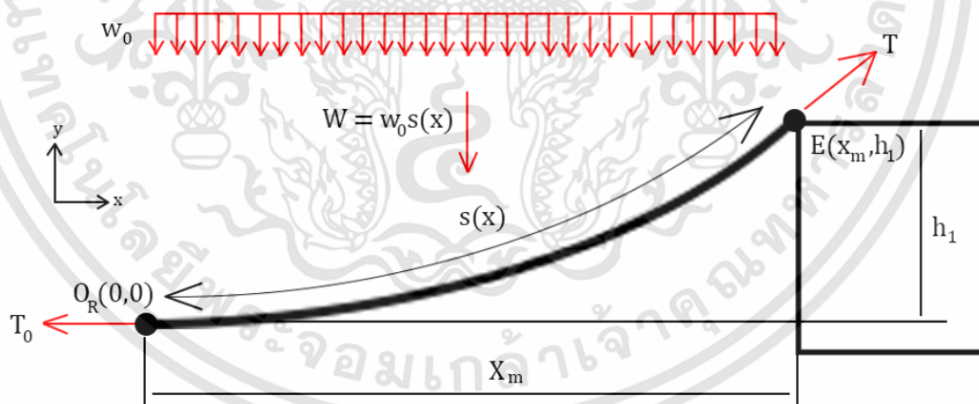
รูปที่ 3.67 แสดงสถานะสมดุลของสายส่งบนโหลดเซลล์ (Load cell)

จากรูปสามารถอธิบายได้ว่า ในสถานะสมดุลจะมีแรงที่กระทำบนโหลดเซลล์ทั้งหมด 3 แรง ประกอบด้วย แรงดึงเชือกฝั่งซ้าย แรงดึงเชือกฝั่งขวา และน้ำหนักของสายส่งที่ตกลงบนโหลดเซลล์ (Load cell)



รูปที่ 3.68 แสดงภาพอย่างง่ายของสายทั้งสองฝั่งของโหลดเซลล์ (Load cell)

3.10.8.1 คำนวณหาแรงดึงในเส้นเชือกที่กระทำบนโหลดเซลล์ (Load cell)



รูปที่ 3.69 แสดงแผนภาพอิสระของเชือกที่พาดบนโหลดเซลล์ (Load cell)

เนื่องจากระยะห่างของจุดปลายทั้งสองและระยะหย่อนของเชือกในแต่ละฝั่งมีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้แรงดึงในเส้นเชือกของทั้งสองฝั่งมีค่าต่างกัน จึงต้องแยกคำนวณ โดยค่าระยะห่างฝั่งซ้ายและฝั่งขวา ค่าระยะห่างจากจุด E ไปจุดกำเนิดของพาราโบลา (Parabola) และระยะหย่อนของเชือกของแต่ละระดับการปรับสายมีค่าดังนี้

Tension	L_{left} (m)	h_{1left} (m)	h_{2left} (m)	X_{mleft} (m)	L_{right} (m)	h_{1right} (m)	h_{2right} (m)	X_{mright} (m)
High	0.35	0.007	0.018	0.15	0.272	0.003	0.011	0.1
Mid	0.33	0.025	0.036	0.17	0.225	0.005	0.016	0.1
Low	0.32	0.048	0.059	0.19	0.225	0.007	0.018	0.11

รูปที่ 3.70 ระยะห่างต่าง ๆ บนสายส่ง

ขั้นตอนแรก หาความยาวของสายในรูปที่ 3.68 โดยใช้สมการพาราโบลา (Parabola) ซึ่งสมการพาราโบลา (Parabola) หาได้จาก

$$(y - k) = a(x - h)^2$$

โดยมีจุดต่ำสุดที่จุด O_R โดยให้มีกัตที่ $(0,0)$ จากนั้นทำการหาค่า a ในสมการโดยนำจุด E แทนกลับลงในสมการ จะได้ความสัมพันธ์ของค่า a ดังนี้

$$a = \frac{h_1}{x_m^2} \quad (3.58)$$

จากนั้นหาความยาวของสายส่งจากจุด E ไปจุด O_R โดยใช้สมการ

$$s = \int_0^{x_m} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (3.59)$$

จากนั้นทำการหาแรงตึงเชือกในแนวระดับของสายส่งจาก

$$s(x_m) = \frac{T_0}{w_0} \sinh \frac{w_0 x_m}{T_0} \quad (3.60)$$

เมื่อได้ค่าแรงตึงเชือกในแนวระดับจากสมการ (3.60) แล้ว นำค่าที่ได้มาหาแรงตึงในเส้นเชือกจาก

$$T = T_0 \cosh \frac{w_0 x_m}{T_0} \quad (3.61)$$

และทำการหามุมที่เชือกกระทำที่จุดปลายจากสมการ

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{w_0 s(x_m)}{T_0} \right) \quad (3.62)$$

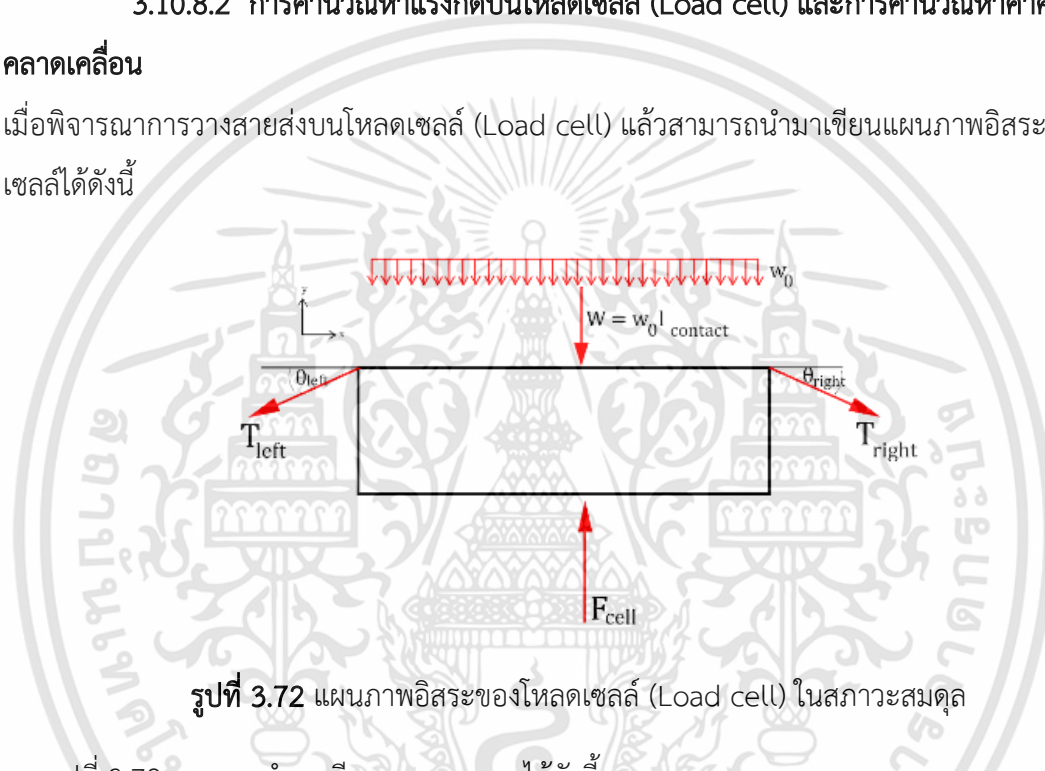
เมื่อนำค่าในรูปที่ 3.69 มาแทนลงในสมการ (3.58) ถึงสมการ (3.62) จะได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

Tension	θ_{left} (degree)	T_{left} (N)	θ_{right} (degree)	T_{right} (N)
High	20.735	1.604	17.68	1.11
Mid	34.521	1.188	21.42	1.04
Low	42.662	1.16	23.94	1.034

รูปที่ 3.71 ตารางแสดงค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณ

3.10.8.2 การคำนวณหาแรงกดบนโหลดเซลล์ (Load cell) และการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน

เมื่อพิจารณาการวางสายส่งบนโหลดเซลล์ (Load cell) แล้วสามารถนำมาเขียนแผนภาพอิสระของโหลดเซลล์ได้ดังนี้



รูปที่ 3.72 แผนภาพอิสระของโหลดเซลล์ (Load cell) ในสภาวะสมดุล

จากรูปที่ 3.72 สามารถนำมาเขียนสมการสมดุลได้ดังนี้

$$\uparrow \sum F_y = 0$$

$$F_{cell} - T_{left} \sin \theta_{left} - T_{right} \sin \theta_{right} - W = 0$$

$$F_{cell} = T_{left} \sin \theta_{left} + T_{right} \sin \theta_{right} + w_0 l_{contact} \quad (3.63)$$

เมื่อนำหน้ากับความยาวของสายส่ง (w_0) = 3.7 N/m และมีค่าความยาวสายส่งที่ตกลงบนโหลดเซลล์ (Load cell) เมื่อเรียงตามระยะหย่อนของสายส่งที่น้อยที่สุดไปจนถึงระยะหย่อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.12 m, 0.13 m และ 0.13 m ตามลำดับ

ตัวอย่างการคำนวณแรงกระทำบนโหลดเซลล์ (Load cell) ของระยะหย่อนของสายที่น้อยที่สุดจากสมการ (3.63) จะได้

$$F_{cell} = [1.604 \times \sin(20.735^\circ)] + [1.11 \times \sin(17.68)] + (3.7 \times 0.12)$$

$$F_{cell} = 1.349 \text{ N}$$

ซึ่งค่าจากทฤษฎีเท่ากับ 1.012 N และค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีค่า 1.503 N นำมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนจะได้

$$\%error = \frac{|1.349 - 1.503|}{1.349} \times 100 = 11.41\%$$

จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 11.41%

เมื่อนำค่าจากรูปที่ (3.71) มาหาแรงกระทำบนโพลดเซลล์ จะได้ค่าดังนี้

Tension	F_{cell} (N)	Experimental (N)	%error
High	1.349	1.503	11.41
Mid	1.533	1.667	8.74
Low	1.686	1.726	2.37

รูปที่ 3.73 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลลัพธ์

จากการทำชุดทดลองแบบทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph) เสมือนของจริง หลังจากการปรับเวลาในการเคลื่อนที่ของชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph) ให้เสมือนของจริง ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดสอบการเคลื่อนที่เพื่อวัดแรงสัมผัสของแพนโทกราฟ (Pantograph) ที่เกิดขึ้น ขณะที่แพนโทกราฟ (Pantograph) เกิดการเคลื่อนที่

4.1 การทดสอบค่าแรงสัมผัสระหว่างสายส่ง และแพนโทกราฟ (Pantograph)



รูปที่ 4.1 การทดสอบค่าแรงสัมผัสระหว่างสายส่ง และแพนโทกราฟ (Pantograph)

การทดลองนี้เป็นการวัดแรงสัมผัสระหว่างสายส่ง และแพนโทกราฟ (Pantograph) โดยใช้มีการควบคุมตัวแปรต้นได้แก่ความดันและเวลาในการยกแพนโทกราฟ (Pantograph) เท่ากันทุกการทดลอง ความดันที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.28 MPa เวลาในการยก 4 วินาที โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง โดยแบ่งจากระยะความยาวของสายส่งตามแนวระดับ และระยะที่สายส่งหย่อนลงมาจากแนวระดับ โดยจะมีรายละเอียด คือ ระยะที่ 1 แรงดึงเชือกเนื่องจากน้ำหนักของสายส่งสูงสุด ระยะห่างจากจุดปลายทั้งสองตามแนวระดับ 695 มิลลิเมตร และมีระยะหย่อนลงมาจากแนวระดับ 25 มิลลิเมตร ระยะที่ 2 แรงดึงเชือกเนื่องจากน้ำหนักของสายระดับกลาง ระยะห่างจากจุดปลายทั้งสองตามแนวระดับ 681 มิลลิเมตร และมีระยะหย่อนลงมาจากแนวระดับ 64 มิลลิเมตร ระยะที่ 3 แรงดึงเชือกเนื่องจากน้ำหนักของสายต่ำ ระยะห่างจากจุดปลายทั้งสองตามแนวระดับ 666 มิลลิเมตร และมีระยะหย่อนลงมาจากแนวระดับ 86 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ประกอบโหลดเซลล์ (Load cell) เข้ากับส่วนหัวของชุดทดลองแพนโทกราฟ (Pantograph)
2. ทำการปรับระดับสายส่งตามระยะห่างจากจุดปลายทั้งสองตามแนวระดับ และระยะที่สายส่งหย่อนลงมาจากแนวระดับ
3. ทำการต่อระบบลม ทำการปรับวาล์วควบคุมลม 0.75 รอบในส่วนของฝั่งลมเข้า 0.5 รอบในส่วนของฝั่งลมออกโดยทำการต่อแบบควบคุมลมไหลจากฝั่งก้านสูบ (Meter out) และควบคุมลมที่ไหลเข้ากระบอกสูบฝั่งก้านสูบ (Meter in) เปิดวาล์วลมให้แพนโทกราฟ (Pantograph) เคลื่อนที่โดยแต่ละระยะจะทำการทดลอง 3 รอบ
4. ทำการบันทึกค่าแรงสัมผัสที่วัดได้ โดยจะพบว่า การอ่านค่าแรงของโหลดเซลล์มีการหน่วงเวลา จะเริ่มทำการแสดงผลค่าแรงออกมาทางคอมพิวเตอร์ หลังจากการแตะ 5 บรรทัดในหน้าจอแสดงผล จึงได้ทำการเริ่มจับบันทึกเวลา และแรงสัมผัส หลังจากทีหน้าจอแสดงผลผ่านไป 5 บรรทัดในหน้าจอแสดงผล (แต่ละบรรทัดจะมีการแสดงเวลาในหน่วยมิลลิวินาที)

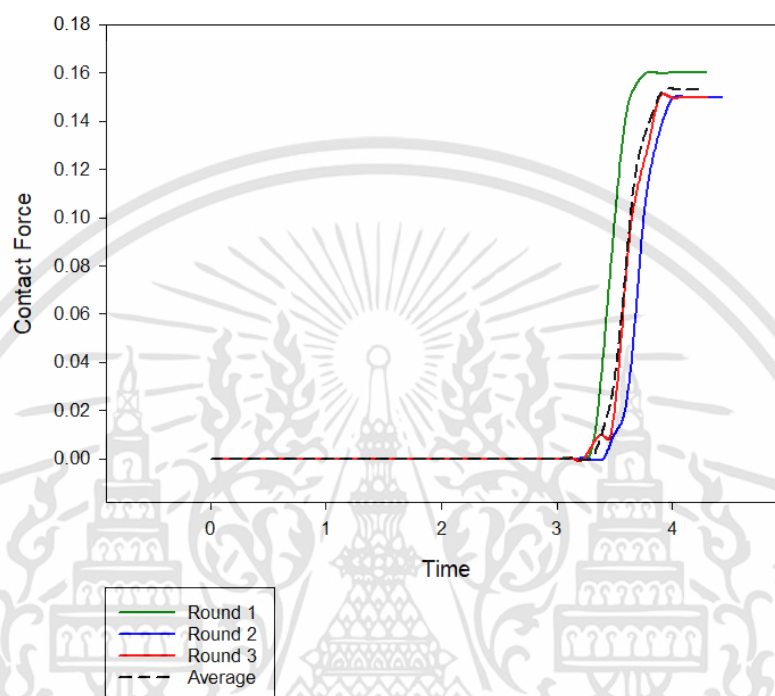


รูปที่ 4.2 การแสดงผลแรงสัมผัสบนหน้าจอ

5. นำข้อมูลที่ได้มาทำกราฟ โดยจะทำการกราฟแรงสัมผัสต่อเวลาของทั้งสามการทดลองจากนั้น หา ค่าเฉลี่ยของกราฟ เพื่อหาแรงสัมผัสเฉลี่ยของแต่ละระดับ

4.2 แรงสัมผัสของแพนโทกราฟ (Pantograph) ที่ความตึงเชือกสูงสุด

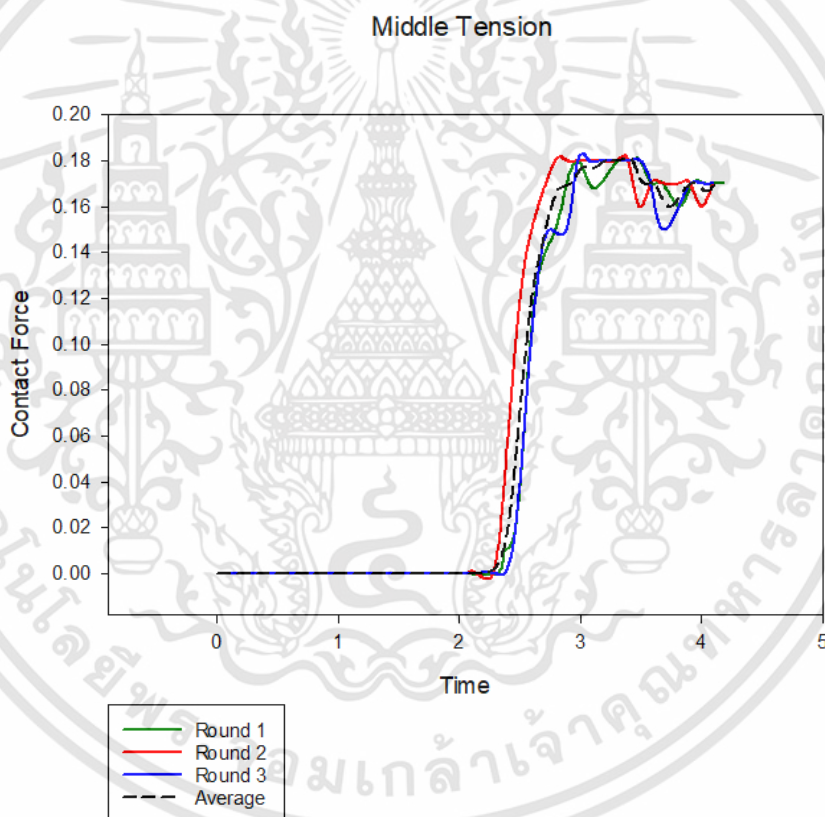
High Tension



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดลองแบบแรงตึงเชือกสูงสุด

จากการทดสอบแรงสัมผัสแพนโทกราฟ (Pantograph) ขณะแรงตึงเชือกสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักของสายส่ง โดยกำหนดระยะห่างจากจุดปลายทั้งสองตามแนวระดับ 695 มิลลิเมตร และมีระยะหย่อนลงมาตามแนวระดับ 25 มิลลิเมตร โดยจากการทำการทดลอง 3 ครั้งได้ผลดังกราฟ กล่าวคือในช่วงเวลาที่แพนโทกราฟ (Pantograph) เริ่มขึ้น 0-3.41 วินาที คือในช่วงที่แพนโทกราฟ (Pantograph) เริ่มเคลื่อนที่ขึ้นจะไม่มีแรงใดที่กระทำกับโหลดเซลล์ (Load cell) หรือแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์ (Load cell) มีค่าเป็น 0.00 kg จากนั้นในช่วง 3.50 วินาที จะอยู่ในช่วงที่โหลดเซลล์ (Load cell) เริ่มสัมผัสกับสายส่งและจะเริ่มมีการอ่านค่าแรงสัมผัส โดยจะเริ่มอ่านค่าแรกที่ 0.033 kg (ค่าเฉลี่ยจากการทำการทดลอง 3 ครั้ง) ช่วงเวลาต่อมาแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์ (Load cell) เนื่องจากการเคลื่อนที่ขึ้นของแพนโทกราฟ (Pantograph) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) หยุดการเคลื่อนที่แรงที่อ่านได้ก็จะหยุดที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยแรงคงที่ที่วัดได้จากการทดลองนี้คือ 0.153 kg (ค่าเฉลี่ยจากการทำการทดลอง 3 ครั้ง)

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าแรงสัมผัสแรกเกิดขึ้น ณ จุดที่โหลดเซลล์ (Load cell) สัมผัสใต้ท้องช้างพอดี ดังนั้นแรงสัมผัสที่เกิดบนโหลดเซลล์ (Load cell) คือ น้ำหนักของสายส่งโดยตรงไม่มีแรงดึงเชือกเข้ามาเกี่ยวข้องโดยตรงเนื่องจากบริเวณท้องช้างความชันของสายส่งจะเป็น 0 ส่งผลให้แรงดึงเชือกในแนวตั้งมีค่าเป็น 0 ด้วย ในส่วนของแรงที่เพิ่มขึ้นหลังจากแรงครั้งแรกที่สัมผัสเกิดจากการเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ (Pantograph) มีการดันสายส่งขึ้นไปในแนวตั้งส่งผลให้แรงดึงเชือกในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้นจากทั้งสองข้างของโหลดเซลล์ (Load cell) โดยแรงสุดท้ายที่เกิดขึ้นหลังจากน้ำหนักของสายส่งที่อยู่ในระยะของโหลดเซลล์ (Load cell) รวมเข้ากับแรงดึงเชือกจากทั้งสองข้างของโหลดเซลล์ (Load cell)



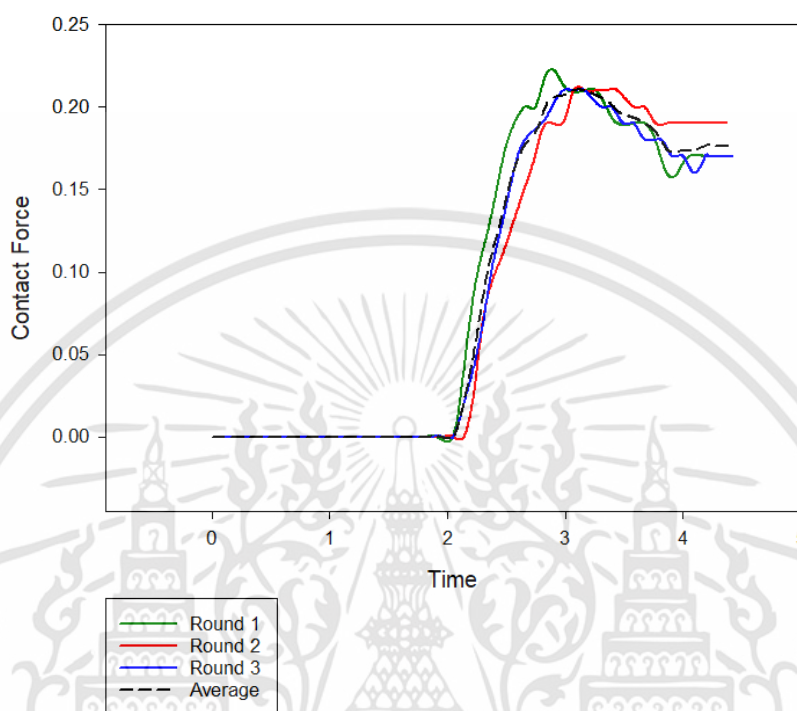
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดลองแบบแรงดึงเชือกระดับกลาง

จากการทดสอบแรงสัมผัสแพนโทกราฟขณะแรงดึงเชือกระดับกลางเนื่องจากน้ำหนักของสายส่ง โดยกำหนดระยะห่างจากจุดปลายทั้งสองตามแนวระดับ 681 มิลลิเมตร และมีระยะหย่อนลงมาจากแนวระดับ 64 มิลลิเมตร โดยจากการทำการทดลอง 3 ครั้งได้ผลดังกราฟ กล่าวคือในช่วงเวลาที่แพนโทกราฟ

(Pantograph) เริ่มขึ้น 0-2.31 วินาที คือในช่วงที่แพนโทกราฟ (Pantograph) เริ่มเคลื่อนที่ขึ้นจะไม่มีแรงไต่ที่กระทำกับโหลดเซลล์ (Load cell) หรือแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์ (Load cell) มีค่าเป็น 0.00 kg จากนั้นในช่วง 2.40 วินาที จะอยู่ในช่วงที่โหลดเซลล์ (Load cell) เริ่มสัมผัสกับสายส่งและจะเริ่มมีการอ่านค่าแรงสัมผัส โดยจะเริ่มอ่านค่าแรกที่ 0.04 kg (ค่าเฉลี่ยจากการทำการทดลอง 3 ครั้ง) ช่วงเวลาต่อมาแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์ (Load cell) เนื่องจากการเคลื่อนที่ขึ้นของแพนโทกราฟ (Pantograph) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) หยุดการเคลื่อนที่แรงที่อ่านได้ก็จะหยุดที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยแรงคงที่ที่วัดได้จากการทดลองนี้คือ 0.17 kg (ค่าเฉลี่ยจากการทำการทดลอง 3 ครั้ง)

โดยจากการทดลองจะเห็นได้ว่าแรงสัมผัสแรกมีแรงสัมผัสเนื่องมาจากจุดที่โหลดเซลล์ (Load cell) ทำการสัมผัสกับสายส่ง จะไม่ใช่จุดที่สายส่งตกห่างข้างพอดีแต่จะสัมผัสในส่วนทางด้านข้างของท้องข้าง ดังนั้นจึงส่งผลให้แรงที่สัมผัสกับโหลดเซลล์ (Load cell) ไม่ใช่ส่วนของน้ำหนักของสายส่งโดยตรง แต่จะเป็นในส่วนของแรงดึงเชือกทางฝั่งทางด้านของตัวปรับระดับความตึงเชือกของสายส่ง โดยในส่วนของแรงที่เพิ่มขึ้นหลังจากแรงครั้งแรกที่สัมผัสเกิดจากการเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ (Pantograph) มีการดันสายส่งขึ้นไปในแนวตั้ง ส่งผลให้แรงดึงเชือกในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้นจากทั้งสองข้างของโหลดเซลล์ (Load cell) โดยแรงสุดท้ายที่เกิดขึ้นหลังจากน้ำหนักของสายส่งที่อยู่ในระยะของโหลดเซลล์ (Load cell) รวมเข้ากับแรงดึงเชือกจากทั้งสองข้างของโหลดเซลล์ (Load cell)

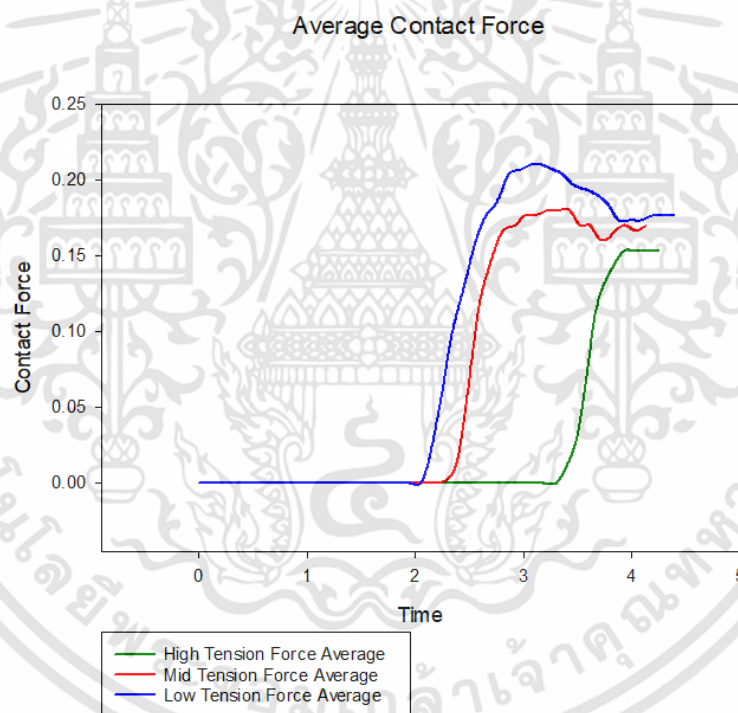
Low Tension



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดลองแบบแรงดึงเชือกระดับต่ำ

จากการทดสอบแรงสัมผัสแพนโทกราฟ (Pantograph) ขณะแรงดึงเชือกต่ำที่สุดที่สุดเนื่องจากน้ำหนักของสายส่ง โดยกำหนดระยะห่างจากจุดปลายทั้งสองตามแนวระดับ 666 มิลลิเมตร และมีระยะหย่อนลงมาจากแนวระดับ 86 มิลลิเมตร โดยจากการทำการทดลอง 3 ครั้งได้ผลดังกราฟ กล่าวคือในช่วงเวลาที่แพนโทกราฟ (Pantograph) เริ่มขึ้น 0-2.04 วินาที คือในช่วงที่แพนโทกราฟ (Pantograph) เริ่มเคลื่อนที่ขึ้นจะไม่มีแรงใดที่กระทำกับโหลดเซลล์ (Load cell) หรือแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์ (Load cell) มีค่าเป็น 0.00 kg จากนั้นในช่วง 2.14 วินาที จะอยู่ในช่วงที่โหลดเซลล์ (Load cell) เริ่มสัมผัสกับสายส่งและจะเริ่มมีการอ่านค่าแรงสัมผัส โดยจะเริ่มอ่านค่าแรกที่ 0.04 kg (ค่าเฉลี่ยจากการทำการทดลอง 3 ครั้ง) ช่วงเวลาต่อมา แรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์ (Load cell) เนื่องจากการเคลื่อนที่ขึ้นของแพนโทกราฟ (Pantograph) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) หยุดการเคลื่อนที่แรงที่อ่านได้ก็จะหยุดที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยแรงคงที่ที่วัดได้จากการทดลองนี้คือ 0.177 kg (ค่าเฉลี่ยจากการทำการทดลอง 3 ครั้ง)

โดยจากการทดลองจะเห็นได้ว่าแรงสัมผัสแรกมีแรงสัมผัสเนื่องมาจากจุดที่โหลดเซลล์ (Load cell) ทำการสัมผัสกับสายส่งจะไม่ใช่จุดที่สายส่งตกข้างข้างพอดี แต่จะสัมผัสในส่วนทางด้านข้างของห้องข้าง ดังนั้นจึงส่งผลให้แรงที่สัมผัสกับโหลดเซลล์ (Load cell) ไม่ใช่ส่วนของน้ำหนักของสายส่งโดยตรง แต่จะเป็นในส่วนของแรงดึงเชือกทางฝั่งทางด้านของตัวปรับระดับความตึงเชือกของสายส่ง โดยในส่วนของแรงที่เพิ่มขึ้นหลังจากแรงครั้งแรกที่สัมผัสเกิดจากการเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ (Pantograph) มีการดันสายส่งขึ้นไปในแนวตั้งส่งผลให้แรงดึงเชือกในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้นจากทั้งสองข้างของโหลดเซลล์ (Load cell) โดยแรงสุดท้ายที่เกิดขึ้นหลังจากน้ำหนักของสายส่งที่อยู่ในระยะของโหลดเซลล์ (Load cell) รวมเข้ากับแรงดึงเชือกจากทั้งสองข้างของโหลดเซลล์ (Load cell)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของแรงแต่ละระดับ

จะเห็นได้ว่า ณ จุดแรกที่แพนโทกราฟ (Pantograph) เริ่มสัมผัส ในขณะที่แรงดึงเส้นเชือกสูงที่สุด จะมีแรงสัมผัสสูงที่สุด โดยจะลดลงในแรงดึงเชือกระดับกลาง และแรงดึงเชือกต่ำที่สุดตามลำดับ ในส่วนของเวลา ณ จุดที่แรงดึงเชือกสูงที่สุดจะใช้เวลาในการที่แพนโทกราฟ (Pantograph) เริ่มสัมผัสสายส่งมาก

ที่สุดจะลดลงมาในแรงดึงเชือกระดับกลาง และแรงดึงเชือกต่ำที่สุดตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามแรงคงที่สุดท้าย หลังจากแพนโทกราฟ (Pantograph) หยุดการเคลื่อนที่แรงที่อ่านได้จะมีค่าน้อยที่สุดในช่วงที่แรงดึงเชือกสูงที่สุดจะเพิ่มขึ้นในแรงดึงเชือกระดับกลาง และแรงดึงเชือกต่ำที่สุดตามลำดับ

โดยสรุปได้ว่าแรงสัมผัสแรกที่อ่านค่าได้จะมีค่ามากที่สุด ในขณะที่แรงดึงเชือกสูงสุด และลดลงมาในขณะที่แรงดึงเชือกระดับกลาง และแรงดึงเชือกต่ำที่สุดตามลำดับ จึงระบุได้ว่าค่าของแรงดึงเชือกมีความสัมพันธ์กับแรงสัมผัส คือแรงดึงเชือกสูงมีผลทำให้ค่าของแรงสัมผัสสูงขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามขณะแรงดึงเชือกสูงสุด ค่าของแรงที่แสดงผลคงที่เมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) หยุดการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นตามลำดับในแรงดึงเชือกระดับกลาง และแรงดึงเชือกระดับต่ำ จึงระบุได้ว่าค่าของแรงดึงเชือกมีความสัมพันธ์กับค่าของแรงที่แสดงผลคงที่เมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) หยุดการเคลื่อนที่ กล่าวคือค่าแรงดึงเชือกสูงมีผลทำให้แรงคงที่ที่อ่านได้ในการสัมผัสต่ำลงไปในทิศทางตรงกันข้าม

จากผลที่เกิดขึ้นข้างต้นจะสังเกตได้ว่า ณ ขณะแรงดึงเชือกสูงแรงสัมผัสจะมีค่ามากที่สุดจะลดลงตามลำดับในแรงดึงเชือกระดับกลาง และแรงดึงเชือกระดับต่ำเนื่องจากลักษณะการสัมผัสที่แตกต่างกัน โดยกรณีความดึงเชือกสูงที่สุดจุดที่โหลดเซลล์ (Load cell) ทำการสัมผัสกับสายส่งจะเป็นจุดที่สายส่งมีลักษณะตกร่องข้างพอดี ดังนั้นจึงส่งผลให้แรงที่สัมผัสกับโหลดเซลล์ (Load cell) เป็นน้ำหนักของสายส่งโดยตรงแรงสัมผัสจึงมีค่ามากที่สุด โดยในส่วนของแรงดึงเชือกระดับกลาง และต่ำจุดที่โหลดเซลล์ทำการสัมผัสกับสายส่งจะไม่ใช่จุดที่สายส่งตกร่องข้างพอดี แต่จะสัมผัสในส่วนของด้านข้างของร่องข้าง ดังนั้นจึงส่งผลให้แรงที่สัมผัสกับโหลดเซลล์ (Load cell) ไม่ใช่ส่วนของน้ำหนักของสายส่งโดยตรง แต่จะเป็นในส่วนของแรงดึงเชือกที่กระทำด้านข้างของโหลดเซลล์ (Load cell) ฝั่งเดียว

ในส่วนของแรงสัมผัสที่เพิ่มขึ้นในขณะที่โหลดเซลล์ (Load cell) ดันสายส่งขึ้นในขณะที่สายส่งดันขึ้นไปในแนวตั้ง โดยเนื่องจากการที่โหลดเซลล์ (Load cell) ไปสัมผัสที่สายส่งจะก่อให้เกิดการตกร่องข้างของสายส่งทั้งสองข้างของโหลดเซลล์ (Load cell) ซึ่งแรงดึงเชือกในแนวตั้งแต่ละฝั่งจะมีค่าไม่เท่ากัน และจะมีค่ามากขึ้นตามระยะที่โหลดเซลล์ (Load cell) ดันสายส่งขึ้นไปในแนวตั้ง กล่าวคือ แรงดึงเชือกในแนวตั้งมีค่าผกผันกับระยะห่างในแนวตั้งของปลายทั้งสองของร่องข้างแต่ละฝั่ง

โดยส่วนของแรงคงที่เมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) หยุดเคลื่อนที่เกิดจากแรงตึงเชือก และน้ำหนักของสายโดยในความตึงเชือกแต่ละกรณีไม่เท่ากันเกิดขึ้นจากลักษณะของสายส่งในแต่ละกรณี ลักษณะแตกต่างกันส่งผลให้เมื่อแพนโทกราฟ (Pantograph) หยุดเคลื่อนที่จึงส่งผลให้แรงที่อ่านค่าได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละกรณี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและออกแบบระบบควบคุมแพนโทกราฟ (Pantograph) และแบบจำลองสายส่ง

1. การทดลองสามารถทำให้เข้าใจได้ถึงระบบการทำงานของแพนโทกราฟ เวลาในการเคลื่อนที่ลักษณะในการเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ (Pantograph) รวมไปถึง ลักษณะของการขึ้นไปสัมผัสสายส่ง
2. สามารถควบคุมให้แบบจำลองแพนโทกราฟ (Pantograph) มีการเคลื่อนที่ได้เหมาะสมตามค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ของรุ่นแบบจำลองต้นแบบอาทิเช่น เวลาในการยกขึ้นและลงที่เหมาะสม
3. สามารถวิเคราะห์หาแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นบนโหลดเซลล์ (Load cell) ผ่านการคำนวณแรงภายในกลไกและการคำนวณแรงดึงของเส้นเชือกภายใต้แรงกระทำแบบสม่ำเสมอ และสามารถศึกษาพฤติกรรมแรงสัมผัสที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระยะหย่อนของสายส่งได้
4. ความคลาดเคลื่อนของแรงสัมผัสที่วัดได้ ที่จุดสัมผัสจุดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 19.37%, ความคลาดเคลื่อนของแรงสัมผัสที่วัดได้ ที่จุดสัมผัสจุดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 22.562% และความคลาดเคลื่อนของแรงสัมผัสที่วัดได้ ที่จุดสัมผัสจุดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 23.727%

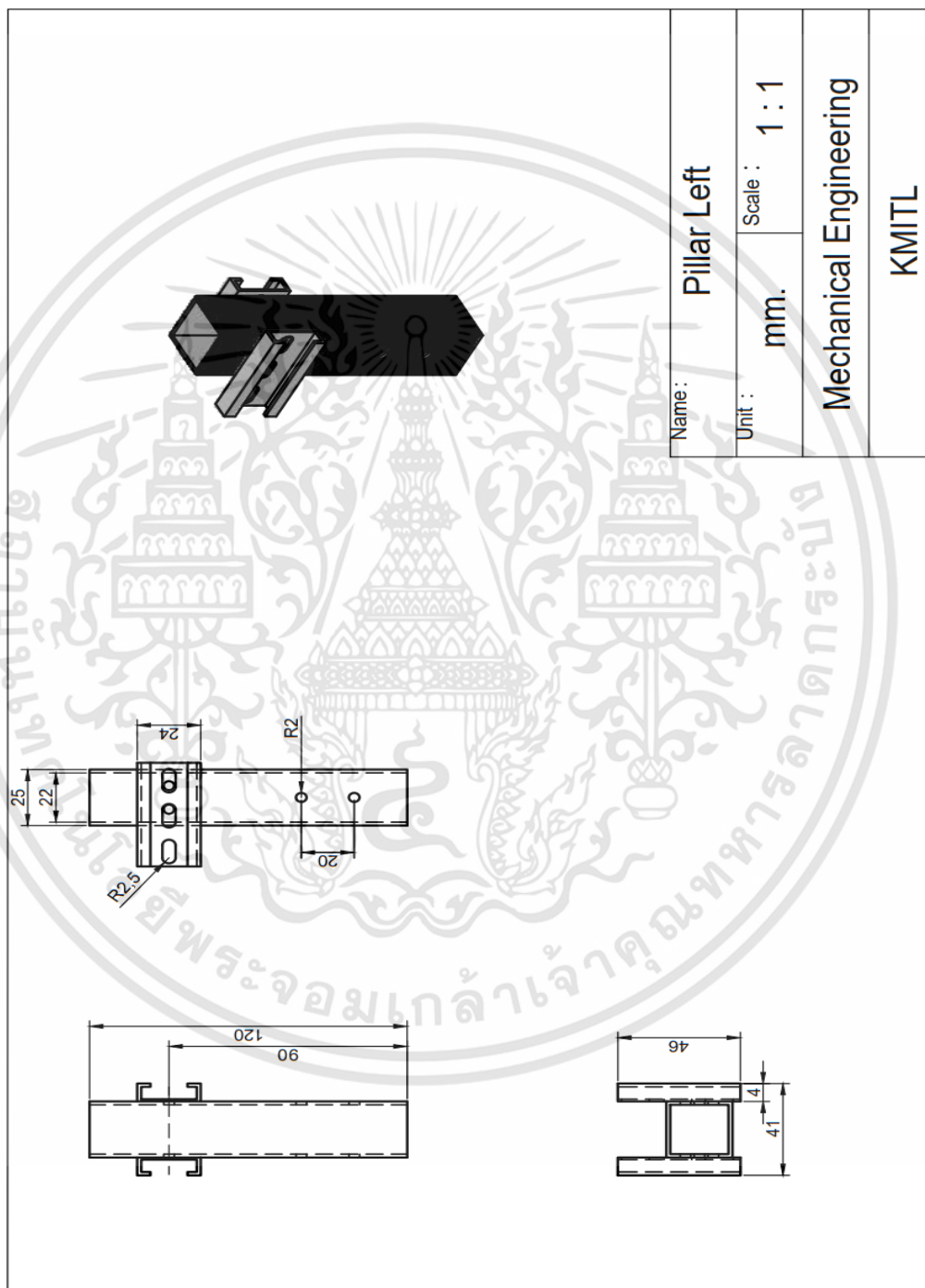
5.2 ปัญหาจากการศึกษาและข้อเสนอแนะ

1. การเปรียบเทียบค่าแรงที่เกิดขึ้นในโหลดเซลล์ (Load cell) และค่าแรงในทางทฤษฎีอาจจะมี ความคลาดเคลื่อน
2. ความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากแรงอากาศพลศาสตร์ ซึ่งทางผู้จัดทำได้ละเว้นในผลกระทบของ ส่วนนี้
3. ในการที่จะทำการวัดค่าแรงสัมผัสโดยโหลดเซลล์ (Load cell) จำเป็นต้องทำการต่อบอร์ดอาดูโน่ (Arduino) และทำการสอบเทียบก่อน
4. ทางผู้จัดทำได้ใช้สายตาในการหามุมแรงความดันความดันโดยมีอุปกรณ์การอ่านที่ค่อนข้างหยาบ ทำให้ค่าที่ได้ออกมามีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงอยู่พอสมควร

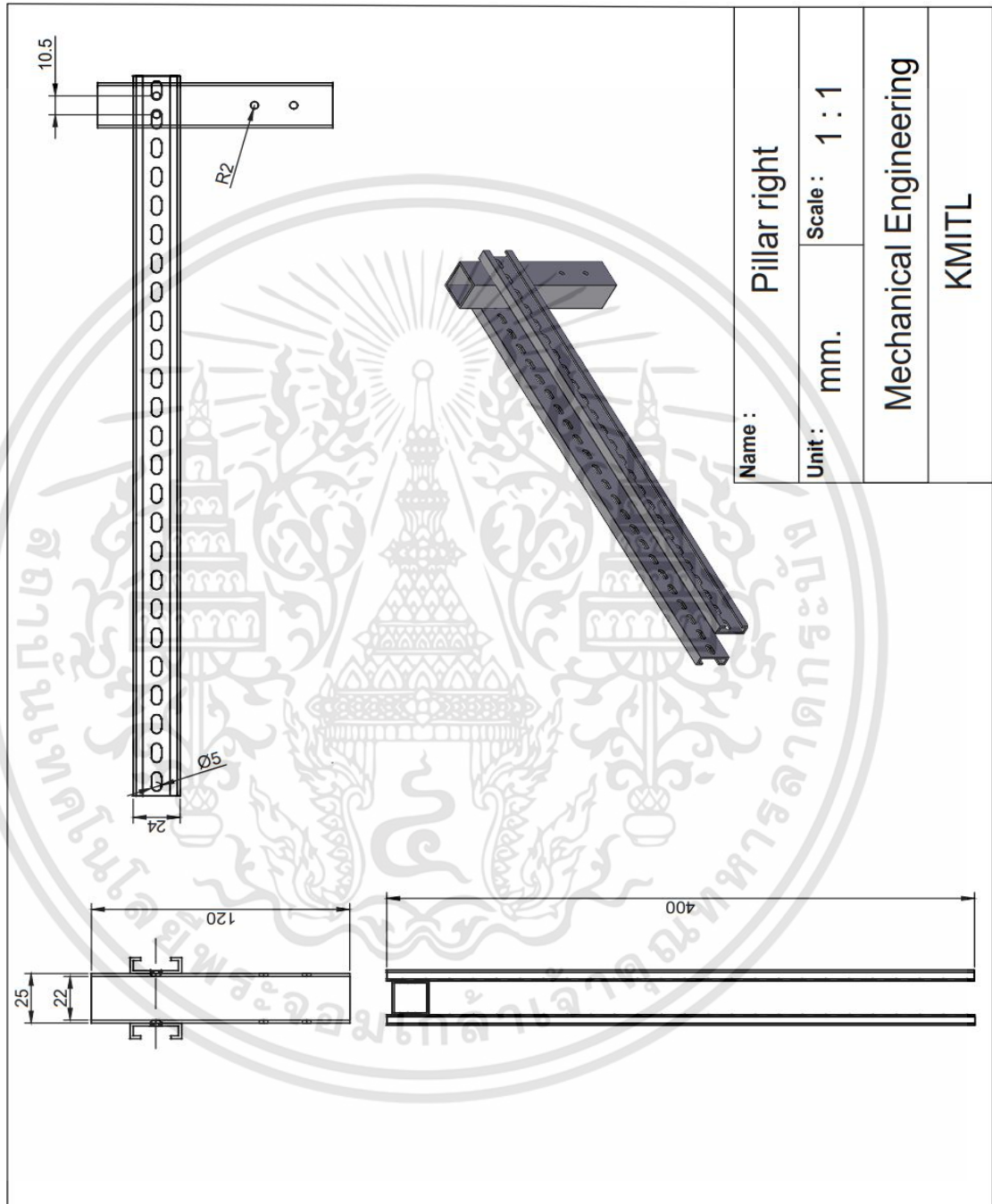


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

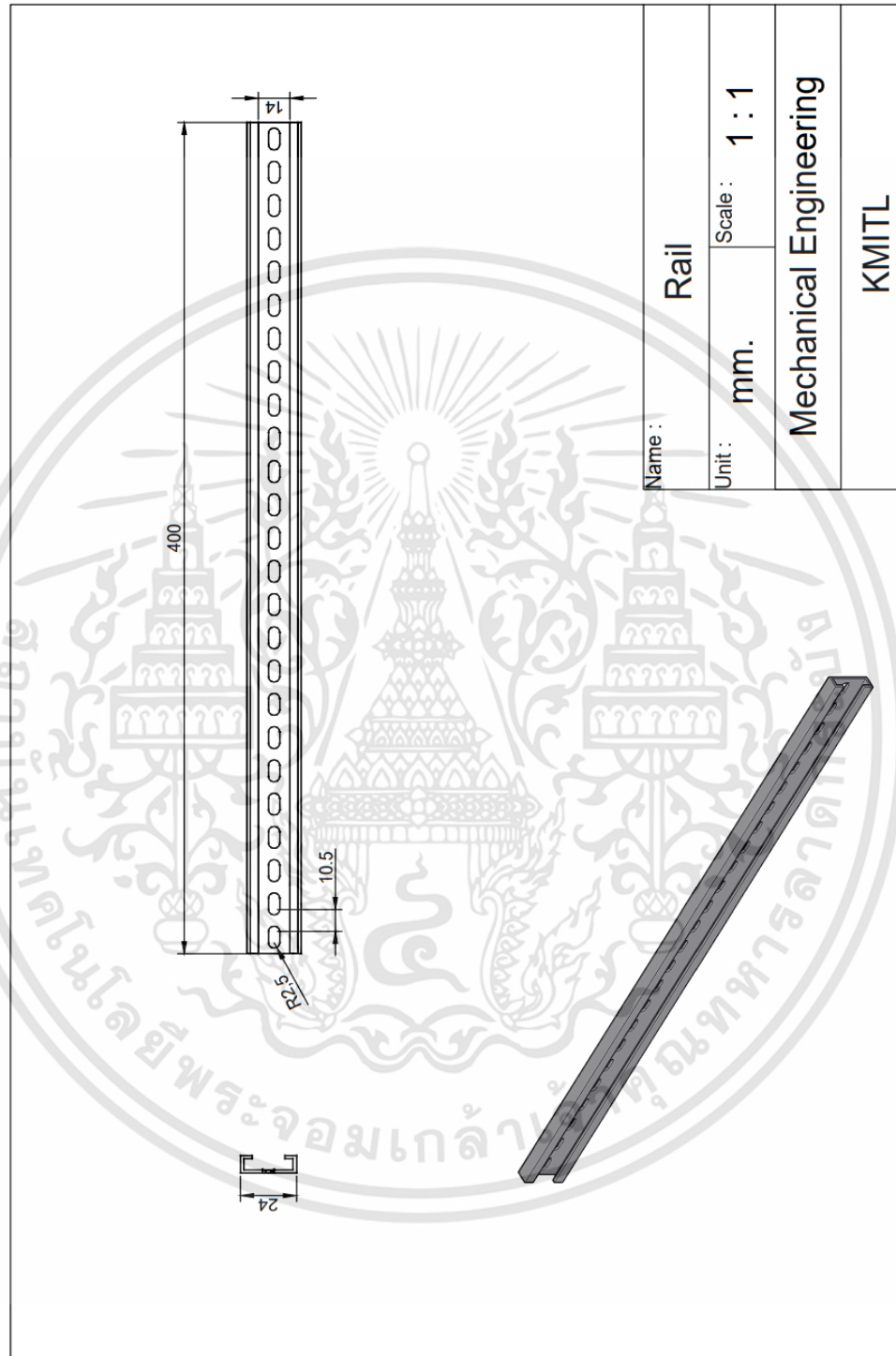
ภาคผนวก ก
แบบจำลองสายส่งแพนโทกราฟ (AutoCAD)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name : Pillar	
Unit : mm.	Scale : 1 : 1
Mechanical Engineering	
KMITL	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรมคำนวณ

คำนวณหาตัวแปรการสอบเทียบโปรแกรมอาร์ดูโน้ (Arduino)

```
#include "HX711.h"

#include <Wire.h>

#define DOUT A3

#define CLK A2

#define DEC_POINT 2

#define STABLE 1

float offset=0;

float calibration_factor = 1;

float real_weight = 1.560;//kg

HX711 scale(DOUT, CLK);

unsigned char state=0;

long FindZeroFactor();

float get_units_kg();

void ReadWeight();

void FindCalibrationFactor();

void setup()

{

    Serial.begin(115200);

    Serial.println();
```

```

Serial.println("Auto Calibrate Program");

Serial.println("Send 'a' to Find Zero Factor (Please Remove all weight from scale)");

Serial.println("Send 'b' to Find Calibration Factor (Please insert know the weight on the scales)");

Serial.println("Send 'c' Show weight on the scales");

}

void loop()

{

if(Serial.available())

{

char temp = Serial.read();

if(temp=='a')

state=1;

if(temp=='b')

state=2;

if(temp=='c')

state=3;

}

switch(state)

{

case 0:

break;

case 1:

```

```

    FindZeroFactor();

// ReadWeight();

    state=0;

break;

case 2:

    FindCalibrationFactor();

    state=0;

break;

case 3:

    ReadWeight();

    delay(200);

break;

case 4:

break;

}

}

long FindZeroFactor()

{

    Serial.println("Find Zero Factor");

    Serial.println("Please wait .....");

    scale.set_scale();

    scale.tare();

```

```

long zero_factor = scale.read_average(20);

Serial.print("Zero factor: ");

Serial.println(zero_factor);

return(zero_factor);

}

void FindCalibrationFactor()
{
  unsigned char flag_stable=0;
  unsigned int decpoint=1;
  for(unsigned char i=0;i<DEC_POINT+1;i++)
  {
    decpoint = decpoint*10;
    while(1)
    {
      scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor
      Serial.print("Reading: ");
      float read_weight = get_units_kg();
      String data = String(read_weight, DEC_POINT);
      Serial.print(data);
      Serial.print(" kg");
      Serial.print(" calibration_factor: ");
      Serial.print(calibration_factor);
      Serial.println();
    }
  }
}

```

```

long r_weight    = (real_weight*decpoint);

long int_read_weight = read_weight*decpoint;

Serial.print(r_weight);

Serial.print(" , ");

Serial.println(int_read_weight);

long x;

if(r_weight == int_read_weight)
{
    flag_stable++;
    if(flag_stable>=STABLE)
    {
        Serial.print("Calibration Factor is = ");
        Serial.println(calibration_factor);
        break;
    }
}

if(r_weight > int_read_weight)
{
    x = r_weight - int_read_weight;

    if(x > 100)

        calibration_factor -= 1000;

    else if(x > 100)

```

```

        calibration_factor -= 10;

    else

        calibration_factor -= 1;

    flag_stable=0;

}

if(r_weight < int_read_weight)

{

    x = int_read_weight-r_weight;

    if(x > 100)

        calibration_factor += 1000;

    else if(x > 10)

        calibration_factor += 10;

    else

        calibration_factor += 1;

    flag_stable=0;

}

}

}

float get_units_kg()

{

    return(scale.get_units()*0.453592);

}

```

```

void ReadWeight()
{
    scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor

    Serial.print("Reading: ");

    String data = String(get_units_kg()+offset, DEC_POINT);

    Serial.print(data);

    Serial.println(" kg");
}

```

คำนวณหาแรงที่กระทำกับโหลดเซลล์ (Load cell) โปแกรม MATLAB

```

omega2 = input('Omega2 = ');
alpha2 = input('alpha2 = ');
th2 = input('th2(degree) = ');
%% // geometer of pantograph
l1=0.24;
l2=0.5;
lab=0.2;
lcb=0.5566;
l4=0.34;
lao4 = sqrt(l1^2+l2^2-2*l1*l2*cos(th2*pi/180));
lf=0.25;
lcg2=0.18786;
lcg3b=0.36511;
lcg4=0.17064;

%% Find Angle in pantograph
theta1=10.78*pi/180; %%theta1rad
theta2=th2*pi/180; %%theta2rad
beta = acos((l1^2+lao4^2-l2^2)/(2*l1*lao4))*180/pi; %%betadegree
gamma = acos((lab^2+lao4^2-l4^2)/(2*lab*lao4))*180/pi; %%gammadegree
x = asin((lab/l4)*sin(acos((lab^2+lao4^2-l4^2)/(2*lab*lao4))))*180/pi; %%xdegree

```

```

theta3 = (beta-gamma)*pi/180; %%theta3rad
theta4 = (180-x-beta)*pi/180; %%theta4rad
theta3dot=((beta-gamma)+4.7886)*pi/180; %%theta3dotrad
%% properties
Flift = 63.11;
m2 = 1.26243;
m3 = 3.57317;
m4 = 0.67755;
lcg2 = 0.05;
lcg3 = 0.551;
lcg4 = 0.0276;
g = 9.81;
%% omega
omega3 = -omega2*l2*sin(theta2-theta4)/(lab*sin(theta3-theta4));
omega4 = -l2*omega2*sin(theta2-theta3)/(l4*sin(theta4-theta3));
%% alpha
alpha3 = -(alpha2*l2*sin(theta2-theta4)+l2*omega2^2*cos(theta2-theta4)+lab*omega3^2*cos(theta3-
theta4)-l4*omega4^2)/(lab*sin(theta3-theta4));
alpha4 = (alpha2*l2*sin(theta2-theta3)+l2*omega2^2*cos(theta2-theta3)-l4*omega4^2*cos(theta4-
theta3)+lab*omega3^2)/(l4*sin(theta4-theta3));
%% acc
acg2x = -(alpha2*lcg2*sin(theta2)+(omega2)^2*lcg2*cos(theta2));
acg2y = alpha2*lcg2*cos(theta2)-(omega2)^2*lcg2*sin(theta2);
aax = -(alpha2*l2*sin(theta2)+(omega2)^2*l2*cos(theta2));
aay = alpha2*l2*cos(theta2)-(omega2)^2*l2*sin(theta2);
acg4x = -((alpha4*lcg4*sin(theta4))+((omega4)^2*lcg4*cos(theta4)));
acg4y = (alpha4*lcg4*cos(theta4))-((omega4)^2*lcg4*sin(theta4));
abx = -(alpha4*l4*sin(theta4)+(omega4)^2*l4*cos(theta4));
aby = alpha4*l4*cos(theta4)-(omega4)^2*l4*sin(theta4);
acg3x = -(alpha2*l2*sin(theta2)+(omega2)^2*l2*cos(theta2))-
alpha3*lcg3b*sin(theta3dot)+alpha3*lab*sin(theta3)+(omega3)^2*lcg3b*cos(theta3dot)-
(omega3)^2*lab*cos(theta3);

```

```

acg3y = alpha2*l2*cos(theta2)-(omega2)^2*l2*sin(theta2)-
alpha3*lcg3b*cos(theta3dot)+alpha3*lab*cos(theta3)-
(omega3)^2*lcg3b*sin(theta3dot)+(omega3)^2*lab*sin(theta3);
acx = -alpha4*l4*sin(theta4)-(omega4)^2*l4*cos(theta4)-
alpha3*lcb*sin(theta3)+(omega3)^2*lcb*cos(theta3);
acy = alpha4*l4*cos(theta4)-(omega4)^2*l4*sin(theta4)-alpha3*lcb*cos(theta3)-
(omega3)^2*lcb*sin(theta3);
%% Matrix
mat = [-l2*sin(theta2) -l2*cos(theta2) 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000;
1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 -1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000;
0.0000 -1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 -1.0000 0.0000 0.0000 0.0000;
lab*sin(theta3) -lab*cos(theta3) 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 lcb*cos(theta3);
-1.0000 0.0000 1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000;
0.0000 1.0000 0.0000 -1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 -1.0000;
0.0000 0.0000 l4*sin(theta4) l4*cos(theta4) 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000;
0.0000 0.0000 -1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 1.0000 0.0000 0.0000;
0.0000 0.0000 0.0000 1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 -1.0000 0.0000]
ans = [(lcg2+m2*lcg2^2)*alpha2+m2*g*lcg2*cos(theta2)+Flift*lf*sin(theta1+theta2);
m2*acg2x+Flift*cos(theta1);
m2*acg2y+m2*g-Flift*sin(theta1);
(lcg3+m3*lcg3b^2)*alpha3-m3*g*lcg3b*cos(theta3dot);
m3*acg3x;
m3*acg3y+m3*g;
(lcg4+m4*lcg4^2)*alpha4+m4*g*lcg4*cos(theta4);
m4*acg4x;
m4*acg4y+m4*g]

```

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงค่าที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB

ตัวแปร	ค่าที่โปรแกรมใช้ในการประมวลผล
l_1	0.24 m
l_2	0.5 m
$l_{a/b}$	0.2 m
$l_{c/b}$	0.5566 m
l_4	0.34 m
l_f	0.25 m
l_{CG2}	0.18786 m
$l_{CG3/b}$	0.36511m
l_{CG4}	0.17064 m
$theta_1$	10.78 degree
F_{lift}	63.11 N
m_2	1.26243 kg
m_3	3.57317 kg
m_4	0.67755 kg
I_{CG2}	0.05 kg/m ²
I_{CG3}	0.551 kg/m ²
I_{CG4}	0.0276 kg/m ²
g	9.81 m/s ²

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์

ตารางแสดงคุณสมบัติวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)

Accessories—Speed controllers



PSA, PSL, PSS series



Symbol



Product feature

1. The spencer is small size, and light weight with small installation space.
2. Excellent flow characteristics, high sensitivity and easy to adjust.
3. The spencer brass body adopts a special nickel-plating process, which has good corrosion resistance and anti-pollution property.
4. Anti-drip structure is designed on the regulating rod.
5. The sealant being coated on threaded portion can ensure no leakage of the threaded connection part.
6. The inserting direction of universal speed controller can be adjusted in 360 degree.

Ordering code

PSL 6 01 A □ □

Model	Thread type
PSL: Speed controller	Blank, PT
PSS: Universal speed controller	
Standard color	Specification
Blank: Release button: Gray Body: Gray	
Black: Release button: Black Body: Black	
Port size	Control method
4: Φ4mm 6: Φ6mm 8: Φ8mm 10: Φ10mm 12: Φ12mm	A: Meter-out Handle marking "A" Controlled flow
Thread connection	B: Meter-in Handle marking "B" Free flow
Thread connection: M5, M3, G1/8, G1/4, G3/8, G1/2 Adaptable port size: Φ4, Φ6, Φ8, Φ10, Φ12	

PSA 6 □

Model	Standard color
PSA: Straight speed controller	Standard color: Specification
	Blank: Gray: Release button: Gray Body: Gray
	Black: Release button: Black Body: Black
Port size	
4: Φ4mm 6: Φ6mm 8: Φ8mm 10: Φ10mm 12: Φ12mm	

Specification

Operating pressure range	0~9kgf/cm ² (0~0.9MPa)
Negative pressure	-75mmHg(10Torr)
Proof pressure	1.5MPa
Ambient and fluid temperature (°C)	0~60
Applicable tubing	Soft nylon or polyurethane
Color	Gray/black

Table for interface port and tube O.D.

Product series	Thread type	Port size				
		Φ4	Φ6	Φ8	Φ10	Φ12
PSL	M5	●	●	●	●	●
	1/8"	●	●	●	●	●
	3/8"	●	●	●	●	●
	1/2"	●	●	●	●	●
PSS	M5	●	●	●	●	●
	1/8"	●	●	●	●	●
	3/8"	●	●	●	●	●
	1/2"	●	●	●	●	●

Product series	Port size				
	Φ4	Φ6	Φ8	Φ10	Φ12
PSA	●	●	●	●	●

Inner structure

Model: PSA

No.	Name	Material
1	Adjusting cap	Aluminum alloy or Brass
2	Locking cap	Aluminum alloy
3	Throttling column	Brass
4	Throttling body	Brass
5	O-ring	NBR
6	O-ring	NBR
7	Throttling sleeve	Aluminum alloy
8	O-ring	NBR
9	Plastic body	PBT
10	O-ring	NBR
11	Locating seat	POM
12	Spring gasket	Stainless steel
13	Locating ring	Aluminum alloy
14	Plastic interface	POM

Model: PSL

No.	Item	Material
1	Handle	Aluminum alloy or Brass
2	Lock nut	Aluminum alloy
3	Needle	Brass
4	Body	Brass
5	O-ring	NBR
6	O-ring	NBR
7	Bushing	PBT
8	O-ring	NBR
9	Seal ring	Brass
10	Rubber body	PBT
11	Crutch	POM
12	Guide	Aluminum alloy
13	O-ring	NBR
14	Spring gasket	Stainless steel
15	Release button	POM

Model: PSS

No.	Name	Material
1	Adjusting cap	Aluminum alloy or Brass
2	Locking cap	Aluminum alloy
3	Throttling column	Brass
4	Throttling body	Brass
5	O-ring	NBR
6	O-ring	NBR
7	Holder	PBT
8	O-ring	NBR
9	Throttling sleeve	Brass
10	Plastic body	PBT
11	O-ring	NBR
12	Plastic body	PBT
13	O-ring	NBR
14	Locating seat	POM
15	Spring gasket	Stainless steel
16	Locating ring	Aluminum alloy
17	Plastic interface	POM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

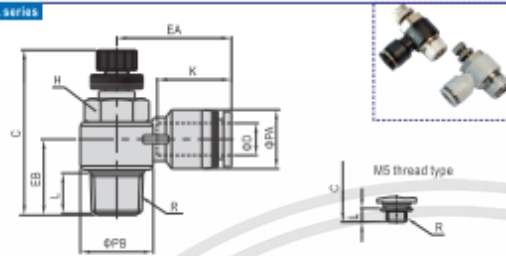
Accessories—Speed controllers



PSA, PSL, PSS series

■ Dimensions

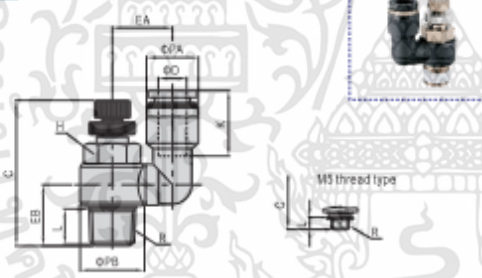
PSL series



Model/Item	ΦD	R	ΦPA	ΦPB	L	max	C	K	EA	EB	H(Across face)	Weight(g)
PSL4M5	4	M5×0.8	9	10	3.5	30	27.5	14	19	9.5	8	6.5
PSL401	4	1/8"	9	14	7.5	41.5	36	14	26.5	15	11	16.5
PSL6M5	6	M5×0.8	12.5	10	3.5	30	27.5	16.5	23.5	11.5	8	9
PSL601	6	1/8"	12.5	14	7.5	41.5	36	16.5	23	15.5	11	17.5
PSL602	6	1/4"	12.5	18	10	47.5	41	16.5	25	18	14	32
PSL603	6	3/8"	12.5	22.5	11	52.5	45.5	16.5	27	20	19	59.5
PSL801	8	1/8"	15	14	7.5	41.5	35	18.5	26.5	11.5	11	18
PSL802	8	1/4"	15	18	10	47.5	41	18.5	28.5	19	14	33
PSL803	8	3/8"	15	22.5	11	52.5	45.5	18.5	29.5	20	19	60
PSL804	8	1/2"	15	28	14	58.5	51.5	18.5	32	25	24	96.5
PSL1002	10	1/4"	18	18	10	47.5	41	21	31	20.5	14	34.5
PSL1003	10	3/8"	18	22.5	11	52.5	45.5	21	33	21.5	19	62
PSL1004	10	1/2"	18	28	14	58.5	51.5	21	35.5	25.5	24	98
PSL1203	12	3/8"	21	22.5	11	52.5	45.5	23	36	23.5	19	64
PSL1204	12	1/2"	21	28	14	58.5	51.5	23	38	27	24	100

Note: "□" stands for A or B. A indicates meter-out type while B indicates meter-in type. The two types are with the same overall dimension.

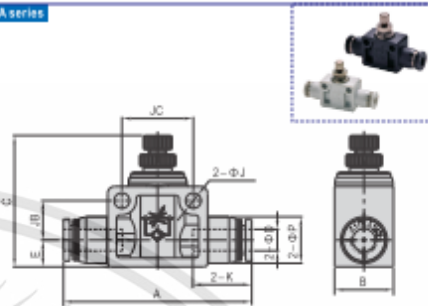
PSS series



Model/Item	ΦD	R	ΦPA	ΦPB	L	max	C	K	EA	EB	H(Across face)
PSS4M5	4	M5×0.8	9	10	3.5	30	27.5	14	12.5	9.5	8
PSS601	6	1/8"	12.5	14	7.5	41.5	35	17	17	15	11
PSS602	6	1/4"	12.5	18	10	47.5	41	17	19	17.5	14
PSS801	8	1/8"	15	14	7.5	41.5	35	18.5	17	15	11
PSS802	8	1/4"	15	18	10	47.5	41	18.5	19	17.5	14
PSS1002	10	1/4"	18	18	10	47.5	41	21	20.5	19.5	14
PSS1003	10	3/8"	18	22.5	11	52.5	45.5	21	24	20	19
PSS1203	12	3/8"	21	22.5	11	52.5	45.5	23	25.5	20	19
PSS1204	12	1/2"	21	28	14	58.5	51.5	23	28	25	24

Note: "□" stands for A or B. A indicates meter-out type while B indicates meter-in type. The two types are with the same overall dimension.

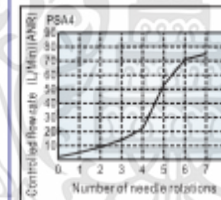
PSA series



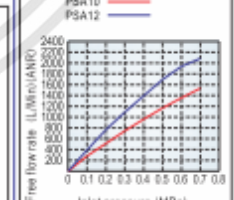
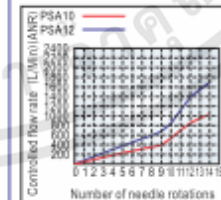
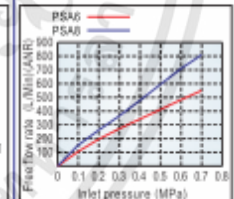
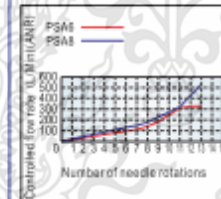
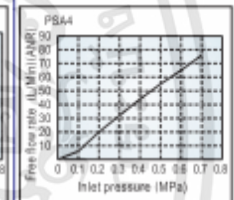
Model/Item	ΦD	A	B	max	C	ΦP	K	E	ΦJ	JB	JC
PSA4	4	41	11	29	26.5	9.5	14	7	3.2	6	14
PSA6	6	62.5	16.5	43.5	36.5	13	16.5	7.5	4.3	11	20
PSA8	8	59.5	16.5	47	40	15	18.5	8.5	4.3	11	22
PSA10	10	69	21	53.5	46.5	18	21	10.5	4.3	14.5	26
PSA12	12	78.5	26	58.5	51	21.5	23	12	4.3	17.5	32

■ Flow chart

Controlled flow rate



Free flow rate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติโหลดเซลล์ (Load cell)

Single-Point Aluminum Load Cell

SPECIFICATIONS			
Model	YZC-1B		
Capacity	Kg	2, 3, 5, 8, 10, 30, 35, 40, 50, 60, 80	
Rated output	MV/V	2.0±0.15	
Accuracy class		C2	C3
Maximum number of verification intervals	n_{max}	2000	3000
Minimum load cell verification intervals	V_{min}	$E_{Max}/5000$	$E_{Max}/500$
Combined error	%RO	≤ ±0.030	≤ ±0.020
Creep	%RO/30min	0.03	0.0167
Temperature effect on sensitivity	%RO/°C		0.0016
Temperature effect on zero	%RO/°C	0.003	0.002
Zero balance	%RO		±1.0
Input resistance	Ω	402±6	1066±10
Output resistance	Ω	350±3	1000±10
Insulation resistance	M Ω (50V)	5000	
Recommended excitation voltage	V	10 - 15	
Compensated temperature range	°C	-10 - +40	
Operating temperature range	°C	-35 - +80	
Safe overload	%RO	150	
Ultimate overload	%RO	200	
Load cell material		铝合金 Aluminium	
Platform size		350X350	
Connecting cable		Ø 4.2X350mm	

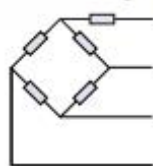
Full-scale output voltage = excitation voltage x sensitivity 2.0mv / v

For example: 5v supply voltage is multiplied by the sensitivity 2.0mv / v = full scale 10mv

Wiring: red + black line input voltage Input voltage -
Green Line output signal + white line output signals -

Installation: Installation cantilever

WIRING SCHEMATIC
DIAGRAM****
(Unbalanced bridge
configuration)



+VE INPUT (Green)
+VE OUTPUT (Red)
-VE INPUT (Black)
-VE OUTPUT (White)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] A. Balestrino, O. Bruno & A. Landi. (1994). **Active control for the pantograph-catenary system.**
- [2] B Allotta, L Pugi, and F Bartolin. (2007). **An active suspension system for railway pantographs: the T2006 prototype.**
- [3] นิธินันท์ สิ้นพันธุ์ นิลเนตร จันทร์แก้ว และ พัฒน์ภูมิ บุญรอด. (2563). **การออกแบบและพัฒนาแพนโทกราฟแบบไม่สมมาตรสำหรับการวัดแรงสัมผัส.** สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] Jiqin Wu. (2018). **Pantograph and Contact Line System.**
- [5] Andrew Pytel, Jaan Kiusalaas (2010). **Engineering Mechanics: Statics 3ED.**
- [6] Wenlin Wang, Yuwen Liang, Weihua Zhang, Simon Iwnicki. (2018). **Effect of the Nonlinear displacement-dependent characteristics of a hydraulic damper on high-speed rail pantograph dynamics.**
- [7] นพพร น้อยวัฒนกุล. (2020). **รายงานพื้นฐานนิวแมติกส์.**
- [8] ผศ.สกล นันทศรีวิวัฒน์. (2548). **เอกสารประกอบการสอนรายวิชา ไฮดรอลิกส์และนิวแมติกส์ 2.** มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี.
- [9] เกษมสุข สุขศรีสวัสดิ์ (2021). **Load cell คืออะไร.** แหล่งที่มา: <https://www.changfi.com/fix/2021/12/23/14526/?fbclid=IwAR0OCfy7s9bgsG19cHUDEL3045XsP1cBfupDLQnpT1TatPNn0z-AQh41jVY> เข้าดูเมื่อวันที่ 3/2/2565
- [10] Ideal valve incorporated. **Flow calculation for gases.**