

การพัฒนาระบบรองรับการสะท้อนแบบควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



นายปรัชญ์ แจ่มแจ้ง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

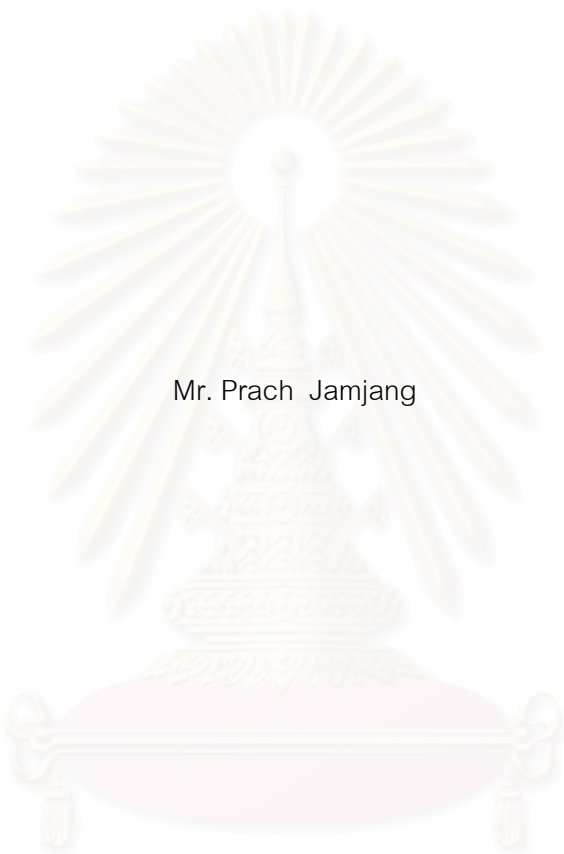
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC – CONTROLLED
SHOCK ABSORBER SYSTEM



Mr. Prach Jamjang

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาระบบรองรับการสะท้อนแบบควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

โดย นายปรัชญ์ แจ่มแจ้ง

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธارا ชลปราณี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาโท

 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธารา ชลปราณี)

 กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปรัชญ์ แจ่มแจ้ง : การพัฒนาระบบรองรับการสะเทือนแบบควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า. (DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC – CONTROLLED SHOCK ABSORBER SYSTEM) อ. ที่ปรึกษา : ศศ.ดร.ชารา ชลปราณี, 117 หน้า.

เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวขรุขระจะมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น ระบบรองรับการสะเทือนมีผลต่อประสิทธิภาพการขับเคลื่อน และประสิทธิภาพในการควบคุมของยานพาหนะ สำหรับระบบรองรับการสะเทือนที่พัฒนาขึ้นนี้ต้องการให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับยานพาหนะต่างๆ โดยมีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนรูปแบบการรองรับการสะเทือนของระบบ ความแม่นยำด้วยการควบคุมจากการประมวลผล และการสึกหรอจากส่วนเคลื่อนที่ทางกลที่น้อยกว่าระบบรองรับการสะเทือนที่ใช้ในปัจจุบัน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนากระบวนการรองรับการสะเทือนแบบควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำการออกแบบและสร้างระบบรองรับการสะเทือนแบบควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จำลองขึ้นด้วยแนวคิดของรถไฟแม่เหล็ก เพื่อต้องการให้ระบบรองรับการสะเทือนที่พัฒนาขึ้นมาสามารถตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนในรูปแบบต่างๆ ได้ ส่งผลให้การขับเคลื่อนและควบคุมของยานพาหนะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบดังกล่าวใช้การเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรภายในขดลวดไฟฟ้า โดยขดลวดไฟฟ้าจะมีการส่งงานผ่านหน่วยประมวลผลไปยังวงจรขยายเพื่อกำหนดแรงดันที่เหมาะสม วงจรขยายทำหน้าที่รับสัญญาณแรงดันแอนะล็อกและทำการปรับเปลี่ยนแรงดันให้แก่ขดลวดไฟฟ้า เป็นผลทำให้ส่วนแม่เหล็กที่มีการเคลื่อนที่อยู่ภายในขดลวดไฟฟ้ามีแรงกระทำเปลี่ยนแปลงไปมาได้ ส่วนหน่วยประมวลผลจะรับสัญญาณเข้าจากระดับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวที่จำลองขึ้นล่วงหน้า และสัญญาณค่าแรงกดที่แม่เหล็กกระทำกับโครงเครื่องหรือตัวถังนำมาคำนวณเพื่อปรับเปลี่ยนแรงที่ส่วนแม่เหล็กจะกระทำต่อตัวถังให้เหมาะสมและส่งสัญญาณออกไปยังส่วนวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นแอนะล็อกซึ่งค่ออยู่กับวงจรขยายต่อไป ระบบรองรับการสะเทือนที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถกำหนดแรงที่แม่เหล็กกระทำกับตัวถังในตอนเริ่มต้นได้ด้วยการตั้งค่าที่หน่วยประมวลผล เป็นประโยชน์ในการปรับเปลี่ยนระดับสูงหรือต่ำของตัวถังได้ตามรูปแบบการใช้งานต่างๆ และผลการจำลองรูปแบบของพื้นผิวเรขาคณิตที่มีการเปลี่ยนความสูงและต่ำ สามารถยืนยันการทดสอบการตอบสนองของระบบรองรับการสะเทือนที่พัฒนาขึ้นด้วย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....ปรัชญ์.....แจ่มแจ้ง.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4770345821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: MAGNETIC LEVITATION SYSTEM / MAGLEV / SHOCK ABSORBER

PRACH JAMJANG : DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC –
CONTROLLED SHOCK ABSORBER SYSTEM.

THESIS ADVISOR : ASST.PROF. TARA CHOLPRANEE, Ph.D., 117 pp.

When a vehicle moves on a surface, there is always some vibration. Suspension system affects the efficiency of vehicle driving and controlling. The development of electromagnetic - controlled suspension system is applicable to various kinds of vehicles with the flexibility of the adjustment of suspension styles. It is also accurate by using digital processing unit. In addition, it has less mechanical wear than conventional suspension systems.

This thesis presents the design of shock absorber system controlled by electromagnetic field similar to maglev. The purpose of this thesis is to develop a suspension system suitable for different types of vibration and having higher driving efficiency. The system makes use of permanent magnet movement in a solenoid. The solenoid sends signals to a digital processing unit. Then the processing unit sends signals to an amplifier through a digital-to-analog converter to set the required voltage. The amplifier receives analogue signal which is varied to feed the solenoid. As a result, a variable force is created by moving magnet inside the solenoid. The processing unit receives an input signal representing the variation of the surface model. The signal representing the force between magnet and vehicle chassis is calculated to provide the appropriate force between magnet and vehicle chassis. The output signal is sent to the digital-to-analog converter and fed to the amplifier. The designed suspension system can also set an initial force between magnet and vehicle chassis at the processing unit. It is very useful to be able to adjust the chassis's height according to different driving situations. Results of surface models of different geometries with variable heights can confirm the response of this developed suspend system.

Department : Electrical Engineering
Field of study : Electrical Engineering
Academic year : 2007

Student's signature : Prach Jamjang...
Advisor's signature : Tara Cholpranee...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชารา ชลปราณี อาจารย์ที่ปรึกษา และครูถาวร สุวรรณกิจ ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการทำงาน ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหา ตลอดจนความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนมา นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณคณาจารย์ทั้งหลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่กรุณาช่วยสอนสั่งวิชาความรู้ให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และอาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ ที่ช่วยกรุณาติดตามและตรวจสอบงานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ตลอดจนสั่งสอนและให้ข้อเสนอแนะต่างๆ งานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าจึงสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์และเพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการไบโออิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ ตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆ ระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า และช่วยสนับสนุนให้การดำเนินงานวิจัยของข้าพเจ้าเป็นไปได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณพ่อและแม่ ที่กรุณาให้คำสั่งสอน ตลอดจนให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าเสมอมา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่มีความสำเร็จลุล่วงไปได้เลย ถ้าขาดกำลังใจและการสนับสนุนจากพ่อและแม่ของข้าพเจ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำแนะแนวเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ระบบรองรับการสะท้อน.....	4
2.1 อาการสั่นสะเทือนของตัวถังรถยนต์.....	4
2.1.1 อาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากน้ำหนักกรองรับด้วยสปริงหรือสปริงเวท.....	4
2.1.1.1 การกระดอน.....	5
2.1.1.2 การโคลงตัว.....	5
2.1.1.3 การเดิน.....	5
2.1.1.4 การส่าย.....	5
2.1.2 อาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากน้ำหนักไม่ถูกรองรับด้วยสปริงหรืออันสปริงเวท	5
2.1.2.1 การกระโดด	5
2.1.2.2 การกระดอน	5
2.1.2.3 การม้วนตัวของแหนบ.....	5
2.2 คุณสมบัติของระบบกันสะเทือน	6
2.2.1 การสปริงตัว	6
2.2.2 การหน่วงหรือบรรเทาการสั่น	7
2.2.3 การต้านการโคลง	8

2.3	การทำงานของช็อกอัพซอร์บเบอร์และคอยล์สปริง.....	8
2.4	ระบบรองรับการสะเทือนในปัจจุบัน.....	10
2.4.1	ระบบรองรับการสะเทือนแบบคานแข็ง	10
2.4.2	ระบบรองรับการสะเทือนแบบอิสระ.....	11
2.4.3	สปริง.....	13
2.4.4	ชนิดของสปริง.....	14
2.4.4.1	สปริงแหนบ	14
2.4.4.2	สปริงขด.....	15
2.4.4.3	สปริงทอร์ชันบาร์.....	15
2.4.5	ช็อกอัพซอร์บเบอร์	16
บทที่ 3	การออกแบบระบบรองรับการสะเทือนโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้า.....	20
3.1	การวิเคราะห์แรงของระบบโซเลนอยด์/แม่เหล็กถาวร.....	20
3.2	ระบบรองรับการสะเทือนโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้า.....	25
3.3	การวิเคราะห์แบบจำลอง.....	26
3.4	คุณสมบัติของขดลวดและแม่เหล็ก.....	33
3.5	การออกแบบการทดลองระบบรองรับการสะเทือนแบบควบคุมด้วยไฟฟ้าแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้น.....	37
3.6	สเตรนเกจ	44
3.7	โพลดเซลล์	44
3.8	การออกแบบและการทำงานของระบบ	49
3.8.1	รูปแบบพื้นผิวถนนที่ใช้ในการจำลอง	50
3.8.2	ส่วนอุปกรณ์ควบคุมและชุดคำสั่ง	50
3.8.3	วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก.....	56
3.8.4	การทำงานของวงจรขยาย.....	59
3.8.4.1	วงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม.....	59
3.8.4.2	วงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรเชื่อมโยงทางแสง.....	62
3.8.4.3	วงจรขับเคลื่อนโซเลนอยด์และส่วนป้อนกลับ	64
3.8.5	วงจขยายสัญญาณจากโพลดเซลล์	65
บทที่ 4	ผลการทดลอง.....	68

4.1 การทดลองขดลวดที่พันเอง	68
4.2 การทดลองวัดสัญญาณของวงจรขยายเพื่อขับ โซเลนอยด์.....	71
4.2.1 การทดลองวัดแรงดันอ้างอิงที่ขาเข้าและรูปแบบของสัญญาณขาออกของ วงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม	71
4.2.2 การทดลองวัดรูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและรูปแบบ ของสัญญาณขาออกของวงจรขับ โซเลนอยด์	74
4.3 การทดลองวัดแรงที่กระทำจากโซเลนอยด์ที่แรงดันควบคุมค่าต่างๆ.....	78
4.4 การทดลองวัดแรงที่กระทำจากโซเลนอยด์ในการหาเวลาตอบสนองของระบบ เมื่อพื้นผิวจำลองเป็นรูปไซน์ค่ายอดคงที่.....	81
4.5 การทดลองวัดแรงที่กระทำจากโซเลนอยด์ในการหาเวลาตอบสนองของระบบ เมื่อพื้นผิวจำลองเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีคาบเวลาคงที่	84
4.6 การทดลองวัดแรงที่กระทำจากโซเลนอยด์ในการหาเวลาตอบสนองของระบบ เมื่อพื้นผิวจำลองเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีคาบเวลาคงที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลง ระดับแรงดันอ้างอิงค่าต่างๆ	87
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
รายการอ้างอิง	94
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	117

สารบัญตาราง

ญ

ตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ความเร็วลูกสูบภายในตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพ

ของผิวถนน19

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการพิจารณา35



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนที่น้ำหนักถูกรองรับด้วยสปริงกับส่วนที่น้ำหนักไม่ถูกรองรับด้วยสปริง.....	4
รูปที่ 2.2 การสั่นสะเทือนที่เกิดจากน้ำหนักที่รองรับด้วยสปริงหรือสปริงเวท.....	5
รูปที่ 2.3 การสั่นสะเทือนที่เกิดจากน้ำหนักที่ไม่ได้รองรับด้วยสปริงหรืออันสปริงเวท	6
รูปที่ 2.4 ระบบกันสะเทือนทำให้รถแล่นเรียบ ไม่เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงของคนนั่ง ตามสภาพของผิวถนน	7
รูปที่ 2.5 อาการสั่นของสปริงและคุณสมบัติของการสปริงตัว.....	7
รูปที่ 2.6 การเสื่อมลงของค่าแรงในการหน่วงช็อคอัพเซอร์เบอ์เทียบกับระยะทางการใช้งาน	8
รูปที่ 2.7 แรงในการหน่วงที่สัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของยานพาหนะ	9
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการหน่วงและความเร็ว.....	10
รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของระบบรองรับน้ำหนักแบบคานแข็ง.....	11
รูปที่ 2.10 การทำงานของระบบรองรับน้ำหนักแบบคานแข็งในขณะเคลื่อนที่ไปบนภูมิประเทศ ที่ไม่ราบเรียบ.....	11
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของระบบรองรับการสะเทือนแบบอิสระ	12
รูปที่ 2.12 การทำงานของระบบรองรับน้ำหนักแบบอิสระจะสามารถรักษาระดับการทรงตัว ของตัวถังทุกสภาพของพื้นถนนที่ไม่ราบเรียบได้ดี	13
รูปที่ 2.13 ลำดับขั้นตอนการเดินของสปริง	14
รูปที่ 2.14 โครงสร้างส่วนประกอบของสปริงแหนบ	15
รูปที่ 2.15 สปริงขด.....	15
รูปที่ 2.16 สปริงทอร์ชันบาร์.....	16
รูปที่ 2.17 หน้าที่การทำงานของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน (Shock absorber) เมื่อรถวิ่งบนถนน ที่มีสภาพที่ไม่ราบเรียบ	17
รูปที่ 2.18 กราฟการเปรียบเทียบความถี่การเดินของสปริงในระบบรองรับน้ำหนักที่ไม่ใช้ ตัวหน่วงการสั่นสะเทือนกับใช้ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน.....	17
รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนรูปทรงกระบอก	18
รูปที่ 3.1 เรขาคณิตของขดลวดไฟฟ้าแกนอากาศและแม่เหล็กถาวร	20
รูปที่ 3.2 ลักษณะของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อแม่เหล็กถาวรซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง ตามแนวแกนต่างๆ	22
รูปที่ 3.3 การจัดรูปแบบของแม่เหล็กถาวรและขดลวดไฟฟ้าแกนอากาศ.....	23

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.4 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก D และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน d ของขดลวดต่อแรงตามแนวแกน F_z เมื่อแม่เหล็กอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0.6 l$	24
รูปที่ 3.5 แรงตามแนวแกนของจุดศูนย์กลางขดลวดเมื่อความสูงของแม่เหล็กถาวรมีค่าต่างๆ.....	25
รูปที่ 3.6 รูปร่างของส่วนการยกในระบบรองรับการสะเทือน	25
รูปที่ 3.7 รูปทรงสัมบูรณ์ของส่วนการยกในรูปที่ 3.6	26
รูปที่ 3.8 การจัดตำแหน่งของรูปกลมและขดลวด.....	26
รูปที่ 3.9 สนามแม่เหล็ก.....	27
รูปที่ 3.10 โซเลนอยด์ยาวที่มีแกนแม่เหล็กอยู่ใน โดยมีจุดศูนย์กลางแกนร่วมกัน	29
รูปที่ 3.11 ทิศทางแกน X และ Y ของโซเลนอยด์ด้านนอกและแกนที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กด้านใน	31
รูปที่ 3.12 ทิศทางแกน Y และ Z ที่มีกระแสไหลผ่านขดลวดทิศทาง \vec{a}	31
รูปที่ 3.13 เรขาคณิตของชิ้นส่วนที่มีกระแสไหลเพื่อใช้ในการหาแรงระหว่างกัน.....	31
รูปที่ 3.14 ระบบรองรับการสะเทือนที่ควบคุมโดยแม่เหล็กถาวรทดลองโดย Polgreen	33
รูปที่ 3.15 อัตราส่วนกำลังต่อแรงยก โดยเป็นฟังก์ชันของความสูงของการสะเทือนสำหรับแม่เหล็กที่สร้างแรงยก 1 ตัน และ 5 ตัน ด้วยวัสดุชนิดต่างๆ.....	35
รูปที่ 3.16 อัตราส่วนแรงยกต่อน้ำหนัก โดยเป็นฟังก์ชันของความสูงของการสะเทือนสำหรับแม่เหล็กที่สร้างแรงยก 1 ตัน และ 5 ตัน ด้วยวัสดุชนิดต่างๆ.....	36
รูปที่ 3.17 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก	38
รูปที่ 3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้ากับข้อมูลดิจิทัล	39
รูปที่ 3.19 วงจรขยายขับโซเลนอยด์.....	40
รูปที่ 3.20 โซเลนอยด์ที่ใช้ในการจำลอง.....	41
รูปที่ 3.21 ส่วนประกอบภายในของโซเลนอยด์ที่ใช้ในการจำลอง	41
รูปที่ 3.22 โหลดเซลล์แบบ Single point ยี่ห้อ METTLER TOLEDO	42
รูปที่ 3.23 การติดตั้งของโหลดเซลล์ในโครงสร้างสำหรับทดสอบ	42
รูปที่ 3.24 โครงสร้างสำหรับการทดสอบระบบรองรับการสะเทือนที่จำลองขึ้น.....	43
รูปที่ 3.25 Weight indicator รุ่น Thunder ของ Linear Instrument	43
รูปที่ 3.26 โครงสร้างและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของสเตรนเกจ.....	44
รูปที่ 3.27 โหลดเซลล์ที่ใช้สเตรนเกจ	45

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.28 วงจรบริดจ์แบบวีตสโตน	45
รูปที่ 3.29 ลักษณะการติดตั้งสเตรนเกจยึดติดกับแท่งวัสดุ.....	46
รูปที่ 3.30 ลักษณะของสเตรนเกจที่ยึดติดบนวัสดุรูปทรงแตกต่างกัน	46
รูปที่ 3.31 ลักษณะของโพลีเซลล์รูปแบบต่างๆ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม.....	46
รูปที่ 3.32 วงจรพื้นฐานแสดงการขยายสัญญาณแรงดันออกที่ได้จากวงจรสเตรนเกจ.....	47
รูปที่ 3.33 วงจรสมมูลทางเรเวนินของวงจรในรูปที่ 3.32	47
รูปที่ 3.34 การขยายสัญญาณแรงดันออกที่ได้จากวงจรสเตรนเกจ โดยใช้ วงจขยายสัญญาณผลต่าง	49
รูปที่ 3.35 ระบบรองรับการสะท้อนที่ออกแบบ.....	49
รูปที่ 3.36 พลังงานของชุดคำสั่งของระบบรองรับการสะท้อน.....	51
รูปที่ 3.37 พลังงานของชุดคำสั่งของระบบรองรับการสะท้อน (ต่อ)	52
รูปที่ 3.38 การตั้งค่าช่องทางเข้าของสัญญาณ (Com port) จากวงจขยายสัญญาณ โพลีเซลล์.....	53
รูปที่ 3.39 การกำหนดค่าย่อยของคาบและส่วนสูงสุดของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม	53
รูปที่ 3.40 การกำหนดค่าย่อยของคาบและส่วนสูงสุดของสัญญาณรูปไซน์	54
รูปที่ 3.41 การกำหนดค่าย่อยของคาบและส่วนสูงสุดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม	54
รูปที่ 3.42 การแสดงผลระหว่างการทดสอบ.....	56
รูปที่ 3.43 ส่วนประกอบของ PDX-800 บอร์ดเรียนรู้ระบบดาต้าแอกควิชชันอย่างง่าย.....	57
รูปที่ 3.44 วงจรสมมูลของ PDX-800 บอร์ดเรียนรู้ระบบดาต้าแอกควิชชันอย่างง่าย	57
รูปที่ 3.45 ส่วนประกอบของวงจขยาย.....	59
รูปที่ 3.46 วงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม	60
รูปที่ 3.47 สัญญาณขาออกจากวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม เมื่อไดโอดซีเนอร์มีค่า 4.7 โวลต์.....	61
รูปที่ 3.48 สัญญาณที่ได้จากการรวมกันระหว่างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม เมื่อไดโอดซีเนอร์ มีค่า 6.8 โวลต์ และสัญญาณในการควบคุมจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็น แอนะล็อกขนาด 3.5 โวลต์	62
รูปที่ 3.49 วงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรเชื่อมโยงทางแสง	62
รูปที่ 3.50 สัญญาณป้อนกลับจากโซเลนอยด์เพื่อเป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 4 โวลต์.....	63
รูปที่ 3.51 สัญญาณขาออกจากวงจรเปรียบเทียบแรงดัน เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 4 โวลต์	63

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.52 วงจรจับเคลื่อน โขเลนอยด์และส่วนป้อนกลับ	64
รูปที่ 3.53 สัญญาณที่ใช้จับโขเลนอยด์ เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 1.25 โวลต์.....	65
รูปที่ 3.54 ช่องต่อสัญญาณขาเข้าจากโพลเซลล์.....	65
รูปที่ 3.55 ช่องต่อสัญญาณขาออกผ่านพอร์ตอนุกรม	66
รูปที่ 3.56 แผนภาพบล็อกการทำงานของวงจรขยายสัญญาณจาก โพลเซลล์.....	66
รูปที่ 3.57 ส่วนแสดงผลของวงจรขยายสัญญาณจาก โพลเซลล์.....	67
รูปที่ 4.1 ขดลวดแกนอากาศที่พันขึ้นเอง	68
รูปที่ 4.2 เรขาคณิตของส่วนประกอบต่างๆ ของขดลวดแกนอากาศที่ใช้ในการคำนวณ ค่าความเหนี่ยวนำ	69
รูปที่ 4.3 เครื่องชั่งที่ใช้ในการทดลอง	69
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของแม่เหล็กกับระยะการเคลื่อนที่ของขดลวด ที่กระแสคงที่ 4.0 A	70
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของแม่เหล็กกับระยะการเคลื่อนที่ของขดลวด ที่กระแสคงที่ 4.6 A	71
รูปที่ 4.6 รูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยมเมื่อแรงดันขาเข้าอ้างอิง มีค่า 4.3 โวลต์	72
รูปที่ 4.7 รูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยมเมื่อแรงดันขาเข้าอ้างอิง มีค่า 5.6 โวลต์	72
รูปที่ 4.8 รูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยมเมื่อแรงดันขาเข้าอ้างอิง มีค่า 6.8 โวลต์	73
รูปที่ 4.9 รูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยมเมื่อแรงดันขาเข้าอ้างอิง มีค่า 8.2 โวลต์.....	73
รูปที่ 4.10 รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและรูปแบบของสัญญาณขาออก ของวงจรจับโขเลนอยด์เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 0.5 โวลต์	74
รูปที่ 4.11 รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันเมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 0.5 โวลต์ ..	75
รูปที่ 4.12 รูปแบบสัญญาณขาออกของวงจรจับโขเลนอยด์เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 0.5 โวลต์.....	75
รูปที่ 4.13 รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและรูปแบบของสัญญาณขาออก ของวงจรจับโขเลนอยด์เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 1.5 โวลต์	76

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.14 รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและรูปแบบของสัญญาณขาออก ของวงจรขับโซเลนอยด์เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 2.5 โวลต์	76
รูปที่ 4.15 รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและรูปแบบของสัญญาณขาออก ของวงจรขับโซเลนอยด์เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 3.75 โวลต์	77
รูปที่ 4.16 กราฟแรงยกเมื่อแรงดันขาเข้าวงจรขยายมีค่า 1.25 โวลต์ เมื่อระดับจำลองที่ 5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	78
รูปที่ 4.17 กราฟแรงยกเมื่อแรงดันขาเข้าวงจรขยายมีค่า 3.75 โวลต์ เมื่อระดับจำลองที่ -5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	79
รูปที่ 4.18 กราฟแรงยกเมื่อแรงดันขาเข้าวงจรขยายมีค่าต่างๆ โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้า มีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	80
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับแรงดันขาเข้าวงจรขยายเมื่อแรงดันอ้างอิงขาเข้า มีค่า 2.5 โวลต์	81
รูปที่ 4.20 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นไซน์มีคาบ 5 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	82
รูปที่ 4.21 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นไซน์มีคาบ 8 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	82
รูปที่ 4.22 กราฟเวลาตอบสนองของแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นไซน์ที่คาบเวลาต่างๆ โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	83
รูปที่ 4.23 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 2 และ -2 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	84
รูปที่ 4.24 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	85
รูปที่ 4.25 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 10 และ -10 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	85
รูปที่ 4.26 เวลาตอบสนองของแรงยกต่อระดับจำลองรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีค่ายอดแตกต่างกัน เมื่อคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	86
รูปที่ 4.27 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 0.5 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.	87

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ ก.11 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 5, 5, 5, 5, 5 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ ที่ 10 ม.ม.....	102
รูปที่ ก.12 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ -5, -5, -5, -5, -5 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ ที่ 10 ม.ม.....	103
รูปที่ ก.13 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 5, 0, 5, 0, 5 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ ที่ 10 ม.ม.....	103
รูปที่ ก.14 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ -5, 0, -5, 0, -5 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ ที่ 10 ม.ม.....	104
รูปที่ ก.15 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 1, 3, 5, 7, 9 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ ที่ 10 ม.ม.....	104
รูปที่ ก.16 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 1, -3, 5, -7, 9 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ ที่ 10 ม.ม.....	105
รูปที่ ก.17 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 2, -2, 4, -4, 6 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ ที่ 10 ม.ม.....	105
รูปที่ ก.18 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ -9, 7, -5, 3, -1 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ ที่ 10 ม.ม.....	106
รูปที่ ก.19 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 5, 0, 5, 0, 5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 1 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.	106

ภาพประกอบ

หน้า

- รูปที่ ก.38 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 0, 2, -2, 4, -4 ม.ม.
ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์
และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.116
- รูปที่ ก.39 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 0, -2, 2, -4, 4 ม.ม.
ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์
และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.116



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำและแนวเหตุผล

สภาพของพื้นผิวถนนนั้นย่อมจะไม่ราบเรียบเสมอไปในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ ด้วยเหตุนี้ รถยนต์โดยทั่วไปจึงต้องมีระบบรองรับน้ำหนักเชื่อมต่อยู่ระหว่างตัวถังกับล้อรถ เพื่อทำหน้าที่ ดูดกลืนอาการสั่นสะเทือน อาการส่าย และอาการกระแทกที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวถนน ซึ่งจะมีผลทำให้ผู้โดยสารและสัมภาระที่บรรทุกได้รับความปลอดภัยและมีเสถียรภาพในการขับขี่ที่ดี

นอกจากหน้าที่ดังกล่าวมาแล้ว ระบบรองรับน้ำหนักยังต้องทำหน้าที่อีกประการหนึ่งก็คือ จะรับการถ่ายทอดการขับเคลื่อนและแรงเบรก ซึ่งเป็นผลมาจากความฝืดที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวถนนและล้อส่งผ่านระบบเครื่องล่างและตัวถัง

ส่วนประกอบของระบบรองรับการสะเทือนในยานพาหนะปัจจุบันนี้มีหลากหลายแบบ สปริงซึ่งติดตั้งระหว่างล้อกับตัวรถ เพื่อให้เกิดการอ่อนตัวยืดหยุ่นระหว่างพื้นถนนกับตัวรถ ช็อกอัพหรือเบาะซึ่งทำหน้าที่หน่วงหรือบรรเทาการเต้นหรือเด็งขึ้นเด็งลงของตัวรถ เหล็กกันโคลงทำหน้าที่เหนี่ยวรั้งให้ตัวรถทั้งสองข้างยุบหรือเด็งขึ้นเท่าๆ กัน เป็นการป้องกันการเอียงของตัวถัง ซึ่งเป็นสาเหตุของอาการ โคลงของรถ ชิ้นส่วนระบบแขวนล้อซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ตามลักษณะการออกแบบติดตั้งล้อหรือแขวนล้อเข้ากับโครงรถ เช่น คานล้อ ปีกนก หนวดกึ่งแมกเฟอร์สันสตริต ฯลฯ

สำหรับยานพาหนะต่างๆ ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันและในอนาคตนั้น ระบบรองรับการสะเทือนก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นอยู่ เนื่องจากยานพาหนะทุกชนิดเมื่อมีการเคลื่อนที่บนพื้นผิวย่อมต้องมีการสะเทือนเกิดขึ้น และระบบรองรับการสะเทือนที่มีประสิทธิภาพย่อมจะทำให้สามารถบังคับควบคุมยานพาหนะได้อย่างแม่นยำและปลอดภัยขึ้นด้วย ดังนั้นในระบบรองรับการสะเทือนที่จะพัฒนาขึ้นนี้จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบระบบรองรับการสะเทือนที่ใช้เทคโนโลยีแตกต่างจากระบบรองรับการสะเทือนแบบเดิม โดยมีแนวคิดมาจากการทำงานของรถไฟแม่เหล็กที่ใช้พลังงานแม่เหล็กในการขับเคลื่อนและทำหน้าที่ยกขบวนรถไฟแม่เหล็กให้เคลื่อนที่ลอยขึ้นและลงบนรางของรถไฟ เทคโนโลยีนี้ทำให้รถไฟแม่เหล็กมีความนิ่มนวลในการโดยสารเป็นอย่างมาก เมื่อเทียบกับรถไฟที่วิ่งบนรางโดยมีสปริงเป็นระบบรองรับการสะเทือน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอการประยุกต์และพัฒนาการยกด้วยอำนาจแม่เหล็ก นำมาประยุกต์กับระบบรองรับการสะเทือน เพื่อให้เป็นแนวทางการพัฒนาระบบรองรับการสะเทือนในอนาคตของยานพาหนะต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาผลของระบบรองรับการสะเทือนที่ใช้ในรถยนต์ทั่วไปในปัจจุบัน
- 1.2.2 ศึกษาวิธีการทำงานของระบบยกด้วยอำนาจแม่เหล็ก
- 1.2.3 ศึกษาและออกแบบระบบรองรับการสะเทือน โดยใช้การยกด้วยอำนาจแม่เหล็ก
- 1.2.4 ออกแบบการควบคุมระบบรองรับการสะเทือน โดยใช้การยกด้วยอำนาจแม่เหล็ก

1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 ศึกษาระบบรองรับการสะเทือนที่ใช้ในรถยนต์ทั่วไป
- 1.3.2 ศึกษาและทดสอบการทำงานของระบบยกด้วยอำนาจแม่เหล็ก
- 1.3.3 ออกแบบและสร้างระบบรองรับการสะเทือน โดยใช้การยกด้วยอำนาจแม่เหล็ก
- 1.3.4 ออกแบบการควบคุมและประมวลผลสำหรับระบบรองรับการสะเทือน โดยใช้การยกด้วยอำนาจแม่เหล็ก
- 1.3.5 ทดสอบระบบรองรับการสะเทือนที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาผลของระบบรองรับการสะเทือนที่ใช้ในรถยนต์ทั่วไป
- 1.4.2 ศึกษาวิธีการทำงานของระบบยกด้วยอำนาจแม่เหล็ก
- 1.4.3 ศึกษาและออกแบบระบบรองรับการสะเทือน โดยใช้การยกด้วยอำนาจแม่เหล็ก
- 1.4.4 ทดสอบวิเคราะห์ระบบรองรับการสะเทือนที่พัฒนาขึ้น
- 1.4.5 ออกแบบการควบคุมและประมวลผลสำหรับระบบรองรับการสะเทือน โดยใช้การยกด้วยอำนาจแม่เหล็ก
- 1.4.6 ทำการทดลองระบบรองรับการสะเทือนแบบควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- 1.4.7 สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถศึกษาระบบรองรับการสะท้อนที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับยานพาหนะในปัจจุบันและอนาคต
- 1.5.2 สามารถพัฒนาและสร้างระบบรองรับการสะท้อนแบบควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ระบบรองรับการสะเทือน

2.1 อาการสั่นสะเทือนของตัวถังรถยนต์

สาเหตุที่ตัวถังเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นได้นั้นเป็นผลสืบเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกและสภาพของพื้นผิวถนน ซึ่งก็มีสาเหตุมาจากสิ่งต่อไปนี้

น้ำหนักที่ถูกรองรับและน้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับ (Sprung weight and unsprung weight) ตัวถังรถยนต์จะถูกรองรับด้วยสปริง ดังนั้นน้ำหนักของตัวถังและส่วนประกอบอื่นๆ ที่ถูกรองรับด้วยสปริงซึ่งเรียกว่า น้ำหนักที่ถูกรองรับด้วยสปริงหรือสปริงเวท (Sprung weight)

ในทางตรงกันข้าม ส่วนที่ไม่ได้ถูกรองรับด้วยสปริง เช่น ล้อ เพลา และส่วนอื่นๆ เรียกว่า น้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับด้วยสปริงหรืออันสปริงเวท (Unsprung weight) ดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนที่น้ำหนักถูกรองรับด้วยสปริงกับส่วนที่น้ำหนักไม่ถูกรองรับด้วยสปริง [1]

พอจะกล่าวได้ว่า ถ้ามีน้ำหนักอยู่เหนือสปริงมากกว่า จะทำให้การขับขี่เกิดความนุ่มนวล และมีเสถียรภาพที่ดีกว่า เป็นสาเหตุให้ช่วยลดแรงเหวี่ยงและแรงกระแทกของตัวถัง

ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีน้ำหนักที่อยู่ใต้สปริงมากกว่า ก็จะเป็นสาเหตุทำให้ตัวถังเกิดการโคลงและการสั่นสะเทือน เป็นผลให้การขับขี่ไม่สะดวกสบายเช่นกัน

ดังนั้น อาการสั่นสะเทือนและการโคลงของตัวถังรถสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

2.1.1 อาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากน้ำหนักถูกรองรับด้วยสปริงหรือสปริงเวท

จะมีสาเหตุทำให้เกิดอาการขึ้นกับตัวถังดังต่อไปนี้

2.1.1.1 การกระดอน (Pitching) เป็นอาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในลักษณะขึ้นลงของด้านหน้าและด้านหลังของตัวถังรถยนต์ โดยจะมีความสัมพันธ์กับศูนย์ถ่วงของตัวถัง อาการที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะรถที่วิ่งไปบนถนนที่เป็นหลุมเป็นบ่อ และเกิดขึ้นได้โดยง่ายเมื่อสปริงในระบบรองรับน้ำหนักอ่อน ดังในรูปที่ 2.2

2.1.1.2 การโคลงตัว (Rolling) เป็นอาการที่เกิดจากการยึดตัวของสปริงด้านหนึ่งและอีกด้านยุบตัวเมื่อเลี้ยวรถหรือถนนเป็นหลุม จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอาการโคลงตัวของตัวถังขึ้น ดังในรูปที่ 2.2

2.1.1.3 การเต้น (Bouncing) เป็นอาการเคลื่อนตัวขึ้นลงของตัวถังรถทั้งคัน ซึ่งจะมีความแตกต่างจากการกระดอน สาเหตุเกิดจากรถวิ่งด้วยความเร็วสูงบนถนนที่เป็นคลื่น และจะเกิดขึ้นกับรถที่ใช้สปริงอ่อนมากกว่ารถที่ใช้สปริงที่แข็ง ดังในรูปที่ 2.2

2.1.1.4 การส่าย (Yawing) เป็นอาการเคลื่อนตัวขึ้นลงของตัวถังรถที่ส่ายไปทางด้านซ้ายและขวาตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางที่สัมพันธ์กับจุดศูนย์ถ่วงของรถ อาการส่ายจะเกิดขึ้นพร้อมกับการการกระดอนไปด้วย ดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสั่นสะเทือนที่เกิดจากน้ำหนักที่รองรับด้วยสปริงหรือสปริงเวท [1]

2.1.2 อาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากน้ำหนักไม่ถูกรองรับด้วยสปริงหรืออันสปริงเวท

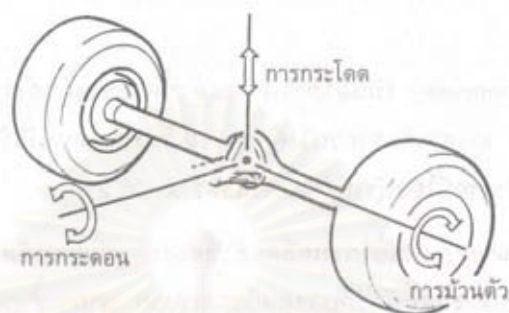
มีสาเหตุที่ทำให้เกิดอาการดังต่อไปนี้

2.1.2.1 การกระโดด (Hopping) เป็นอาการที่เกิดจากล้อรถเต้นขึ้นลง ซึ่งมักจะเกิดขึ้นบนถนนที่เป็นลูกคลื่นและขับขี่ด้วยความเร็วสูง ดังในรูปที่ 2.3

2.1.2.2 การกระดอน (Traming) เป็นอาการสั่นสะเทือนของล้อรถทั้งด้านซ้ายและด้านขวา เป็นสาเหตุทำให้ล้อเกิดอาการเต้นบนพื้นถนน อาการกระดอนของล้อมักจะเกิดขึ้นได้โดยง่ายกับรถยนต์ที่ใช้ระบบรองรับแบบคานแข็ง ดังในรูปที่ 2.3

2.1.2.3 การม้วนตัวของแหวน (Wind up) เป็นอาการที่เกิดจากแหวนสปริงพยายามที่จะม้วนตัวเองไปรอบๆ เฟลา ซึ่งเป็นผลมาจากแรงบิดในขณะที่ขับเคลื่อนของเฟลา

ดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การสั่นสะเทือนที่เกิดจากน้ำหนักที่ไม่ได้รองรับด้วยสปริงหรืออันสปริงเวท [1]

2.2 คุณสมบัติของระบบกันสะเทือน

ระบบกันสะเทือนที่ดีต้องมีคุณสมบัติดังนี้

2.2.1 การสปริงตัว (Springiness) คือแรงต้านต่อภาระหรือน้ำหนักที่รับ และสามารถยืดหยุ่นได้ แต่ถ้าน้ำหนักสปริงหรือแขนบมาใช้กับรถยนต์ เมื่อสปริงได้รับแรงกดและปล่อยแรงออก สปริงจะยืดและหดเข้ายืดออกหลายๆ ครั้ง จนกว่าจะหยุดที่ขนาดความยาวเดิม อาการเช่นนี้เรียกว่า การสั่น (Oscillations) การสั่นนี้มีผลทำให้รถยนต์เต้นขึ้นลงตามการเต้นและสั่นของสปริงจนกว่า สปริงจะหมดอาการสั่น จากการสปริงตัวของระบบนี้ จึงทำให้ล้อของรถยนต์สัมผัสกับผิวหน้าของ ถนนตลอดเวลา เป็นการทำให้รถเกาะถนนและทรงตัว พร้อมกันนั้นการสปริงตัวก็จะกั้นการ กระแทกของล้อที่กระแทกกับถนนที่ไม่เรียบ ดังในรูปที่ 2.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



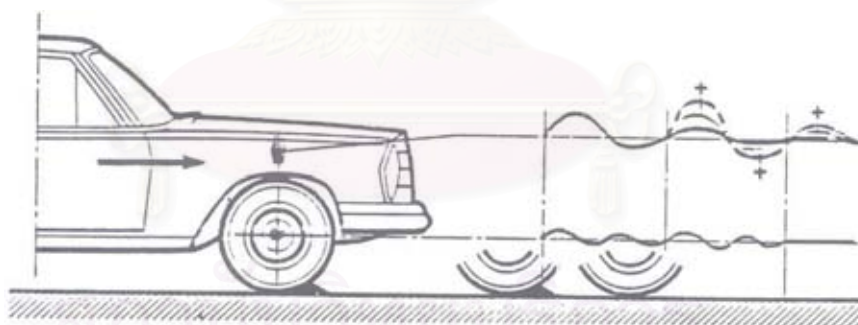
(ก) เมื่อรถไม่มีระบบกันสะเทือน ผิวถนนที่ไม่ราบเรียบจะส่งถ่ายความไม่ปกติทุก ๆ อย่างเข้าสู่ตัวรถและผู้ใช้รถ

(ข) เมื่อรถไม่มีกการหน่วงการเดินรถ จะเดินขึ้นและลงติดต่อกันจนกว่าการสั่นของสปริงได้รับการควบคุมโดยอุปกรณ์หน่วงหรือบรรเทาการสั่น

(ค) รถที่มีระบบกันสะเทือนดีพอ ล้อจะเคลื่อนที่ขึ้นและลงอย่างง่าย แต่การสปริงตัวและการหน่วงการเดิน จะเป็นจนวนกันการเคลื่อนที่ของล้อเข้าสู่ตัวรถและผู้ใช้รถ ผู้ใช้รถจึงอยู่ในสภาพเรียบไปกับแนวระดับขณะรถแล่นไป

รูปที่ 2.4 ระบบกันสะเทือนทำให้รถแล่นเรียบไม่เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงของคานั่งตามสภาพของผิวถนน [2]

2.2.2 การหน่วงหรือบรรเทาการสั่น (Damping) เป็นความสามารถในการดูดกลืนพลังงานบางอย่างของสปริง หลังจากสปริงได้รับแรงกด ซึ่งทำให้เกิดการสั่น (Oscillations) โดยการเปลี่ยนพลังงานจากการสั่นเป็นพลังงานความร้อน พร้อมกันนั้นก็ยังมีความสามารถบรรเทาการเต็งหรือเดินของรถยนต์เพื่อลดเสียงดัง และเพิ่มความอ่อนนุ่มแก่ผู้ขับขี่ด้วย ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เมื่อด็อรรถปะทะกับก้อนหิน ทำให้ล้อรถเดินขึ้นเป็นผลให้ตัวรถเกิดการกระแทกเมื่อนำเอาสปริงไปติดตั้งระหว่างล้อกับตัวรถ จึงทำให้เกิดการสปริงตัวลดการกระแทกลงได้ แต่จะเกิดปัญหาการเดินเข้าออกของสปริงทำให้รถเดินตามอาการสั่นของสปริง [2]

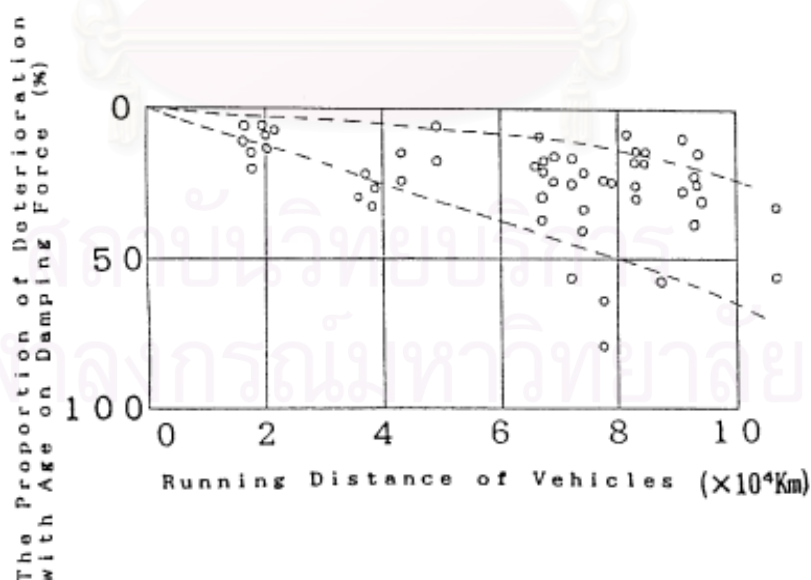
2.2.3 การต้านการโคลง (Anti-Rolling) คือมีความสามารถต้านหรือลดการโคลงของตัวรถ เพราะในขณะที่รถยนต์เลี้ยวจะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เหวี่ยงให้ตัวถังรถเอียงออกจากจุดศูนย์กลางการเลี้ยว อันเป็นผลทำให้การทรงตัวของรถเสียไป

สภาพของพื้นผิวถนนนั้นย่อมจะไม่ราบเรียบเสมอไปในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ ด้วยเหตุนี้รถยนต์โดยทั่วไปจึงต้องมีระบบรองรับน้ำหนักเชื่อมต่ออยู่ระหว่างตัวถังกับล้อรถ เพื่อทำหน้าที่ดูดกลืนอาการสั่นสะเทือน อาการส่าย และอาการกระแทกที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวถนน ซึ่งจะมีผลทำให้ผู้โดยสารและสัมภาระที่บรรทุกได้รับความปลอดภัยและมีเสถียรภาพในการขับขี่ที่ดี

นอกจากหน้าที่ดังกล่าวมาแล้ว ระบบรองรับน้ำหนักยังต้องทำหน้าที่อีกประการหนึ่งก็คือ จะรับการถ่ายทอดการขับเคลื่อนและแรงเบรก ซึ่งเป็นผลมาจากความฝืดที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวถนนและล้อส่งผ่านระบบเครื่องล่างและตัวถัง

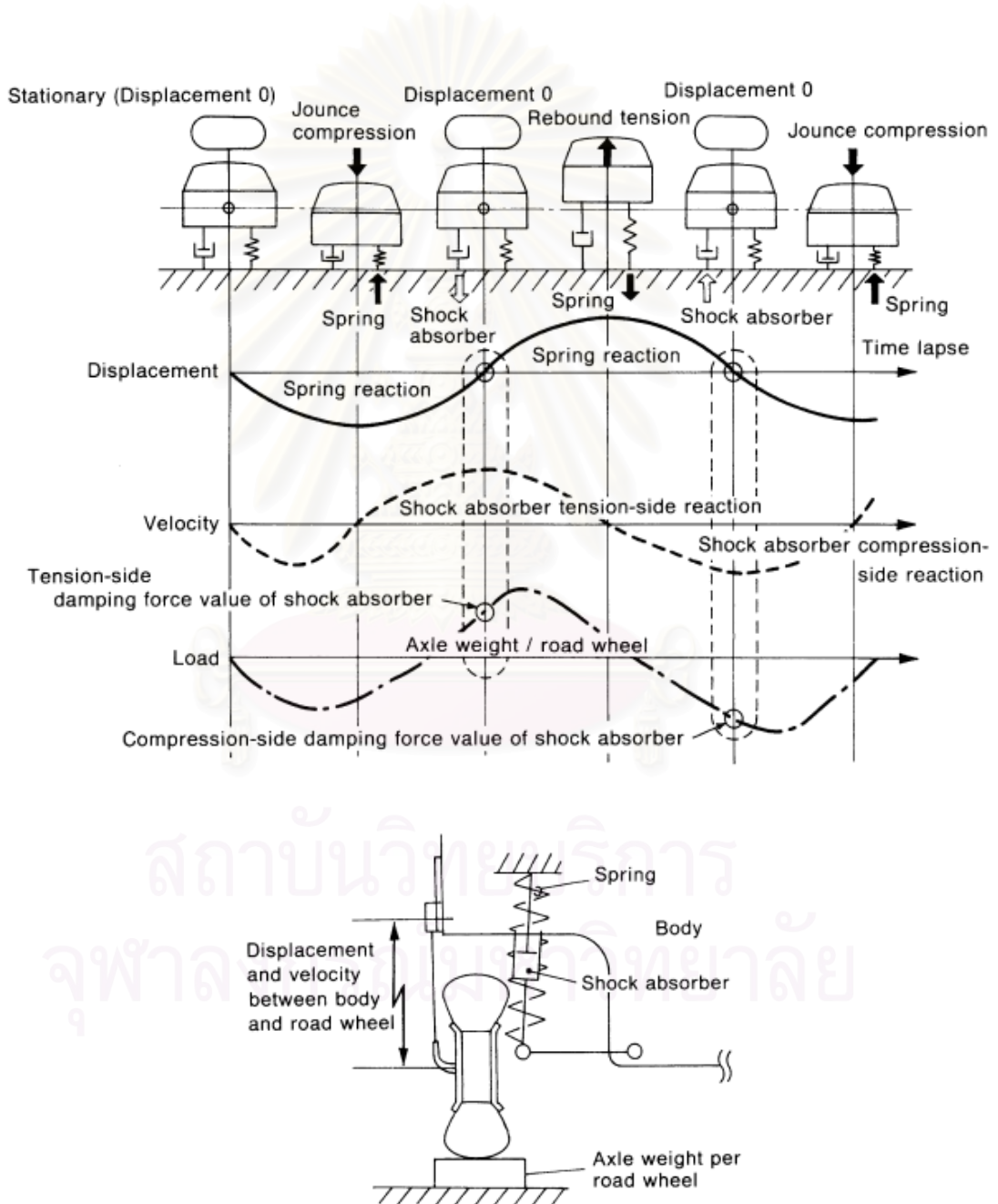
2.3 การทำงานของช็อกอัพซอร์บเบอร์และคอยล์สปริง

สมรรถนะของช็อกอัพซอร์บเบอร์และคอยล์สปริงมีความสำคัญต่อเสถียรภาพในการขับขี่ของยานพาหนะอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม ค่าแรงในการหน่วง (Damping force) ของช็อกอัพซอร์บเบอร์ที่ติดตั้งอยู่ในยานพาหนะจะมีประสิทธิภาพลดลงตามระยะทางการใช้งาน ดังในรูปที่ 2.6

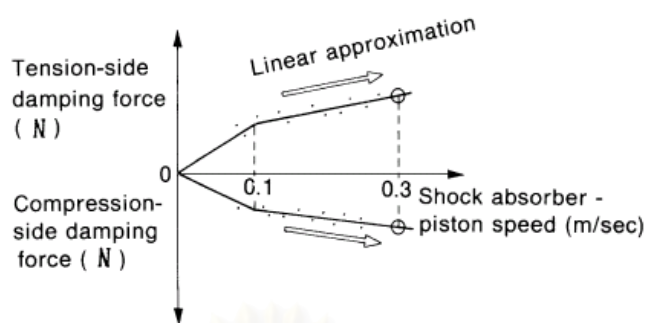


รูปที่ 2.6 การเสื่อมลงของค่าแรงในการหน่วงช็อกอัพซอร์บเบอร์เทียบกับระยะทางการใช้งาน [3]

การเปลี่ยนแปลงแรงสะท้อนของสปริงและช็อกอัพซอร์บเบอร์ตามการเคลื่อนไหวขึ้นและลงสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.7 ที่จุดซึ่งตัวถังพาหนะอยู่ที่ 0 (จุดอ้างอิง) โดยจะใช้สัญลักษณ์วงกลมแทน ณ ตำแหน่งนี้แรงสะท้อนจากสปริงจะเป็น 0 ในกรณีที่ตัวถังของยานพาหนะเคลื่อนที่ในแนวตั้งด้วยความเร็วอยู่ในช่วงระหว่าง 0 - 0.3 เมตรต่อวินาที จะสามารถประมาณรูปแบบจำลองเป็นเชิงเส้นได้ดังในรูปที่ 2.8 ซึ่งจะได้แผนผังลักษณะสมบัติของแรงในการหน่วงโดยทั่วไป



รูปที่ 2.7 แรงในการหน่วงที่สัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของยานพาหนะ [3]



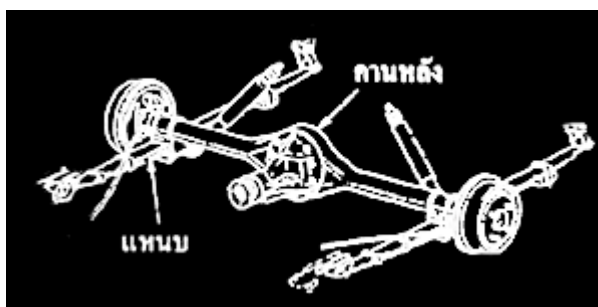
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการหน่วงและความเร็ว

2.4 ระบบรองรับการสะเทือนในปัจจุบัน

รูปแบบของระบบรองรับการสะเทือนที่นำมาใช้กับรถยนต์ส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมกับการขับเคลื่อนหรือแบบของสปริง ระบบรองรับการสะเทือนสามารถแบ่งออกอย่างกว้างๆ ได้ 2 แบบตามลักษณะของโครงสร้างคือ ระบบรองรับแบบคานแข็ง และระบบรองรับแบบอิสระ ซึ่งล้อด้านซ้ายและด้านขวาเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแต่ละด้าน

2.4.1 ระบบรองรับการสะเทือนแบบคานแข็ง

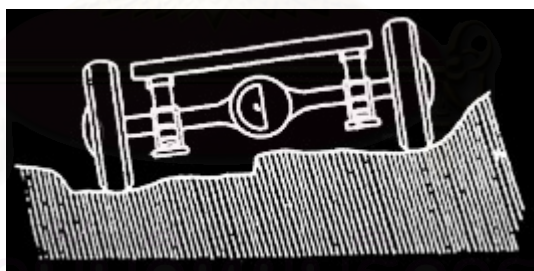
ในรถยนต์ที่ใช้ระบบรองรับการสะเทือนแบบคานแข็ง ล้อด้านซ้ายและด้านขวาจะต่อกันอยู่ด้วยเพลลาเพียงอันเดียว ซึ่งจะติดอยู่กับตัวถังและโครงรถด้วยสปริง (แหนบหรือคอยล์สปริง) เนื่องจากเป็นระบบที่มีความแข็งแรงมากและมีโครงสร้างแบบง่ายๆ ระบบรองรับแบบคานแข็งจึงใช้กันอย่างกว้างขวาง ที่ล้อด้านหน้าและด้านหลังของรถโดยสารและรถบรรทุกและกับล้อหลังของรถยนต์นั่ง ซึ่งมีความต้องการบรรทุกโหลดปริมาณมาก ดังนั้น รถยนต์ที่ใช้ระบบรองรับการสะเทือนแบบคานแข็งนี้ จึงมีลักษณะการใช้งานของเพลลาเดียวกันทั้งล้อด้านซ้ายล้อด้านขวา ดังในรูปที่ 2.9 โดยที่ระบบรองรับการสะเทือนจะติดต่อกับตัวถังหรือโครงด้วยแหนบหรือคอยล์สปริง



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของระบบรองรับน้ำหนักแบบแกนแข็ง [1]

ด้วยเหตุนี้ ระบบรองรับน้ำหนักแบบแกนแข็งจึงมีคุณสมบัติดังนี้

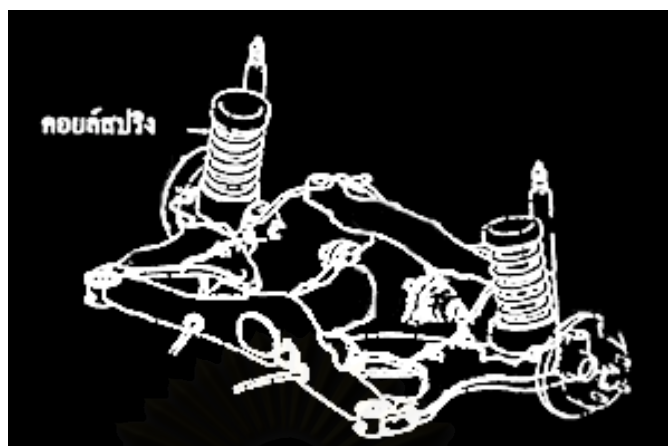
1. มีโครงสร้างที่เป็นแบบง่ายไม่ยุ่งยาก ทำให้สามารถบำรุงรักษาได้ง่าย
2. มีความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งานหนักๆ จึงนิยมใช้กับรถบรรทุกและในระบบรองรับน้ำหนักด้านหลังของรถยนต์บรรทุกขนาดเบา
3. การสึกของดอกยางจะมีน้อยมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของศูนย์ล้อในขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นลงของล้อเป็นไปได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น
4. การจับจีจะมีควมมั่นคงเมื่อน้ำหนักที่บรรทุกเหนือสปริงมีค่าต่ำ
5. การสั่นสะเทือนจะสามารถเกิดขึ้นได้อย่างง่าย เนื่องจากการเคลื่อนไหวของล้อทั้งซ้ายและขวาใช้เพลาร่วมกัน ดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การทำงานของระบบรองรับน้ำหนักแบบแกนแข็งในขณะที่ไปบนภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบ [4]

2.4.2 ระบบรองรับการสะเทือนแบบอิสระ

ในรถยนต์ที่ใช้ระบบรองรับการสะเทือนแบบอิสระ ล้อด้านขวาและด้านซ้ายจะไม่ต่อกันโดยตรง โดยเพลาระบบรองรับจะติดอยู่กับตัวถังและ โครงรถ ในลักษณะที่ล้อทั้งสองสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระไม่ขึ้นต่อกัน ดังในรูปที่ 2.11

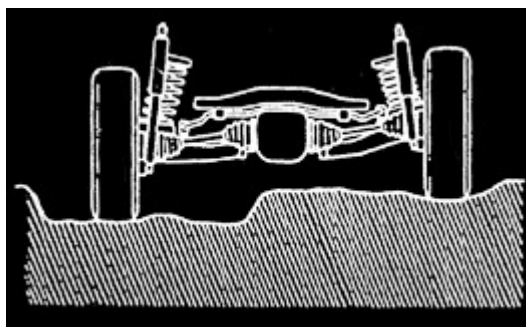


รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของระบบรองรับการสะท้อนแบบอิสระ [4]

ระบบรองรับการสะท้อนแบบอิสระนิยมใช้กับล้อหลังของรถยนต์นั่ง หรือระบบรองรับการสะท้อนอิสระหน้าของรถยนต์บรรทุกขนาดเบาเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ก็เพื่อให้การขับขี่นั้นมีประสิทธิภาพที่ดี ระบบรองรับแบบอิสระนี้มีส่วนประกอบซับซ้อนกว่าระบบรองรับแบบคานแข็ง และจะทำให้มีความนุ่มนวลในการขับขี่มากกว่า แต่จะด้อยกว่าในเรื่องของการทรงตัว

ด้วยเหตุนี้ ระบบรองรับการสะท้อนแบบอิสระนี้จึงมีคุณสมบัติดังนี้

1. ทำให้เกิดน้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับ (อันสปริงเวท) น้อย สะดวกสบายต่อการขับขี่และมีสมรรถนะสูง
2. มีโครงสร้างที่ซับซ้อน
3. สามารถใช้สปริงที่อ่อนได้
4. ศูนย์ล้อมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการเคลื่อนตัวขึ้นลงของล้อ
5. มีจุดศูนย์ถ่วงต่ำ ทำให้มีห้องโดยสารที่กว้าง บรรทุกสัมภาระได้มาก ดังในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การทำงานของระบบรองรับน้ำหนักแบบอิสระจะสามารถรักษาระดับการทรงตัวของตัวถังทุกสภาพของพื้นถนนที่ไม่ราบเรียบได้ดี [4]

2.4.3 สปริง

สปริงในระบบรองรับการสะเทือนมีหน้าที่รับน้ำหนัก และเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างช่วงล่างกับตัวถังรถยนต์ สปริงจะทำหน้าที่ดูดกลืนอาการสั่นสะเทือนของล้อไปยังตัวถัง เป็นผลให้ผู้โดยสารหรือสินค้าได้รับแรงสั่นสะเทือนน้อยลง

ดังนั้น สปริงที่นำมาใช้ในระบบรองรับน้ำหนักจึงต้องมีคุณสมบัติเฉพาะดังนี้

1. การยืดหยุ่น เมื่อมีแรงมากกระทำต่อวัสดุที่ทำจากยาง มันจะเกิดแรงคืนขึ้นในวัสดุนั้น ทำให้มีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไป แต่เมื่อเอาแรงที่มากกระทำนั้นออกไป แรงคืนก็จะหมดไป ทำให้วัสดุนั้นคืนสภาพดั้งเดิม เรียกคุณสมบัตินี้ว่า การยืดหยุ่น

สปริงที่นำมาใช้กับรถยนต์จึงอาศัยหลักการยืดหยุ่นนี้ เพื่อดูดกลืนการสั่นสะเทือนจากพื้นถนนไปยังตัวถังรถ ทำการสะสมพลังงานและความเค้นเอาไว้เพียงชั่วคราว ดังนั้น สปริงที่ทำจากโลหะแผ่น เช่น แหนบสปริง จะสามารถสะสมพลังงานไว้ได้โดยการโค้งงอหรือการบิดตัว เช่น คอยล์สปริง ทอร์ชันบาร์ พลังงานที่สะสมนี้จะถูกคายออกเมื่อสปริงนั้นคืนกลับสู่สภาพปกติ

2. ค่าคงตัวของสปริง การบิดตัวของสปริงจะเป็นสัดส่วนกับโหลดที่มากกระทำ นั่นก็คือค่าคงตัวจะได้จากการหารโหลดด้วยขนาดของการบิด โหลดที่มากกระทำต่อสปริงที่มีขนาดที่เท่ากัน สปริงตัวที่มีค่าคงตัวของสปริงต่ำกว่าจะต้องยุบตัวได้มากกว่าสปริงที่มีค่าคงตัวของสปริงสูง หรือในกรณีหนึ่งเรียกสปริงที่มีค่าคงตัวต่ำว่า สปริงอ่อน ส่วนสปริงที่มีค่าคงตัวของสปริงสูงเรียกว่า สปริงแข็ง

3. การคืนตัวของสปริง เมื่อล้อรถเกิดกระแทกกับสิ่งกีดขวางขึ้น สปริงของรถจะถูกอัดตัวอย่างรวดเร็วและพยายามที่จะกลับคืนสู่สภาพดั้งเดิมในทันที จึงทำให้ตัวถังรถถูกดันให้ยกตัวลอยขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม สปริงจะดูดซับพลังงานเอาไว้ในขณะที่ถูกอัดตัวกดลงนั้น ดังนั้น จึงทำให้มันเกิดการกระเด็นขึ้นจนเลยระดับความสูงปกติ ทั้งนี้เป็นเพราะได้คายพลังงานที่ได้สะสมเอาไว้

ออกไป จากการเคลื่อนตัวให้ลอยขึ้นของรถ จึงเป็นสาเหตุที่ช่วยให้สปริงถูกยืดตัวให้มีความสูงเหนือความสูงเดิม แต่เมื่อตัวถังรถเคลื่อนตัวกลับสู่สภาพเดิม มันก็จะดันให้สปริงนั้นกลับความสูงของโหลเดิมเช่นกัน จากนั้นสปริงก็เริ่มยืดตัวขึ้นอีกครั้ง

จากลำดับขั้นตอนข้างต้นเราเรียกว่า การเต้นของสปริง และจะกระทำซ้ำๆ กันหลายครั้ง แต่อาการเต้นในลำดับต่อมาจะน้อยกว่าครั้งแรกที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้เนื่องจากพลังงานในสปริงมีการสูญเสียและแปรรูปไปเป็นพลังงานอื่น จนในที่สุดการเต้นก็จะหยุดลงไปดังในรูปที่ 2.13

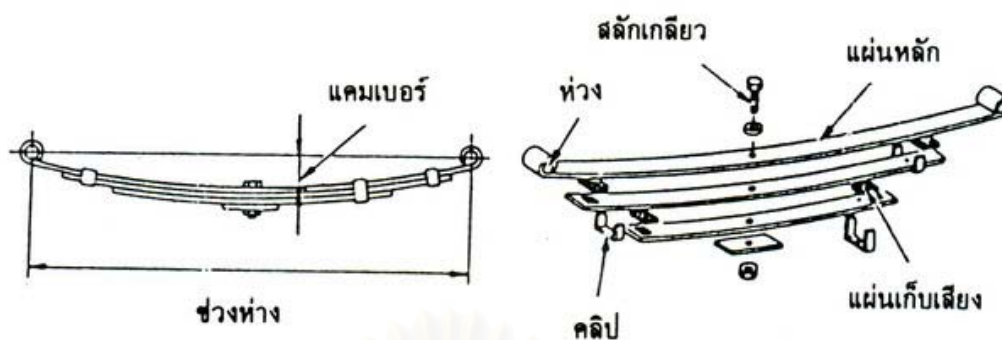


รูปที่ 2.13 ลำดับขั้นตอนการเต้นของสปริง [1]

2.4.4 ชนิดของสปริง

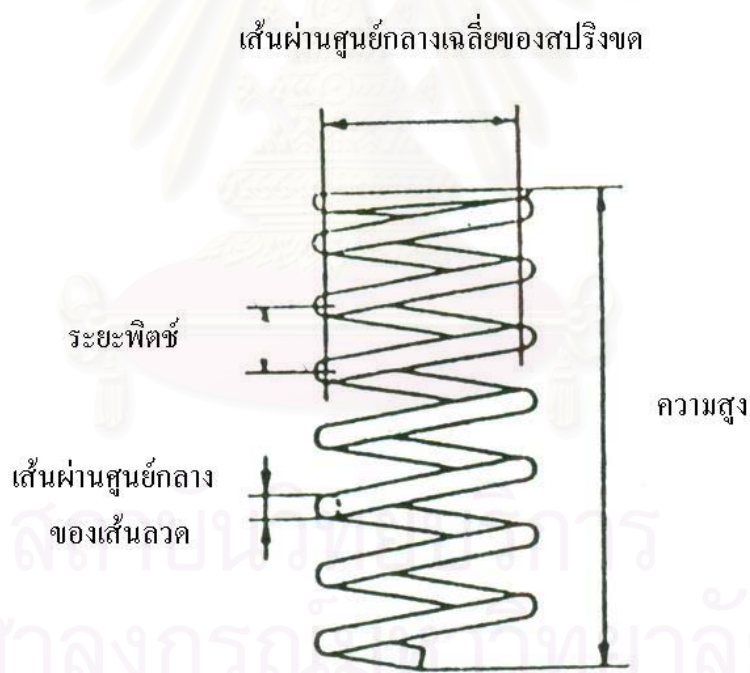
สปริงที่ใช้ในระบบรองรับของรถยนต์จะทำจากวัสดุ 2 ชนิดก็คือ ทำจากโลหะ เช่น แหนบสปริง ทอร์ชันบาร์ และคอยล์สปริง เป็นต้น ส่วนสปริงที่ไม่ได้ทำจากโลหะ เช่น ยางและสปริงถูกลมในระบบรองรับด้วยอากาศ

2.4.4.1 สปริงแหนบ ประกอบด้วยแผ่นสปริงหลายแผ่นซ้อนกันและมีลักษณะโค้ง แผ่นสปริงยึดรวมกันที่บริเวณศูนย์กลางด้วยสลักเกลียวซึ่งสอดผ่านรูบริเวณด้านบน แต่ละช่วงของแผ่นสปริงจะมีลึบยึดแผ่นไว้ด้วยกัน แผ่นสปริงชิ้นที่ยาวที่สุดเรียกว่าแผ่นหลัก ปลายทั้งสองข้างของแผ่นหลักจะโค้งเป็นห่วงและมีบูชชิ่งโลหะหรือบูชชิ่งยางสอดอยู่ภายใน สปริงแผ่นบางชุดมีแผ่นเก็บเสียงสอดอยู่ระหว่างแผ่นสปริง เพื่อให้แผ่นสปริงเลื่อนไถลไปมาบนผิวหน้าของแผ่นสปริงข้างเคียงได้เมื่อสปริงโก่งตัว ดังในรูปที่ 2.14



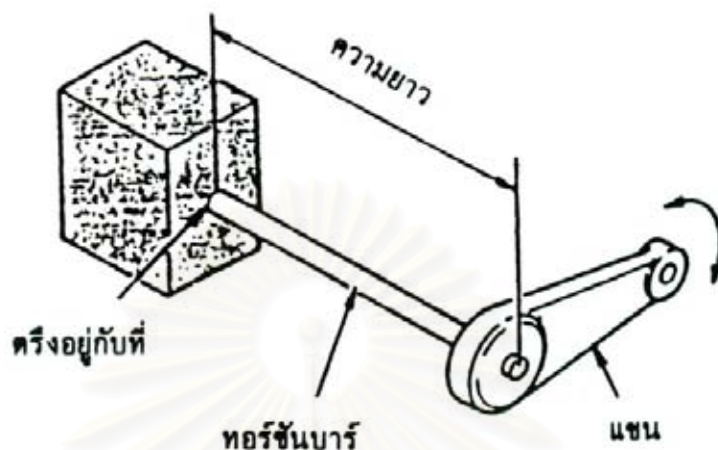
รูปที่ 2.14 โครงสร้างส่วนประกอบของสปริงแหนบ [5]

2.4.4.2 สปริงขด มักใช้กับระบบกันสะเทือนแบบอิสระ สปริงขดทำจากเส้นเหล็กกล้าขดเป็นรูปสปริงดังในรูปที่ 2.15 สปริงขดมีความยืดหยุ่นสูงและจะหดตัวเมื่อมีแรงกดกระทำ ความเค้นบนสปริงเกิดจากทอร์กเนื่องจากแรงกดและเกิดขึ้นทุกส่วนของสปริง



รูปที่ 2.15 สปริงขด [5]

2.4.4.3 สปริงทอร์ชันบาร์ ใช้สำหรับระบบกันสะเทือนแบบอิสระ ทอร์ชันบาร์เป็นแท่งเหล็กกล้าทำหน้าที่เป็นสปริง เมื่อตรงปลายข้างหนึ่งของแท่งเหล็กกล้าไว้กับที่แล้วบิดปลายอีกข้างหนึ่ง แท่งเหล็กกล้าจะเกิดการบิดตัวและสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้เองเมื่อปล่อยดังในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สปริงทอร์ชันบาร์ [5]

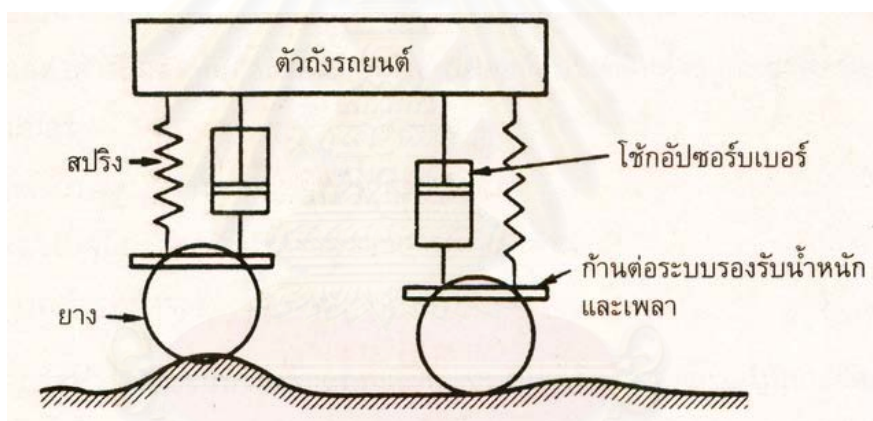
โดยทั่วไป ปลายข้างหนึ่งของทอร์ชันบาร์จะตรึงไว้กับ โครงฐานและปลายด้านตรงข้ามจะยึดกับกลไก ในขณะที่ล้อเคลื่อนที่ขึ้นและลงจะถ่ายทอดการเคลื่อนที่ผ่านกลไกไปยังสปริงทอร์ชันบาร์ และจะดูดกลืนแรงกระแทกในขณะที่เกิดการบิดตัว สปริงทอร์ชันบาร์ก็เช่นเดียวกับสปริงชนิดอื่น คือ สามารถดูดกลืนการสั่นสะเทือนได้น้อยกว่าสปริงแผ่น

2.4.5 ซ็อกอับซอร์บเบอร์

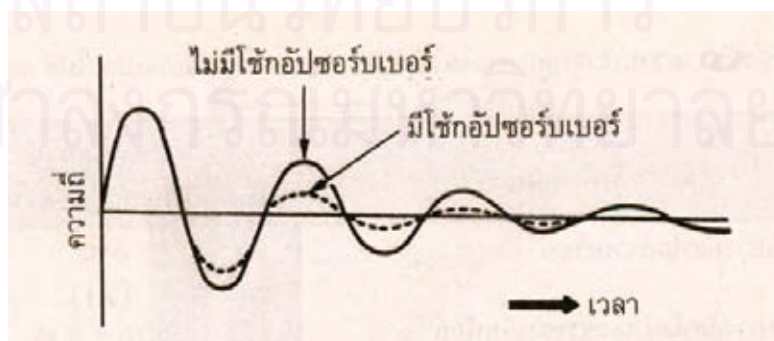
ซ็อกอับซอร์บเบอร์มีหน้าที่โดยพื้นฐานคือ เป็นตัวควบคุมการขูดตัวและการยึดตัวของสปริง แหนบ และสปริงแบบแท่ง เพื่อลดแรงกระแทกที่เกิดจากพื้นผิวของถนนที่ไม่เรียบ มีหน้าที่พื้นฐานคือเป็นอุปกรณ์ที่คอยควบคุมการทำงานของสปริงหรือแหนบ โดยเมื่อรถยนต์ได้รับแรงกระแทกเนื่องจากสภาพถนน ซ็อกอับซอร์บเบอร์จะเป็นตัวหน่วงการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของตัวรถยนต์ เพื่อให้รถยนต์ได้รับแรงสะเทือนน้อยที่สุด และควบคุมล้อรถให้สัมผัสกับพื้นผิวของถนนขณะรถวิ่ง ซ็อกอับซอร์บเบอร์ของรถยนต์โดยทั่วไปแล้วไม่มีหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกทุก สปริงหรือแหนบจะทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุก

ซ็อกอับซอร์บเบอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีส่วนสำคัญอย่างหนึ่งของระบบช่วงล่าง คือ เป็นตัวรองรับแรงกระแทกและควบคุมการยึดเกาะถนนของตัวรถยนต์ ซ็อกอับซอร์บเบอร์และสปริงต้องทำงานร่วมกัน โดยเมื่อมีแรงกดมายังช่วงล่าง สปริงจะทำการขูดตัวและค่อยๆ ดึงตัวขึ้น ตรงส่วน

นี่เองซึ่งข้อบกพร่องของสปริงจะเข้ามามีส่วนร่วมในการลดแรงเคี้ยวตัวของสปริง ทำให้แรงเคี้ยวตัวของสปริงมีความหนืดขึ้น ทำให้มีความรู้สึกรุนแรงขึ้นของช่วงล่าง ถ้าข้อบกพร่องของสปริงสามารถลดแรงเคี้ยวตัวของสปริงได้มากเท่าใด ก็แสดงถึงประสิทธิภาพของข้อบกพร่องของสปริงได้มากเท่านั้น ข้อบกพร่องของสปริงมีความจำเป็นเนื่องจากสปริงจะมีการสั่นอย่างต่อเนื่องเมื่อถูกแรงกระทำ ข้อบกพร่องของสปริงช่วยดูดซับการสั่นสะเทือนให้เร็วที่สุด และมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความสบายในการขับขี่เช่นเดียวกับความปลอดภัย ขณะที่รถยนต์ได้รับแรงกระแทกจากการวิ่งบนถนนที่ไม่เรียบ ข้อบกพร่องของสปริงจะมีหน้าที่เป็นตัวช่วยหน่วงการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงของตัวรถยนต์ และยังช่วยควบคุมการเต้นของล้อให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด เพื่อให้ล้อของรถยนต์ได้สัมผัสกับพื้นผิวของถนนในขณะที่ยานยนต์อยู่ตลอดเวลา ให้เกิดความสบายของผู้ขับขี่ และให้เกิดการทรงตัวที่ดีที่สุด ดังในรูปที่ 2.17 และ 2.18

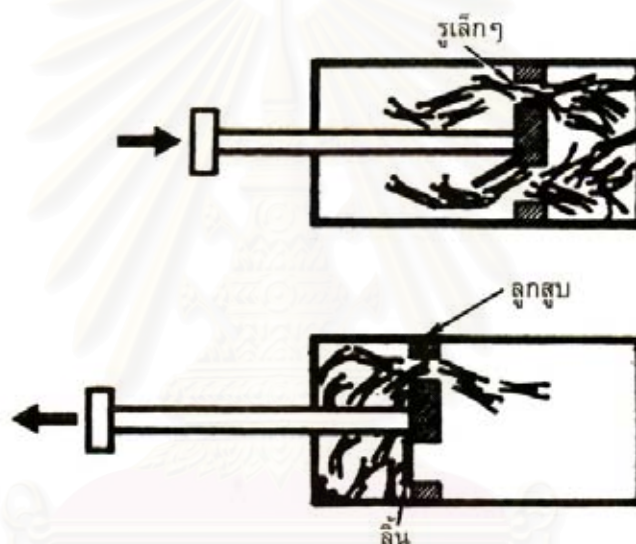


รูปที่ 2.17 หน้าที่การทำงานของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน (Shock absorber) เมื่อรถวิ่งบนถนนที่มีสภาพที่ไม่ราบเรียบ [1]



รูปที่ 2.18 กราฟการเปรียบเทียบความถี่การเต้นของสปริงในระบบรองรับน้ำหนักที่ไม่ใช้ตัวหน่วงการสั่นสะเทือนกับใช้ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน [1]

ในรูปที่ 2.19 ภายในกระบอกของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนจะบรรจุน้ำมันเป็นตัวกลางในการทำงาน เพื่อให้เกิดแรงต้านขึ้นภายในกระบอกช็อก ซึ่งมีสาเหตุจากการเกิดความต้านทานในการไหลของน้ำมันผ่านรูเล็กๆ ของลูกสูบในขณะที่เคลื่อนที่ แรงต้านภายในของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนจะมีมากขึ้น ก็ต่อเมื่อเกิดการเคลื่อนที่และการเดินอย่างรวดเร็วของตัวถัง แรงกระแทกจากตัวถังจะเป็นผลลัพธ์โดยตรงกับแรงต้าน อย่างไรก็ตาม แรงต้านที่เกิดขึ้นภายในตัวหน่วงการสั่นสะเทือนนั้นจะถูกแปรเปลี่ยนไปตามความเร็วของลูกสูบ โดยจะสอดคล้องกับสภาพของพื้นถนนที่อยู่ในสถานะการขับขี่ปกติ ในตารางที่ 2.1 แสดงอัตราความเร็วลูกสูบภายในตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพถนน



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนรูปทรงกระบอก [1]

ตารางที่ 2.1 ความเร็วลูกสูบภายในตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพของผิวถนน[1]

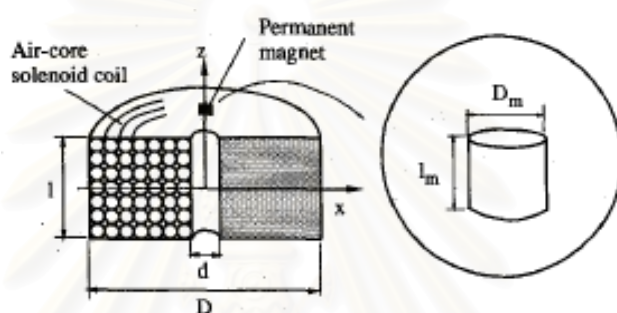
สภาพพื้นผิวถนน	ความเร็วลูกสูบ เมตรต่อวินาที (นิ้วต่อวินาที)
ถนนลาดยางแอสฟัลต์ราบเรียบ	0.08 (3.1)
ถนนลาดยางแอสฟัลต์ขรุขระเล็กน้อย	0.10 – 0.15 (3.9 – 5.9)
ถนนลาดยางแอสฟัลต์ขรุขระ	0.20 – 0.30 (7.8 – 11.7)
ถนนไม่ได้ลาดยางแอสฟัลต์	0.40 – 0.60 (15.6 – 23.4)
ถนนไม่ได้ลาดยางแอสฟัลต์และขรุขระอย่างมาก	0.80 – 1.00 (31.2 – 39.3)

บทที่ 3

การออกแบบระบบรองรับการสะท้อนโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้า

3.1 การวิเคราะห์แรงของระบบโซเลนอยด์/แม่เหล็กถาวร

ในการวิเคราะห์ผลของแรงตามแนวแกนกับมิติของขดลวดไฟฟ้าและแม่เหล็กถาวร เพื่อเลือกขนาดของขดลวดและแม่เหล็กให้เหมาะสม พิจารณาได้จากรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เรขาคณิตของขดลวดไฟฟ้าแกนอากาศและแม่เหล็กถาวร [6]

ในรูป D คือเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของขดลวดไฟฟ้า d คือเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของขดลวดไฟฟ้า l คือความยาวของขดลวดไฟฟ้า D_m คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็กถาวร และ l_m คือความยาวของแม่เหล็กถาวร

เมื่อมีโมเมนต์ไดโพลแม่เหล็ก m ในสนามแม่เหล็ก B แรงที่เกิดขึ้นจากโมเมนต์ไดโพลแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากกฎของแรงของ Lorentz จะได้สมการในรูปแบบเวกเตอร์เป็น[7]

$$\vec{F} = (\vec{m} \cdot \nabla) \vec{B} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ 3.1 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แรงจะมีสมมุติฐานสองข้อ ข้อแรกคือโมเมนต์ไดโพลแม่เหล็กมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในแม่เหล็กถาวร ข้อสองคือแม่เหล็กที่ใช้ในการคำนวณจะเหมารวมว่าเป็นตำแหน่งตรงกลางของแม่เหล็ก เหมือนเป็นโมเมนต์ไดโพลแม่เหล็กหนึ่งหน่วยแรงโดยรวมทั้งหมดจะเป็นผลคูณของอัตราส่วนปริมาตรของแม่เหล็กถาวรกับโมเมนต์ไดโพลแม่เหล็กหนึ่งหน่วย

ด้วยสมมุติฐานข้างต้น เมื่อพิจารณาแม่เหล็กถาวรที่มีขั้วแม่เหล็กอยู่ในแนวทิศทางแกน z เท่านั้น ซึ่งมีโมเมนต์ไดโพลเป็น m_z จากสมการ 3.1 จะได้

$$F_x = m_z \frac{\partial B_x}{\partial z} \quad (3.2)$$

$$F_y = m_z \frac{\partial B_y}{\partial z} \quad (3.3)$$

$$F_z = m_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (3.4)$$

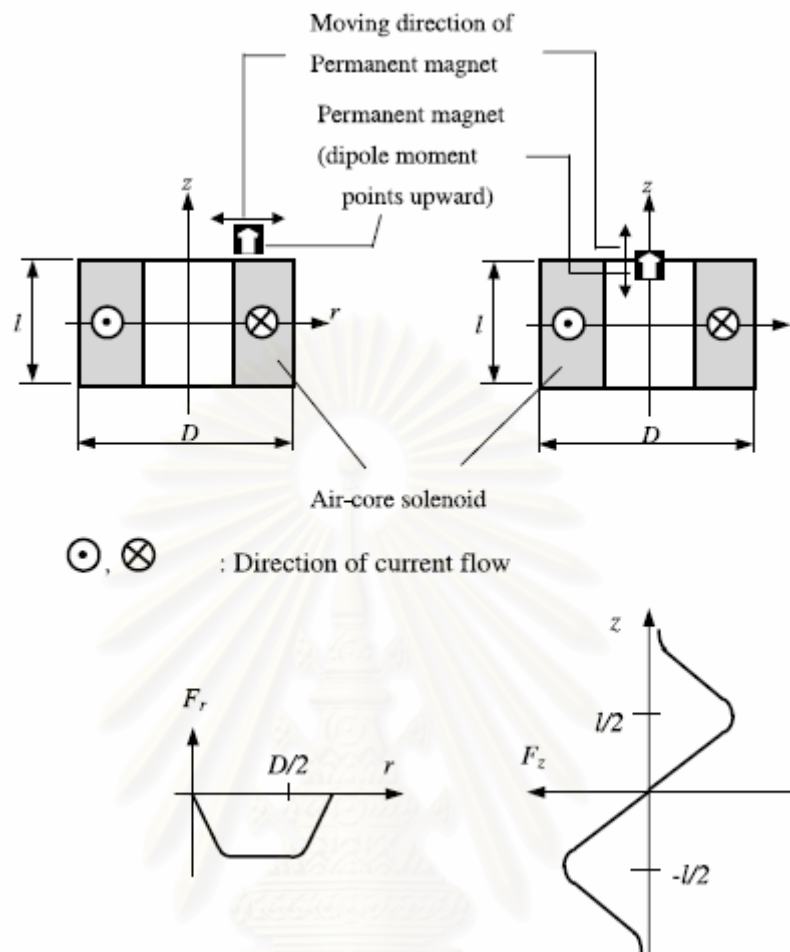
สำหรับการคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) \mathbf{B} จะพิจารณา ส่วนย่อยของกระแสในขดลวด และใช้กฎของ Biot - Savart เพื่อคำนวณสนาม $d\mathbf{B}$ เนื่องจาก ส่วนย่อยของกระแสที่จุดสนใจ i เป็นกระแสที่ไหล $d\mathbf{S}$ เป็นความยาวของส่วนที่กระแสไหล μ_0 คือความซึมซาบได้ (permeability) ของอากาศว่าง $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m และ r เป็นระยะจากส่วน ของกระแสไปยังจุดที่พิจารณา

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \left(\frac{d\mathbf{S} \times \mathbf{r}}{r^3} \right) \quad (3.5)$$

จะได้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกนเป็น [8]

$$B_z = \frac{\mu_0 N_i}{2l(D-d)} \left[(l+2z) \cdot \ln \left(\frac{D + \sqrt{D^2 + (l+2z)^2}}{d + \sqrt{d^2 + (l+2z)^2}} \right) \right] \\ + \frac{\mu_0 N_i}{2l(D-d)} \left[(l-2z) \cdot \ln \left(\frac{D + \sqrt{D^2 + (l-2z)^2}}{d + \sqrt{d^2 + (l-2z)^2}} \right) \right] \quad (3.6)$$

โดย D , d และ l กำหนดไว้ดังในรูปที่ 3.1 z เป็นระยะจากจุดศูนย์กลางของแม่เหล็กถาวรสัมพันธ์กับ จุดศูนย์กลางของขดลวดไฟฟ้า N เป็นจำนวนรอบของขดลวดไฟฟ้า และ i เป็นกระแส

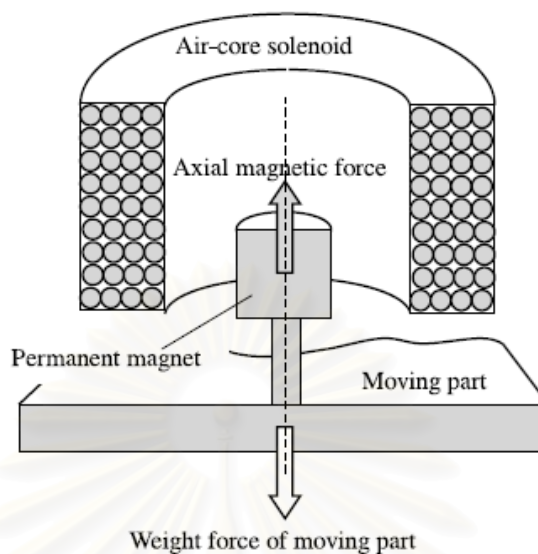


รูปที่ 3.2 ลักษณะของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อแม่เหล็กถาวรซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางตามแนวแกนต่างๆ [9]

รูปที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อแม่เหล็กถาวร ซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางตามแนวแกนเหนือพื้นผิวของขดลวดไฟฟ้าแกนอากาศ โดยกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดไฟฟ้าแกนอากาศนั้นมีค่าคงที่ แรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับแม่เหล็กถาวรในรูปดังกล่าวจะมีสองประเภท ประกอบด้วยแรงในแนวรัศมีและแรงตามแกน

เมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ไปเหนือพื้นผิวของขดลวดไฟฟ้าตามทิศทางในแนวรัศมี แรงในแนวรัศมีจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อแม่เหล็กถาวรอยู่ในตำแหน่งตรงกลางของขดลวดไฟฟ้า และเมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ไปตามทิศทางตามแนวแกนของขดลวดไฟฟ้า แรงตามแนวแกนจะมีค่าสูงสุดที่ผิวของขดลวดไฟฟ้างดังในรูปที่ 3.2

กรณีแม่เหล็กถาวรยึดติดอยู่กับส่วนเคลื่อนที่ โดยที่ขดลวดไฟฟ้าแกนอากาศอยู่กับที่ดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การจัดรูปแบบของแม่เหล็กถาวรและขดลวดไฟฟ้าแกนอากาศ [9]

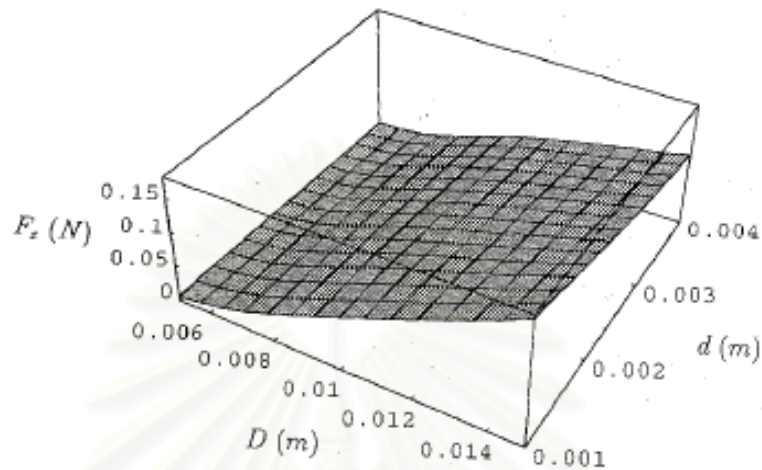
ถ้ากระแสที่จ่ายให้กับขดลวดไฟฟ้าคงที่เพื่อให้เกิดแรงดึงดูดกับแม่เหล็กถาวร ส่วนที่เคลื่อนที่จะรักษาตำแหน่งสมดุลแรงตามแนวแกนของแม่เหล็กถาวรและแรงจากน้ำหนักของส่วนเคลื่อนที่ ในกรณีนี้ ถ้ามีการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรขึ้นไปจากจุดสมดุลเล็กน้อย แรงแม่เหล็กตามแนวแกนก็จะมีค่าลดลง เพื่อให้ส่วนเคลื่อนที่กลับมาอยู่ในตำแหน่งสมดุลของแรงอีกครั้ง ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรลงจากจุดสมดุลเล็กน้อย ก็จะเป็นผลให้แรงแม่เหล็กตามแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อให้ส่วนเคลื่อนที่กลับมาอยู่ ณ จุดสมดุลอีกครั้งหนึ่ง

ในการวิจัยของ Kyihwan Park, Kee-Bong Choi, Soo-Hyun Kim และ Yoon Keun Kwak [9] เพื่อวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของขดลวดไฟฟ้า ที่มีผลต่อแรงตามแนวแกนซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของรถแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ได้เลือกใช้แม่เหล็ก neodymium – iron - boron (NdFeB) rare earth ที่มีค่าการเหนี่ยวนำตกค้าง 11.5 T ความเข้มสนามแม่เหล็ก 867,000 A/m และมีความสามารถในการคงสภาพแม่เหล็กสูง

ส่วนประกอบในการเลือกขนาดของขดลวดไฟฟ้าและแม่เหล็กให้เหมาะสมมี 2 ส่วน ส่วนแรกคือแรงที่กระทำต่อแม่เหล็กควรมีค่าสูงที่สุด เพื่อให้ผู้ใช้สามารถควบคุมได้อย่างมั่นคง และมีความสามารถในการยกได้มากโดยใช้กระแสน้อย ส่วนที่สองคือความชันของกราฟแรงกับระยะทาง ควรมีค่าชันเพื่อประสิทธิภาพของการยก

ขั้นแรก พิจารณาถึงผลของขนาดขดลวดไฟฟ้าที่มีแรงที่ศูนย์กลางกระทำต่อแม่เหล็กถาวรขนาดคงที่ โดยให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดและจำนวนรอบของขดลวดมีค่าคงที่ ผลที่ได้ดัง

ในรูปที่ 3.4 ซึ่งแสดงผลของ D , d และ l ต่อแรง เมื่อแม่เหล็กถาวรอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0.6 l$ โดย $m_z = 0.0309$ A/m, $N=400$ และ $i = 1$ A

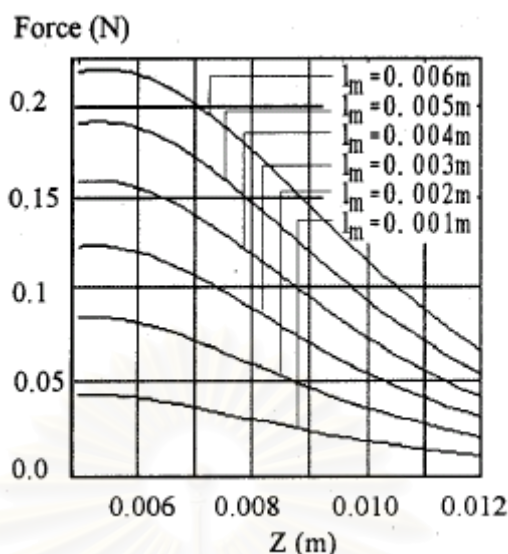


รูปที่ 3.4 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก D และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน d ของขดลวดต่อแรงตามแนวแกน F_z เมื่อแม่เหล็กอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0.6 l$ [6]

จากรูปจะเห็นได้ว่า D และ l เป็นตัวแปรที่มีผลมากกว่า d และขดลวดไฟฟ้าที่เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกกว้างกว่าและมีความสูงที่น้อยกว่า จะให้แรงตามแนวแกนมากกว่าขดลวดไฟฟ้าที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกแคบกว่าและมีความสูงมากกว่า เมื่อปริมาตรของขดลวดไฟฟ้าเท่ากัน

ต่อมาพิจารณาผลของขนาดแม่เหล็กถาวรต่อแรงตามแนวแกน เมื่อให้ขนาดของขดลวดไฟฟ้าคงที่ $D = 0.018$ m, $d = 0.008$ m, $l = 0.01$ m, $N = 450$ และกระแส 1 A ในรูปที่ 3.5 แสดงแรงตามแนวแกน z โดยที่ l_m มีค่า 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005 และ 0.006 m และ D_m มีค่า 0.003 m จะเห็นได้ว่า แรงตามแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของแม่เหล็ก l_m มีค่าเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

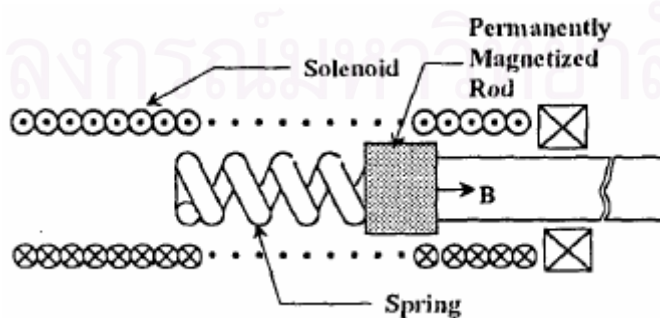


รูปที่ 3.5 แรงตามแนวแกนของจุดศูนย์กลางขดลวดเมื่อความสูงของแม่เหล็กถาวรมีค่าต่างๆ [6]

3.2 ระบบรองรับการสะเทือนโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้า

ระบบรองรับการสะเทือน โดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้านี้จะออกแบบให้ก้านที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กติดตั้งอยู่ในขดลวดที่มีกระแสไหล เพื่อให้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงตามแนวแกน ซึ่งเป็นผลมาจากขอบเขตของขั้วแม่เหล็กและเป็นกำลังในการเคลื่อนที่เชิงเส้น ขณะที่แรงแม่เหล็กในแนวรัศมีจะทำการพยุงก้านที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก ทำให้ไม่มีความฝืดระหว่างก้านที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กกับขดลวดที่มีกระแสไหลด้านนอก

เพื่อให้ได้แรงในการยก กระแสในขดลวดต้องอยู่ในทิศทางที่สามารถรักษาเสถียรภาพของการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี แรงแม่เหล็กในทิศทางตามแนวแกนจะทำหน้าที่ผลักก้านที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กออกจากตำแหน่งเริ่มต้นของขดลวด ดังนั้น เพื่อการรองรับแรงในทิศทางตรงกันข้าม จึงต้องใช้สปริงเพื่อป้องกันการควบคุมไม่ได้จากจุดสมดุล ดังในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รูปร่างของส่วนการยกในระบบรองรับการสะเทือน [10]

ระบบแม่เหล็กสำหรับพวงถูกใช้เพื่อให้ส่วนที่เคลื่อนที่มีความสมดุลในทิศทางแนวแกน และการไบแอสกระแสเข้าสู่ขดลวด ทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก ($\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B}$) ในทิศทางรัศมี เพื่อใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนของส่วนที่เคลื่อนไหว และมีรูปทรงสมบูรณ์ของส่วนการยกในระบบรองรับการสะท้อน ดังในรูปที่ 3.7



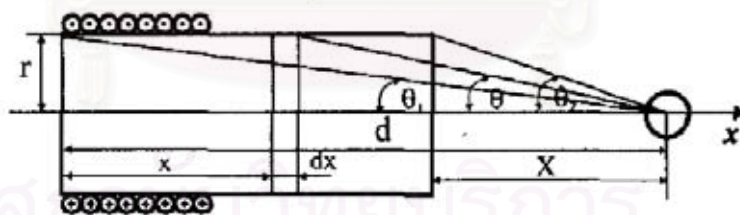
รูปที่ 3.7 รูปทรงสมบูรณ์ของส่วนการยกในรูปที่ 3.6 [10]

3.3 การวิเคราะห์แบบจำลอง

โดยการใช้หลักทฤษฎีพื้นฐานการเคลื่อนที่ พฤติกรรมของลูกเหล็กกึ่งแม่เหล็กจะได้อสมการกลศาสตร์ของแม่เหล็กไฟฟ้า

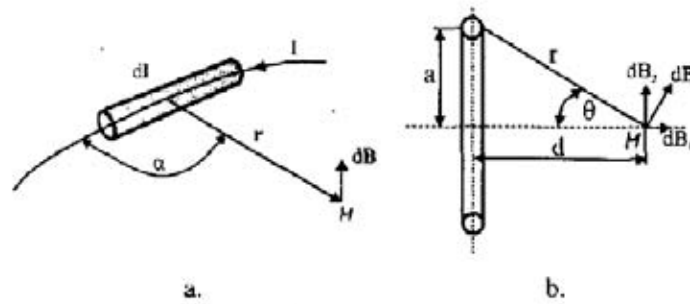
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg + f(x, i) \tag{3.7}$$

โดย m คือมวลของลูกเหล็กที่ยก g เป็นความโน้มถ่วง x เป็นระยะจากลูกเหล็กไปยังแม่เหล็กไฟฟ้า i คือกระแสที่ผ่านเข้าสู่ขดลวด และ $f(x, i)$ คือแรงที่ใช้ควบคุมแม่เหล็ก



รูปที่ 3.8 การจัดตำแหน่งของรูปกลมและขดลวด [11]

พิจารณาขดลวดไฟฟ้าที่มีรัศมี r ความยาว l โดยมีกระแส i ไหลผ่าน ลูกเหล็กจะอยู่ในตำแหน่งบนแนวแกนของขดลวดดังในรูปที่ 3.8 ผลของสนามแม่เหล็กที่สร้างโดยแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในลูกเหล็ก ซึ่งจะเกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้น ดังนั้น แรงที่กระทำต่อลูกเหล็กจะประกอบไปด้วย แรงดึงดูดสู่ศูนย์กลางโลกและแรงแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำขั้วแม่เหล็ก



รูปที่ 3.9 สนามแม่เหล็ก [11]

- (a) สนามแม่เหล็กที่สร้างโดยส่วนของกระแส $i dl$
 (b) สนามแม่เหล็กที่สร้างโดยกระแสวิ่งรอบเป็นวง

สนามแม่เหล็ก ณ จุดสนใจ (ดูรูปที่ 3.8) สามารถพิจารณาตามหลักของ Biot – Savart สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากส่วนเล็กๆ ของลวด dl ซึ่งมีกระแส i ดังในรูปที่ 3.9(a) จะได้

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{dl \times r}{r^3} \quad (3.8)$$

โดย μ_0 เป็นสภาพซึมซาบได้ของอวกาศว่าง และ $dl \times r$ คือผลคูณเวกเตอร์ของเวกเตอร์ dl และ r ดังนั้น จะได้ขนาดของสนามแม่เหล็กจะเป็น

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2} \quad (3.9)$$

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลเป็นวงกลมซึ่งมีรัศมี a ดังในรูปที่ 3.9(b) จะได้

$$B = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{a^2}{(a^2 + d^2)^{3/2}} \quad (3.10)$$

จากการพิจารณาความเท่ากันของส่วนประกอบสนามที่ตั้งฉากกับแกนของขดลวด dB_2 จะมีค่าเป็น 0 บนแกน

สำหรับการหาค่าของสนามในกรณีที่มีขดลวดหลายรอบ (N) รอบแกน ให้ n เป็นจำนวนรอบต่อเมตร ระยะทางร่วมกัน dx โดยมีกระแสไหลผ่านเป็น $nI dx$ ดังนั้น สนามโดยรวมตามแกนจากขดลวดทุกรอบจะเป็น

$$B = \int dB = \frac{\mu_0}{2} nI \int dx \frac{\sin^3 \theta}{r} \quad (3.11)$$

รวมสมการที่ 3.11 ในช่วง $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ จะเป็น

$$B = \frac{\mu_0}{2} nI \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0}{2} nI (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (3.12)$$

และสามารถเขียนใหม่ได้ในรูป

$$B = \frac{\mu_0}{2} nI \left(\frac{X+l}{\sqrt{r^2 + (X+l)^2}} - \frac{X}{\sqrt{r^2 + X^2}} \right) \quad (3.13)$$

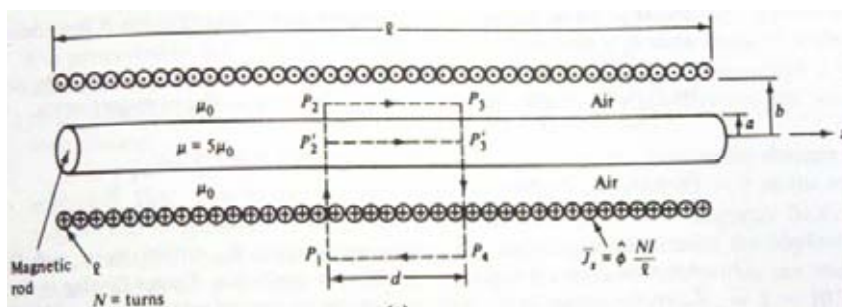
อย่างไรก็ตาม สำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขดลวดที่พันอยู่หลายชั้นที่มีรัศมี $r_1 \leq r \leq r_2$ นำไปพิจารณาในสมการที่ 3.13 สนามแม่เหล็กจะเป็น

$$dB = \frac{\mu_0}{2} nI \left(\frac{X+l}{\sqrt{r^2 + (X+l)^2}} - \frac{X}{\sqrt{r^2 + X^2}} \right) ndr \quad (3.14)$$

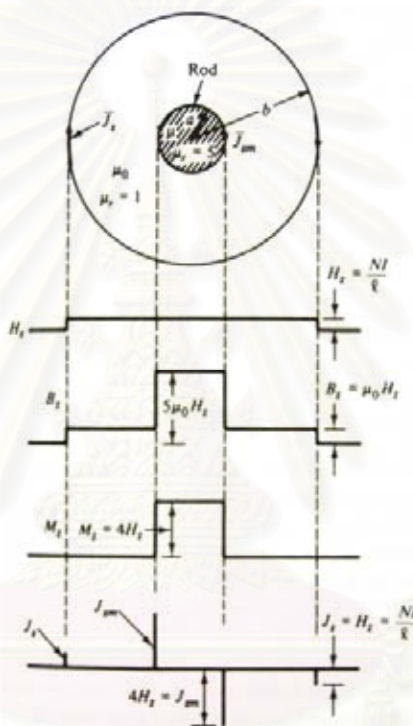
ดังนั้น สนามแม่เหล็กโดยรวมจะมีค่าดังนี้

$$B = \frac{\mu_0 n^2 I}{2} \left((X+l) \ln \left| \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + (X+l)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (X+l)^2}} \right| + X \ln \left| \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + X^2}}{r_2 + \sqrt{r_2^2 + X^2}} \right| \right) = C_1 IG(X) \quad (3.15)$$

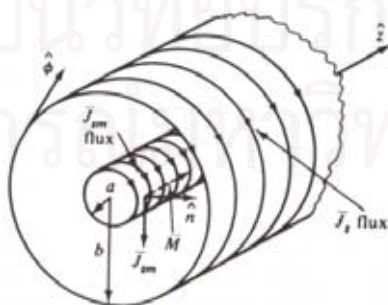
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.10 (a) โซเลนอยด์ยาวที่มีแกนแม่เหล็กอยู่ภายใน โดยมีจุดศูนย์กลางแกนร่วมกัน

(b) การพล็อตของ H , B , M , J_s และ J_{sm} ตามพื้นที่ตัดขวาง

(c) \bar{J}_s บนโซเลนอยด์และ \bar{J}_{sm} บนแกนแม่เหล็ก

พิจารณาขดลวดโซเลนอยด์ยาวที่มีก้านแม่เหล็กอยู่ใน โดยมีจุดศูนย์กลางแกนร่วมกันดัง
ในรูปที่ 3.10 (a) จาก $\nabla \times \bar{H} = \bar{J}$ เป็นจริงสำหรับกระแสสม่ำเสมอในอากาศว่างและวัสดุแม่เหล็ก
ด้วยกฎของแอมแปร์จะได้

$$\oint_l \bar{H} \cdot d\bar{l} = I_{en} \quad (3.16)$$

เมื่อ I_{en} เป็นกระแสเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของประจุอิสระ และไม่รวมกับกระแสที่เกิดจาก
แม่เหล็ก I_m เมื่อใช้กฎของแอมแปร์ในเส้นทางปิด $P_1 - P_2 - P_3 - P_4$ จะได้

$$\oint_l \bar{H} \cdot d\bar{l} = \int_{P_2}^{P_3} (\hat{z}H_z) \cdot (\hat{z}dz) = H_z d = I_{en} = \frac{NI}{l} d \quad (3.17)$$

เมื่อ H_z ภายในโซเลนอยด์เท่านั้นที่มีค่าสนาม \bar{H} บนทางเดิน P ไม่เป็นศูนย์ จะได้ค่า H_z ในช่วง
อากาศเป็น

$$H_z = \frac{NI}{l} = J_s \quad (3.18)$$

ถ้าเราใช้กฎของแอมแปร์กับส่วนทางเดินปิด $P_1 - P_2' - P_3' - P_4 - P_1$ จะได้ H_z ในก้านเหมือนกับ
อากาศ เพราะกฎของแอมแปร์ไม่ได้รวม I_m ไว้ในเทอม I_{en}

Magnetic vector \bar{M} จะมีความสัมพันธ์กับ \bar{H} ในวัสดุแม่เหล็กที่มีลักษณะทางกายภาพที่
เหมือนกันจะได้

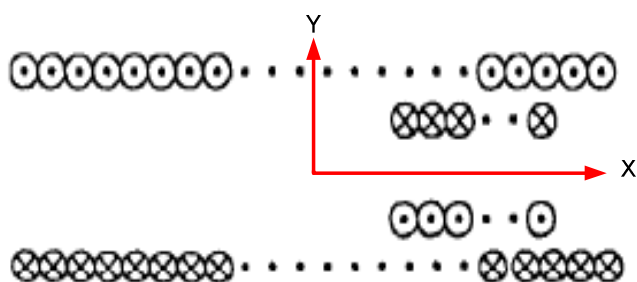
$$\bar{M} = \chi_m \bar{H} \quad (3.19)$$

โดย χ_m คือความไวของแม่เหล็กในวัสดุ ดังนั้น สำหรับก้านแม่เหล็กจะได้

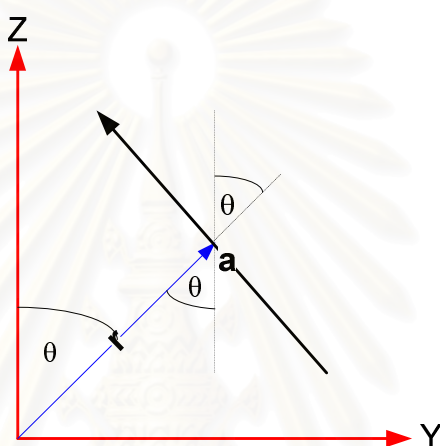
$$\bar{M} = \hat{z}M_z = \chi_m (\hat{z}H_z) \quad (3.20)$$

\bar{M} ในอากาศจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ χ_m ในอากาศเป็นศูนย์ และจากสมการ $\bar{B} = \mu\bar{H}$ จะเห็นว่า \bar{B}
ในอากาศจะเป็น $\mu_0(\hat{z}H_z)$ ขณะที่ \bar{B} ในก้านจะมีค่า $\mu_0\mu_r(\hat{z}H_z)$ อัตราส่วนของ \bar{B} ในก้านต่อ
อากาศจะเป็น μ_r ดังนั้น \bar{B} ในก้านจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม μ_r จากการดึงดูของแม่เหล็ก

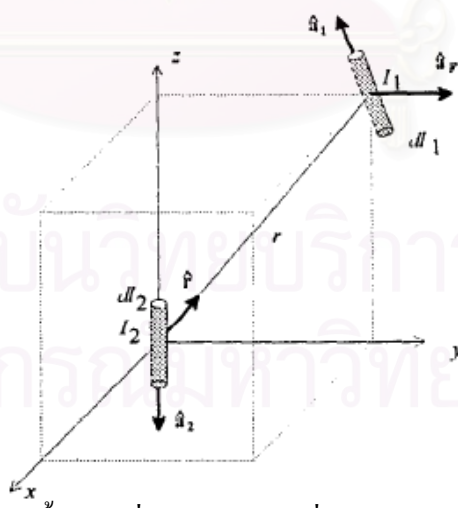
จาก $\bar{J}_{sm} = \bar{M} \times \hat{n} = (\hat{z}M_z) \times (\hat{r}_c) = \hat{\phi}M_z$ และ $\bar{J}_m = \nabla \times \bar{M} = \nabla \times (\hat{z}M_z) = 0$ ภายใน
ก้านแม่เหล็ก ผลลัพธ์สามารถพล็อตได้ดังในรูปที่ 3.10 (b) สำหรับ $\mu_r = 5$ ในรูปที่ 3.10 (c)
แสดงค่า \bar{J}_s บนผิวของโซเลนอยด์เนื่องมาจากประจุอิสระภายในขดลวดจำนวน N รอบ และ \bar{J}_{sm}
บนผิวของก้านแม่เหล็กตามการดึงดูของแม่เหล็ก โดย \bar{J}_m ภายในก้านจะมีค่าเป็นศูนย์จากสมการ
ข้างต้น



รูปที่ 3.11 ทิศทางแกน X และ Y ของโซเลนอยด์ด้านนอกและก้านที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กด้านใน



รูปที่ 3.12 ทิศทางแกน Y และ Z ที่มีกระแสไหลผ่านขดลวดทิศทาง \vec{a}



รูปที่ 3.13 เรขาคณิตของชิ้นส่วนที่มีกระแสไหลเพื่อใช้ในการหาแรงระหว่างกัน [10]

สำหรับการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งของก้านที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กกับโซเลนอยด์ด้านนอก สามารถแสดงรูปแบบการจัดวางได้ดังในรูปที่ 3.11 โดยพิจารณาว่าก้านที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กด้านในเสมือนเป็นโซเลนอยด์ ซึ่งมีทิศทางกระแสไหลในด้านตรงกัน

ข้ามกับโซเลนอยด์ที่อยู่ด้านนอกดังในรูปที่ 3.11 แรงที่กระทำกับขดลวดด้านในที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวดด้านนอกสามารถหาได้โดยใช้กฎของแอมแปร์

พิจารณาชิ้นส่วนที่มีกระแสไหลสองชิ้นส่วนดังในรูปที่ 3.13 แรงที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นส่วนที่มีกระแสไหลทั้งสองจะเป็น

$$d\vec{F} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^2} \hat{a}_1 \times (\hat{a}_2 \times \hat{r}) dl_1 dl_2 \quad (3.21)$$

โดยที่

$d\vec{F}$ = แรงบนองค์ประกอบที่ 1 เนื่องจากกระแสในองค์ประกอบที่ 2, N

μ_0 = ความซึมซาบได้ของอากาศ, Hm^{-1}

dl_1, dl_2 = ระยะของชิ้นส่วนที่ 1 และ 2, m

I_1, I_2 = กระแสในองค์ประกอบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ, A

r = ระยะระหว่างองค์ประกอบ, m

\hat{a}_1 = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของกระแสในองค์ประกอบที่ 1

\hat{a}_2 = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของกระแสในองค์ประกอบที่ 2

\hat{r} = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางรัศมี (จากองค์ประกอบที่ 2 ไปยัง 1)

เมื่อประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับตำแหน่ง โดยรัศมีขดลวดด้านในเป็น r_2 ที่ตำแหน่ง x_2 และขดลวดด้านนอกที่มีรัศมี r_1 ที่ตำแหน่ง x_1 พิจารณาจากรูปที่ 3.9 จะได้

$$\hat{a}_1 = \cos\theta_1 \bar{j} - \sin\theta_1 \bar{k}, \quad \hat{a}_2 = \cos\theta_2 \bar{j} - \sin\theta_2 \bar{k} \quad (3.22)$$

และ

$$\hat{r} = (x_2 - x_1) \bar{i} + (r_2 \sin\theta_2 - r_1 \sin\theta_1) \bar{j} + (r_2 \cos\theta_2 - r_1 \cos\theta_1) \bar{k} \quad (3.23)$$

ดังนั้น แรงที่กระทำบนขดลวดด้านในซึ่งมีรัศมี r_2 ที่ตำแหน่ง x_2 เนื่องมาจากกระแสที่ไหลในขดลวดด้านนอกซึ่งมีรัศมี r_1 ที่ตำแหน่ง x_1 จะได้สมการ

$$d\vec{F} = \frac{1}{4\pi} [\cos\theta_2 \bar{j} - \sin\theta_2 \bar{k}] \times [\cos\theta_1 \bar{j} - \sin\theta_1 \bar{k}] \\ \times [(x_2 - x_1) \bar{i} + (r_2 \sin\theta_2 - r_1 \sin\theta_1) \bar{j} + (r_2 \cos\theta_2 - r_1 \cos\theta_1) \bar{k}] \\ \frac{\mu_0 I_1 I_2 r_1 r_2 d\theta_1 d\theta_2}{[(x_1 - x_2)^2 + (r_1 \sin\theta_1 - r_2 \sin\theta_2)^2 + (r_1 \cos\theta_1 - r_2 \cos\theta_2)^2]^{3/2}} \quad (3.24)$$

แรงตามแนวแกนสามารถแสดงได้ดังสมการ

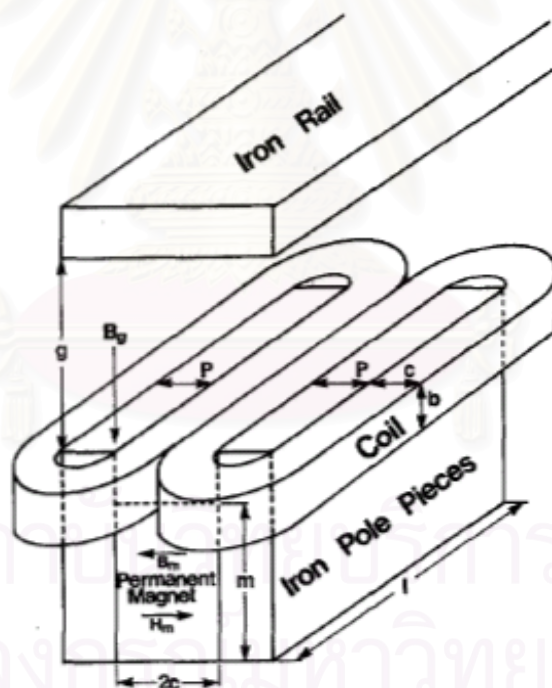
$$dF_x = \frac{-1}{4\pi} \mu_0 I_1 I_2 r_1 r_2 (x_2 - x_1) (\cos\theta_1 \cos\theta_2 + \sin\theta_1 \sin\theta_2) d\theta_1 d\theta_2 \\ \frac{1}{[(x_1 - x_2)^2 + (r_1 \sin\theta_1 - r_2 \sin\theta_2)^2 + (r_1 \cos\theta_1 - r_2 \cos\theta_2)^2]^{3/2}} \quad (3.25)$$

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของก้านที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กในทิศทางรัศมี จะเห็นได้ว่า แรงในแนวรัศมีจะรักษาให้ก้านที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กอยู่ในตำแหน่งตรงกลางของแนวแกน เมื่อมีการหันเหในแนวรัศมีเกิดขึ้น จะมีแรงในทิศทางตรงกันข้ามที่จะผลักลับ เพื่อให้อยู่ในตรงกลางของแนวแกน ทำให้การเคลื่อนที่ในแนวรัศมีไม่สามารถควบคุมได้

3.4 คุณสมบัติของขดลวดและแม่เหล็ก

สำหรับคุณสมบัติของขดลวดที่ใช้ในการพันแกนเพื่อพัฒนาชิ้นงานจะต้องพิจารณาชนิดของลวดที่จะนำมาใช้งาน โดยจะสามารถพิจารณาจากอัตราส่วนกำลังต่อแรงยกและอัตราส่วนแรงยกต่อน้ำหนักที่ยก จากตัวอย่างการคำนวณโดยใช้ขดลวดวัสดุแตกต่างกัน

ในการพิจารณาถึงคุณสมบัติของขดลวดและแม่เหล็ก โดยศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในระบบรองรับการสะเทือนที่ควบคุมโดยแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในรถไฟแม่เหล็กดังในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ระบบรองรับการสะเทือนที่ควบคุมโดยแม่เหล็กถาวรทดลองโดย Polgreen [12]

ท่อนของวัสดุแม่เหล็กถาวรวางอยู่ตรงกลางระหว่างโลหะซึ่งควบคุมโดยขดลวดที่พันโดยรอบและมีการดึงดูดกันกับรางเหล็ก

กระแสรวม I ในแต่ละคอยล์ตามขวาง $b \times c$ จะเป็น

$$I = JKbc \quad [A] \quad (3.26)$$

เมื่อ J คือความหนาแน่นกระแส และ K คือ packing fraction จะได้แรงในการยกเป็น

$$lift = \frac{B_g^2}{\mu_0} pl \quad [\text{N}] \quad (3.27)$$

โดยที่ B_g คือสนามแม่เหล็กในช่องว่าง และ pl เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องว่าง สนามแม่เหล็กในช่องว่างจะมีค่า

$$B_g = \frac{\mu_0(I + H_m c)}{g} \quad [\text{T}] \quad (3.28)$$

เมื่อ g คือช่องว่างอากาศ (แต่ละด้าน) H_m คือความเหนี่ยวนำในแม่เหล็กถาวรซึ่งมีความหนา $2c$ รวมสมการเข้าด้วยกันจะได้

$$lift = \frac{\mu_0}{g^2} (JKbc + H_m c)^2 pl \quad [\text{N}] \quad (3.29)$$

ความหนาแน่นฟลักซ์ในแม่เหล็กถาวร (B_m) และในอวกาศว่าง (B_g) มีความสัมพันธ์กันโดย

$$B_m = B_g \frac{\rho}{m} \quad [\text{T}] \quad (3.30)$$

เมื่อ m เป็นความกว้างของแม่เหล็กถาวร กำลังที่สูญเสียจะเป็น

$$power = 2I^2 \frac{\rho}{b^2 K} (2l + \pi[p + c]) \quad [\text{W}] \quad (3.31)$$

และน้ำหนักรวมมีค่า

$$mass = \sigma_m 2cml + \sigma_{Fe} 2pl(m + b) + \sigma_c K 2bc(2l + \pi[p + c]) \quad [\text{kg}] \quad (3.32)$$

โดย ρ คือความต้านทานของตัวนำ และ σ_m , σ_{Fe} และ σ_c คือความหนาแน่นของแม่เหล็ก เหล็ก และตัวนำตามลำดับ

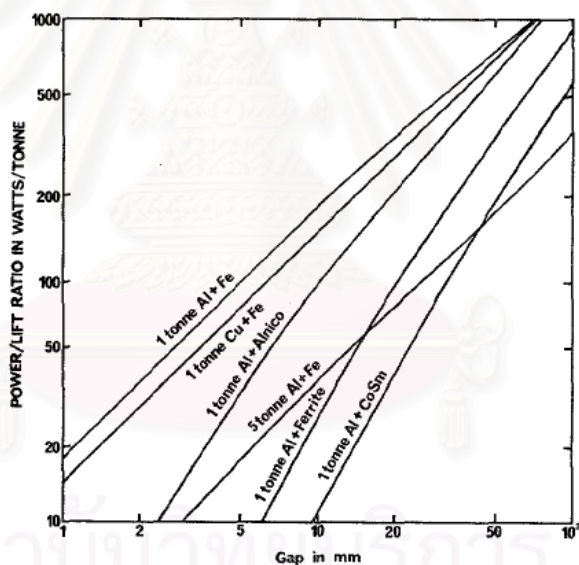
สำหรับขนาดของแรงยกที่แตกต่างกัน จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขดลวดที่ใช้วัสดุแตกต่างกันกับวัตถุอ้างอิง สำหรับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการพิจารณา อัตราส่วนกำลังต่อแรงยกและอัตราส่วนแรงยกต่อน้ำหนักที่ใช้ยกดังในตารางที่ 3.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

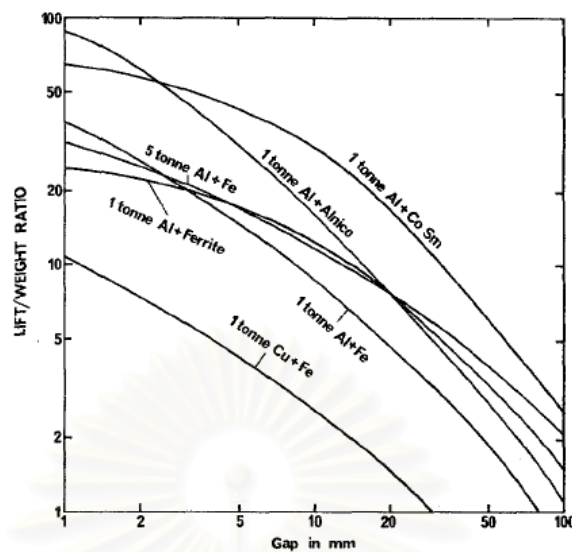
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการพิจารณา [13]

Material	σ Kg/m ³	ρ Ω m	J A/m ²	B_m^* T	H_m^* A/m
Iron	7900	-	-	1.0	0
Copper	8900	1.8×10^{-8}	10^5	-	-
Aluminum	2700	2.8×10^{-8}	8×10^5	-	-
Ferrite(Indox5)	5000	-	-	0.19	14.6×10^4
Alnico (V-7)	7300	-	-	1.15	5.1×10^4
Rare-earth	8200	-	-	0.5	25×10^4

* at maximum energy density product



รูปที่ 3.15 อัตราส่วนกำลังต่อแรงยก โดยเป็นฟังก์ชันของความสูงของการสะท้อน สำหรับแม่เหล็กที่สร้างแรงยก 1 ตันและ 5 ตัน ด้วยวัสดุชนิดต่างๆ [13]



รูปที่ 3.16 อัตราส่วนแรงยกต่อน้ำหนัก โดยเป็นฟังก์ชันของความสูงของการสะท้อน สำหรับแม่เหล็กที่สร้างแรงยก 1 ตันและ 5 ตัน ด้วยวัสดุชนิดต่างๆ [13]

ในรูปที่ 3.15 และ 3.16 แสดงให้เห็นอัตราส่วนที่ขึ้นกับระยะห่างและวัสดุที่แตกต่างกัน โดยใช้ อัลนิโค เฟอร์ไรท์ และ โคบอล - ซามาเรียมเรเอิร์ธแม่เหล็กถาวร ซึ่งมีอลูมิเนียมและทองแดงเป็นขดลวด ความหนาแน่นกระแสในอลูมิเนียมและทองแดงได้ปรับให้มีความหนาแน่นของกำลังในแกนของขดลวดเท่ากัน

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.15 และ 3.16 จะพบว่า ลักษณะระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบรองรับการสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้านั้น จะเห็นได้ว่าอลูมิเนียมมีข้อดีมากกว่าทองแดง เนื่องจากมีอัตราส่วนแรงยกต่อน้ำหนักที่ยกมากกว่าอย่างเด่นชัด

พิจารณาอัตราส่วนของแรงในการยกต่อน้ำหนักดังในรูปที่ 3.16 ถึงแม้ว่าอัลนิโคจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเนื่องจากมีค่า Retentivity สูง แต่ในความเป็นจริง ด้วยราคาของแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ที่ถูกกว่า และแม่เหล็ก Rare - earth ซึ่งมีความคุ้มค่ากว่า จึงเหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากนี้ อัลนิโคยังมีปัญหาในการเสื่อมสภาพแม่เหล็ก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอากาศว่าง และภายใต้การควบคุมของกระแสที่มีเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งแม่เหล็ก Ferrite และแม่เหล็ก Rare-earth สามารถใช้งานในสภาวะดังกล่าวได้

คุณสมบัติของแม่เหล็กอัลนิโค นั้นจะเป็นแม่เหล็กที่ทนต่ออุณหภูมิสูง และทนต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี ส่วนมากใช้ประกอบในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน เครื่องมือวัด แม่พิมพ์ ส่วนแม่เหล็กเฟอร์ไรท์หรือแม่เหล็กเซรามิกนั้น มักจะมีราคาถูกกว่าแม่เหล็กประเภทอื่นๆ และนับว่าเป็นแม่เหล็กที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะคุณสมบัติหลายๆด้านและการทนความร้อน ส่วนมากใช้ประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม อุปกรณ์การ

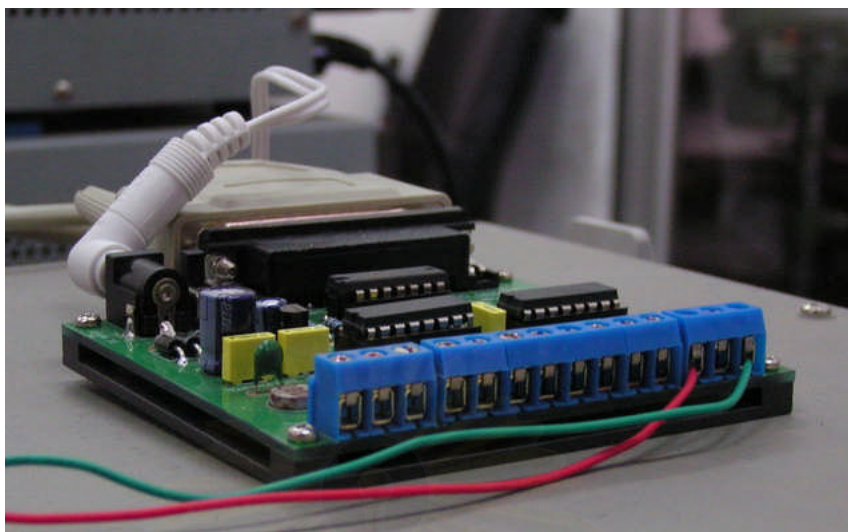
สี่สาร ของเล่น และสำหรับแม่เหล็ก Rare - earth ซึ่งมีทั้งแม่เหล็กซามาเรียมโคบอลต์ (SmCo) และแม่เหล็กนีโอดีเมียม-เฟอร์ไรต์-โบรอน (Nd-Fe-B) มีคุณสมบัติต่างกันบางประการ โดยแม่เหล็กซามาเรียมนั้นมีแรงดูดสูง เหมาะสำหรับงานหลายประเภทที่ทนความร้อนสูงและทนต่อการกัดกร่อน ส่วนมากใช้ประกอบในเครื่องมือนาฬิกา เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แม่พิมพ์ ส่วนแม่เหล็กที่เหมาะสมในใช้กับระบบรองรับการสะเทือนคือนีโอดีเมียมจะมีแรงดูดสูง มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพสูงสุดในประเภทของแม่เหล็กถาวรที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ส่วนมากใช้ประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้าเครื่องแยกเศษเหล็ก เครื่องจักรต่างๆ ฮาร์ดดิสก์ มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เซ็นเซอร์ เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยตารางพื้นที่ (Flux density) มากที่สุดที่ใช้ในการพาณิชย์โดยทั่วไปในปัจจุบัน คุณสมบัติของแม่เหล็กนีโอดีเมียมที่เด่นชัด เช่น มีความต้านทานต่อการเสื่อมของแม่เหล็กสูง มีพลังต่อขนาดสูง แต่วัสดุสามารถถูกกัดกร่อนได้ จึงควรทำการเคลือบเพราะจะได้พลังงานสูงในระยะยาว โดยสารที่นำมาเคลือบได้แก่ สังกะสี นิเกิล เป็นต้น ลักษณะแม่เหล็กจะมีสีตามลักษณะของสารที่นำมาเคลือบ เช่น เคลือบสังกะสีจะมีลักษณะแม่เหล็กเป็นสีเงิน [14]

3.5 การออกแบบการทดลองระบบรองรับการสะเทือนแบบควบคุมด้วยไฟฟ้าแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้น

ในการทดลองระบบรองรับการสะเทือนที่พัฒนาขึ้นนี้ ระบบประกอบด้วย หน่วยประมวลผลและจำลองระดับพื้นผิวทดสอบขึ้น วงจรต่างๆ อาทิ วงจรแปลงสัญญาณ ดิจิทัลเป็นแอนะล็อก วงจรขยายเพื่อขับขดลวด และวงจรขยายสัญญาณจากโพลเดเซลล์ ส่วนของโซเลนอยด์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณควบคุมและให้แรงออกมา และส่วนของโพลเดเซลล์ซึ่งวัดปริมาณแรงกดของโซเลนอยด์ที่เกิดขึ้น

หน่วยประมวลผลที่ใช้ในการจำลองนี้เป็นคอมพิวเตอร์กระเป๋าหิ้ว เพื่อให้มีความสะดวก อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นในการเขียนและปรับเปลี่ยนชุดคำสั่งต่างๆ ของโปรแกรม สามารถบันทึกข้อมูลผลการจำลองเพื่อนำมาคำนวณได้ง่าย โปรแกรมสำหรับการจำลองนี้พัฒนาขึ้นด้วย Visual Basic มีการจัดส่วนต่อประสานให้ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าและดูผลการประมวลผลได้ง่าย ในด้านการเชื่อมต่อมีสองส่วนคือ การเชื่อมต่อสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของโซเลนอยด์ผ่านทางพอร์ตขนานไปยังส่วนวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก และการเชื่อมต่อสัญญาณแรงโซเลนอยด์จากโพลเดเซลล์เข้ามาประมวลผลผ่านทางพอร์ต RS-232

วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เพื่อส่งแรงดันควบคุมไปยังวงจรขยายเพื่อขับโซเลนอยด์ดังในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

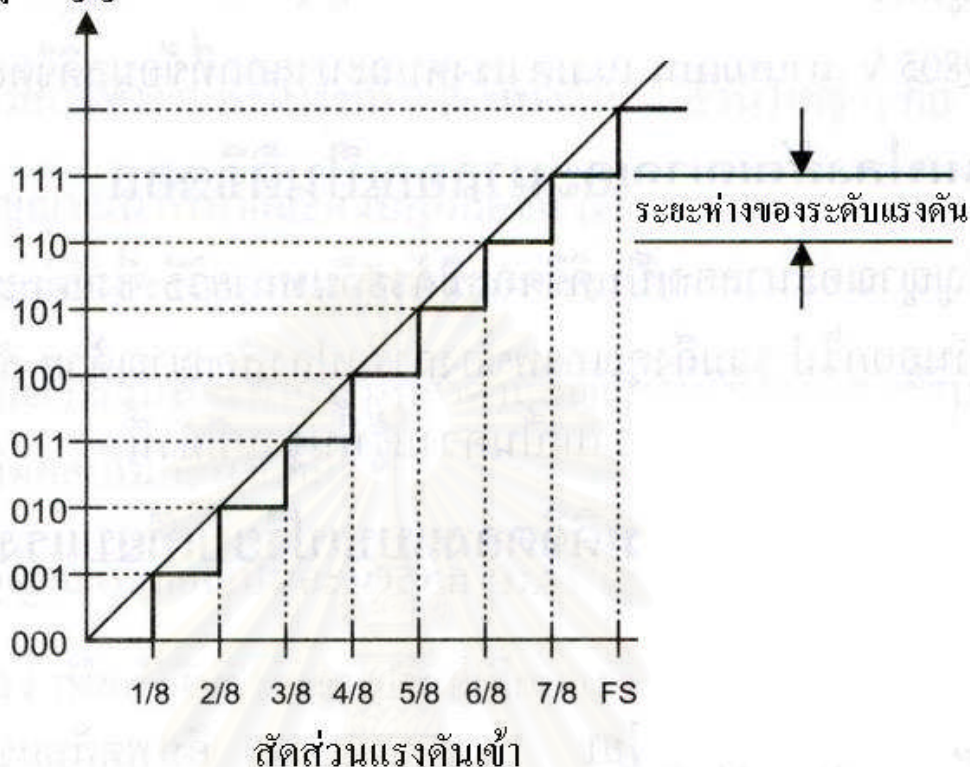
โดยกระบวนการแปลงสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อก เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณแอนะล็อกกับข้อมูลตัวเลขที่ใช้แทนสัญญาณดิจิทัล ความแม่นยำของการแปลงจะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของข้อมูลดิจิทัล วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด n บิต จะเกิดข้อมูลดิจิทัลจำนวน 2^n ข้อมูล ยกตัวอย่าง วงจรแปลงสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อก 3 บิต ก็จะเกิดข้อมูลดิจิทัลทั้งสิ้น 8 ข้อมูล ดังในรูปที่ 3.18 ระยะห่างของแต่ละข้อมูลจะเป็นตัวกำหนดความแม่นยำของการแปลงสัญญาณ กระบวนการที่ทำหน้าที่ตีความระดับสัญญาณแอนะล็อกว่าตรงกับข้อมูลดิจิทัลใดเรียกว่า กระบวนการควอนไทซิง (Quantizing)

ระยะห่างของระดับข้อมูลดิจิทัลในวงจรแปลงสัญญาณ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$V_{LSB} = \frac{V_{Fs}}{2^n} \quad (3.33)$$

โดยที่ V_{LSB} คือแรงดันของค่าเชิงเลขที่เล็กที่สุด (Least Significant Bit Voltage) และ V_{Fs} คือแรงดันเต็มสเกลหรือแรงดันสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในวงจรแปลงสัญญาณ ปกติมีค่าเท่ากับไฟเลี้ยง

ข้อมูลสัญญาณออก



รูปที่ 3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้ากับข้อมูลดิจิทัล [15]

ถ้าหาก V_{Fs} ของวงจรแปลงสัญญาณ 3 บิต มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ ระยะห่างของระดับข้อมูลดิจิทัลจะเท่ากับ $5/8 = 0.625$ โวลต์ ข้อมูลดิจิทัลสูงสุดในรูปที่ 3.18 คือ 111_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7_{10} ดังนั้น ที่ข้อมูลดิจิทัลสูงสุดของวงจรแปลงสัญญาณ 3 บิตจะมีค่าเทียบกับแรงดันแอนะล็อกเท่ากับ

$$\frac{7}{8} \times 5V = 4.375V \quad (3.34)$$

เมื่อเป็นเช่นนี้ จึงสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของแรงดันแอนะล็อกกับข้อมูลดิจิทัลสูงสุดในวงจรแปลงสัญญาณระหว่างแอนะล็อกและดิจิทัล ไม่ว่าจะเป็นที่บิตก็ตามได้ดังนี้

$$\text{แรงดันแอนะล็อกที่ข้อมูลดิจิทัลสูงสุด} = V_{Fs} - V_{LSB} \quad (3.35)$$

โดยที่ V_{LSB} คือระยะห่างของระดับแรงดันที่ข้อมูล 1 บิต หรือค่าแรงดันที่ข้อมูลดิจิทัลเท่ากับ 1

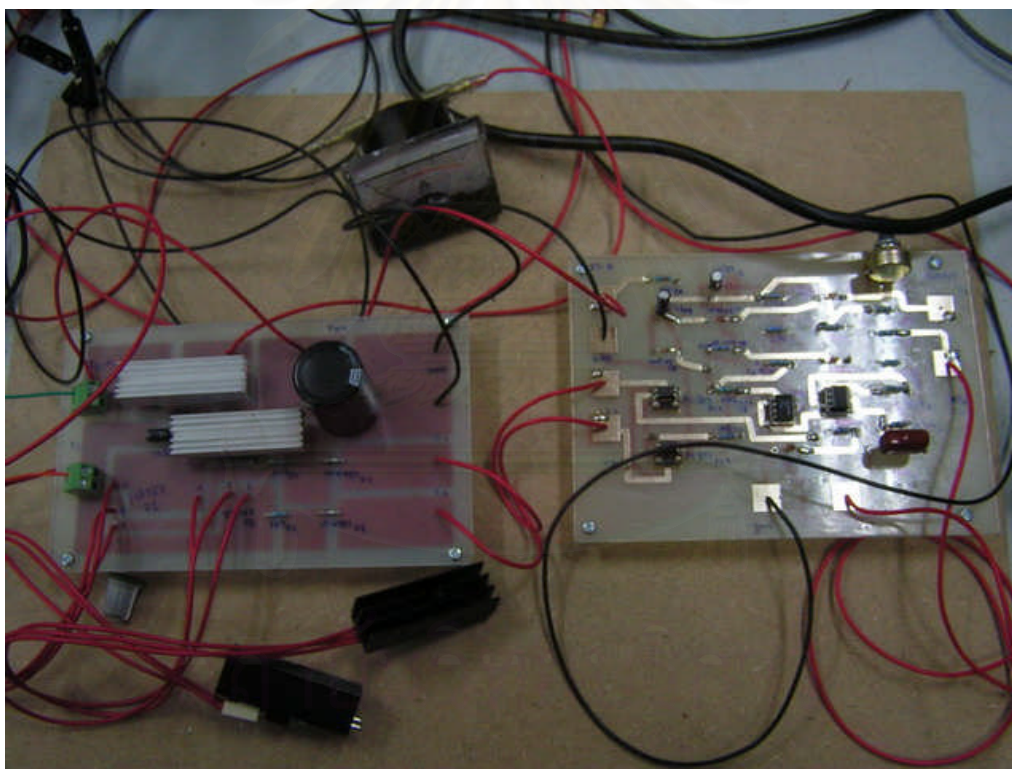
ในวงจรแปลงสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อก 3 บิต ค่าแรงดัน V_{LSB} เท่ากับ 0.625 โวลต์ ถ้าหากจำนวนบิตของวงจรแปลงสัญญาณมีมากขึ้น ค่าของแรงดัน V_{LSB} จะลดลง ทำให้ความแม่นยำของการแปลงสัญญาณมีมากขึ้น และส่งผลให้ที่ข้อมูลดิจิทัลสูงสุดเมื่อเทียบกับแรงดันแอนะล็อกจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ยกตัวอย่างวงจรแปลงสัญญาณ 8 บิต จะมีค่า V_{LSB} เท่ากับ

$$V_{LSB} = \frac{5}{2^8} \times 5 = \frac{5}{256} \times 5 = 0.0195V \quad (3.36)$$

ดังนั้น ที่ข้อมูลดิจิทัลสูงสุดคือ 1111111_2 หรือ FFH จะมีค่าเทียบเท่ากับแรงดัน แอนะล็อกเป็น $5 - 0.0195 = 4.9805 V$

วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่ใช้ในการจำลองนี้ใช้ไอซี PCF8591 ขนาด 8 บิต ให้แรงดันไฟตรงขาออก 0 – 5 โวลต์ เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน

วงจรขยายเพื่อขับโซเลนอยด์ ประกอบด้วยส่วนวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม เพื่อนำมารวมกับสัญญาณแอนะล็อก ที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก และส่งไปยังส่วนวงจรเปรียบเทียบแรงดันต่อไปยังส่วนวงจรเชื่อมโยงทางแสง และไปยังส่วนวงจรขับโซเลนอยด์ ดังในรูปที่ 3.19



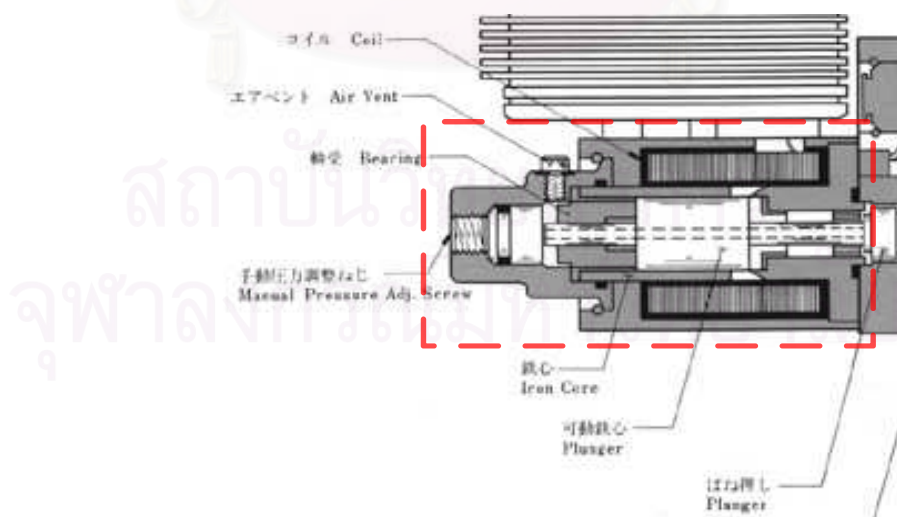
รูปที่ 3.19 วงจรขยายขับโซเลนอยด์

โซเลนอยด์ที่ใช้ในการจำลองเป็นโซเลนอยด์ยี่ห้อ YUKEN ที่ใช้อยู่ในเครื่องจักรที่มีการควบคุมตามสัดส่วน ดังในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 โซลีนอยด์ที่ใช้ในการจำลอง

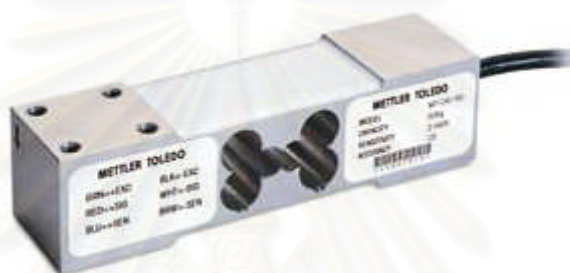
โดยโซลีนอยด์ดังกล่าวมีส่วนประกอบภายในดังในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ส่วนประกอบภายในของโซลีนอยด์ที่ใช้ในการจำลอง

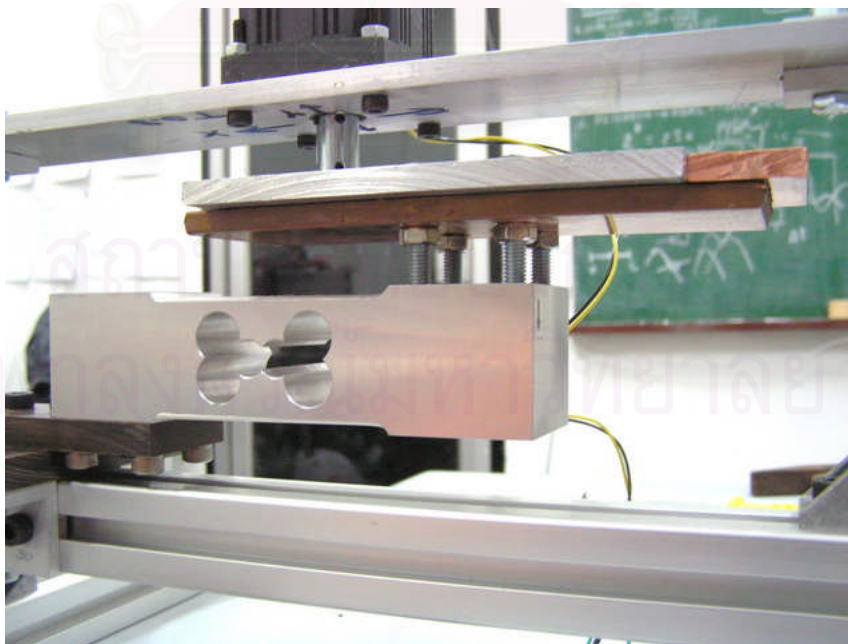
จากรูปที่ 3.21 จะสังเกตได้ว่า ในโซเลนอยด์จะมีส่วนของขดลวดไฟฟ้าและแม่เหล็กถาวรจัดวางอยู่โดยมีการปรับแนวเรียบร้อยแล้ว มีส่วนปลั๊นเจอร์ (Plunger) ที่เคลื่อนที่ออกมาดันโหลดเซลล์ โดยแรงที่ปลั๊นเจอร์กระทำจะเป็นผลมาจากวงจรที่ใช้ในการขับโซเลนอยด์

โหลดเซลล์ที่ใช้ในการจำลองเป็นของยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น MT1241 ที่ให้สัญญาณขาออก 2 mV/V แรงดันกระตุ้น 5 – 15 V AC/DC สามารถใช้งานโดยที่แพลตฟอร์ม (Platform) มีขนาดกว้างและยาวได้ถึง 400×400 มม. ดังในรูปที่ 3.22 ลูกศรชี้ลงหมายถึง โหลดเซลล์นี้มีการใช้งานแบบ Single point คือรับแรงกดได้ด้านเดียว



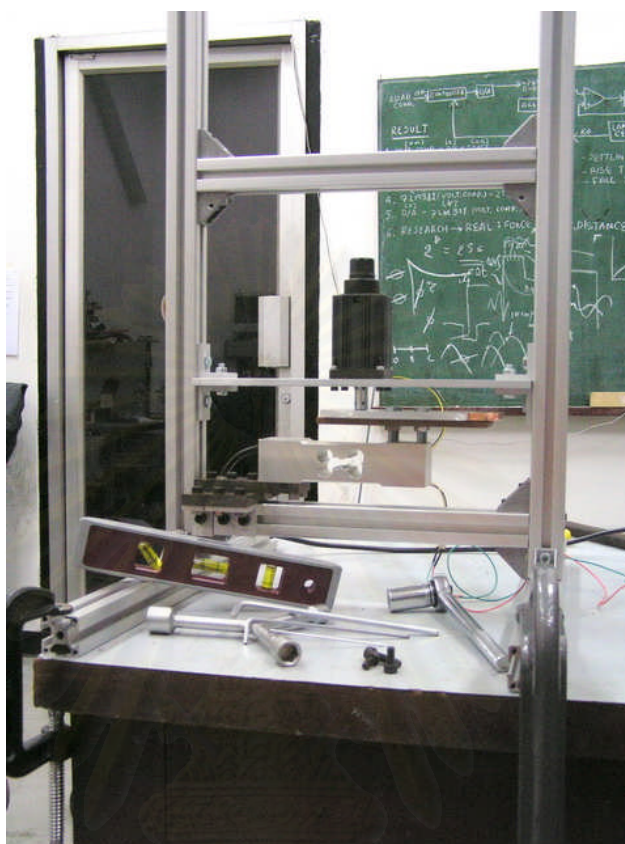
รูปที่ 3.22 โหลดเซลล์แบบ Single point ยี่ห้อ METTLER TOLEDO [16]

และทำการติดตั้งโหลดเซลล์ในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นดังในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การติดตั้งของโหลดเซลล์ในโครงสร้างสำหรับทดสอบ

แล้วทำการประกอบส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันบน โครงสร้างสำหรับทดสอบดังในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 โครงสร้างสำหรับการทดสอบระบบรองรับการสะเทือนที่จำลองขึ้น

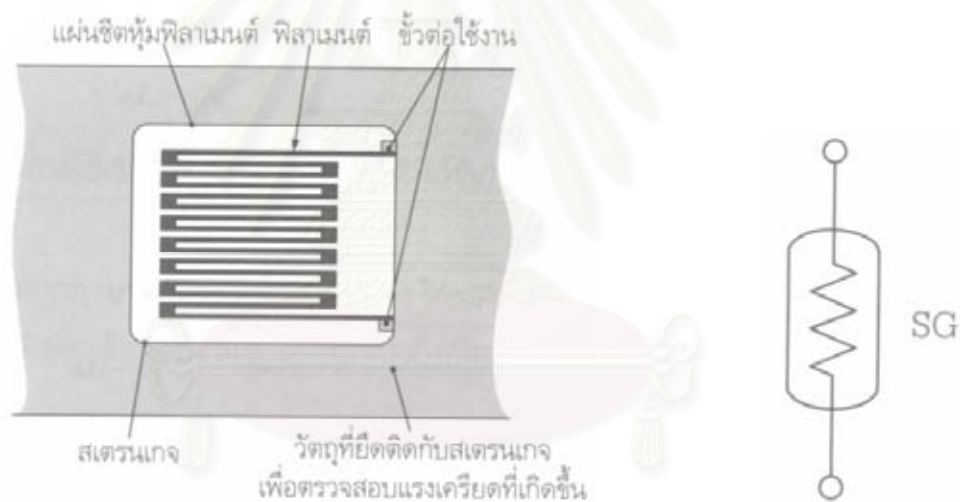
ส่วนวงจรถ่ายสัญญาณเป็นของ Linear Instrument รุ่น THUNDER ดังในรูปที่ 3.25 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณขนาดเล็กที่ได้จากโพลดเซลล์ แสดงผลค่าแรงที่กระทำกับโพลดเซลล์ และส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต RS-232



รูปที่ 3.25 Weight indicator รุ่น Thunder ของ Linear Instrument

3.6 สเตรนเกจ (Strain gauge)

สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดหนึ่งที่มีอาศัยคุณสมบัติเพียโซรีซิสทีวิตี (Piezoresistivity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุตัวนำ ที่แสดงถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในเมื่อความยาวหรือพื้นที่หน้าตัดของวัสดุตัวนำนั้นมีค่าเปลี่ยนไป ใช้ทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดแรงกระทำทางกล โครงสร้างพื้นฐานและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของสเตรนเกจแสดงได้ดังในรูปที่ 3.26 ซึ่งประกอบด้วยฟิลาเมนต์ (Filament) ทั่วไปนิยมทำมาจากวัสดุจำพวกลวดตัวนำ แผ่นโลหะตัวนำบาง (Metal foil) สารกึ่งตัวนำหรือโลหะผสม เช่น ทองแดง – นิกเกิล หรือ นิกเกิล – โครเมียม เป็นต้น ซึ่งจะมีค่าความต้านทานสูงและทนทานต่อแรงกระทำทางกลสูง เมื่อนำสเตรนเกจไปใช้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดรูปทรงของวัตถุ นั่นคือเรากำลังจะทำการวัดความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นบนวัตถุนั้น ในที่นี้ความเครียดคือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุต่อขนาดเดิมของวัตถุในสภาวะปกติ

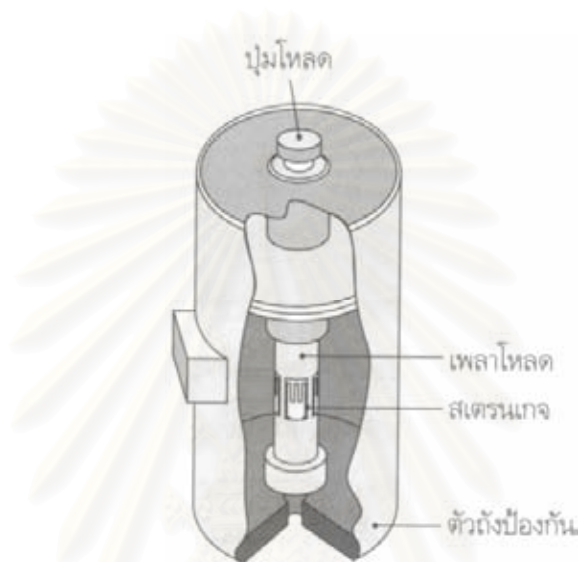


รูปที่ 3.26 โครงสร้างและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของสเตรนเกจ [17]

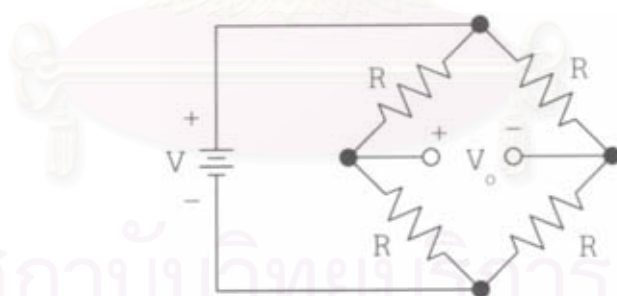
3.7 โหลดเซลล์ (Load cell)

โหลดเซลล์เป็นอุปกรณ์ที่นำเอาสเตรนเกจมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแรงทางกลที่ไม่ทราบค่า (Unknown force) หรือมวล บางครั้งนิยมเรียกแรงทางกลที่ไม่ทราบค่านี้ว่า “โหลด (Load)” โครงสร้างทั่วไปของโหลดเซลล์ที่ต่อใช้งานร่วมกับสเตรนเกจสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 3.27 ประกอบด้วยสเตรนเกจยึดติดอยู่กับเพลาลoad (Load bearing) เมื่อมีแรงทางกลมากระทำกับปุ่มโหลด (Load button) แล้วจะส่งผลทำให้เกิดความเครียด (Strain) ขึ้นบนเพลาลoad เป็นเหตุให้ค่าความต้านทานภายในตัวสเตรนเกจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของแรงที่มากระทำ และในส่วนของ การนำเอาสัญญาณออกที่ได้จากโหลดเซลล์นี้ไปใช้งานในรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้านั้น

มักจะต่อร่วมกับวงจรบริดจ์แบบวีตสโตนดังในรูปที่ 3.28 โดยต่อสเตรนเกจจากโหนดเซลล์เป็นส่วนหนึ่งของแขนของวงจรบริดจ์ ดังนั้น เมื่อค่าความต้านทานของตัวสเตรนเกจในโหนดเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าออกที่ได้จากวงจรบริดจ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงกล่าวได้ว่า ขนาดของแรงดันไฟฟ้าออกมีค่าแปรผันไปตามขนาดของแรงกระทำทางกลที่กำลังตรวจวัด



รูปที่ 3.27 โหนดเซลล์ที่ใช้สเตรนเกจ [17]

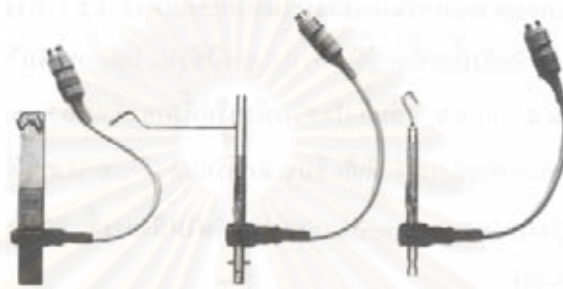


รูปที่ 3.28 วงจรบริดจ์แบบวีตสโตน [17]

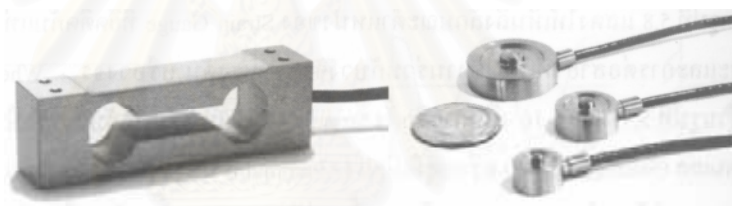
รูปที่ 3.29 แสดงลักษณะตำแหน่งของสเตรนเกจที่ยึดติดกับแท่งวัสดุที่เป็นโลหะและการต่อสายไฟ เพื่อใช้งานร่วมกับวงจรแบ่งแรงดันหรือวงจรวีตสโตนส่วนรูปที่ 3.30 และ 3.31 เป็นการติดตั้งสเตรนเกจแบบยึดติดกับวัสดุที่เป็นโลหะชนิดสแตนเลสสตีล (Stainless Steel) หรืออลูมิเนียม (Aluminium) ที่มีรูปทรงแตกต่างกันออกไปตามลักษณะการใช้งานในอุตสาหกรรม โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดและน้ำหนักหรือรูปแบบของความเค้นที่ต้องการตรวจวัด



รูปที่ 3.29 ลักษณะการติดตั้งสเตรนเกจยึดติดกับแท่งวัสดุ [18]



รูปที่ 3.30 ลักษณะของสเตรนเกจที่ยึดติดบนวัสดุรูปทรงแตกต่างกัน [18]

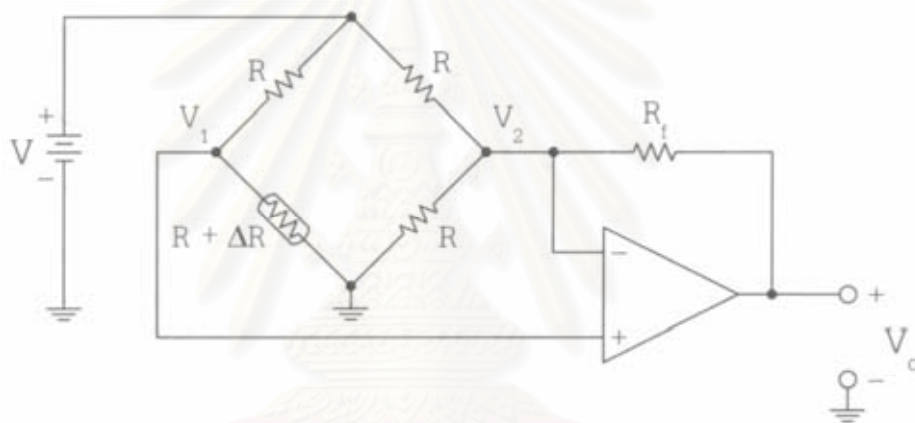


รูปที่ 3.31 ลักษณะของโหลดเซลล์รูปแบบต่างๆ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม [18]

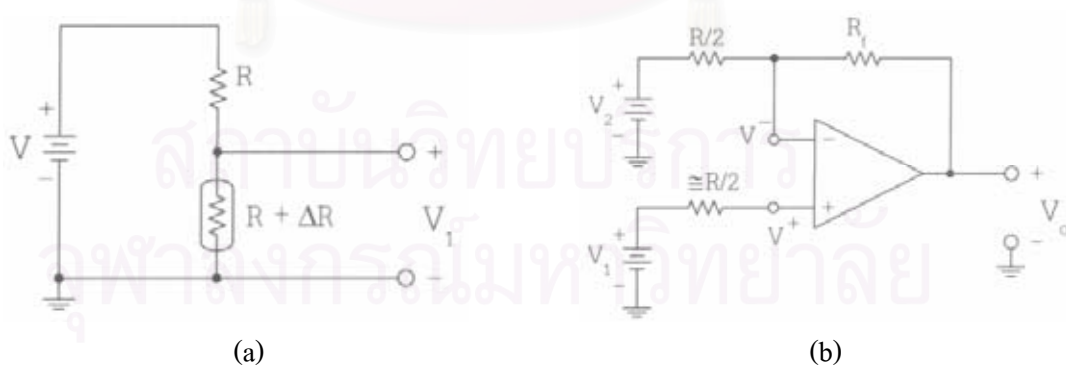
การตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดจากความเค้นใดๆ อุปกรณ์ที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเซ็นเซอร์มากที่สุดชนิดหนึ่งคือ สเตรนเกจ เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย ง่าย สำหรับการต่อใช้งานร่วมกับวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งยังมีราคาที่ไม่สูงมากจนเกินไป การทำงานของสเตรนเกจใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในของวัสดุที่เป็นโลหะในลักษณะที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ นั่นคือการตรวจวัดค่าความเค้นใดๆ จะอยู่ในรูปของค่าความต้านทาน การใช้งานสเตรนเกจจึงต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกเข้ามากระตุ้น เพื่อให้สัญญาณออกที่ได้จากสเตรนเกจอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า (mV) ด้วยเหตุนี้สเตรนเกจจึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์ประเภท Passive Transducer อีกชนิดหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในของสเตรนเกจจะมีค่าน้อยมากๆ ดังนั้น อุปกรณ์ที่ใช้จัดระดับเงื่อนไขของสัญญาณและวงจรขยาย (Instrument Amplifier) จึงต้องมีอัตราขยายที่สูง โดยทั่วๆ

ไปจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 1,000 เท่า เพื่อให้ได้สัญญาณไฟฟ้าทางด้านออกที่มีความเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ต่อรวม

เมื่อนำวงจรสเตรนเกจไปประยุกต์ใช้งานเป็นเซ็นเซอร์ตรวจสอบปริมาณทางฟิสิกส์ เราจะพบว่า โดยทั่วไปแรงดันออกที่ได้จากวงจรบริดจ์ ซึ่งมีค่าแปรผันตามขนาดปริมาณทางฟิสิกส์ที่กำลังตรวจวัดอยู่นั้นมีค่าน้อยมาก ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานหรือประมวลผลสัญญาณต่อได้ทันที ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับแต่งแรงดันออกดังกล่าวให้มีขนาดสัญญาณใหญ่ขึ้นเพียงพอเสียก่อน โดยอาศัยการต่อวงจรขยายสัญญาณเพิ่มเข้าไปทางด้านออกของวงจรสเตรนเกจเพื่อทำการขยายแรงดันให้ใหญ่ขึ้น ในที่นี้ตัวอย่างวงจรพื้นฐานแสดงได้ดังในรูปที่ 3.32 [17] โดยแนวทางการวิเคราะห์ห้วงจรมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.32 วงจรพื้นฐานแสดงการขยายสัญญาณแรงดันออกที่ได้จากวงจรสเตรนเกจ [17]



รูปที่ 3.33 วงจรสมมูลทางเซเวินินของวงจรในรูปที่ 3.32 [17]

เพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น ในที่นี้จะทำการยุบวงจรในส่วนแรงดัน V_1 และ V_2 ของวงจรบริดจ์ให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลเทียบเท่าทางเซเวินิน (Thevenin equivalent circuit) โดยวงจรแสดงการหาแรงดันเทียบเท่าทางเซเวินิน V_1 แสดงได้ดังในรูปที่ 3.33 (a) อาศัยกฎแบ่งแรงดันจะได้

$$V_1 = \frac{R + \Delta R}{R + (R + \Delta R)} V = \frac{\left(1 + \frac{\Delta R}{R}\right)}{2\left(1 + \frac{\Delta R}{2R}\right)} V \cong \left(1 + \frac{\Delta R}{2R}\right) \left(\frac{V}{2}\right) \quad (3.37)$$

และค่าความต้านทานเทียบเท่าเรเวนินสามารถหาได้ โดยทำการลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง V ($V = 0$) จะได้ค่าความต้านทานเทียบเท่ามีค่าประมาณ

$$R // (R + \Delta R) = \frac{R(R + \Delta R)}{R + (R + \Delta R)} \cong \frac{R}{2} \quad (3.38)$$

ด้วยวิธีการเดียวกัน ก็จะสามารถหาแรงดันเทียบเท่าและค่าความต้านทานเทียบเท่าเรเวนินในส่วนแรงดัน V_2 ได้เช่นกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $V_2 = V/2$ และ $R/2$ ตามลำดับ เมื่อนำวงจรสมมูลทั้งสองที่หาได้กลับไปต่อที่ตำแหน่งเดิมทางขึ้นเข้าไม่กลับและขึ้นเข้ากลับของออปแอมป์ จะได้วงจรใหม่เป็นดังในรูปที่ 3.33(b) จากนั้นทำการวิเคราะห์ห้วงจรโดยใช้วิธีแรงดันโหนด (Node voltage analysis) และอาศัยคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ว่า $V \cong V^+$ โดยที่ $V^+ \cong V_1$ จะได้แรงดันออกของวงจรในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ

$$V_o = \left[1 + \frac{\Delta R}{2R} \left(1 + \frac{2R_f}{R}\right)\right] \left(\frac{V}{2}\right) \quad (3.39)$$

โดยทั่วไป $1 \ll \frac{\Delta R}{2R} \left(1 + \frac{2R_f}{R}\right)$ ดังนั้น สมการ (3.39) จึงประมาณได้ว่า

$$V_o \cong \left(1 + \frac{2R_f}{R}\right) \left(\frac{\Delta R}{4R}\right) V \quad (3.40)$$

หรือ

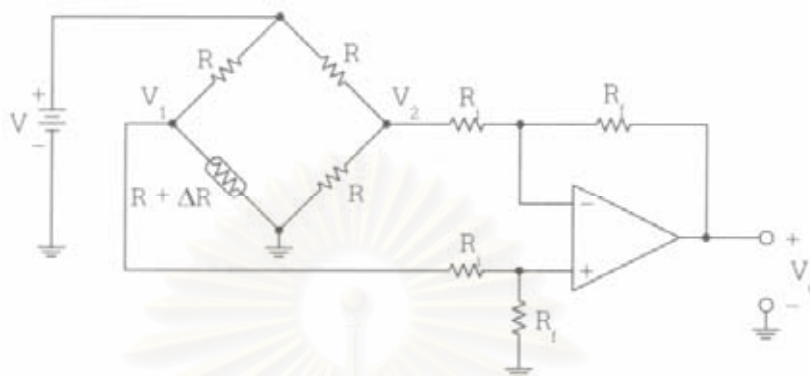
$$V_o = \left(\frac{AV}{4}\right) \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \quad (3.41)$$

เมื่อ A คืออัตราขยายแรงดันของวงจร ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\left(1 + \frac{2R_f}{R}\right)$ จากสมการ 3.41 แสดงให้เห็นว่า แรงดันออกที่ได้จากวงจรสเตรนเกจถูกขยายให้มีขนาดสัญญาณโตขึ้นด้วยอัตราขยายที่มีค่าเท่ากับ A ซึ่งสามารถควบคุมค่าอัตราขยายนี้ได้ด้วยการแปรค่าของตัวต้านทานป้อนกลับ R_f ในวงจร

อีกตัวอย่างหนึ่งของการปรับแต่งแรงดันออกที่ได้จากวงจรสเตรนเกจให้มีขนาดสัญญาณใหญ่ขึ้น โดยใช้วงจรขยายสัญญาณผลต่าง (Differential amplifier) ดังในรูปที่ 3.34 ซึ่งกรณีนี้ วงจรขยายสัญญาณผลต่างจะมีอัตราขยายแรงดัน A เท่ากับ

$$A = \frac{R_f}{R_i} \quad (3.42)$$

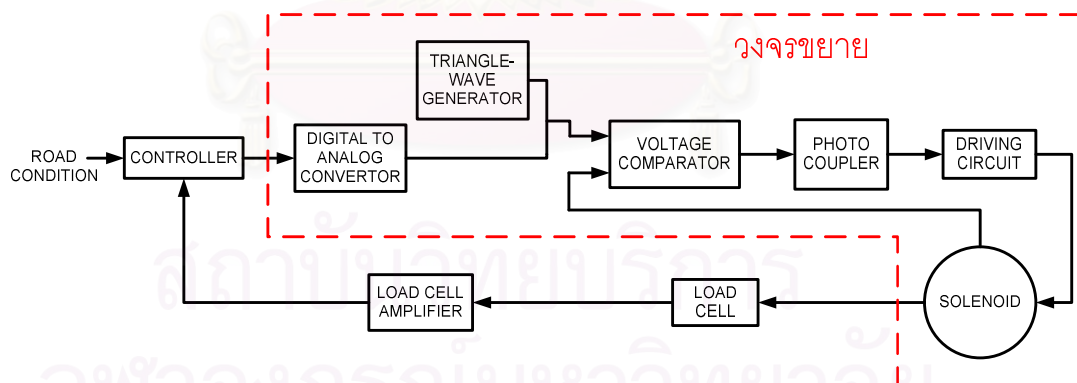
กล่าวได้ว่าแรงดันออกจากวงจรสเตรนเกจจะถูกขยายให้สัญญาณมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยอัตราส่วนของ R_f/R_i



รูปที่ 3.34 การขยายสัญญาณแรงดันออกที่ได้จากวงจรสเตรนเกจโดยใช้วงจรขยายสัญญาณผลต่าง [17]

3.8 การออกแบบและการทำงานของระบบ

สำหรับระบบรองรับการสะเทือนที่ออกแบบนี้ มีส่วนประกอบในการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนอุปกรณ์ ส่วนชุดคำสั่ง ระบบการทำงานทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 ระบบรองรับการสะเทือนที่ออกแบบ

จากรูปที่ 3.35 จะเห็นได้ว่า การทำงานเริ่มต้นจากสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวถนน (Road condition) ที่เข้ามายังตัวควบคุม (Controller) ในการทดลองนี้จะใช้การจำลองสัญญาณดังกล่าว เมื่อสัญญาณเข้าที่ตัวควบคุมแล้ว ตัวควบคุมจะทำการประมวลผลระยะความสูงหรือต่ำของพื้นผิว เทียบอัตราส่วนความสูงอ้างอิงเดิมของ โครงเครื่อง และทำการปรับความสูงหรือต่ำของ โครงเครื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงของโซเลนอยด์ที่กระทำกับ โครงเครื่อง โดยสัญญาณที่ออกไป

จากตัวควบคุมนั้นจะเป็นสัญญาณดิจิทัลเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกและไปยังวงจรถยายเพื่อทำหน้าที่ขับโซเลนอยด์ เมื่อโซเลนอยด์ได้รับสัญญาณจากวงจรถยาย จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงของโซเลนอยด์ที่กระทำ แรงของโซเลนอยด์ที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถวัดได้โดยใช้โพลีเซลล์ และทำการขยายสัญญาณของโพลีเซลล์ด้วยวงจรถยายสัญญาณโพลีเซลล์ เพื่อให้สัญญาณมีขนาดที่เหมาะสมในการอ่านค่าและใช้งานต่อไป

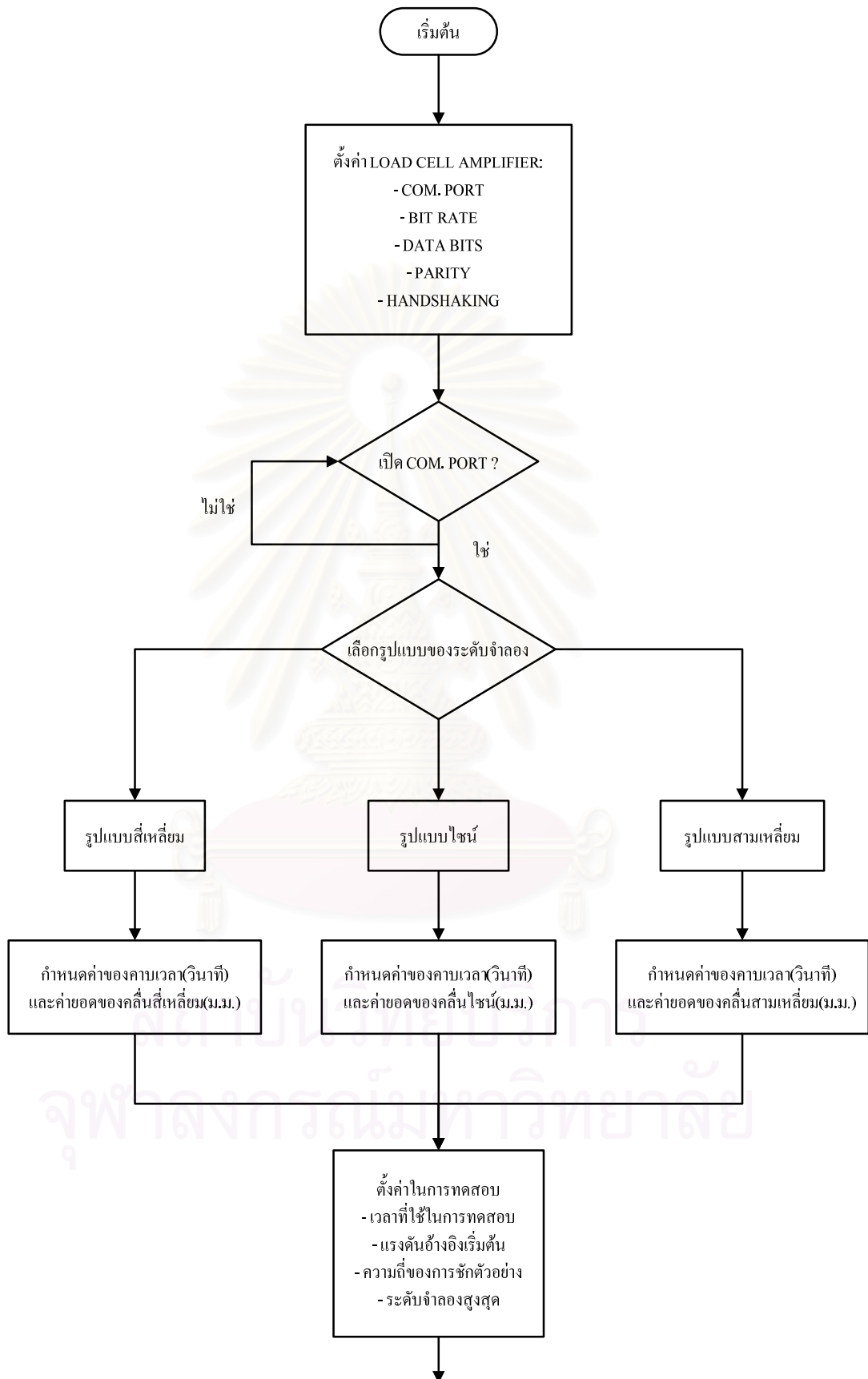
3.8.1 รูปแบบพื้นผิวถนนที่ใช้ในการจำลอง

ในการจำลองการทำงานของระบบรองรับกันสะเทือนนี้ ได้กำหนดให้มีรูปแบบของพื้นผิวถนนจำลอง 3 รูปแบบ เพื่อเป็นตัวอย่างลักษณะการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวถนนในสภาพการใช้งานจริง ประกอบด้วย พื้นผิวถนนจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์ พื้นผิวถนนจำลองเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยมและพื้นผิวถนนจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ในแต่ละรูปแบบจำลองของพื้นผิวถนนนั้นสามารถกำหนดค่ายอด คาบ ช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงของคลื่นต่างๆ ได้โดยการตั้งค่าที่ตัวโปรแกรม

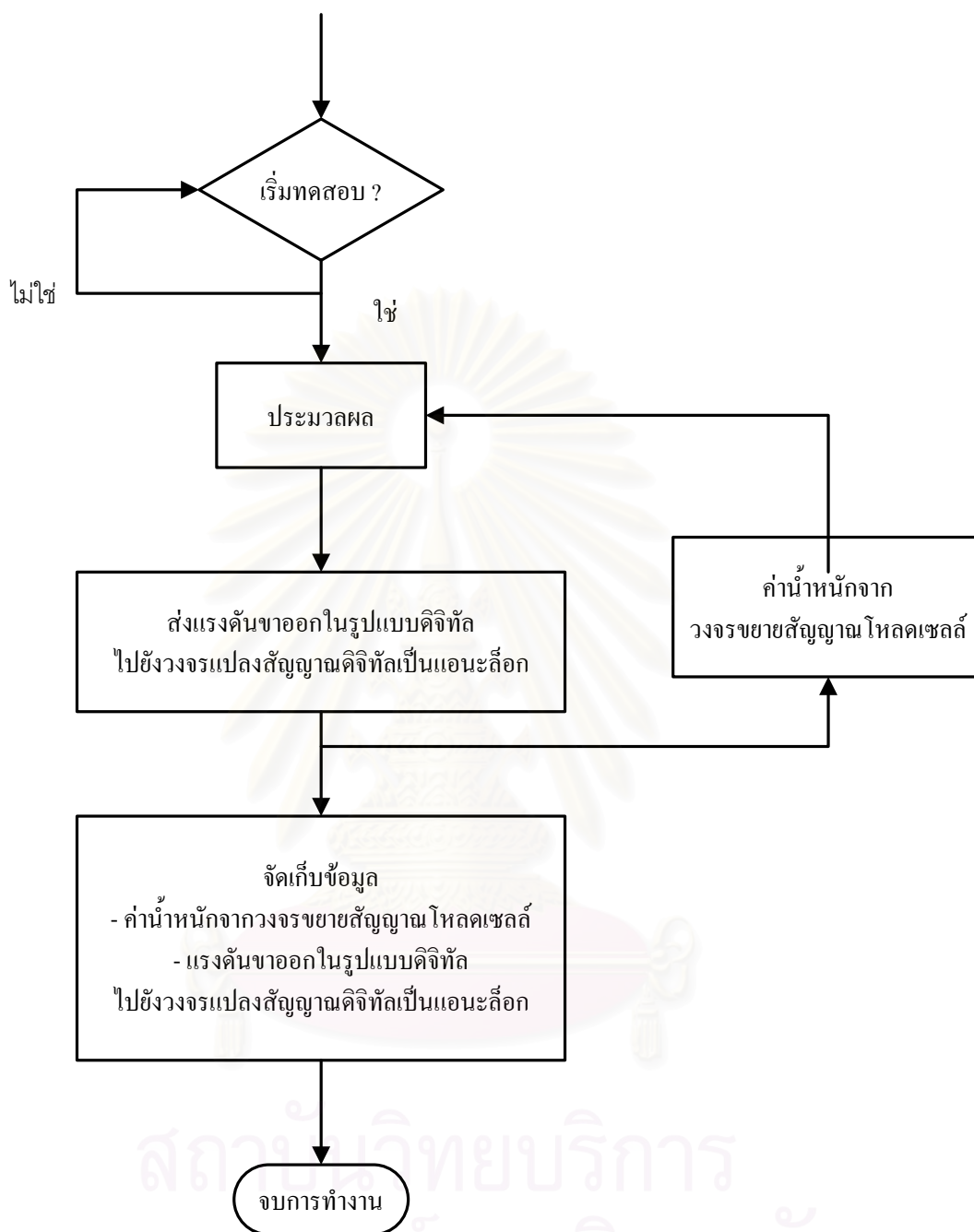
3.8.2 ส่วนอุปกรณ์ควบคุมและชุดคำสั่ง

ส่วนการควบคุมจะทำหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณที่ได้รับจากรูปแบบพื้นผิวถนนจำลอง และการเปลี่ยนแปลงแรงกดของโซเลนอยด์ที่ได้จากโพลีเซลล์ นำมาคำนวณการปรับเปลี่ยนระดับความสูงที่เหมาะสมของระบบ หลังจากนั้น สัญญาณออกถูกส่งไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกเพื่อควบคุมวงจรถยายต่อไป อุปกรณ์ในส่วนการควบคุมเป็นคอมพิวเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ เพื่อรับสัญญาณขาเข้าจากวงจรถยายสัญญาณโพลีเซลล์ผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232 และเชื่อมต่อเพื่อส่งสัญญาณขาออกไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกผ่านพอร์ตขนาน ส่วนชุดคำสั่งนั้นพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Visual Basic เนื่องจากมีความสะดวกในการออกแบบการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ผ่านทางพอร์ตต่างๆ และสามารถสร้างส่วนโปรแกรมต่อประสานกับผู้ใช้งานได้ดี อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ของการควบคุมได้อย่างสะดวก ชุดคำสั่งมีหน้าที่รับสัญญาณของพื้นผิวถนนที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง โดยในการทดลองนี้ใช้ระดับพื้นผิวถนนจำลองในรูปแบบของสัญญาณสี่เหลี่ยม สัญญาณไซน์ และสัญญาณสามเหลี่ยม และสามารถรองรับคำสั่งเพื่อกำหนดระยะเวลาของตัวถังที่ต้องการเริ่มต้น ทำการประมวลผล เพื่อให้แรงของโซเลนอยด์กระทำอย่างเหมาะสมตามลักษณะพื้นผิว และส่งสัญญาณดิจิทัลออกไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

ผังงานการทำงานของชุดคำสั่งสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 3.36 และ 3.37

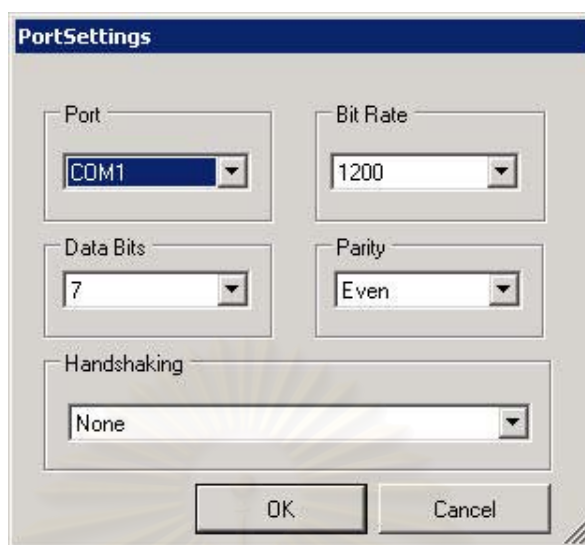


รูปที่ 3.36 ผังงานของชุดค่าตั้งของระบบรองรับการสะท้อน



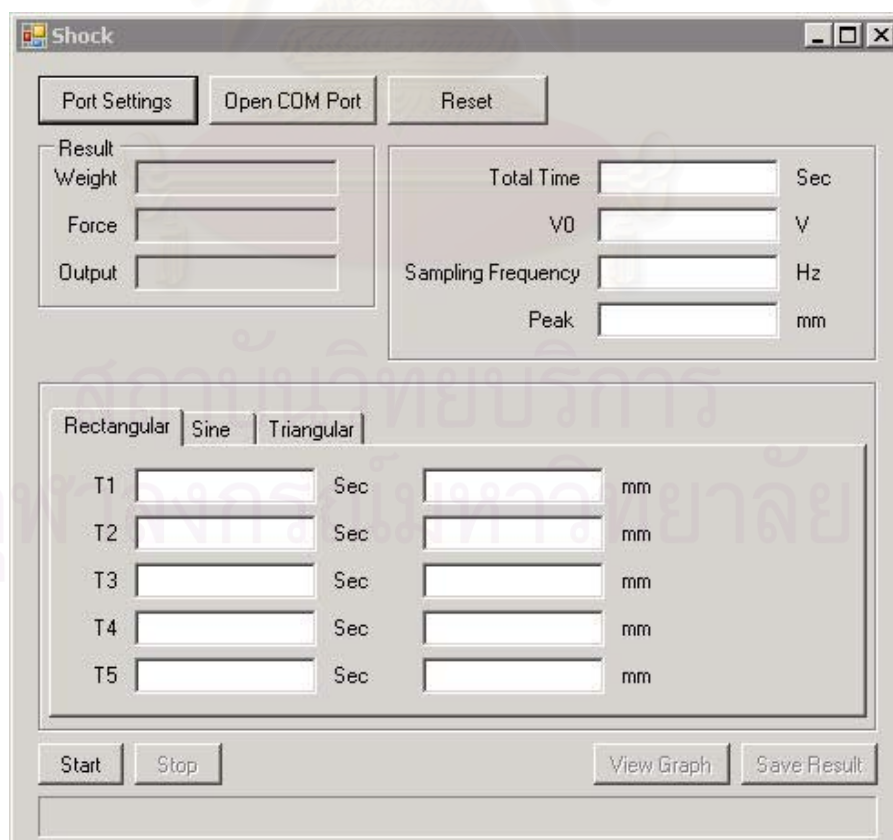
รูปที่ 3.37 ผังงานของชุดคำสั่งของระบบรองรับการสะท้อน (ต่อ)

พิจารณารูปที่ 3.36 และ 3.37 การทำงานของชุดคำสั่งจะเริ่มต้นจากการตั้งค่าช่องทางเข้าของสัญญาณ (Com port) จากวงจรขยายสัญญาณไหลดเซลล์ เพื่อใช้ในการรับข้อมูลแรงที่กระทำของโซเลนอยด์ ทำการเลือกว่า ต้องการเปิดช่องทางเข้าของสัญญาณหรือไม่ ดังในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 การตั้งค่าช่องทางเข้าของสัญญาณ (Com port) จากวงจรขยายสัญญาณโพลีเซลล์

เมื่อทำการเปิดช่องทางเข้าของสัญญาณ โปรแกรมจะแสดงแรงที่โซเลนอยด์กระทำ ณ ขณะนั้น หลังจากนั้นทำการเลือกรูปแบบของสัญญาณที่ต้องการจำลอง อาทิ สัญญาณรูปแบบสี่เหลี่ยมที่ต้องการทำการกำหนดค่าย่อยของคาบและส่วนสูงสุดของสัญญาณ ดังในรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 การกำหนดค่าย่อยของคาบและส่วนสูงสุดของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

กรณีสัญญาณรูปไซน์ที่กำหนดคาบและค่ายอดของสัญญาณ ดังในรูปที่ 3.40

The screenshot shows the 'Shock' software window. At the top, there are three buttons: 'Port Settings', 'Open COM Port', and 'Reset'. Below these are three input fields for 'Result': 'Weight', 'Force', and 'Output'. To the right, there are four input fields: 'Total Time' (with 'Sec' unit), 'V0' (with 'V' unit), 'Sampling Frequency' (with 'Hz' unit), and 'Peak' (with 'mm' unit). In the center, there are three radio buttons: 'Rectangular', 'Sine' (which is selected), and 'Triangular'. Below the radio buttons are two input fields: 'T' (with 'sec' unit) and 'Peak' (with 'mm' unit). At the bottom, there are four buttons: 'Start', 'Stop', 'View Graph', and 'Save Result'.

รูปที่ 3.40 การกำหนดค่าย่อยของคาบและส่วนสูงสุดของสัญญาณรูปไซน์

และกรณีสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ดังในรูปที่ 3.41

The screenshot shows the 'Shock' software window. At the top, there are three buttons: 'Port Settings', 'Open COM Port', and 'Reset'. Below these are three input fields for 'Result': 'Weight', 'Force', and 'Output'. To the right, there are four input fields: 'Total Time' (with 'Sec' unit), 'V0' (with 'V' unit), 'Sampling Frequency' (with 'Hz' unit), and 'Peak' (with 'mm' unit). In the center, there are three radio buttons: 'Rectangular', 'Sine', and 'Triangular' (which is selected). Below the radio buttons, there are five rows of input fields, each with a label (T1, T2, T3, T4, T5) and a unit (Sec or mm). At the bottom, there are four buttons: 'Start', 'Stop', 'View Graph', and 'Save Result'.

รูปที่ 3.41 การกำหนดค่าย่อยของคาบและส่วนสูงสุดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

เราต้องกำหนดค่าของสามเหลี่ยมและคาบของแต่ละยอดคลื่นสามเหลี่ยมด้วย ต่อจากนั้นทำการตั้งค่าที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยเวลาที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด แรงดันอ้างอิงเริ่มต้นซึ่งใช้ในการกำหนดแรงกระทำของโซเลนอยด์ในสถานะเริ่มต้น ในการใช้งานกับรถยนต์นั้น แรงดันอ้างอิงเริ่มต้นจะเป็นตัวกำหนดระยะยกของรถยนต์ เช่น ถ้าระดับแรงดันอ้างอิงต่ำก็จะทำให้ตัวรถยนต์มีระดับต่ำลง โดยลดแรงกระทำของโซเลนอยด์ต่อตัวถังรถในตอนเริ่มต้น ถ้าปรับระดับแรงดันอ้างอิงสูงก็จะทำให้ตัวรถยนต์ยกขึ้น โดยเพิ่มแรงกระทำของโซเลนอยด์ต่อตัวถังรถในตอนเริ่มต้น ระดับสูง - ต่ำเริ่มต้นดังกล่าวนี้มีประโยชน์ในด้านการหลีกเลี่ยงอุปสรรคต่างๆ ยกตัวอย่างในกรณีที่น่าท่วม และผู้ขับขี่ต้องการยกตัวรถยนต์ขึ้นก็ทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันอ้างอิงขึ้นได้ เป็นต้น ต่อจากนั้นทำการกำหนดความถี่ของการชั่งตัวอย่าง (Sampling frequency) เป็นจำนวนครั้งต่อวินาที และกำหนดค่าระดับการยืด - ยุบสูงสุดของระดับที่จำลอง

ในการจำลองนี้ ความหมายของค่าระดับที่มีช่วงตั้งแต่บวกถึงลบหมายถึงระดับเพื่อใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งของระบบรองรับการสะเทือน โดยกำหนดให้ระดับพื้นฐานของระบบจะอยู่ที่ตำแหน่ง 0 มม. หรือที่แรงดันขาเข้าของวงจรขยายมีค่า 2.5 โวลต์ ดังนั้น ในกรณีที่โครงเครื่องมีระดับอ้างอิงเป็นบวกจะหมายถึง โครงเครื่องมีการยกตัวขึ้นสูงกว่าระดับความสูงพื้นฐาน หรือระบบรองรับการสะเทือนมีการยกตัวขึ้น และในกรณีที่โครงเครื่องมีระดับอ้างอิงเป็นลบจะหมายถึง โครงเครื่องมีการลดระดับต่ำกว่าระดับความสูงพื้นฐาน หรือระบบรองรับการสะเทือนมีการยุบตัวลงในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของระดับจำลอง ที่ระดับจำลองค่า 0 มม. จะหมายถึงระดับพื้นผิวที่มีความสูงอ้างอิงมาตรฐาน ดังนั้น ในกรณีที่ระดับจำลองมีค่าเป็นบวกจะหมายถึงระดับพื้นผิวจำลองมีความสูงกว่าระดับมาตรฐานหรือเป็นเนินขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อระดับจำลองมีค่าเป็นลบจะหมายถึง ระดับพื้นผิวจำลองมีความต่ำกว่าระดับมาตรฐานหรือเป็นหลุมลงไป

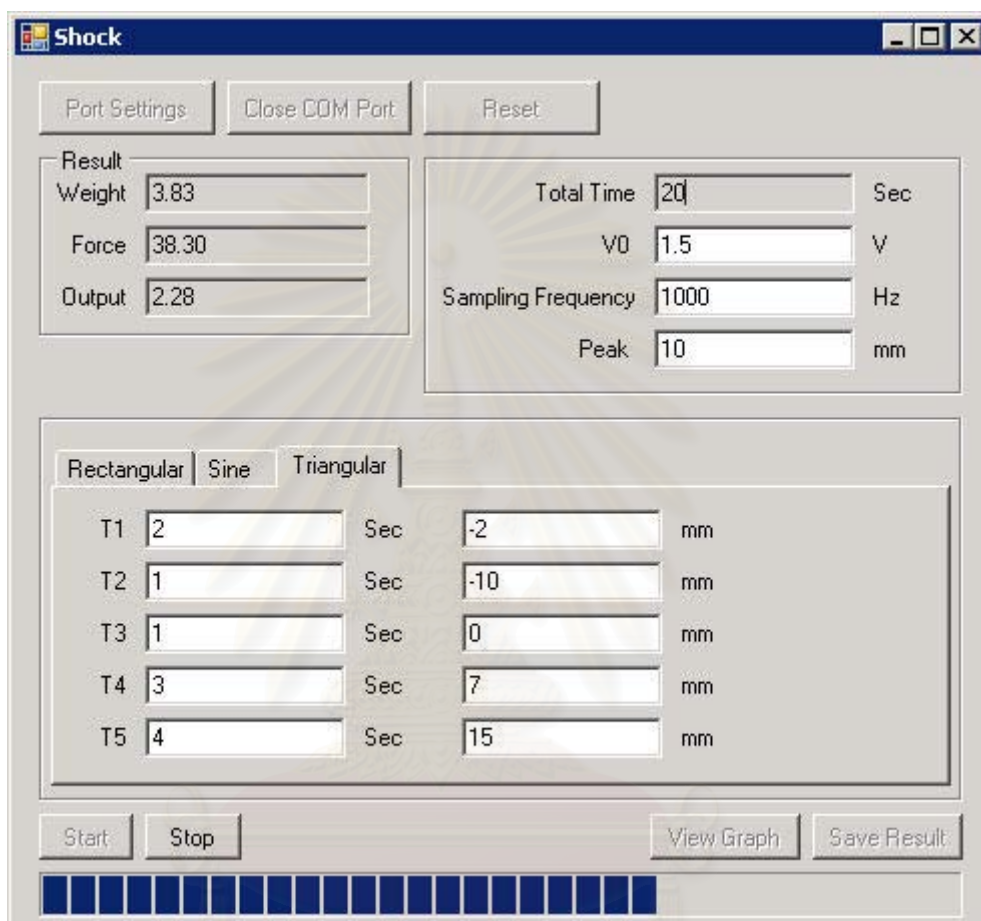
สำหรับผังงานในรูปที่ 3.37 เมื่อทำการกำหนดค่าต่างๆ แล้ว จึงเริ่มทำการทดลองโดยโปรแกรมจะส่งสัญญาณออกไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่มีค่า 0 - 5 โวลต์ และส่งไปควบคุมวงจขยายเพื่อขับโซเลนอยด์ต่อไป

รูปแบบการประมวลผลจะมีลักษณะดังสมการ

$$V = V_0 - \frac{2.5h}{peak} \quad (3.43)$$

เมื่อ V คือแรงดันขาเข้าของวงจรขยาย V_0 คือแรงดันอ้างอิงเริ่มต้น h คือค่าของระดับสัญญาณจำลอง และ $peak$ คือค่าระดับอ้างอิงสัมบูรณ์

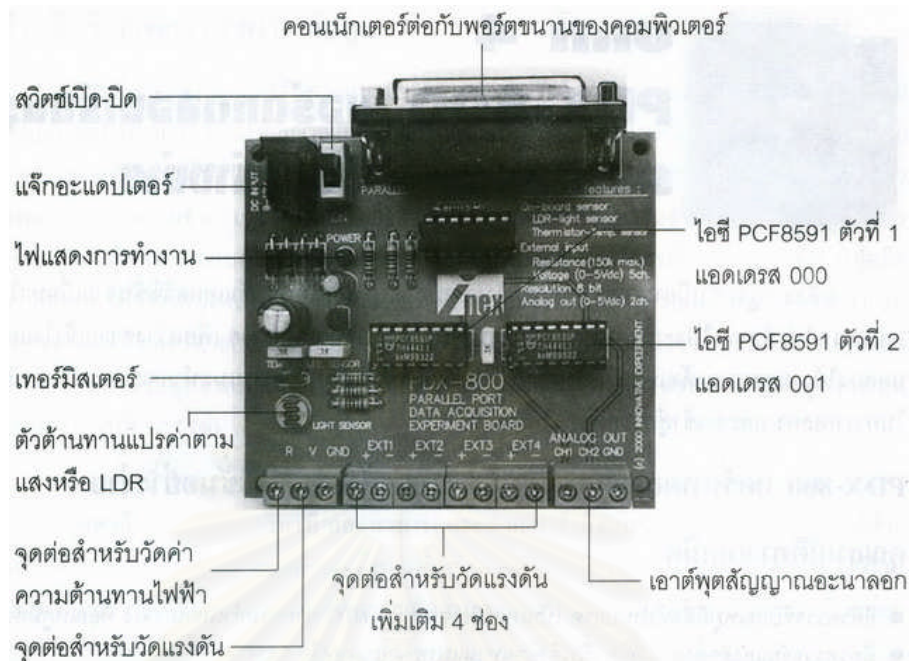
หลังจากนั้น โปรแกรมจะทำการเก็บสัญญาณ ซึ่งเป็นค่าแรงกระทำของโซเลนอยด์ที่ตกลงบนโพลคเซลล์ ทำการบันทึกค่าแรงดันที่วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ส่งออกไปตามจำนวนครั้งของการชั้กตัวอย่างที่กำหนดไว้ในตอนแรก ดังในรูปที่ 3.42



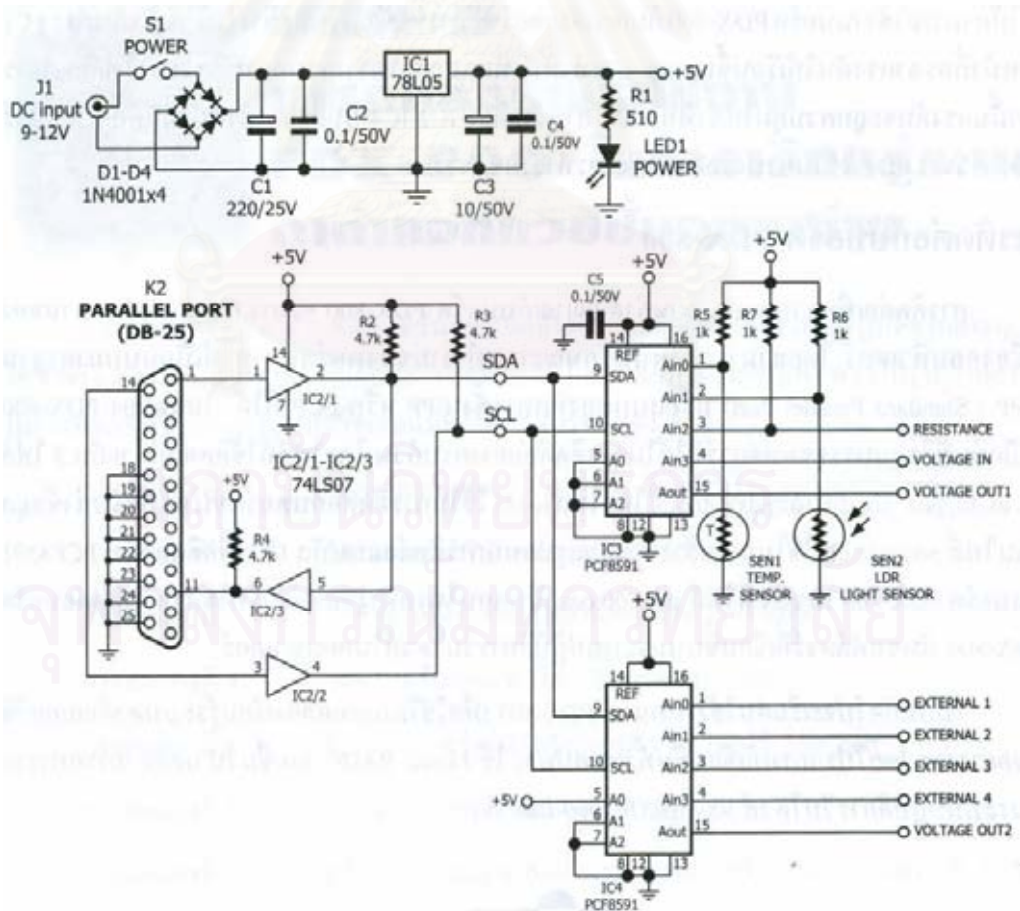
รูปที่ 3.42 การแสดงผลระหว่างการทดสอบ

3.8.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

การทดลองนี้ใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของบอร์ดทดลองและเรียนรู้ระบบคาต้าแอกควิซีชันอย่างง่าย PDX-800 ของบริษัท อิน โนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด มีคุณสมบัติทางเทคนิคของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกขนาด 8 บิต 2 ช่อง ให้แรงดันไฟตรงขาออก 0 - 5 โวลต์ เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน และมีวงจรบัฟเฟอร์เพื่อป้องกันความเสียหายต่อพอร์ตขนานด้วย ดังในรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 ส่วนประกอบของ PDX-800 บอร์ดเรียนรู้ระบบค่าตัวแอกควิชชันอย่างง่าย



รูปที่ 3.44 วงจรสมบูรณของ PDX-800 บอร์ดเรียนรู้ระบบค่าตัวแอกควิชชันอย่างง่าย

วงจรสมบูรณดังในรูปที่ 3.44 ส่วนประกอบที่สำคัญของวงจรคือ IC3 และ IC4 เบอร์ PCF8591 ไอซีแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกขนาด 8 บิต โดยภายใน PCF8591 มีสัญญาณขาเข้าสำหรับแรงดันไฟตรง 0 - 5 โวลต์มากถึง 4 ช่อง และมีสัญญาณขาออกของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่ให้แรงดัน 0 - 5 โวลต์อีก 1 ช่อง และที่พิเศษคือ สามารถต่อพ่วงกันเพื่อขยายจำนวนช่องสัญญาณได้อีก 7 ตัว โดยยังคงใช้สัญญาณในการติดต่อและควบคุมการทำงานเพียง 2 เส้น

การควบคุม IC3 และ IC4 มาจากพอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์ผ่านทางตัวเชื่อมต่อ K2 โดยมี IC2 เบอร์ 7407 ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณข้อมูลอนุกรม SDA (Serial Data) และสัญญาณนาฬิกาอนุกรม SCL (Serial Clock) สายสัญญาณ SDA และ SCL จะต่อเข้ากับขา SDA และ SCL ของ IC3 และ IC4 การต่อพ่วงกันของ IC3 และ IC4 สามารถทำได้โดยการกำหนดขา แอดเดรสทางฮาร์ดแวร์ A0 - A2 ของ IC3 และ IC4 จากวงจรของ PDX-800 กำหนดให้ IC3 มีแอดเดรสเท่ากับ 000 ในขณะที่ IC4 มีแอดเดรสเท่ากับ 001

เนื่องจาก PCF8591 มีสัญญาณขาเข้าสำหรับรับแรงดันแอนะล็อก 4 ช่องต่อตัว เมื่อนำมาต่อพ่วงกัน 2 ตัวจึงได้สัญญาณขาเข้าสำหรับแรงดันแอนะล็อกมากถึง 8 ช่อง และสัญญาณขาออกสำหรับส่งแรงดันแอนะล็อกจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกภายในไอซีอีก 2 ช่อง ในบอร์ด PDX-800 จึงทำการจัดสรรสัญญาณขาเข้าแอนะล็อกเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานตามค่าแอกควิชชันดังนี้

ช่อง Ain0 ของ PCF8591 ตัวที่ 1 (IC3) ต่อกับเทอร์มิสเตอร์เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิ

ช่อง Ain1 ของ PCF8591 ตัวที่ 1 (IC3) ต่อกับ LDR หรือตัวต้านทานแปรค่าตามแสงเพื่อใช้ในการตรวจจับแสง

ช่อง Ain2 ของ PCF8591 ตัวที่ 1 (IC3) ต่อกับวงจรแบ่งแรงดันเพื่อใช้ในการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

ช่อง Ain3 ของ PCF8591 ตัวที่ 1 (IC3) เป็นสัญญาณขาเข้าสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าตรง 0 - 5 โวลต์

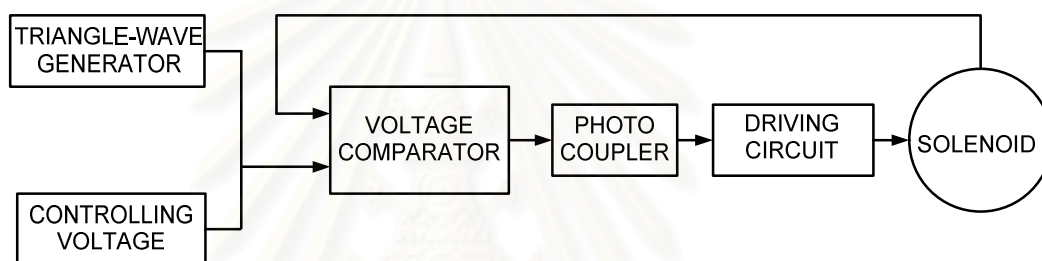
ช่อง Ain0 - Ain3 ของ PCF8591 ตัวที่ 2 (IC4) เป็นสัญญาณขาเข้าเพิ่มเติมสำหรับวัดแรงดันไฟตรง 0 - 5 โวลต์

แรงดันไฟเลี้ยงของบอร์ด PDX-800 ได้มาจากอะแดปเตอร์ขนาด 9 - 16 โวลต์ต่อเข้าที่ J1 โดยมีสวิตช์ S1 ใช้ในการตัดต่อไฟเลี้ยง แรงดันจะผ่านเข้ามาয়วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เพื่อจัดจ้วแรงดันใหม่ ทำให้สามารถใช้งานบอร์ด PDX-800 กับอะแดปเตอร์ที่มีการจัดจ้วแรงดันอย่างไรก็ได้ ตัวเก็บประจุ C1 ทำหน้าที่กรองแรงดันให้เรียบขึ้น และ C2 ทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวน

ความถี่สูงของไฟเลี้ยงวงจร จากนั้นแรงดันจะถูกควบคุมให้คงที่ที่ +5 โวลต์สำหรับเลี้ยง IC2 - IC4 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้คือ IC1 เบอร์ 7805 ส่วน LED1 ใช้ในการแสดงสถานะการทำงานของวงจร

3.8.4 การทำงานของวงจรขยาย

วงจขยายทำหน้าที่รับสัญญาณขาเข้าจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก และส่งสัญญาณขาออกจากวงจขยายไปขับโซเลนอยด์ เพื่อให้แรงกระทำของโซเลนอยด์เปลี่ยนแปลงตามคำสั่งจากส่วนควบคุม การทำงานของวงจขยายสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 3.45 (ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของรูปที่ 3.35)

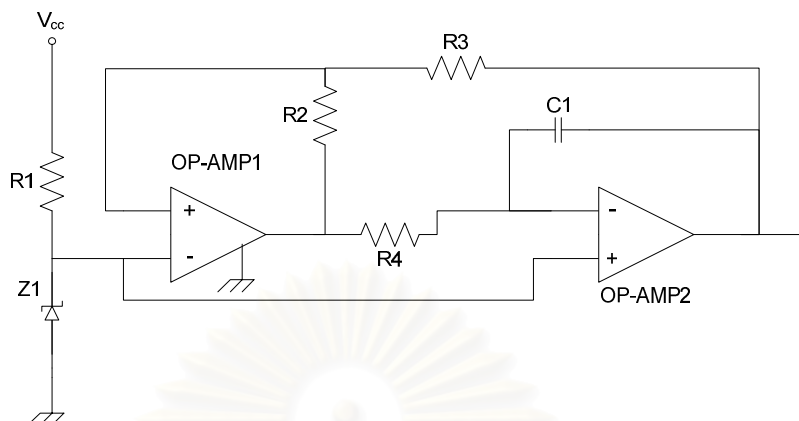


รูปที่ 3.45 ส่วนประกอบของวงจขยาย

สำหรับการทำงานของวงจขยายนั้น เริ่มพิจารณาวงจรสร้างคลื่นสามเหลี่ยม (Triangle - wave generator) ที่มีการปรับขนาดของสัญญาณขาออกให้เหมาะสม และรวมเข้ากับสัญญาณขาเข้าที่ถูกส่งมาจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก โดยแรงดันควบคุม (Controlling voltage) ก็คือสัญญาณแรงดันที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก สัญญาณที่เกิดจากการรวมสัญญาณแรงดันควบคุมกับสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมจะเข้าสู่วงจรเปรียบเทียบแรงดัน ทำการเปรียบเทียบแรงดันขาเข้าสองสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยแรงดันรวมข้างต้นกับแรงดันที่มาจากป้อนกลับของโซเลนอยด์ หลังจากนั้นวงจรเปรียบเทียบแรงดันจะให้สัญญาณขาออกไปยังวงจรเชื่อมโยงทางแสง (Photo coupler) ทำการแยกสัญญาณในส่วนของแรงดันไฟสูงและแรงดันไฟต่ำ สัญญาณขาออกของวงจรเชื่อมโยงทางแสงจะถูกส่งไปยังวงจรขับโซเลนอยด์ที่เป็นส่วนกำลัง

การเปลี่ยนแปลงแรงของโซเลนอยด์จะเป็นผลมาจากสัญญาณแรงดันควบคุม (Controlling voltage) กรณีที่มีแรงดันควบคุมน้อยก็จะทำให้โซเลนอยด์มีแรงกระทำน้อย กรณีที่มีแรงดันควบคุมมากก็จะทำให้โซเลนอยด์มีแรงกระทำมากตามไปด้วย ในการทดลองนี้แรงดันของสัญญาณควบคุมจะอยู่ในช่วง 0 - 5 โวลต์

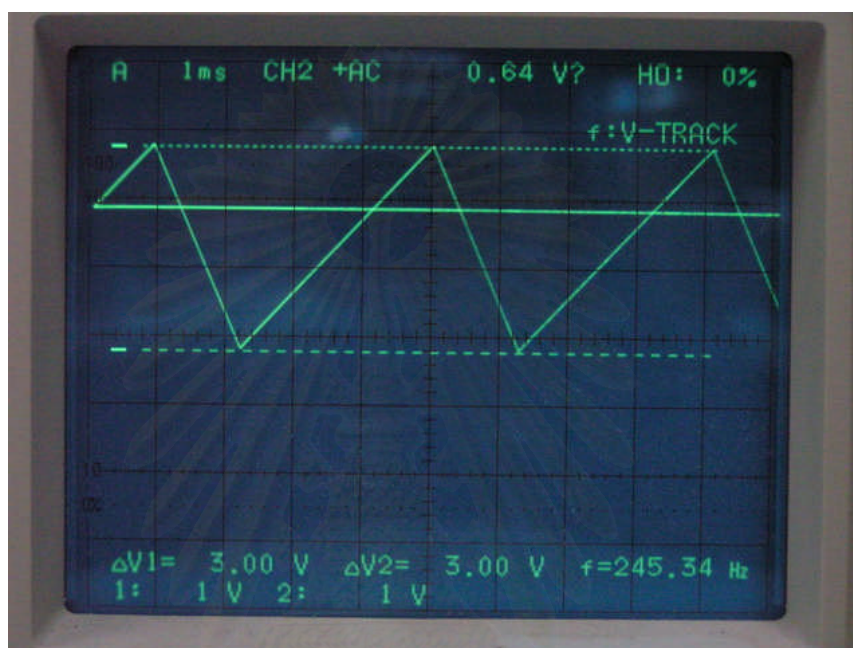
3.8.4.1 วงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 3.46 วงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม

วงจรกำเนิดรูปคลื่นสามเหลี่ยมจะเป็นวงจรที่ประกอบด้วยอินทิเกรเตอร์ของออปแอมป์ 2 และวงจรเปรียบเทียบของออปแอมป์ 1 โดยวงจรจะให้รูปคลื่น 2 รูปคือ แรงดันขาออกของวงจรเปรียบเทียบเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และแรงดันขาออกของวงจรอินทิเกรเตอร์เป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม โดยการนำสัญญาณขาออกของวงจรอินทิเกรเตอร์มาต่อเป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบ และนำสัญญาณขาเข้าของวงจรอินทิเกรเตอร์มาต่อเป็นสัญญาณขาออกของวงจรเปรียบเทียบอีกหนึ่ง สำหรับวงจรเปรียบเทียบที่เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม เมื่อจ่ายไฟเลี้ยงออปแอมป์ 1 โดยแรงดันค่าน้อยๆ ระหว่างช่วงแรงดันขาเข้าหรือแรงดันออฟเซต จะเป็นผลให้สัญญาณขาออกอิมตัว โดยแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ $+V_{sat}$ ป้อนเป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรอินทิเกรเตอร์ ทำให้ตัวเก็บประจุเกิดการเก็บประจุและคายประจุด้วยกระแสที่คงที่ค่าหนึ่ง โดยสัญญาณขาออกของวงจรเปรียบเทียบจะต่อป้อนกลับไปทีขาลบของวงจรอินทิเกรเตอร์ ถ้าให้แรงดันขาออกจากออปแอมป์ 1 เท่ากับ $+V_{sat}$ จะมีผลทำให้มีกระแสคงที่ ($I = \frac{V_{sat}}{R_3}$) ผ่านตัวเก็บประจุ เป็นผลให้แรงดันขาออกจากออปแอมป์ 2 เกิดการลาดลง โดยการลาดลงที่เกิดขึ้นจะเป็นการลาดที่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากแรงดันขาออกจากออปแอมป์จะเปลี่ยนแปลงโดยเป็นสัดส่วนต่อเวลา ($\Delta V_{OP-AMP2} = -\left(\frac{V_{sat}}{R_3 C_1}\right) \times \Delta t$) จาก V_{UT} (Upper Threshold Voltage) ไปยัง V_{LT} (Lower Threshold Voltage) และในทางกลับกัน เมื่อแรงดันมาถึง V_{LT} จะมีผลทำให้แรงดันขาออกของวงจรเปรียบเทียบเปลี่ยนเป็น $-V_{sat}$ เมื่อแรงดันขาออกจากออปแอมป์ 2 เท่ากับ $-V_{sat}$ ทำให้กระแสกลับทิศผ่านตัวเก็บประจุ เป็นผลให้ V_{TR} (Threshold Voltage) เกิดการลาดขึ้นจาก V_{LT} ไปยัง V_{UT} และเมื่อ V_{TR} มาถึง V_{UT} ก็จะทำให้ V_{TR} เปลี่ยนจาก $-V_{sat}$ ไปเป็น $+V_{sat}$ และจะเป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ทำให้เกิดการออสซิลเลตตลอดเวลา เกิดเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม

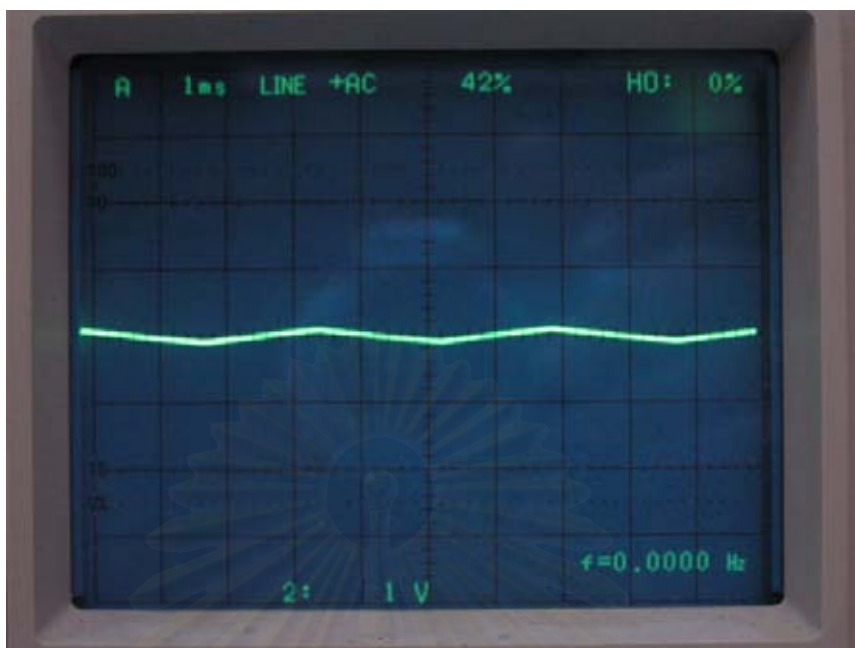
ในการกำหนดรูปแบบสัญญาณของคลื่นรูปสามเหลี่ยม ที่จะนำไปรวมกับสัญญาณควบคุมขาเข้า ซึ่งมาจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ดังในรูปที่ 3.46 สามารถทำได้โดยใช้ ไดโอดซีเนอร์ให้มีค่าที่เหมาะสม ดังในการทดลองที่ 4.2.1 สัญญาณขาออกจากวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยมจะมีลักษณะดังในรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.47 สัญญาณขาออกจากวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม เมื่อไดโอดซีเนอร์มีค่า 4.7 โวลต์

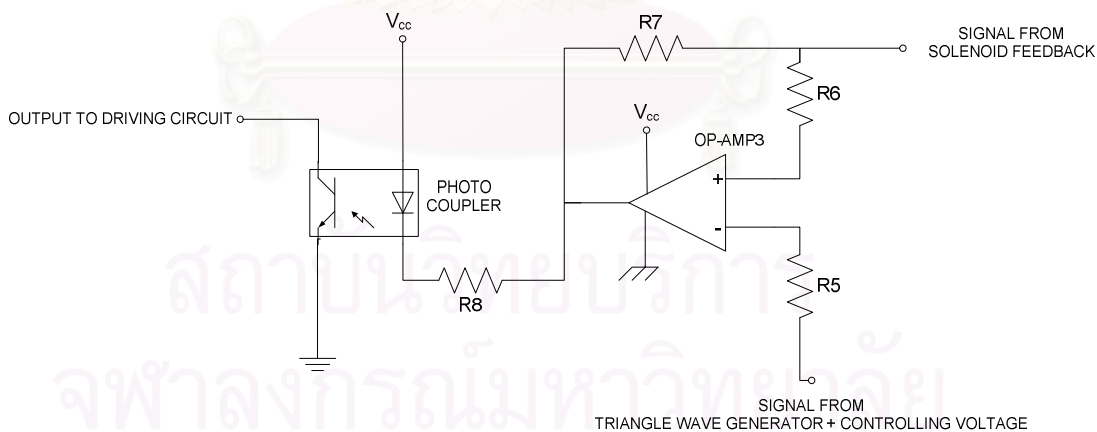
เมื่อได้สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมแล้ว ก็จะนำไปรวมกับสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก และเป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันต่อไป ดังในรูปที่ 3.48

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.48 สัญญาณที่ได้จากการรวมกันระหว่างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม เมื่อไดโอดซีเนอร์ มีค่า 6.8 โวลต์ และสัญญาณในการควบคุมจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัล เป็นแอนะล็อกขนาด 3.5 โวลต์

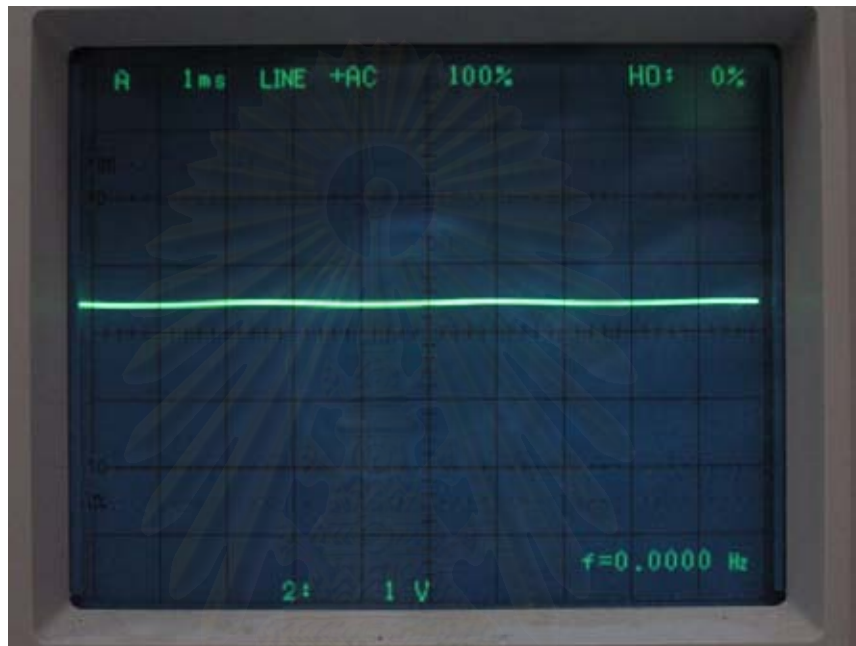
3.8.4.2 วงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรเชื่อมโยงทางแสง



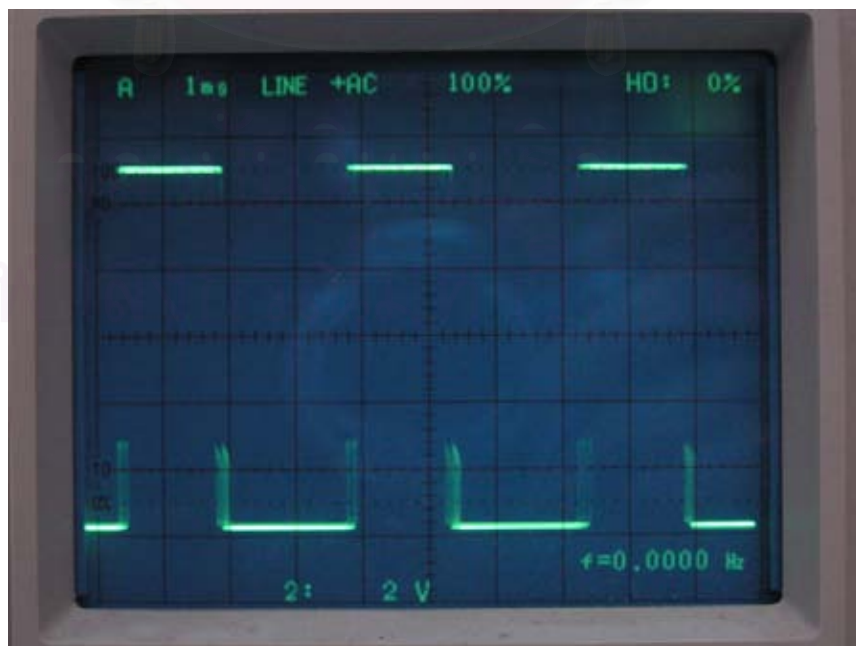
รูปที่ 3.49 วงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรเชื่อมโยงทางแสง

วงจรเปรียบเทียบแรงดันมีสัญญาณขาเข้าอยู่สองสัญญาณด้วยกัน ประกอบด้วย สัญญาณที่มาจากการรวมกันระหว่างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม กับสัญญาณที่ใช้ในการควบคุม จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก และสัญญาณป้อนกลับจากโซเลนอยด์ วงจร

เปรียบเทียบแรงดันจะให้สัญญาณขาออกไปยังวงจรเชื่อม โยงทางแสง ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมสัญญาณระหว่างส่วนที่มีแรงดันต่ำกับแรงดันสูง และให้สัญญาณขาออกไปยังวงจรขับเคลื่อนโซเลนอยด์ต่อไป รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันจากส่วนป้อนกลับของโซเลนอยด์และสัญญาณขาออกจากวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ดังในรูปที่ 3.50 และ 3.51 ตามลำดับ

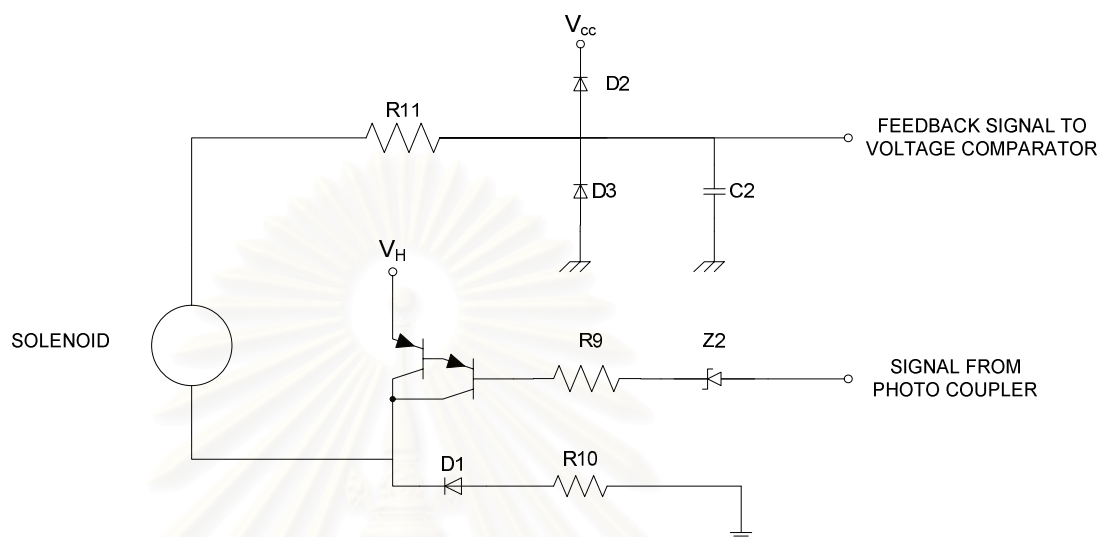


รูปที่ 3.50 สัญญาณป้อนกลับจากโซเลนอยด์เพื่อเป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 4 โวลต์



รูปที่ 3.51 สัญญาณขาออกจากวงจรเปรียบเทียบแรงดัน เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 4 โวลต์

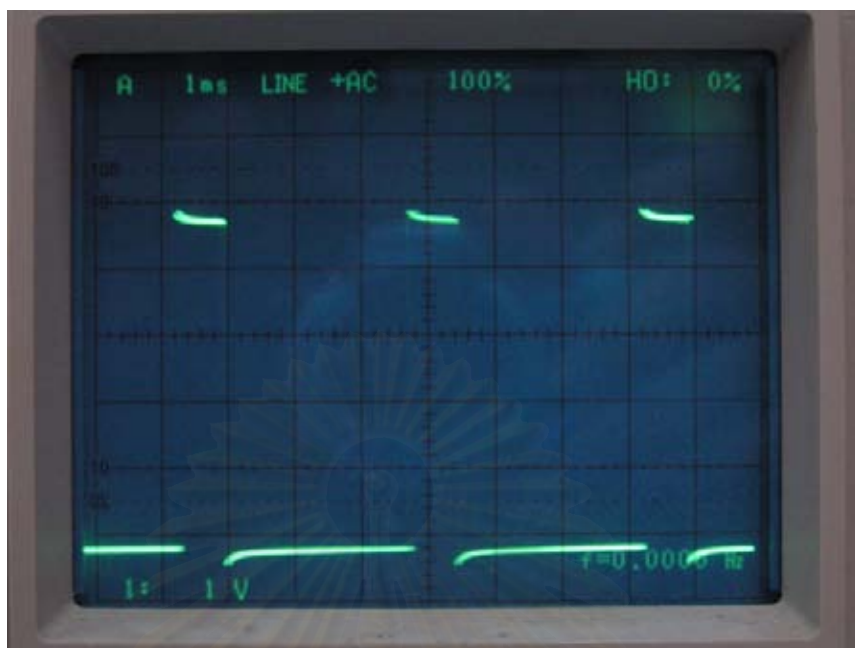
3.8.4.3 วงจรขับเคลื่อนโซเลนอยด์และส่วนป้อนกลับ



รูปที่ 3.52 วงจรขับเคลื่อนโซเลนอยด์และส่วนป้อนกลับ

เมื่อได้รับสัญญาณจากวงจรเชื่อมโยงทางแสง สัญญาณดังกล่าวจะเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งมีไดโอด D1 และตัวต้านทาน R10 ทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ไหลเกินย้อนมาให้ลงที่โครงเครื่อง และทำหน้าที่ขับเคลื่อนโซเลนอยด์ให้เปลี่ยนแปลงแรงกดไปตามสัญญาณการควบคุม จากนั้น ส่วนป้อนกลับก็ส่งสัญญาณป้อนกลับไปยังวงจรเปรียบเทียบแรงดันเพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป รูปแบบของสัญญาณที่คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์กำลังซึ่งทำหน้าที่ขับเคลื่อนโซเลนอยด์ ดังในรูปที่ 3.53

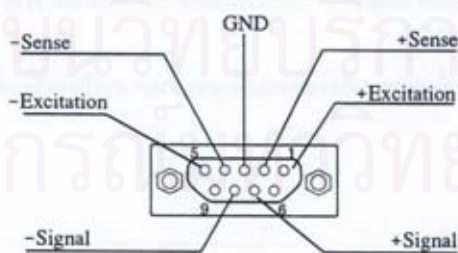
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.53 สัญญาณที่ใช้ขับโซเลนอยด์ เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 1.25 โวลต์

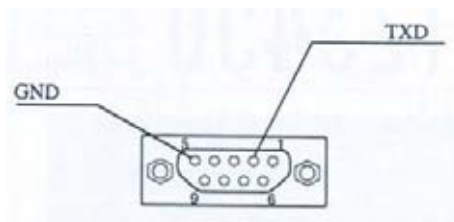
3.8.5 วงจรขยายสัญญาณจากโหลดเซลล์

วงจขยายสัญญาณจากโหลดเซลล์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากโหลดเซลล์ซึ่งมีค่า 2 ± 0.2 มิลลิโวลต์/โวลต์ และส่งสัญญาณออกไปเป็นค่าน้ำหนัก วงจขยายสัญญาณจากโหลดเซลล์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นของห้างหุ้นส่วนจำกัด ลิเนีย อินสทรูเมนต์ ซึ่งมีส่วนของการเชื่อมต่อสองส่วน คือ ช่องต่อสัญญาณขาเข้าจากโหลดเซลล์ และช่องต่อสัญญาณขาออกผ่านพอร์ตอนุกรม ดังในรูปที่ 3.54 และ 3.55 ตามลำดับ



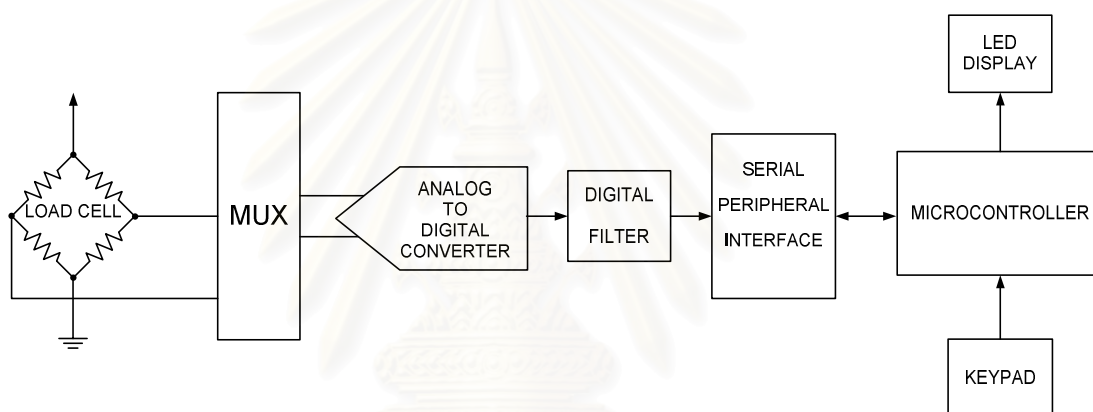
LOAD CELL

รูปที่ 3.54 ช่องต่อสัญญาณขาเข้าจากโหลดเซลล์



รูปที่ 3.55 ช่องต่อสัญญาณขาออกผ่านพอร์ตอนุกรม

โดยช่องต่อสัญญาณขาออกผ่านพอร์ตอนุกรม เป็นสายสัญญาณที่จะต่อไปยังคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์แสดงผลระยะไกล สัญญาณเป็นแบบ RS-232 อัตราการส่งข้อมูลและรูปแบบการส่งข้อมูลได้



รูปที่ 3.56 แผนภาพบล็อกการทำงานของวงจรวางขยายสัญญาณจากโหลดเซลล์

สำหรับการทำงานของวงจรวางขยายสัญญาณจากโหลดเซลล์ จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกทางขาเข้าแล้วทำการแปลงเป็นดิจิทัล โดยสัญญาณแอนะล็อกทางขาเข้าในระดับต่ำๆ ที่ได้ออกมาจากอุปกรณ์ตรวจจับ ระดับสัญญาณแอนะล็อกจากขาออกของอุปกรณ์ทรานส์ดิวเซอร์เหล่านี้ จะมีความแรงสัญญาณอยู่ในระดับมิลลิโวลต์เท่านั้น วงจรวางขยายสัญญาณจากโหลดเซลล์นี้ สามารถรับสัญญาณขาเข้าที่อยู่ในช่วง 0 ถึง 35 มิลลิโวลต์ เมื่อโหลดเซลล์ถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟตรง 5 โวลต์ที่ความต้านทานในบริจค์ของโหลดเซลล์ทั้งสิ้นมีค่า 350 โอห์ม เริ่มต้นด้วยวงจรวางขยายสัญญาณทดสอบทางขาเข้า และเข้าสู่ส่วนที่ทำการโปรแกรมอัตราการขยายสัญญาณภายใน ในส่วนวงจรวางขยายจะเป็นวงจรวางขยายความแตกต่างที่ใช้วิธีมอดูเลตแบบเดลต้า – ซิกม่า ซึ่งเป็นการวัดสัญญาณทางขาเข้าและทำการอ้างอิงกับสัญญาณขาเข้าที่มีการแปลงเป็นดิจิทัลแยกส่วนอิสระ ก่อนที่จะทำการคำนวณผลทางดิจิทัลส่งออกทางสัญญาณขาออก จากนั้นทำการเชื่อมต่อการวัดเทียบกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านวงจรรองสัญญาณทางดิจิทัล สำหรับส่วน

ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรองรับการตั้งค่าต่างๆ จากแผงแป้นกดได้ และแสดงผลตรวจวัดผ่านหน้าจอ LED พร้อมทั้งให้ค่าของผลตรวจวัดผ่านทางพอร์ต RS-232 อีกด้วย

ส่วนแสดงผลของวงจรขยายสัญญาณจากโพลคเซลล์จะเป็นดังในรูปที่ 3.57



รูปที่ 3.57 ส่วนแสดงผลของวงจรขยายสัญญาณจากโพลคเซลล์

ปุ่มต่างๆ จะใช้ในการตั้งค่าต่างๆ สำหรับหลอดไฟแสดงสถานะที่ ZERO หมายถึงน้ำหนักที่แสดงเป็น 0 เมื่อมีการปรับตั้งแล้ว เนื่องจากโดยปกติ เครื่องชั่งจะมีแท่นชั่งวางอยู่บนโพลคเซลล์ การชั่งน้ำหนักจะไม่นับน้ำหนักของแท่นชั่งมารวมกับน้ำหนักของสิ่งของที่ต้องการชั่ง จึงต้องทำการปิดค่าน้ำหนักของแท่นชั่งให้เป็นศูนย์คือ จะถือน้ำหนักในขณะที่มีแท่นชั่งเปล่าๆ วางอยู่บนโพลคเซลล์เป็นศูนย์ เพื่อให้วงจรจดจำค่าน้ำหนักของแท่นชั่งและหักลบออกไปจากน้ำหนักที่จะแสดงจริง ไฟแสดงสถานะที่ NET หมายถึงน้ำหนักที่แสดงเป็นน้ำหนักสุทธิ และไฟแสดงสถานะที่ ~ หมายถึงน้ำหนักที่แสดงยังไม่นิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดลองขดลวดที่พันเอง

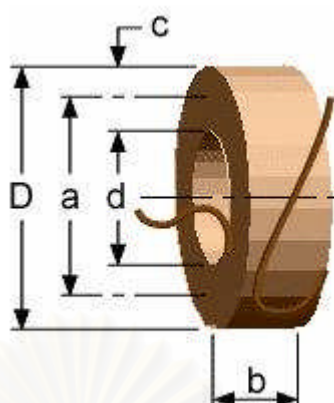
ในการทดลองขดลวดที่พันขึ้นเองเพื่อทดสอบคุณสมบัติแรงของแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำต่อแม่เหล็กถาวร ซึ่งเคลื่อนที่ในแนวแกนและเหนือพื้นผิวของขดลวดไฟฟ้าแกนอากาศ โดยกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดมีค่าคงที่ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยขดลวดแกนอากาศที่พันขึ้นแม่เหล็กนีโอดีเมียมทรงกระบอก ตาชั่งน้ำหนัก อุปกรณ์จับยึดขดลวดแกนอากาศ และแหล่งจ่ายไฟ

ขดลวดแกนอากาศที่พันขึ้นเองนั้น ใช้ลวดทองแดงอบน้ำยา (Enamel copper wire) #19 S.W.G. 1.0 mm ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำ 0.918 mH มีความสูง 39 ม.ม. เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 45.8 ม.ม. และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 39.3 ม.ม. ดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขดลวดแกนอากาศที่พันขึ้นเอง

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแกนอากาศสามารถคำนวณโดยพิจารณาจากรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เรขาคณิตของส่วนประกอบต่างๆ ของขดลวดแกนอากาศที่ใช้ในการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ [19]

จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแกนอากาศในหน่วย mH เป็น [20]

$$L = \frac{0.2a^2n^2 \times 10^{-3}}{3a + 9b + 10c} \quad [\text{mH}] \quad (4.1)$$

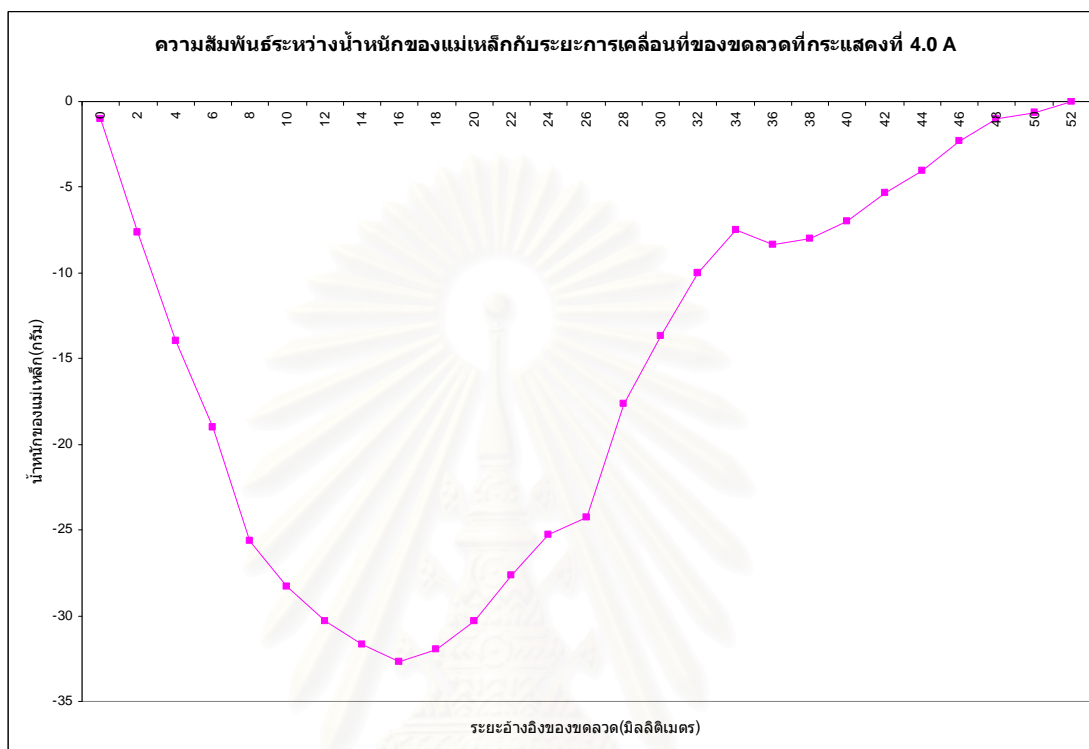
และเครื่องชั่งน้ำหนักที่แสดงผลในหน่วยกรัมดังในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เครื่องชั่งที่ใช้ในการทดลอง

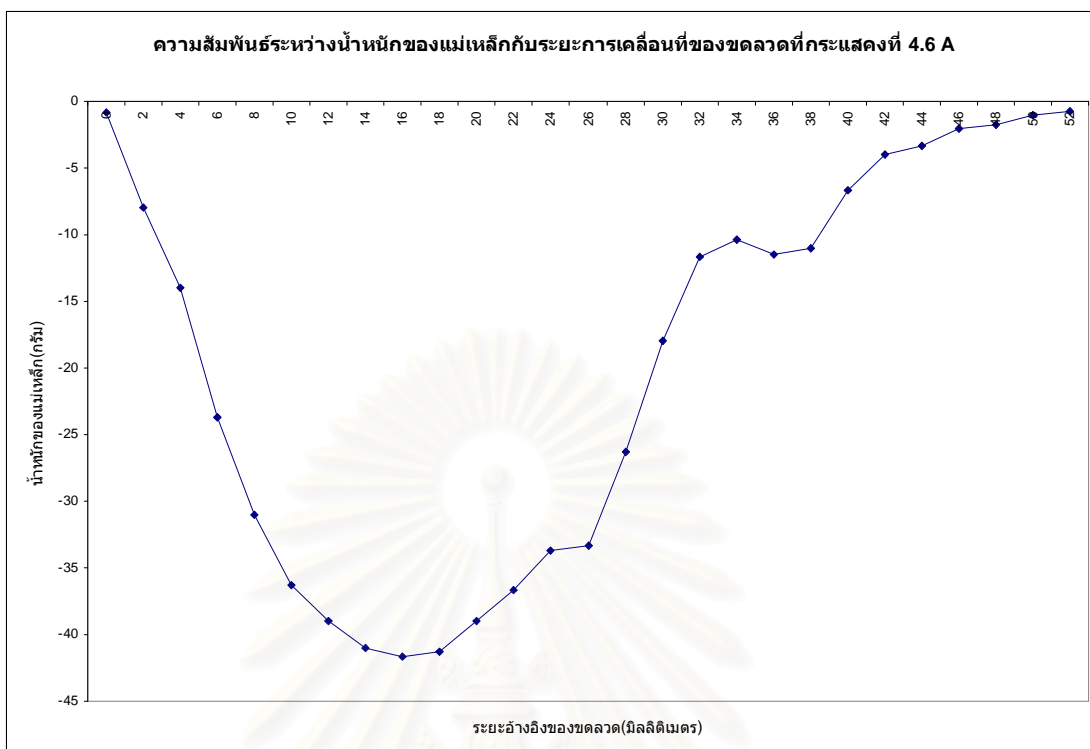
ในการทดลอง จะทำการวางแม่เหล็กนีโอดีเมียมที่มีความสูง 34 ม.ม. เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 32.5 ม.ม. เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 12 ม.ม. ลงบนเครื่องชั่ง และทำการวัดน้ำหนักของแม่เหล็กเพื่ออ้างอิง หลังจากนั้น ใช้อุปกรณ์จับยึดตัวขดลวดทองแดงแกนอากาศที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟโดยควบคุมกระแสคงที่ จัดแนวแกนให้ขดลวดทองแดงแกนอากาศและแม่เหล็กอยู่ในแนวแกนเดียวกัน ทำการบันทึกค่าน้ำหนักของแม่เหล็กบนตาชั่งที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการ

เปลี่ยนแปลงระยะความสูงของขดลวดทองแดงในแนวแกนเดียวกัน ทดลองโดยเปลี่ยนแปลงระยะความสูงของขดลวดและกระแสที่จ่ายให้กับขดลวด จะได้ผลการทดลองดังในรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของแม่เหล็กกับระยะการเคลื่อนที่ของขดลวดที่กระแสคงที่ 4.0 A

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของแม่เหล็กกับระยะการเคลื่อนที่ของขดลวดที่กระแสคงที่ 4.6 A

จากผลการทดลอง จะสังเกตได้ว่า เมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ไปตามทิศทางในแนวแกนของขดลวดไฟฟ้า แรงตามแนวแกนจะมีค่าสูงสุดที่ผิวของขดลวดไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่คำนวณและแสดงไว้ในเนื้อหาข้างต้น

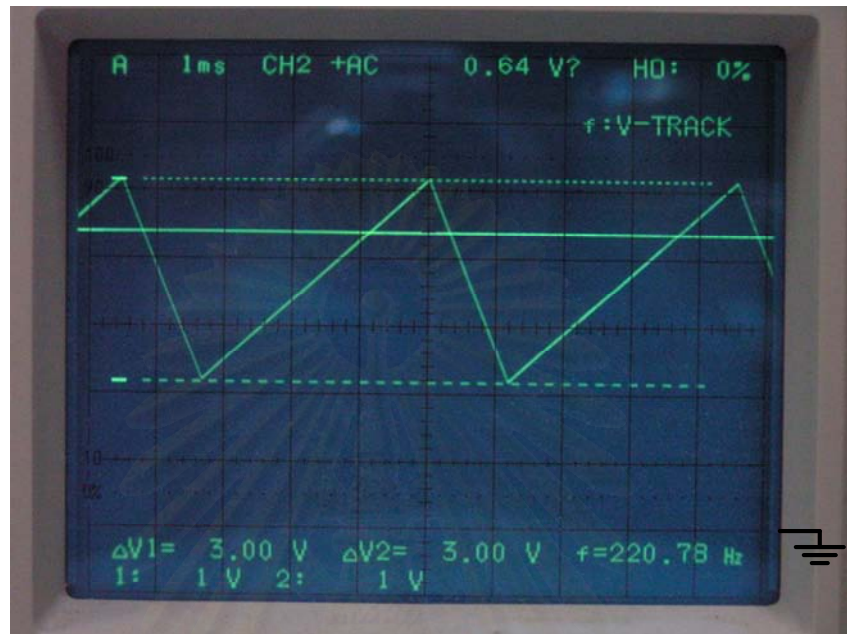
4.2 การทดลองวัดสัญญาณของวงจรขยายเพื่อขับโซเลนอยด์

เพื่อทดสอบรูปแบบสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของวงจร นำเอาไปกำหนดและตั้งค่าต่างๆ ให้เหมาะสมกับการทดลอง

4.2.1 การทดลองวัดแรงดันอ้างอิงที่ขาเข้าและรูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม

เป็นการทดสอบรูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม เมื่อมีการเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิงที่ขาเข้า โดยวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยมจะใช้ Operational amplifiers และเปลี่ยนค่าแรงดันขาเข้าโดยใช้ไดโอดซีเนอร์ค่าต่างๆ เช่น 4.3 โวลต์

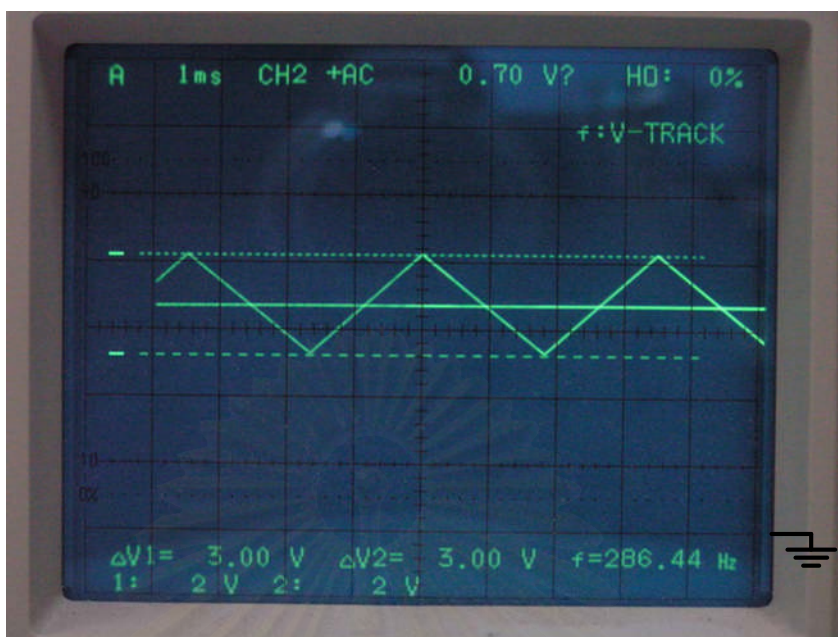
(ดังในรูปที่ 4.6), 4.7, 5.1, 5.6 (ดังในรูปที่ 4.7), 6.2, 6.8 (ดังในรูปที่ 4.8), 7.5 และ (8.2 โวลต์ ดังในรูปที่ 4.9)



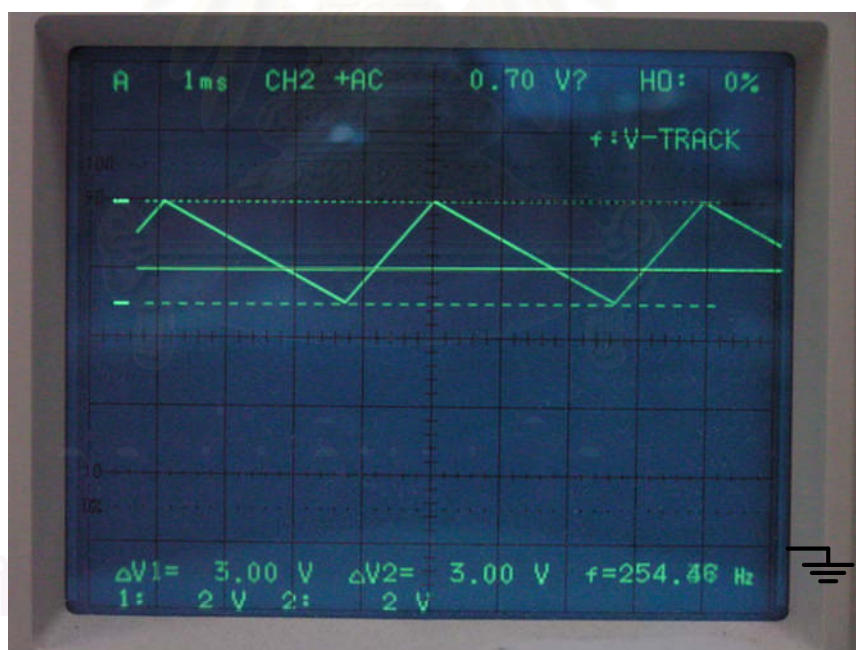
รูปที่ 4.6 รูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม
เมื่อแรงดันขาเข้าอ้างอิงมีค่า 4.3 โวลต์



รูปที่ 4.7 รูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม
เมื่อแรงดันขาเข้าอ้างอิงมีค่า 5.6 โวลต์



รูปที่ 4.8 รูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม
เมื่อแรงดันขาเข้าอ้างอิงมีค่า 6.8 โวลต์



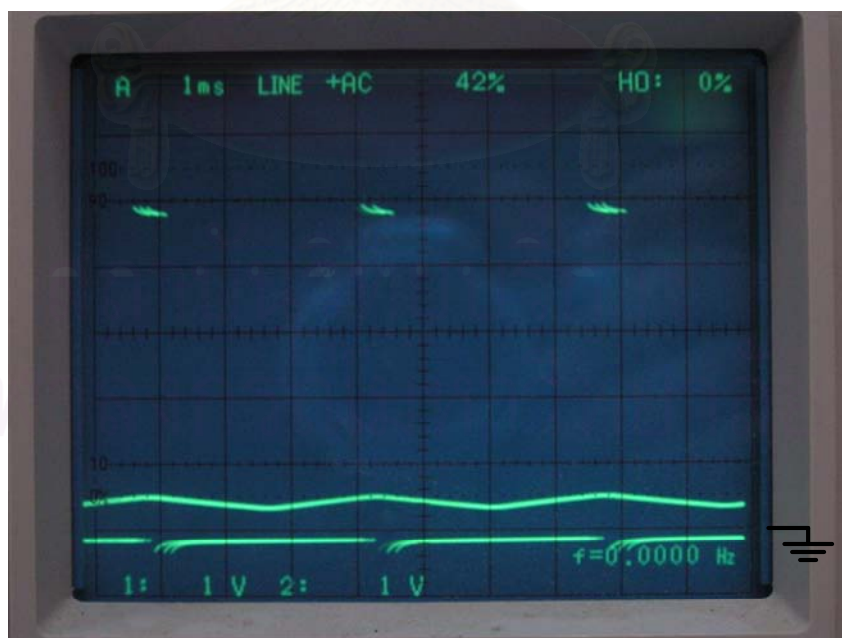
รูปที่ 4.9 รูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม
เมื่อแรงดันขาเข้าอ้างอิงมีค่า 8.2 โวลต์

ในรูปผลการทดลองข้างต้น จะสังเกตเห็นว่า เมื่อให้แรงดันอ้างอิงขาเข้าที่มีค่าต่างกัน
สัญญาณแรงดันขาออกของแต่ละค่าจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีแรงดันค่ายอดสูงสุดถึง

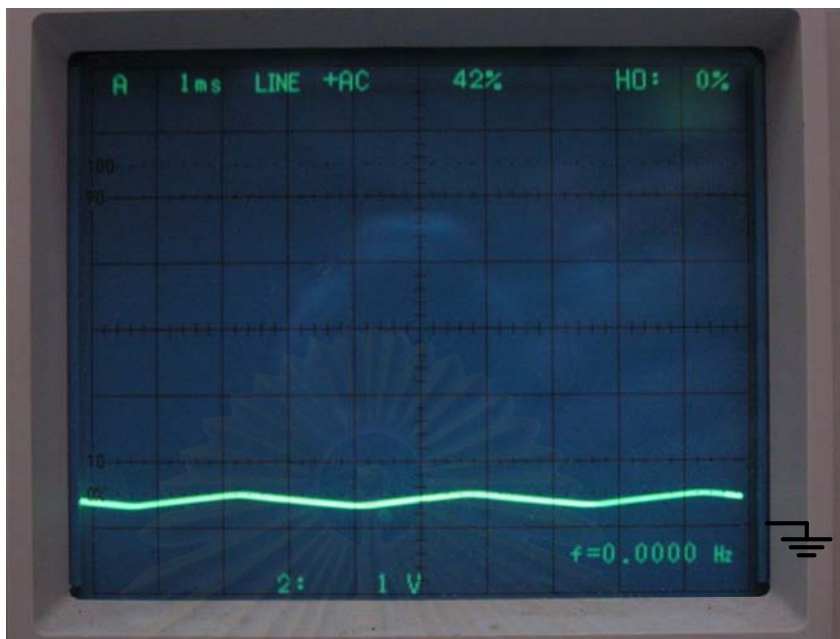
ค่ายอดต่ำสุดเป็น 3 โวลต์ทั้งสิ้น เมื่อพิจารณารูปคลื่นสามเหลี่ยมของแต่ละแรงดันอ้างอิงจะเห็นว่า รูปทรงของคลื่นสามเหลี่ยมจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าแรงดันอ้างอิงขาเข้า ที่แรงดันค่าต่ำจะทำให้รูปคลื่นมาเหลี่ยมมีการเอียงไปทางขวา และค่อยๆ กลับเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีความสมมาตร ณ แรงดันอ้างอิงขาเข้าที่ประมาณ 6.8 โวลต์ หลังจากนั้น รูปคลื่นสามเหลี่ยมก็จะเอียงไปทางซ้ายเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงขาเข้าเพิ่มขึ้น และจะสังเกตได้ว่า ที่แรงดันอ้างอิง 6.8 โวลต์นั้น รูปคลื่นสามเหลี่ยมจะมีจุดกึ่งกลางระหว่างค่ายอดสูงสุดถึงค่ายอดต่ำสุดพอดีกับระดับแรงดันอ้างอิง ในการทดลองเพื่อจำลองการทำงานของระบบรองรับการสะท้อนนี้ จึงใช้ค่าแรงดันอ้างอิงขาเข้าของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยมเป็น 6.8 โวลต์

4.2.2 การทดลองวัดรูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและรูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรขับโซเลนอยด์

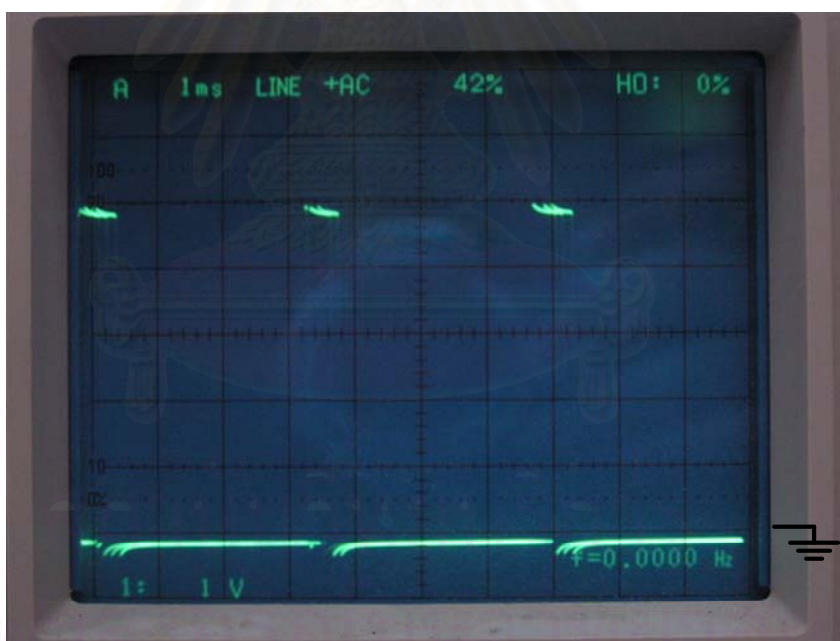
สัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันเป็นสัญญาณรวมกันระหว่างคลื่นรูปสามเหลี่ยมจากส่วนของวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยม และสัญญาณแรงดันแอนะล็อกที่ใช้ควบคุมโซเลนอยด์ซึ่งส่งมาจากหน่วยประมวลผล นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่โซเลนอยด์ได้รับจากส่วนของวงจรขับโซเลนอยด์ ดังในรูปที่ 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 และ 4.15



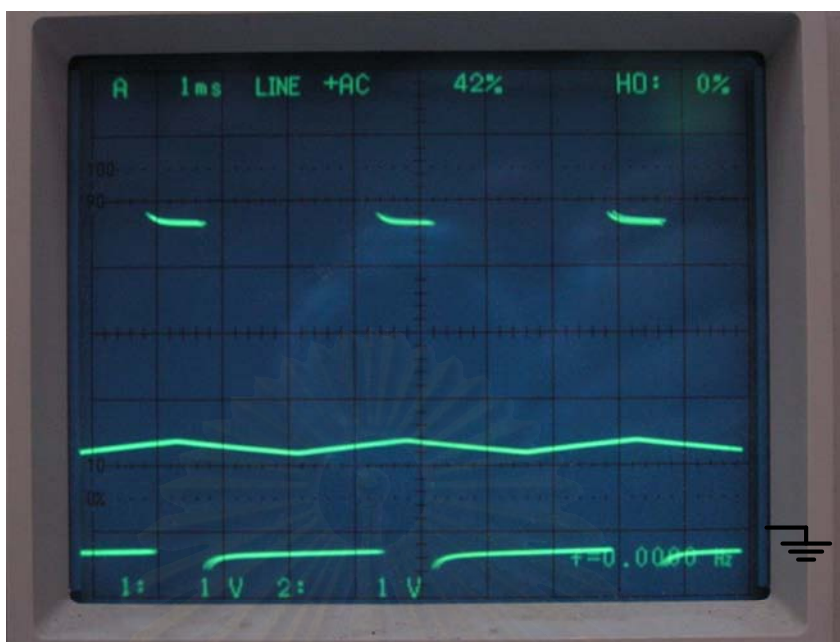
รูปที่ 4.10 รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและรูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรขับโซเลนอยด์เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 0.5 โวลต์



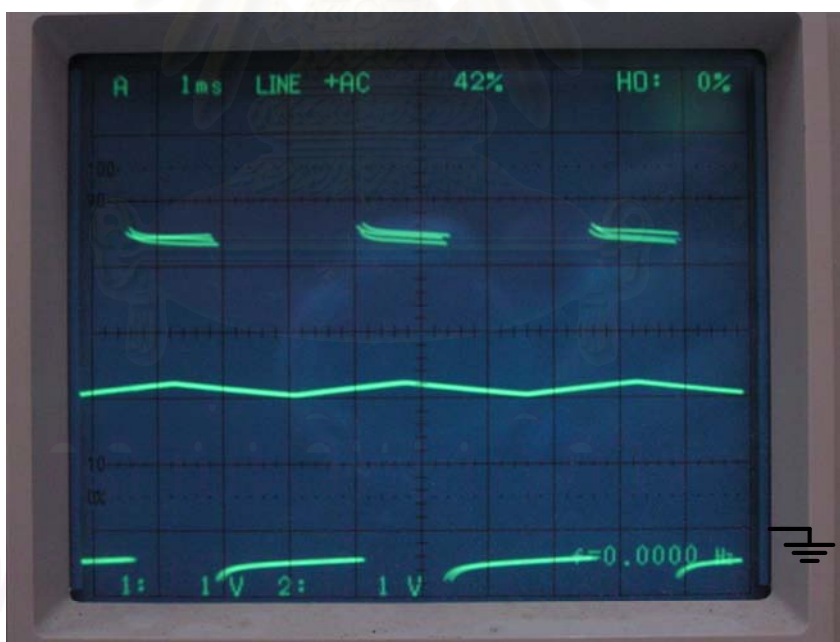
รูปที่ 4.11 รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันเมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 0.5 โวลต์



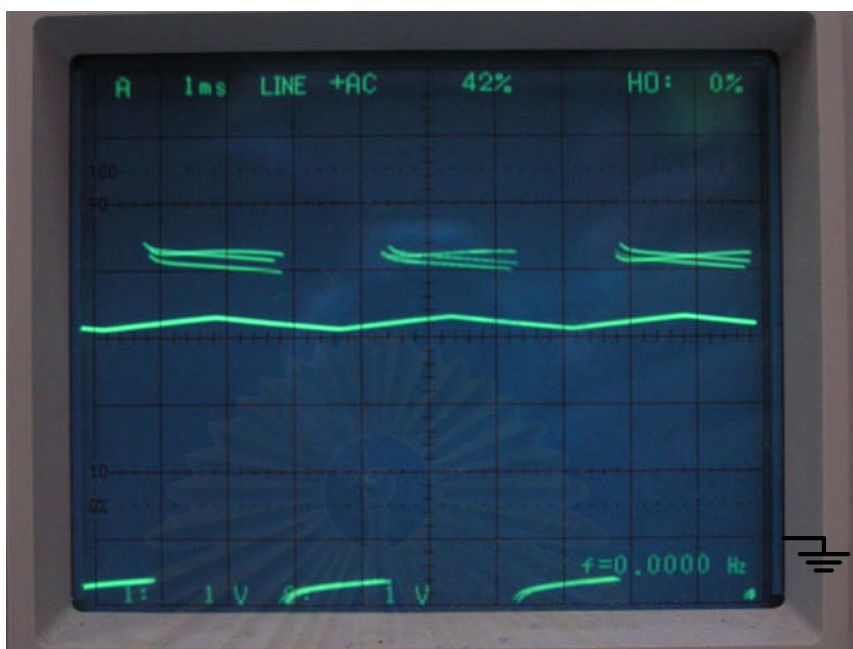
รูปที่ 4.12 รูปแบบสัญญาณขาออกของวงจรจับโซเลนอยด์เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 0.5 โวลต์



รูปที่ 4.13 รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและรูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรขับโซเลนอยด์เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 1.5 โวลต์



รูปที่ 4.14 รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและรูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรขับโซเลนอยด์เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 2.5 โวลต์

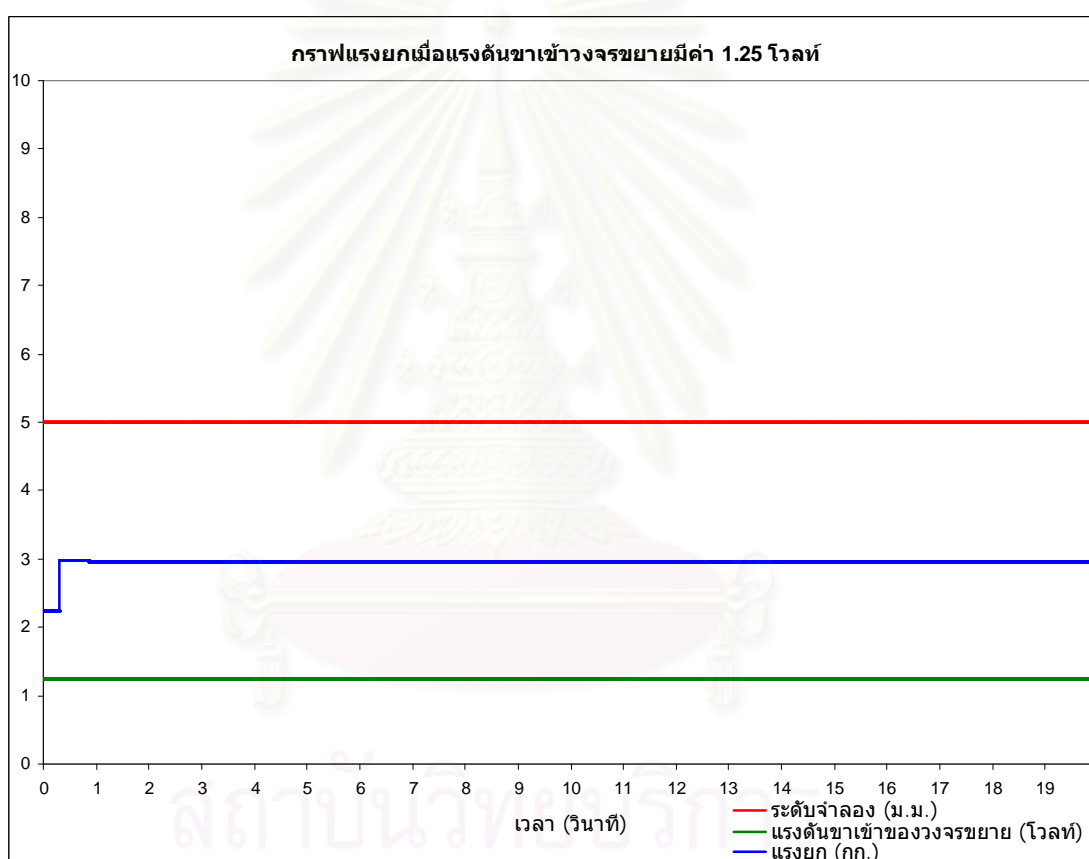


รูปที่ 4.15 รูปแบบสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและรูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรขับโซเลนอยด์เมื่อแรงดันควบคุมมีค่า 3.75 โวลต์

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า มีสัญญาณสองส่วนคือ สัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันดังในรูปที่ 4.11 และสัญญาณขาออกของวงจรขับโซเลนอยด์ดังในรูปที่ 4.12 ส่วนของสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันจะมีลักษณะเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยมที่มีค่ายอดสูงสุดถึงค่ายอดต่ำสุดน้อยลง เมื่อเทียบกับรูปแบบคลื่นที่มาจากส่วนวงจรสร้างคลื่นรูปสามเหลี่ยมในการทดลองก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นผลมาจากการรวมกันระหว่างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมและสัญญาณในการควบคุมโซเลนอยด์ เมื่อพิจารณารูปคลื่นที่เกิดจากการรวมกันในรูปที่ 4.10, 4.13, 4.14 และ 4.15 จะเห็นความแตกต่างกันตรงที่ระดับของแรงดันของคลื่นจากการรวมกันที่เปลี่ยนตามแรงดันที่ใช้ควบคุมโซเลนอยด์ที่ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.75 โวลต์ตามลำดับ ส่วนรูปแบบของสัญญาณขาออกของวงจรขับโซเลนอยด์เมื่อมีค่าแรงดันควบคุมโซเลนอยด์ต่างๆ จะเห็นได้ว่ามีคาบที่เท่ากัน แต่ต่างกันตรงที่สัญญาณของส่วนที่เป็นค่าสูงจะมี Duty cycle ต่างกัน โดยที่แรงดันควบคุมโซเลนอยด์ต่ำ ส่วนที่เป็นค่าสูงของสัญญาณขาออกวงจรขับโซเลนอยด์จะแคบ และเมื่อแรงดันควบคุมโซเลนอยด์เพิ่มขึ้น ส่วนที่เป็นค่าสูงของสัญญาณขาออกวงจรขับโซเลนอยด์ก็จะกว้างขึ้นด้วย

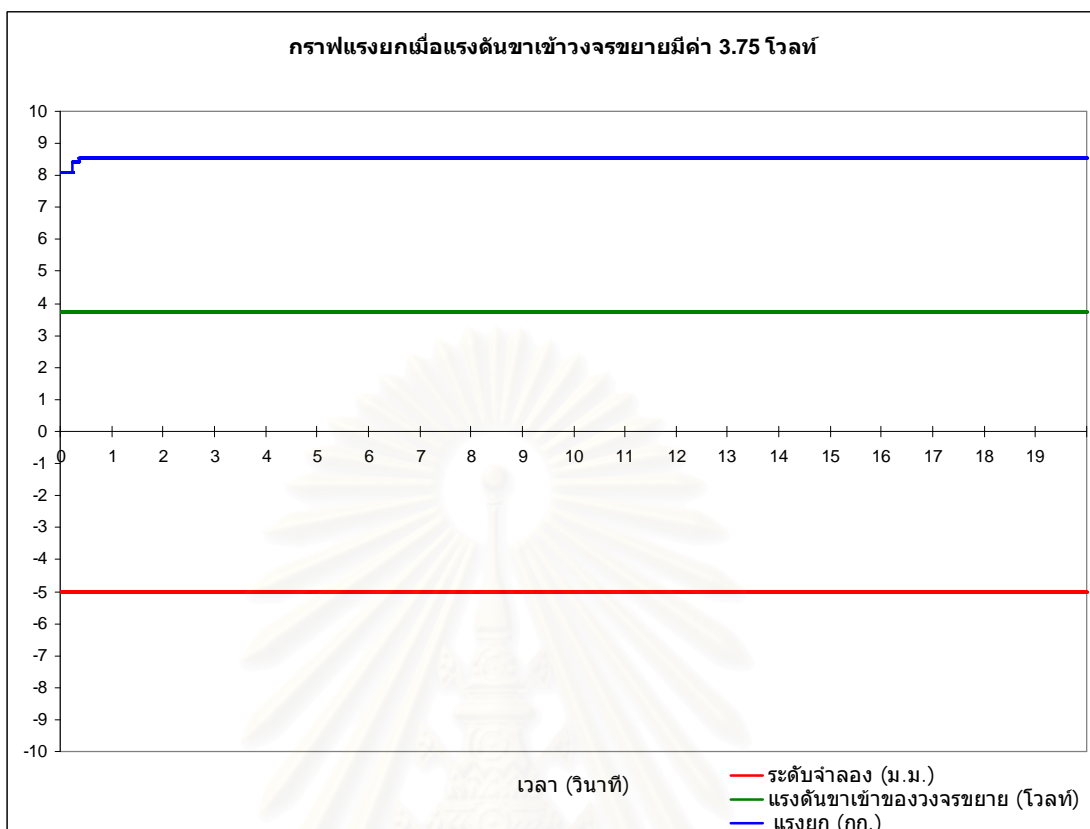
4.3 การทดลองวัดแรงที่กระทำจากโซเลนอยด์ที่แรงดันควบคุมค่าต่างๆ

แรงที่โซเลนอยด์กระทำซึ่งสามารถวัดได้ด้วยโพลดเซลล์ มีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันควบคุมของวงจรขับที่ส่งมาจากหน่วยประมวลผล ในการทดลองนี้จึงกำหนดให้หน่วยประมวลผลส่งค่าแรงดันควบคุมคงที่ โดยกำหนดให้ระยะจำลองของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมีค่าคงที่ทุกคาบการทำงาน และทำการบันทึกค่าแรงที่โซเลนอยด์กระทำในแต่ละแรงดันควบคุมค่าต่างๆ จะได้ตัวอย่างผลการทดลองเมื่อแรงดันขาเข้าวงจรขยายมีค่าเป็น 1.25 และ 3.75 โวลต์ ดังในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 กราฟแรงยกเมื่อแรงดันขาเข้าวงจรขยายมีค่า 1.25 โวลต์ เมื่อระดับจำลองที่ 5 ม.ม.

โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

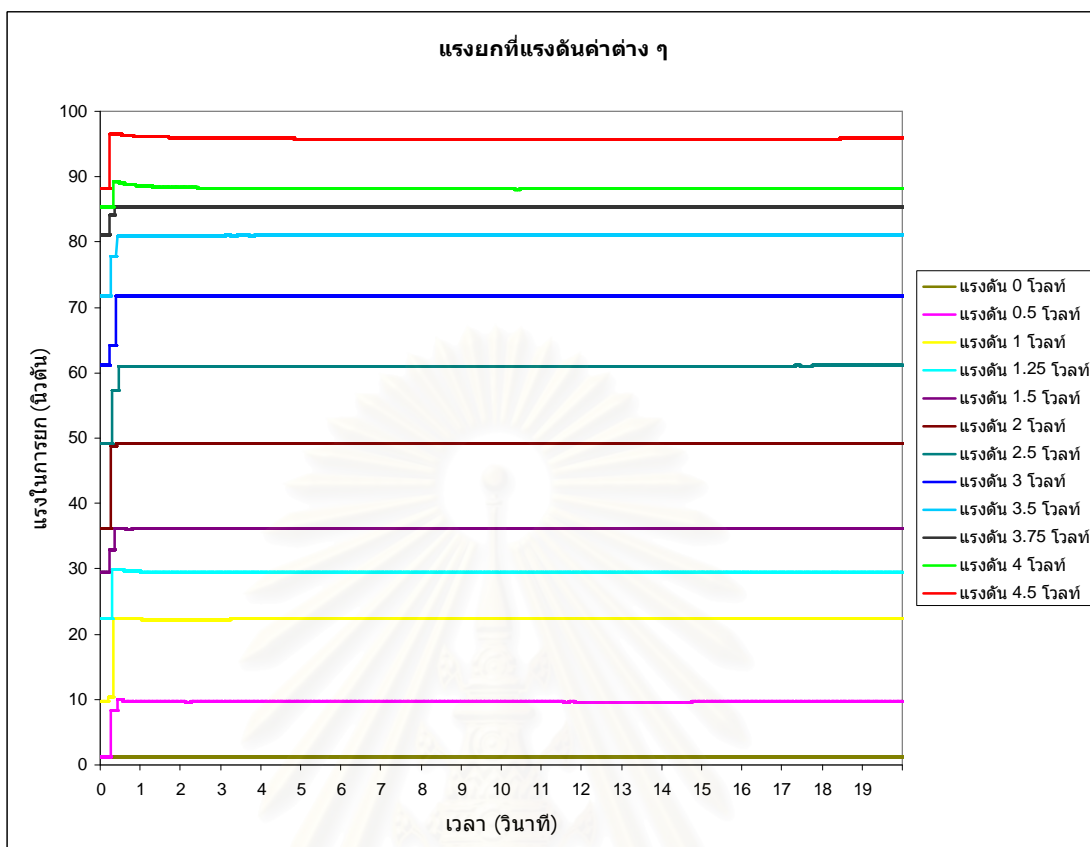


รูปที่ 4.17 กราฟแรงยกเมื่อแรงดันขาเข้าวงจรขยายมีค่า 3.75 โวลต์ เมื่อระดับจำลองที่ -5 ม.ม.

โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันควบคุมจะได้ผลของแรงยกเมื่อแรงดันขาเข้าของวงจรควบคุมมีค่าต่างๆ ดังในรูปที่ 4.18

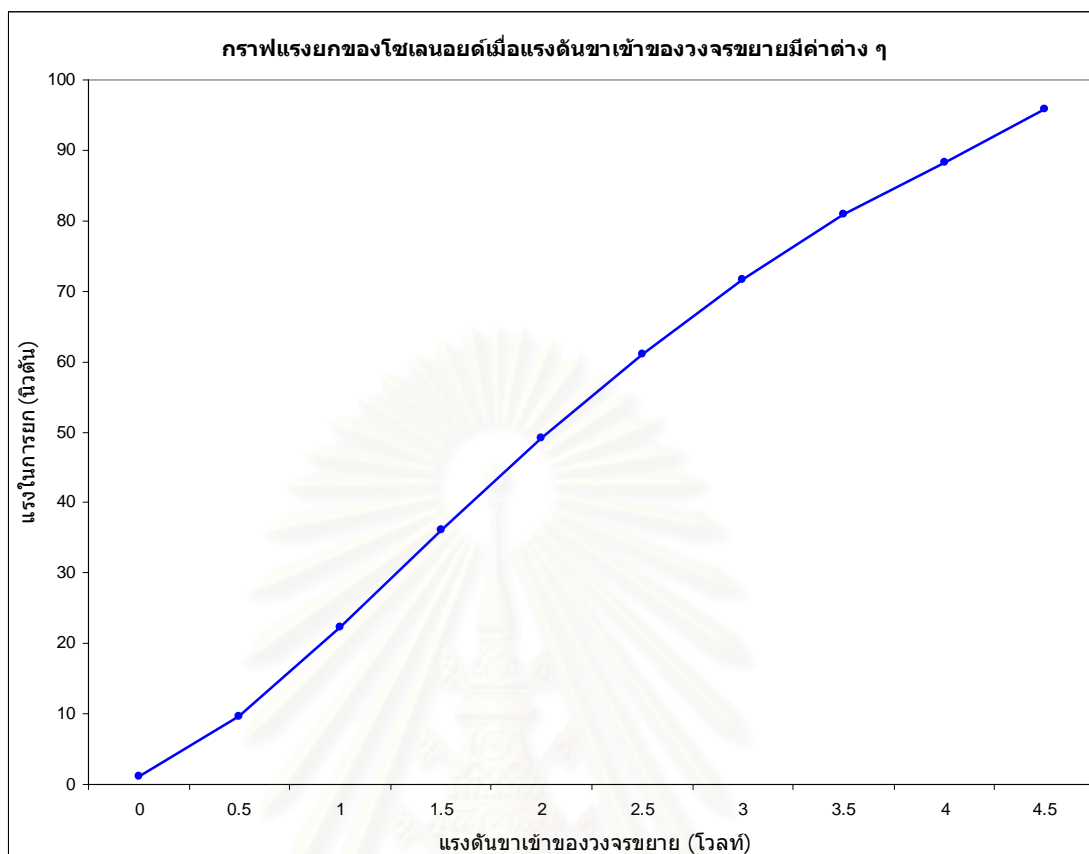
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 กราฟแรงยกเมื่อแรงดันขาเข้าวงจรขยายมีค่าต่างๆ โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสั้มบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

ค่าของแรงยกเมื่อแรงดันขาเข้าวงจรขยายมีค่าต่างๆ สามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับแรงดันขาเข้าวงจรขยายได้ดังในรูปที่ 4.19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

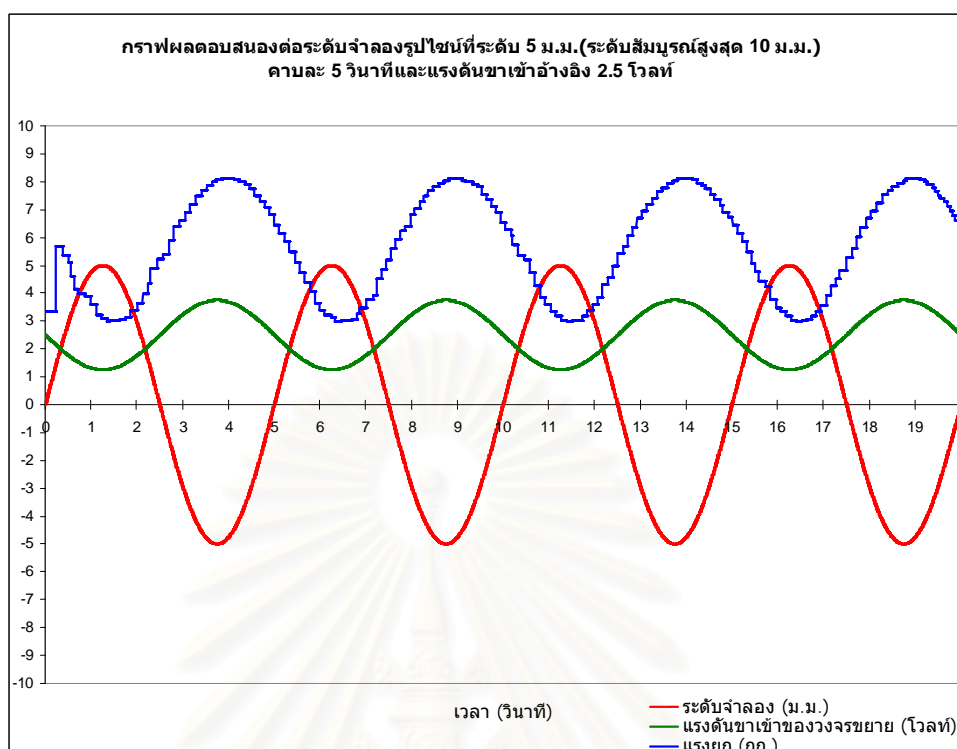


รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับแรงดันขาเข้าวงจรขยาย
เมื่อแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์

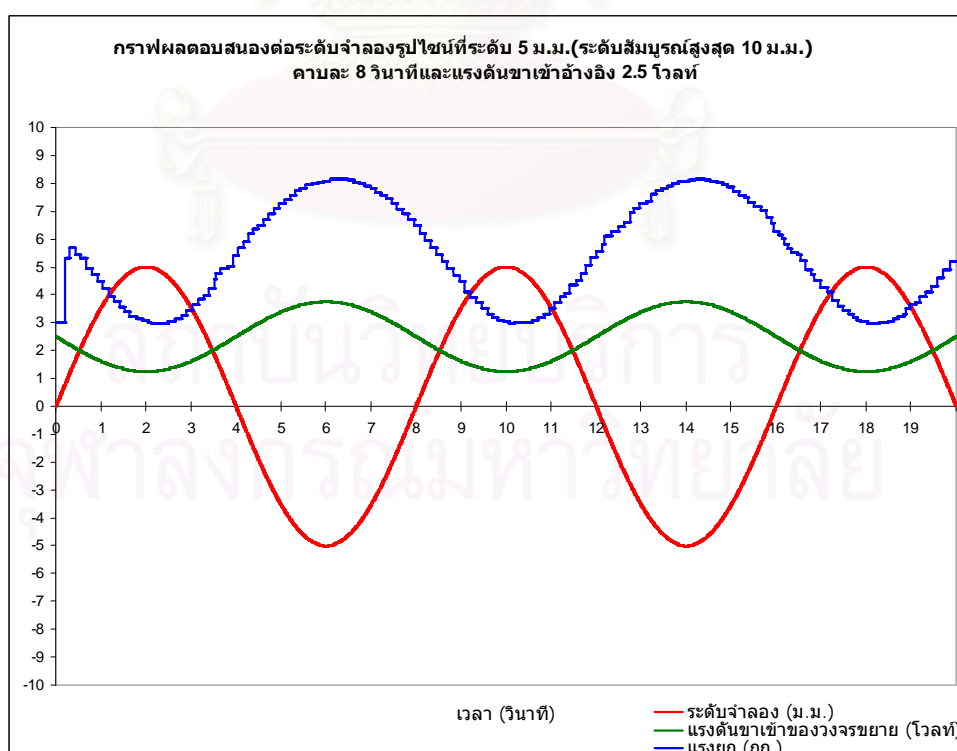
จากรูปจะสังเกตได้ว่า ความสัมพันธ์ของแรงยกกับแรงดันขาเข้าวงจรขยายมีลักษณะเป็นเชิงเส้น และสามารถนำไปใช้ในการคำนวณสัญญาณขาออกที่เหมาะสมในหน่วยประมวลผลได้

4.4 การทดลองวัดแรงที่กระทำจากโซเลนอยด์ในการหาเวลาตอบสนองของระบบเมื่อพื้นผิวจำลองเป็นรูปไซน์ค่ายอดคงที่

เวลาตอบสนองการทำงานของโซเลนอยด์ต่อการสั่งงานการหน่วยประมวลผลกรณีที่พื้นผิวจำลองเป็นรูปคลื่นไซน์ สามารถหาได้ด้วยการกำหนดให้ค่ายอดของคลื่นไซน์มีค่าคงที่ และทำการเก็บค่าของแรงที่กระทำจากโซเลนอยด์เมื่อคาบของรูปคลื่นไซน์มีค่าต่างๆ กัน ตัวอย่างผลการทดลองเมื่อคาบของรูปคลื่นไซน์มีค่า 5 และ 8 วินาที ดังในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

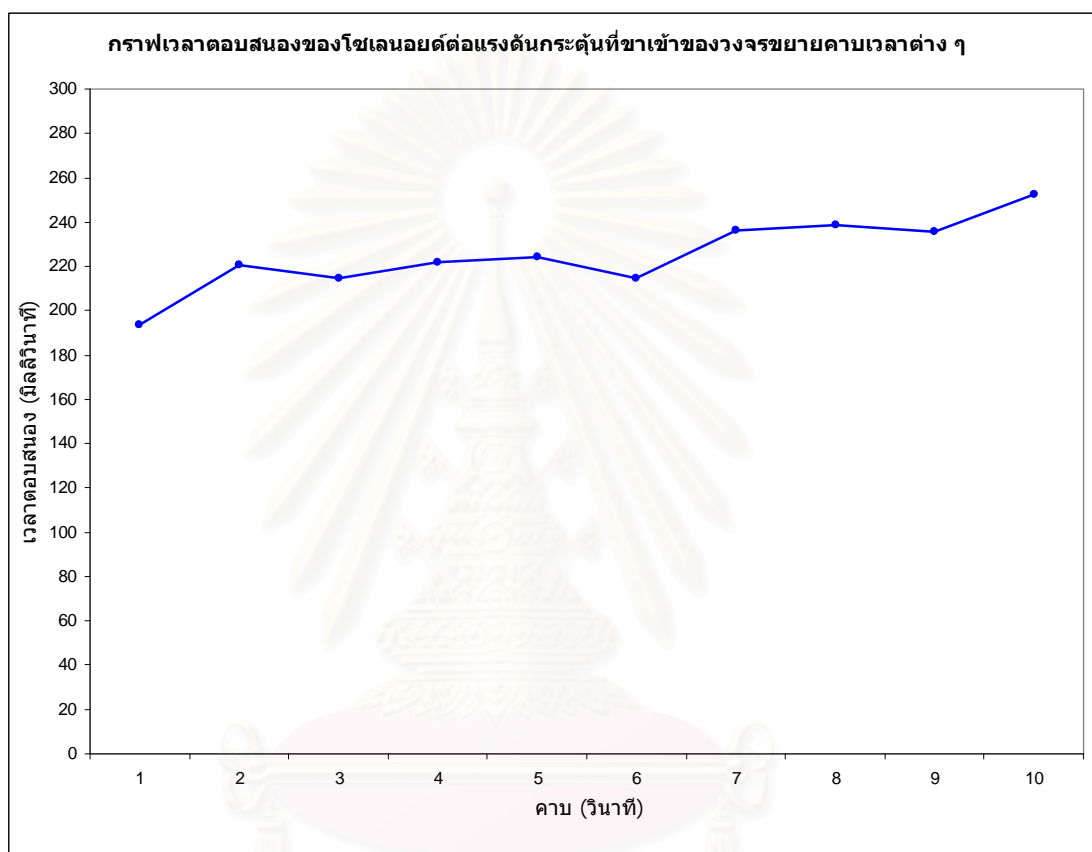


รูปที่ 4.20 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นไซน์มีคาบ 5 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



รูปที่ 4.21 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นไซน์มีคาบ 8 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

เมื่อนำผลต่างค่าของแรงดันขาเข้าวงจรขยายกับแรงยกมาเปรียบเทียบกับในคาบเวลาต่าง ๆ กัน จะได้เวลาตอบสนองของแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นไซน์ที่คาบเวลาต่างๆ ดังในรูปที่ 4.22

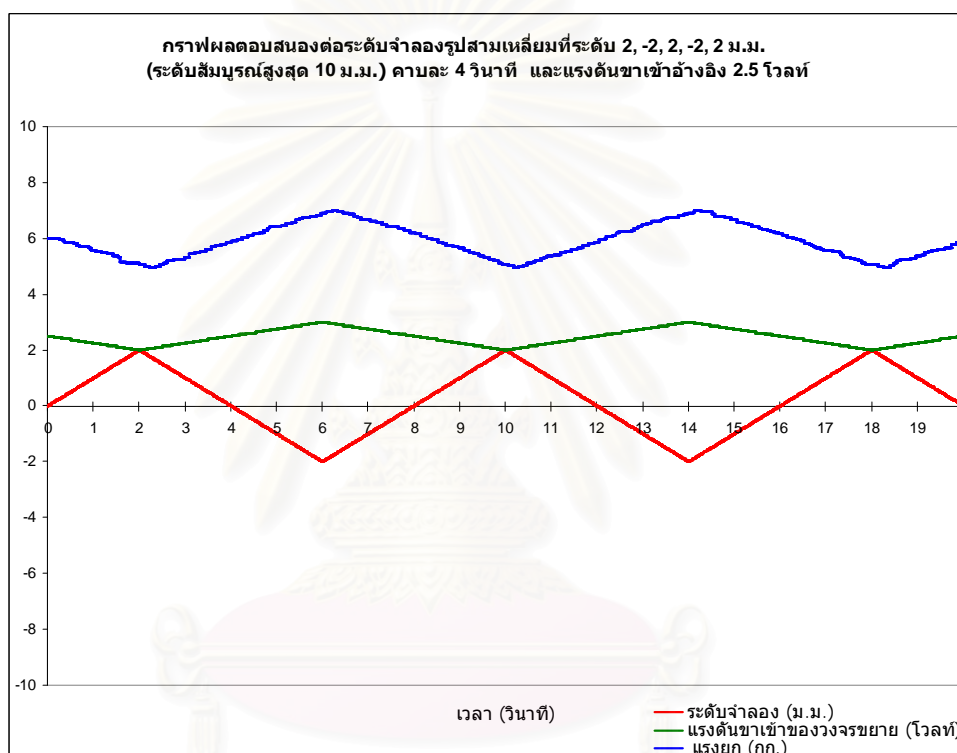


รูปที่ 4.22 กราฟเวลาตอบสนองของแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นไซน์ที่คาบเวลาต่างๆ โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่า เวลาตอบสนองของแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นไซน์ที่คาบเวลาต่างๆ จะมีค่า 225.26 มิลลิวินาที และแรงยกจะมีรูปคลื่นคล้ายรูปไซน์ตอบสนองกับรูปคลื่นที่มาจากเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาเข้าวงจรขยาย

4.5 การทดลองวัดแรงที่กระทำจากโซ่ลื่นยดในการหาเวลาตอบสนองของระบบเมื่อพื้นผิวจำลองเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีคาบเวลาคงที่

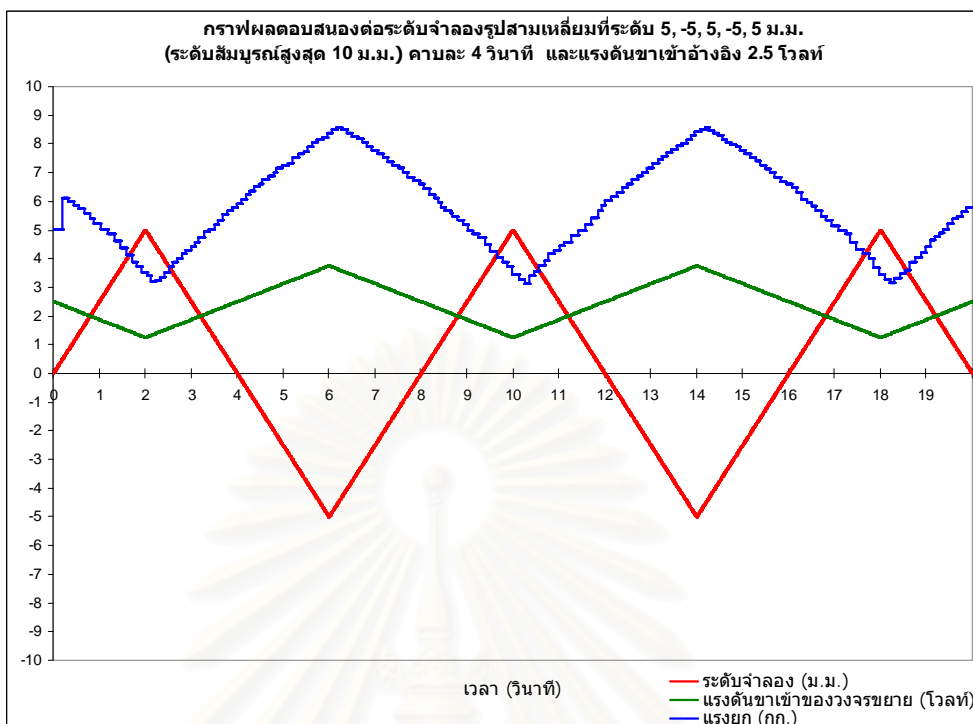
ในการทดลองนี้ จะใช้การจำลองพื้นผิวเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มีค่ายอดแตกต่างกัน ทั้งในด้านบวกและด้านลบ โดยที่คาบเวลาของรูปคลื่นสามเหลี่ยมคงที่ เพื่อหาเวลาตอบสนองเมื่อรูปคลื่นสามเหลี่ยมมีค่ายอดต่างๆ ที่สมมาตรกัน ผลการทดลองเมื่อค่ายอดของรูปคลื่นสามเหลี่ยมมีค่า (2, -2), (5, -5), (10, -10) ดังในรูปที่ 4.23, 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ



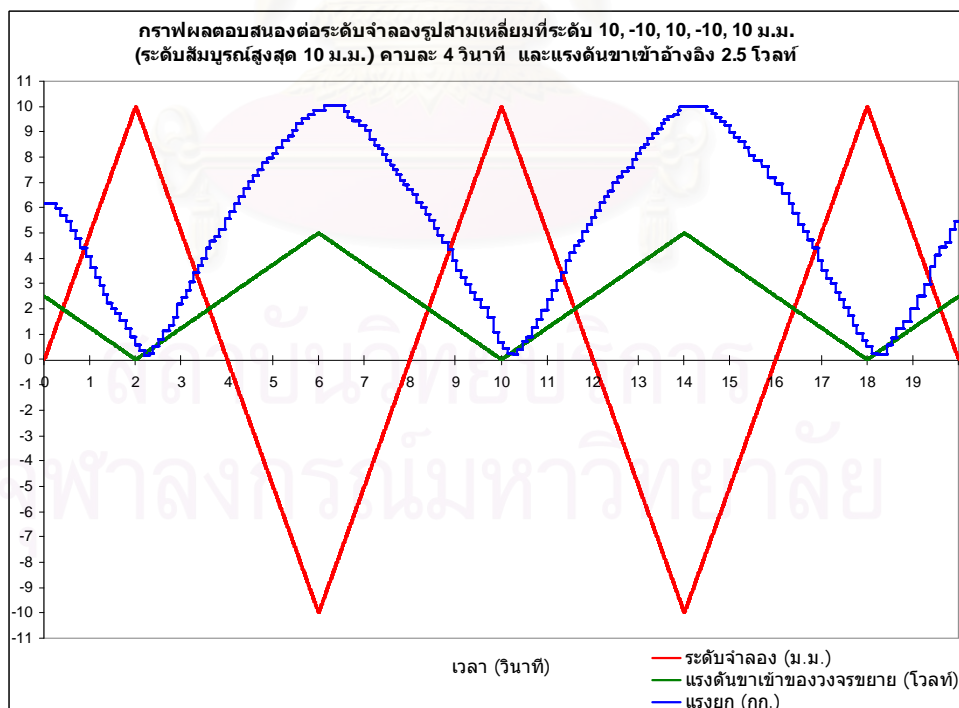
รูปที่ 4.23 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 2 และ -2 ม.ม.

มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

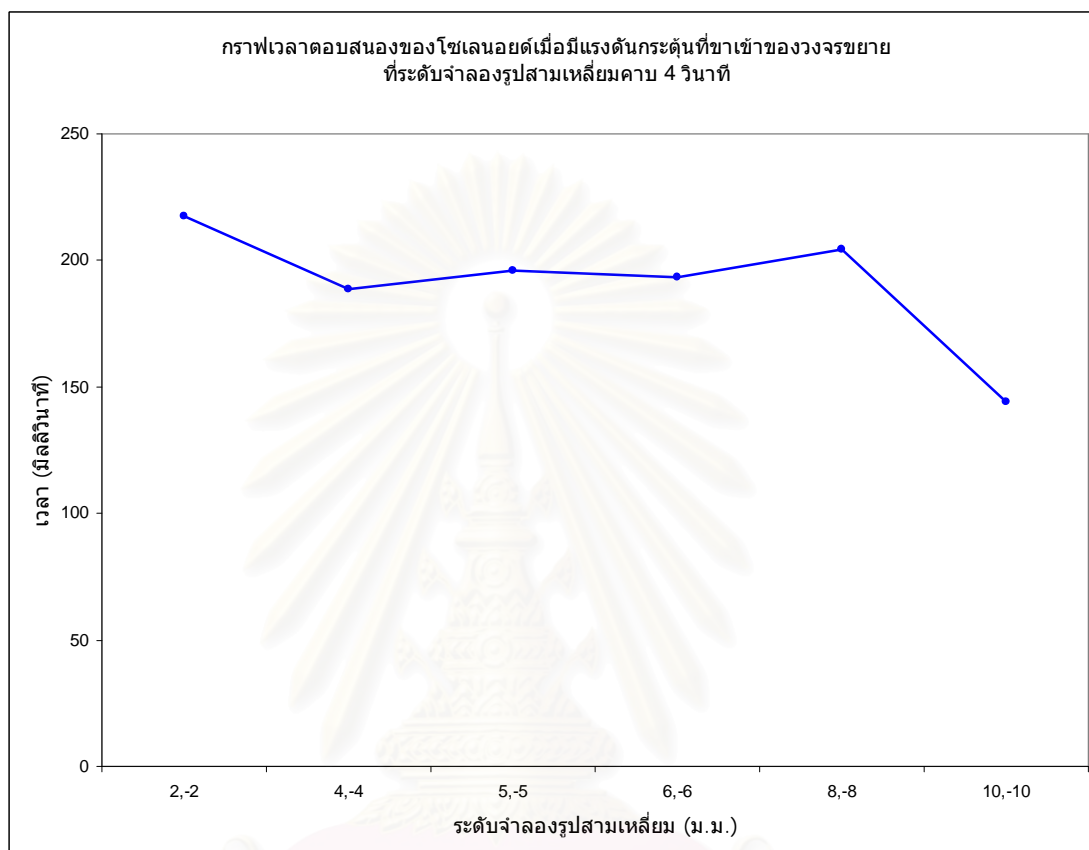


รูปที่ 4.24 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



รูปที่ 4.25 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 10 และ -10 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

เมื่อทำการทดลองที่รูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดต่างๆ กัน โดยคาบเวลา 4 วินาทีเท่ากัน จะได้กราฟเวลาตอบสนองของแรงยกต่อระดับจำลองรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดต่างๆ ดังในรูปที่ 4.26

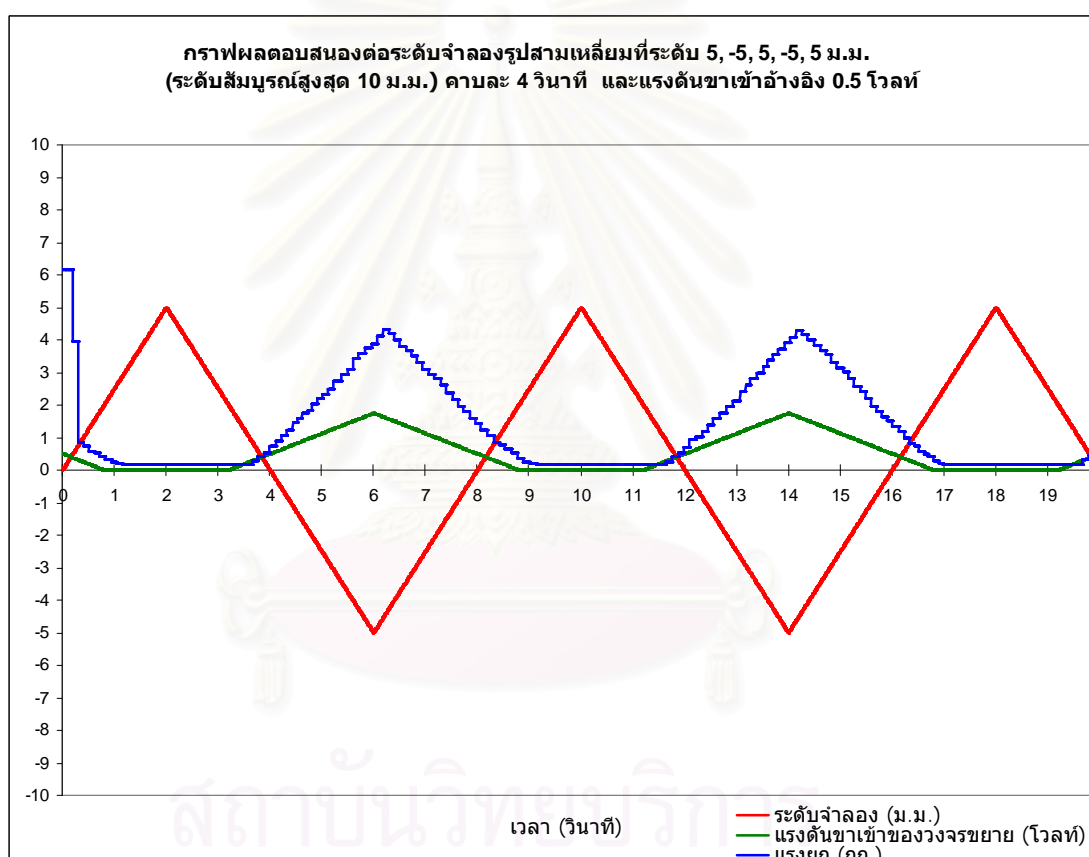


รูปที่ 4.26 เวลาตอบสนองของแรงยกต่อระดับจำลองรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีค่ายอดแตกต่างกันเมื่อคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสั้มบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

จากรูปที่ 4.26 เวลาตอบสนองของแรงยกต่อระดับจำลองรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีค่ายอดต่างๆ มีค่าเฉลี่ย 200 มิลลิวินาที แต่ที่ค่าของรูปคลื่นสามเหลี่ยม 10, -10 ม.ม. นั้น เวลาตอบสนองจะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้น เพราะที่แรงดันอ้างอิงขาเข้า 2.5 โวลต์ และระดับสั้มบูรณ์ที่ 10 ม.ม. ณ ตำแหน่งค่ายอดระดับจำลองที่มีค่า 10 ม.ม. พอคตินั้น จะให้แรงดันขาเข้าของวงจรถาย 5 โวลต์ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.25 ที่ยอดของกราฟแรงยกมีค่าคงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง เป็นผลทำให้เมื่อหาผลต่างระหว่างค่ายอดของแรงดันขาเข้าวงจรถายกับแรงยกมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้น และจะสังเกตได้ว่า แรงยกมีการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นไปในลักษณะเดียวกันกับรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าวงจรถาย

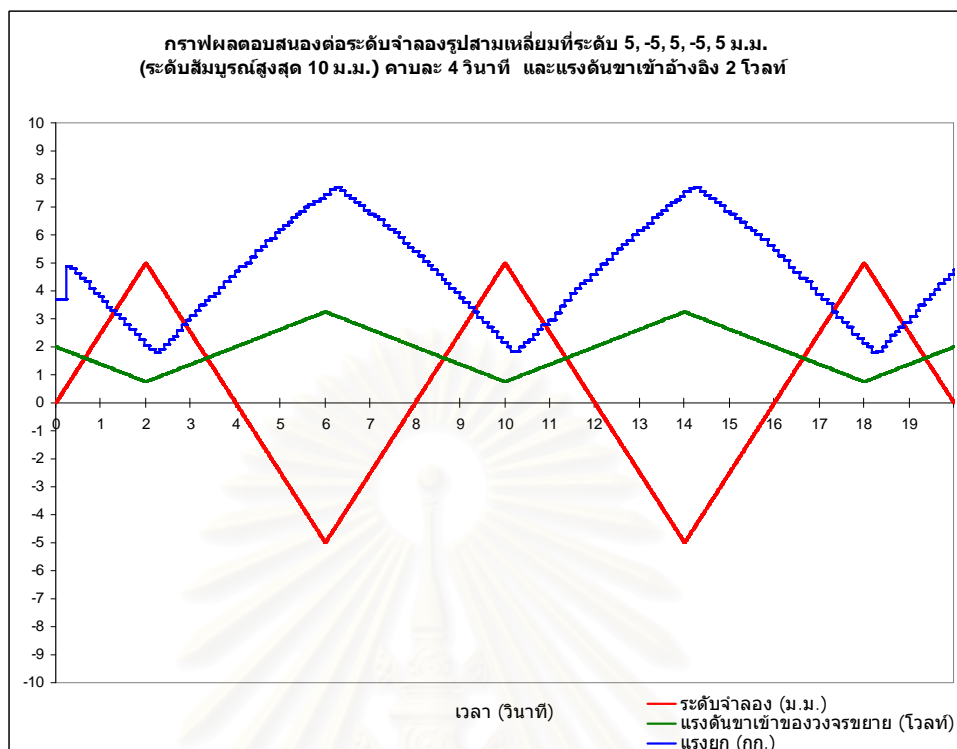
4.6 การทดลองวัดแรงที่กระทำจากโซเลนอยด์ในการหาเวลาตอบสนองของระบบเมื่อพื้นผิวจำลองเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีความคาบเวลาที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอ้างอิงค่าต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอ้างอิงค่าต่างๆ เพื่อดูระยะเวลาตอบสนองของระบบด้วยการจำลองพื้นผิวเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีความสมมาตร มีค่ายอดของสามเหลี่ยมที่ 5 และ -5 ม.ม. สลับไปมาและคาบ 4 วินาทีเท่ากัน จะได้ผลการตอบสนองของแรงยกเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอ้างอิง ดังตัวอย่างแสดงที่ระดับแรงดันอ้างอิงค่า 0.5, 2 และ 4.5 โวลต์ ดังในรูปที่ 4.27, 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ

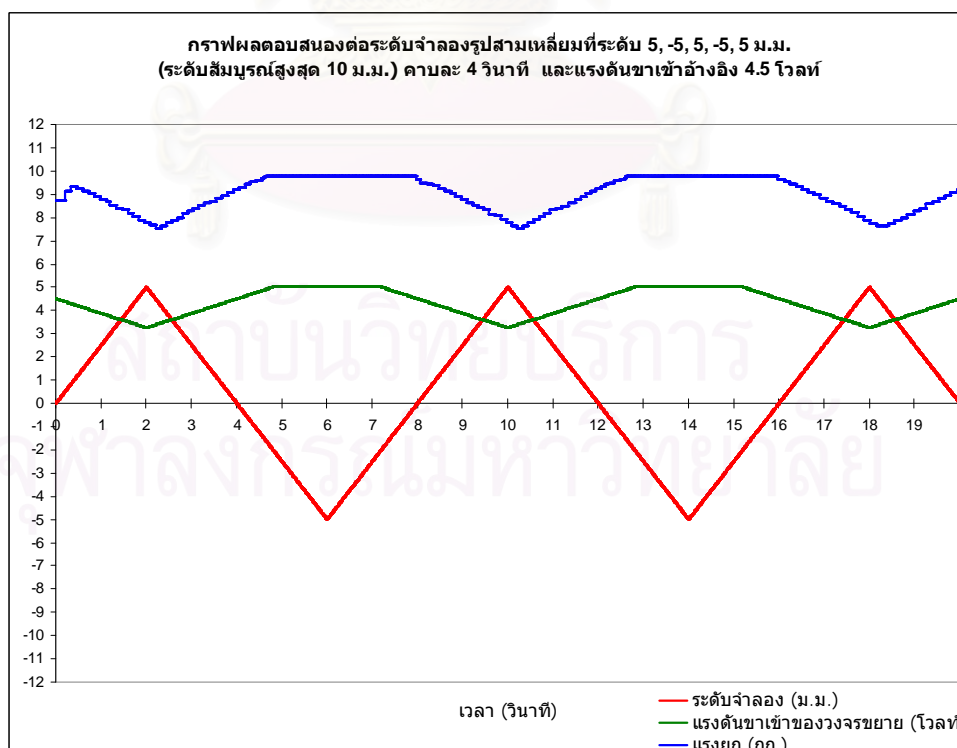


รูปที่ 4.27 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม.

มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 0.5 โวลต์และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



รูปที่ 4.28 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



รูปที่ 4.29 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 4.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

พิจารณารูปแบบของแรงดันขาเข้าของวงจรถยาย เมื่อมีค่าแรงดันอ้างอิงมีค่าต่างๆ จะเห็นว่า รูปกราฟของแรงดันขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลงไปในสามกรณี

กรณีแรก เมื่อแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่าต่ำ และรูปแบบของระดับจำลองมีส่วนที่ทำให้แรงดันขาเข้าของวงจรถยายมีค่าต่ำกว่า 0 โวลต์ หน่วยประมวลผลจะส่งชุดคำสั่งให้แรงดันขาเข้าของวงจรถยายมีค่า 0 โวลต์ เช่น เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 0.5 โวลต์ ที่ระดับสัญญาณที่ 10 ม.ม. สามารถคำนวณความสูงของโครงเครื่องอ้างอิงได้จากสมการโดยเทียบกับระดับอ้างอิงปกติที่ $V_0 = 2.5$ โวลต์

$$V_{out} = V_0 + \frac{2.5h}{10} = 0.5 = 2.5 + \frac{2.5h_{sus}}{10} \quad (4.2)$$

แก้สมการได้ค่าความสูงของระบบรองรับการสะท้อนมีการยุบไปที่ระยะ $h_{sus} = -8$ ม.ม. ระบบรองรับการสะท้อนสามารถจะรองรับการยุบได้อีก 2 ม.ม. และรองรับการยืดได้อีก 18 ม.ม. หรือพิจารณาได้ว่า โครงเครื่องอ้างอิงมีระยะต่ำลง 8 ม.ม. จากระดับโครงเครื่องปกติ ดังนั้นเมื่อระดับจำลองในช่วงวินาทีที่ 1 - 4, 8 - 12 และ 16 - 20 วินาที ที่มีช่วงของระดับจำลองที่ส่งผลให้ระบบรองรับการสะท้อนยุบเกินกว่า -10 ม.ม. ซึ่งเกินกว่าระยะการทำงานของระบบรองรับการสะท้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{out} = V_0 - \frac{2.5h}{10} = 0 = 2.5 - \frac{2.5h}{10} \quad (4.3)$$

จะได้ค่าความสูง $h = 2$ ม.ม. ดังนั้น หน่วยประมวลผลจะส่งแรงดันควบคุมให้ระบบรองรับการสะท้อนยุบมากที่สุดเท่าที่จะทำงานได้ นั่นก็คือยุบไปที่ระยะ -10 ม.ม. หรือค่าแรงดัน 0 โวลต์ เมื่อระดับจำลองมีค่ามากกว่า 2 ม.ม. ขึ้นไป

กรณีที่สอง เมื่อแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีการปรับเปลี่ยนค่า และรูปแบบของระดับจำลองมีส่วนที่ทำให้แรงดันขาเข้าของวงจรถยายมีค่าไม่เกิน 0 - 5 โวลต์ รูปแบบของแรงดันขาเข้าของวงจรถยายเสมือนมีการเลื่อนระดับแกนอ้างอิงปกติไปแต่รูปแบบแรงดันยังคงเดิม เช่น เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.28 จะเห็นว่า แรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2 โวลต์ ที่ระดับสัญญาณที่ 10 ม.ม. สามารถคำนวณความสูงของโครงเครื่องอ้างอิงได้จากสมการโดยเทียบกับระดับอ้างอิงปกติที่ $V_0 = 2.5$ โวลต์

$$V_{out} = V_0 + \frac{2.5h}{10} = 2 = 2.5 + \frac{2.5h_{sus}}{10} \quad (4.4)$$

แก้สมการได้ค่าความสูงของระบบรองรับการสะท้อนมีการยุบไปที่ระยะ $h_{sus} = -2$ ม.ม. ระบบรองรับการสะท้อนสามารถจะรองรับการยุบได้อีก 8 ม.ม. และรองรับการยืดได้อีก 12 ม.ม. หรือพิจารณาได้ว่า โครงเครื่องอ้างอิงมีระยะต่ำลง 2 ม.ม. จากระดับโครงเครื่องปกติ ดังนั้น เมื่อระดับ

จำลองรูปสามเหลี่ยมถูกป้อนเข้ามา แรงดันขาเข้าของวงจรถายที่ได้จากหน่วยประมวลผลก็จะมีลักษณะคล้ายกับรูปแบบแรงดันขาเข้าเมื่อแรงดันอ้างอิงขาเข้าที่ 2.5 โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิงปกติ แต่จะมีลักษณะของการเลื่อนแกนในแนวตั้งลงมาที่ -2 ม.ม. หรือที่แรงดัน 2 โวลต์นั่นเอง

กรณีที่สาม เมื่อแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่าสูง และรูปแบบของระดับจำลองมีส่วนที่ทำให้แรงดันขาเข้าของวงจรถายมีค่าสูงกว่า 5 โวลต์ หน่วยประมวลผลจะส่งชุดคำสั่งให้แรงดันขาเข้าของวงจรถายมีค่า 5 โวลต์ เช่น เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.29 จะเห็นว่า แรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 4.5 โวลต์ ที่ระดับสัญญาณที่ 10 ม.ม. สามารถคำนวณความสูงของโครงเครื่องอ้างอิงได้จากสมการโดยเทียบกับระดับอ้างอิงปกติที่ $V_0 = 2.5$ โวลต์

$$V_{out} = V_0 + \frac{2.5h}{10} = 4.5 = 2.5 + \frac{2.5h_{sus}}{10} \quad (4.5)$$

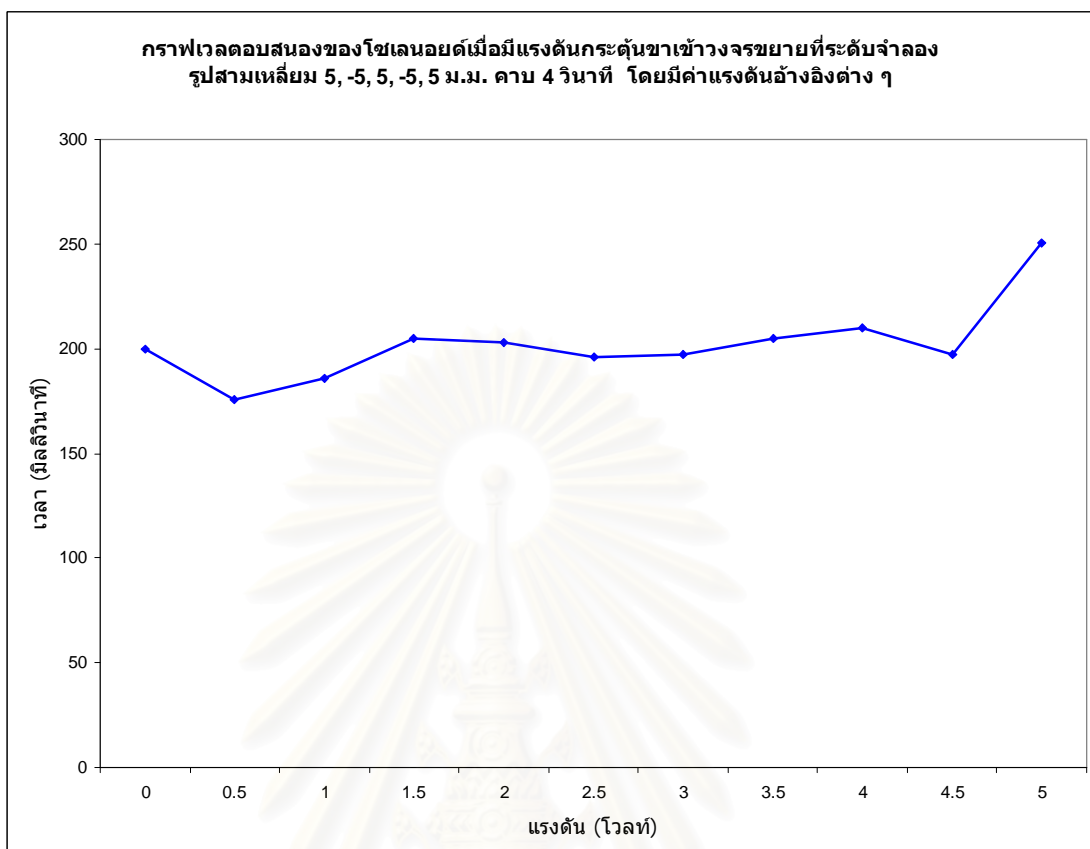
แก้สมการได้ค่าความสูงของระบบรองรับการสะท้อนมีการยึดไปที่ระยะ $h_{sus} = 8$ ม.ม. ระบบรองรับการสะท้อนสามารถจะรองรับการยุบได้อีก 18 ม.ม. และรองรับการยึดได้อีก 2 ม.ม. หรือพิจารณาได้ว่า โครงเครื่องอ้างอิงมีระยะสูงขึ้น 8 ม.ม. จากระดับโครงเครื่องปกติ ดังนั้น เมื่อระดับจำลองในช่วงวินาทีที่ 4 - 8, 12 - 16 วินาที ที่มีช่วงของระดับจำลองที่ส่งผลให้ระบบรองรับการสะท้อนยึดเกินกว่า 10 ม.ม. ซึ่งเกินกว่าระยะการทำงานของระบบรองรับการสะท้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{out} = V_0 - \frac{2.5h}{10} = 5 = 4.5 - \frac{2.5h}{10} \quad (4.6)$$

จะได้ค่าความสูง $h = -2$ ม.ม. ดังนั้น หน่วยประมวลผลจะส่งแรงดันควบคุมให้ระบบรองรับการสะท้อนยึดมากที่สุดเท่าที่จะทำงานได้ นั่นก็คือยึดไปที่ระยะ 10 ม.ม. หรือค่าแรงดัน 5 โวลต์ เมื่อระดับจำลองมีค่าน้อยกว่า -2 ม.ม. ลงไป

และเมื่อทำการทดลองวัดแรงในการยุบเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอ้างอิงขาเข้าค่าต่างๆ แล้ว นำเวลาตอบสนองการทำงานในแต่ละค่าแรงดันอ้างอิงมาแสดงได้ดังในรูปที่ 4.30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.30 เวลาตอบสนองของแรงยกต่อระดับจำลองรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่มีระดับแรงดันขาเข้าอ้างอิงแตกต่างกัน เมื่อคาบ 4 วินาที ค่ายอดของคลื่นสามเหลี่ยมเป็น 5, -5 ม.ม. สลับไปมา และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

จากรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่า เวลาตอบสนองเฉลี่ยของแรงยกต่อระดับจำลองรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีระดับแรงดันขาเข้าอ้างอิงแตกต่างกันจะมีค่า 202.26 มิลลิวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การออกแบบและสร้างระบบรองรับการสะท้อนแบบควบคุมด้วยไฟฟ้าแม่เหล็กนี้ ใช้คุณสมบัติของการยกด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร ที่มีการจัดวางให้เคลื่อนที่อยู่ภายในขดลวดไฟฟ้า โซเลนอยด์จะเป็นตัวควบคุมแรงของแม่เหล็กถาวรที่จะกระทำกับ โครงเครื่อง ผ่านการสั่งงานจากหน่วยประมวล ไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกเข้าสู่ส่วน วงจรขยายของโซเลนอยด์ หน่วยประมวลผลนั้นจะมีข้อมูลขาเข้าอยู่สองส่วนคือ ระดับความสูง – ต่ำของพื้นผิวจำลอง และแรงที่โซเลนอยด์กระทำกับ โครงเครื่อง ซึ่งก็คือแรงกดลงบน โหลด เซลล์นั่นเอง เมื่อมีระดับของผิวจำลองค่าต่างๆ เข้ามายังหน่วยประมวลผล หน่วยประมวลผลจะทำการคำนวณสัญญาณขาออกที่เหมาะสมกับระดับของผิวจำลองนั้นๆ

โดยในการใช้งานนั้น ระดับของผิวล่วงหน้าจะถูกส่งมายังหน่วยประมวลผล เพื่อให้หน่วยประมวลผลทำการคำนวณ และส่งสัญญาณให้โซเลนอยด์สามารถปรับเปลี่ยนระยะยึดหรือยุบของ โครงเครื่องสัมพันธ์กับระดับพื้นผิว ส่วนของโหลดเซลล์ทำหน้าที่วัดแรงที่โซเลนอยด์กระทำกับ โครงเครื่อง นั่นก็คือแรงที่พื้นผิวกดลงบน โหลดเซลล์นั่นเอง ในวิทยานิพนธ์นี้มีการคำนวณ ตำแหน่งและรูปแบบของแรง เพื่อกำหนดรายละเอียดต่างๆ ที่เหมาะสมกับขดลวดและแม่เหล็ก ถาวร ในการพัฒนาระบบรองรับการสะท้อนที่มีมาตราส่วนที่ใหญ่ขึ้น รวมไปถึงคุณสมบัติ ส่วนประกอบของอุปกรณ์ในระบบรองรับการสะท้อน เพื่อเลือกใช้ในการพัฒนาที่เหมาะสมต่อไป

ในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับแม่เหล็กถาวร เมื่อเคลื่อนที่ตาม แนวแกนของขดลวดไฟฟ้าที่พันขึ้น จะเห็นได้ว่า มีรูปแบบความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับการจำลอง และทฤษฎี การทดลองเพื่อหาเวลาตอบสนองของแรงที่โซเลนอยด์กระทำกับ โครงเครื่อง เมื่อมีการ สั่งงานจากหน่วยประมวลผล จะเห็นได้ว่า ระบบรองรับการสะท้อนมีการตอบสนองในช่วงเวลา ประมาณ 200 มิลลิวินาที ความสามารถในการปรับเปลี่ยนค่าของระดับแรงดันอ้างอิงเริ่มต้นของ ระบบรองรับการสะท้อน เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในการปรับเปลี่ยนระดับสูง - ต่ำของ โครงเครื่องได้ รูปแบบของแรงที่โซเลนอยด์กระทำกับ โครงเครื่องในการทดลอง จะมีลักษณะ ใกล้เคียงกับรูปแบบของแรงดันขาเข้าของวงจรขยาย ซึ่งเป็นชุดคำสั่งที่มาจากหน่วยประมวลผล ตามการเปลี่ยนแปลงของระดับจำลอง และมีการปรับเปลี่ยนเมื่อมีการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิง เริ่มต้น ซึ่งจะเป็นการกำหนดค่าแรงที่โซเลนอยด์กระทำกับ โครงเครื่องในตอนเริ่มต้นได้เป็นที่น่า พอใจ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการพัฒนาระบบรองรับการสะท้อนเพื่อให้สามารถทำงานได้ละเอียดยิ่งขึ้น อาจมีการปรับเปลี่ยนค่าความละเอียดของอุปกรณ์ในระบบ อาทิ ส่วนวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่มีความละเอียดมาก จะเป็นผลให้แรงของโซเลนอยด์ที่กระทำกับ โครงเครื่องมีการเปลี่ยนแปลงที่ราบรื่นยิ่งขึ้น ส่งผลให้การทำงานของระบบรองรับการสะท้อนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

2. ระบบรองรับการสะท้อนดังกล่าวอาจต้องใช้งานร่วมกับระบบรองรับการสะท้อนทางกลแบบเดิมด้วย เพื่อเป็นการสำรองการทำงานเมื่อระบบรองรับการสะท้อนแบบควบคุมด้วยแม่เหล็กไฟฟ้ามีการทำงานเกินขีดจำกัดของระยะการทำงาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ประสานพงษ์ หาเรือนชัย. งานเครื่องล่างรถยนต์. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2548.
- [2] เรือราชย์ บุญชะกุล, สมศักดิ์ นรสิงห์. ทฤษฎีช่างเทคนิคยานยนต์ เล่ม 1 โครงสร้าง ล้อ ยาง ระบบกันสะเทือน เล่ม 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2542.
- [3] Hiromichi Nozaki, Yoji Inagaki. Technology for measuring and diagnosing the damping force of shock absorbers and the constant of coil springs when mounted on a vehicle. JSAE Review 20 (1999) : 413 - 419.
- [4] ทีมเทคนิค บริษัท พิธานพาณิชย์ จำกัด. 2550. แบบของระบบรองรับและคุณสมบัติ [Online]. แหล่งที่มา: <http://www.phithan-toyota.com>[15 มิถุนายน 2551]
- [5] รศ.ธีระยุทธ สุวรรณประทีป. เทคนิคยานยนต์. กรุงเทพฯ : หจก. นำอักษรการพิมพ์, 2539.
- [6] Park Kyihwan, Choi kee - Bong, Kim Soo - Hyun, Kwak Yoon Keun. Magnetic levitated High Precision Positioning System Based on Antagonistic Mechanism. IEEE Transactions on Magnetics 32, 1 (1996) : 208 - 219.
- [7] David J.Griffith. Introduction to Electrodynamics. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1989.
- [8] R.K. Wangsnees. Electromagnetic Fields. New York : John Wiley & Sons, 1979.
- [9] Kee - Bong Choi, Soo Hyun Kim, Byung - Wook Choi. Moving - magnet type precision miniature platform for fine positioning and compliant motion. Mechatronics 11 (2001) : 921 - 937.
- [10] J.H. Tarn, K.Y. Juang. Time - Delay Control of Magnetic Levitated Linear Positioning System. Proceedings of the American Control Conference (June 1994). 1948 - 1951.
- [11] Milica B. Naumovic'. Modeling of a Didactic Magnetic Levitation System for Control Education. TELSIKS 2003 (October 2003) : 783 - 786.

- [12] G. R. Polgreen. The ideal magnet - fully controllable permanent magnets for power and transport. Electronics & Power (Jan. '71) : 31 - 34.
- [13] David L. Atherton. Maglev Using Permanent Magnets. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS MAG – 16, 1 (January 1980).
- [14] MASTER MAGNETICS, INC. RARE EARTH MAGNETS [Online]. Available from : <http://www.magnetsource.com>[2008, January 15]
- [15] ชีรบุญย์ หล่อวิเชียรรุ่ง, อรรถพล บุญยะ โภคา, ชัยวัฒน์ ลีมพรจิตรวิไล. เรียนรู้และปฏิบัติ การระบบค้ำเสาเอกควิซขึ้นอย่างง่าย. กรุงเทพฯ ฯ : บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด.
- [16] Mettler - Toledo Ltd. MT1241 - aluminum, potted [Online]. Available from : <http://uk.mt.com/mt>[2007, January 28]
- [17] รศ.ดร.วรวงศ์ ตั้งศรีรัตน์. เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ ในระบบการวัดและระบบควบคุม. กรุงเทพฯ ฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2548.
- [18] วิศรุต ศรีรัตน์. เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ ฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2550.
- [19] Robert A. Booty. 2005. Loudspeaker Passive Crossover Choke Coil Calculator [Online]. Available from : <http://home.new.rr.com>[2006, July 17]
- [20] Allied's Electronics Data Handbook, (h.p.): 1962.
- [21] Robert Bernard. How to Design and Construct Passive Crossovers. 1980.

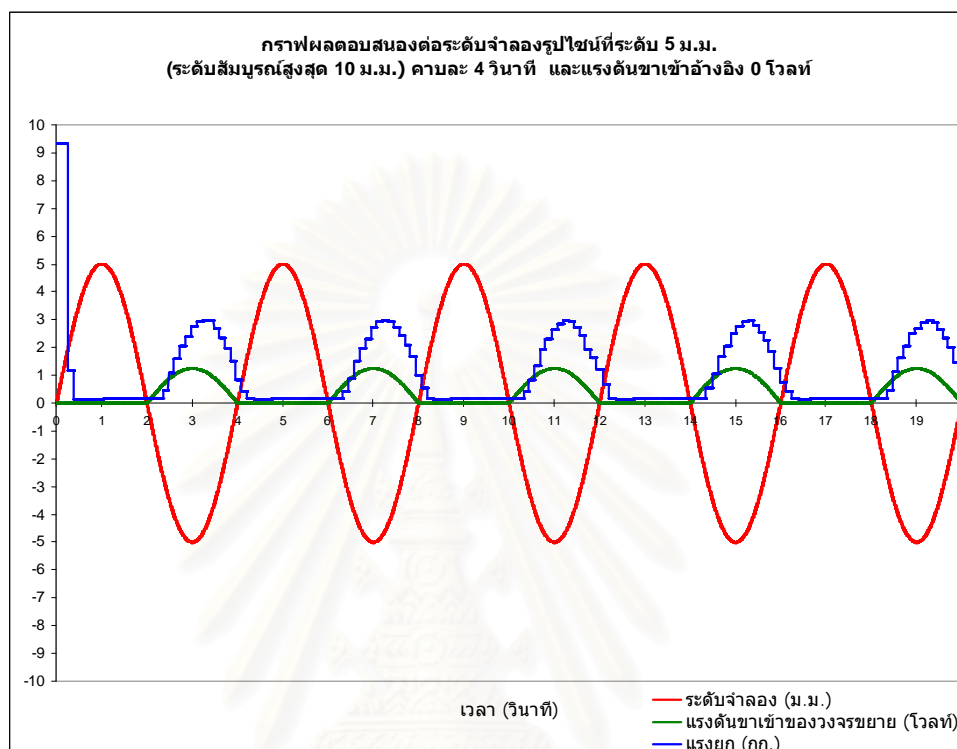


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

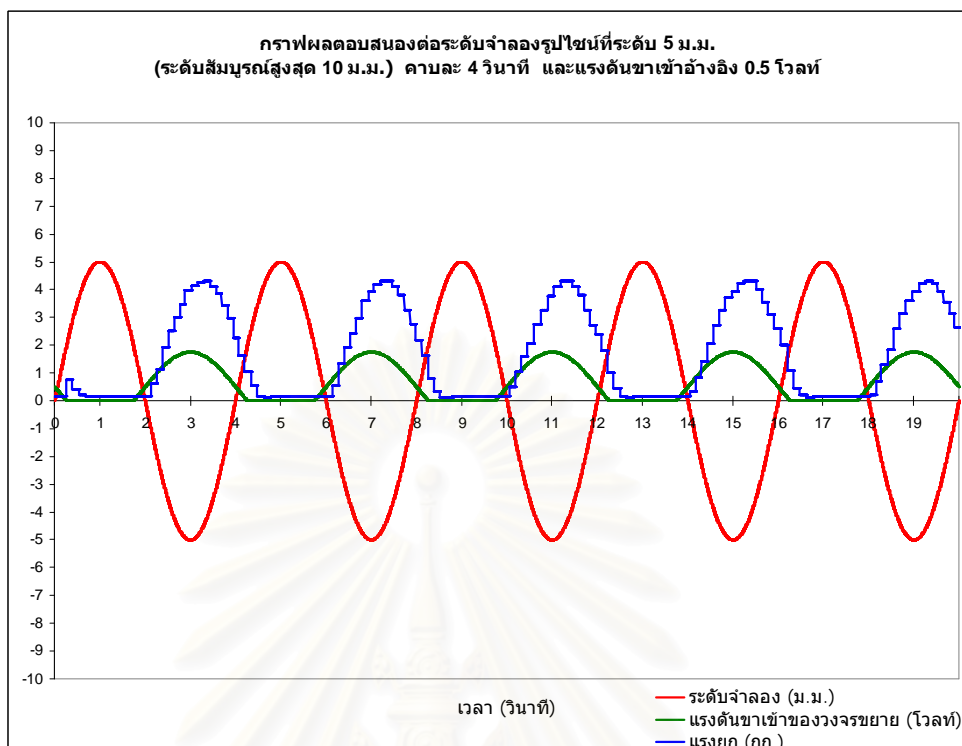
ภาคผนวก ก

กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองมีรูปคลื่น ค่ายอด และแรงดันอ้างอิงขาเข้าต่างๆ กัน

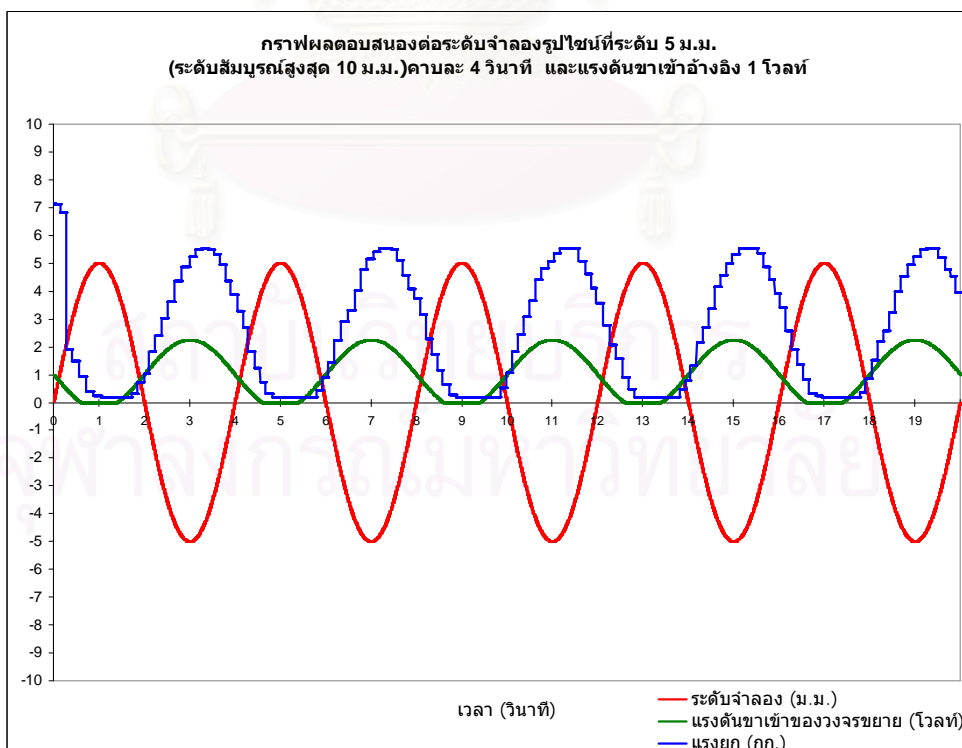


รูปที่ ก.1 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์มีคาบ 4 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 0 โวลต์ และระดับสับนอร์มที่ 10 ม.ม.

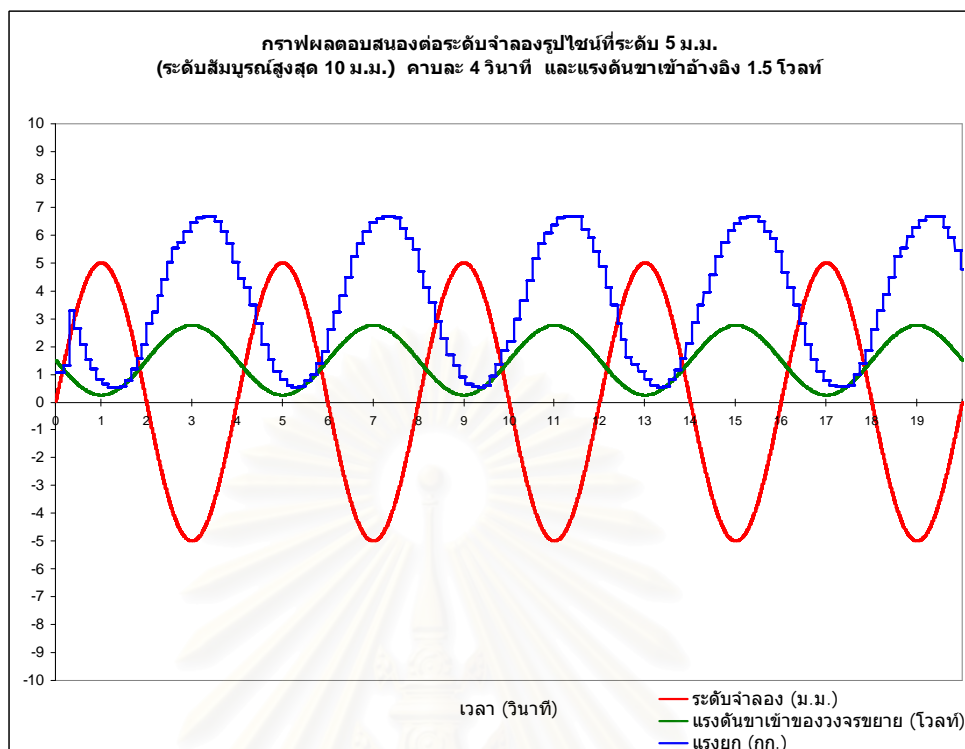
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



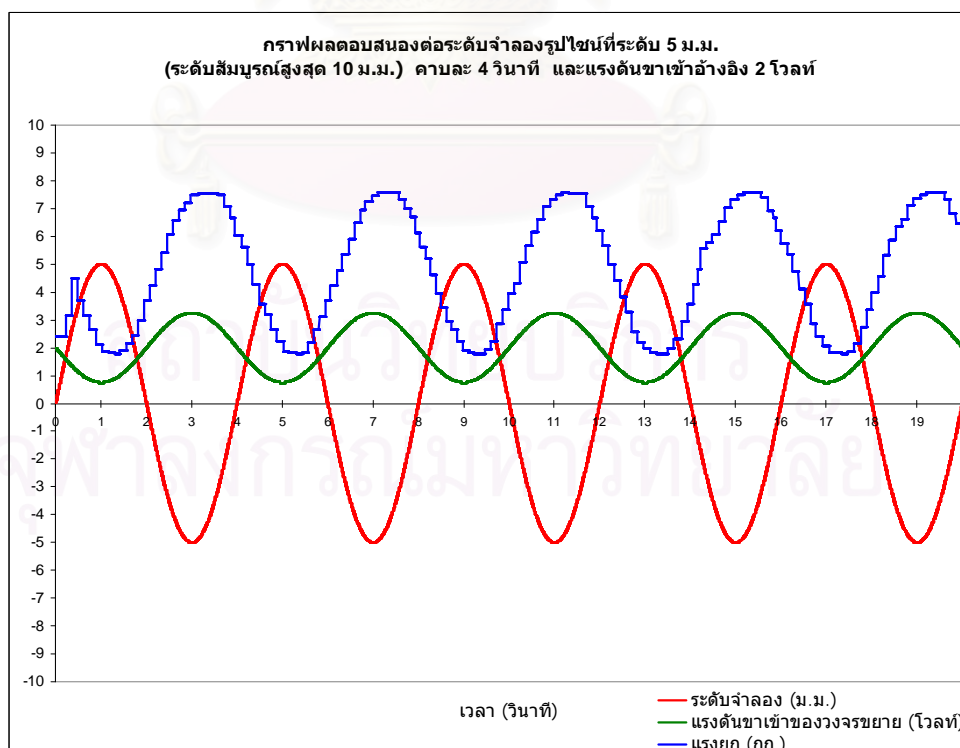
รูปที่ ก.2 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์มีคาบ 4 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 0.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



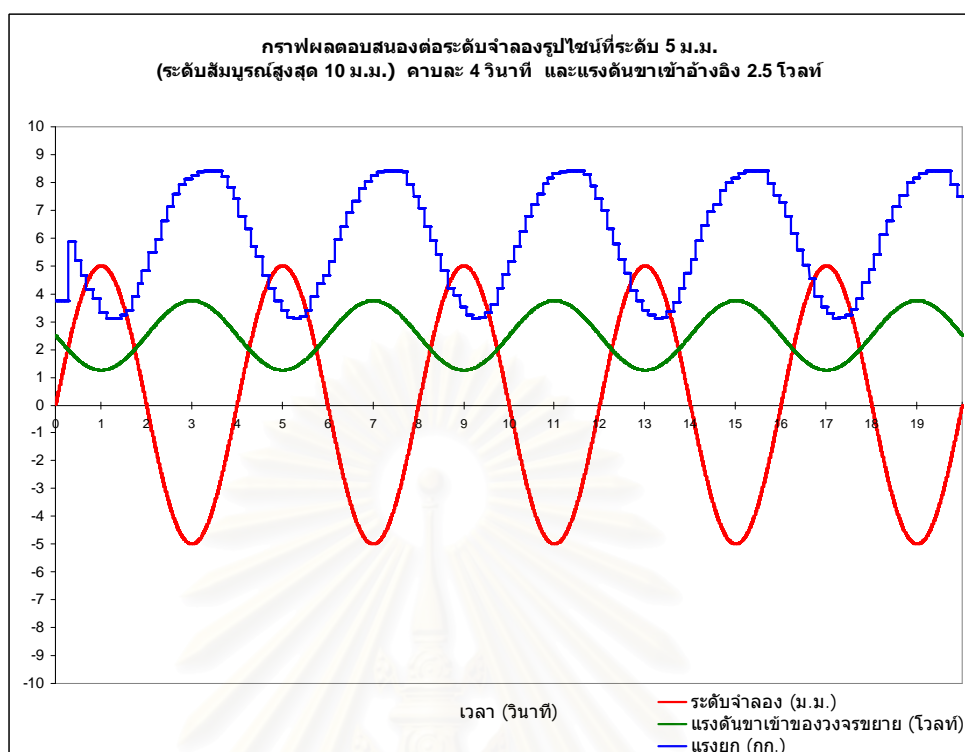
รูปที่ ก.3 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์มีคาบ 4 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 1 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



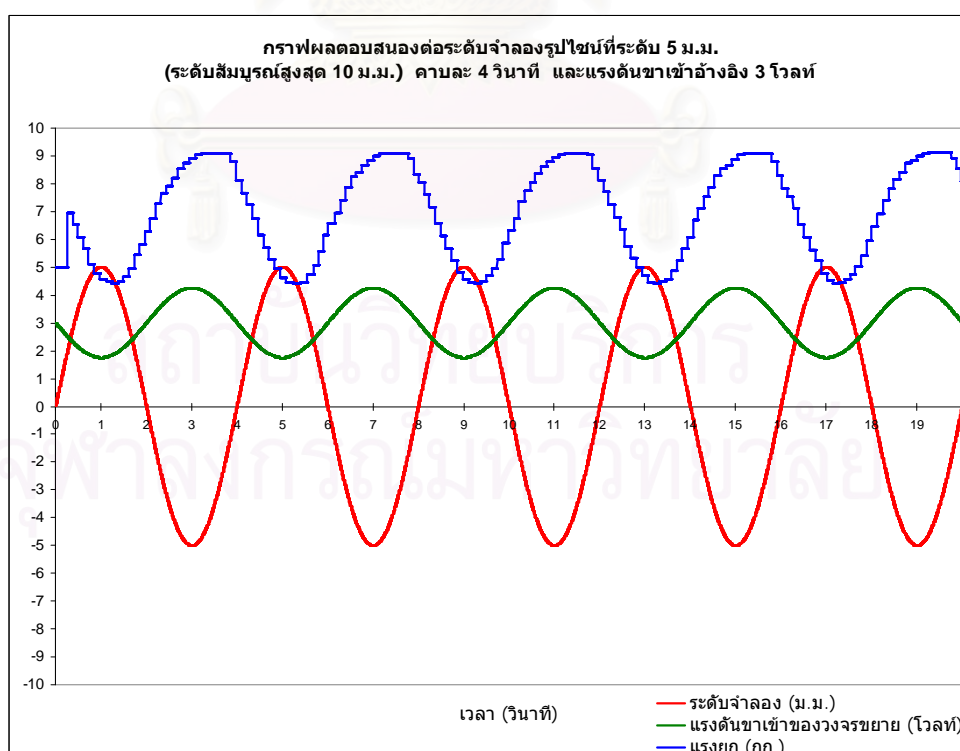
รูปที่ ก.4 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์มีคาบ 4 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 1.5 โวลต์ และระดับสั้มบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



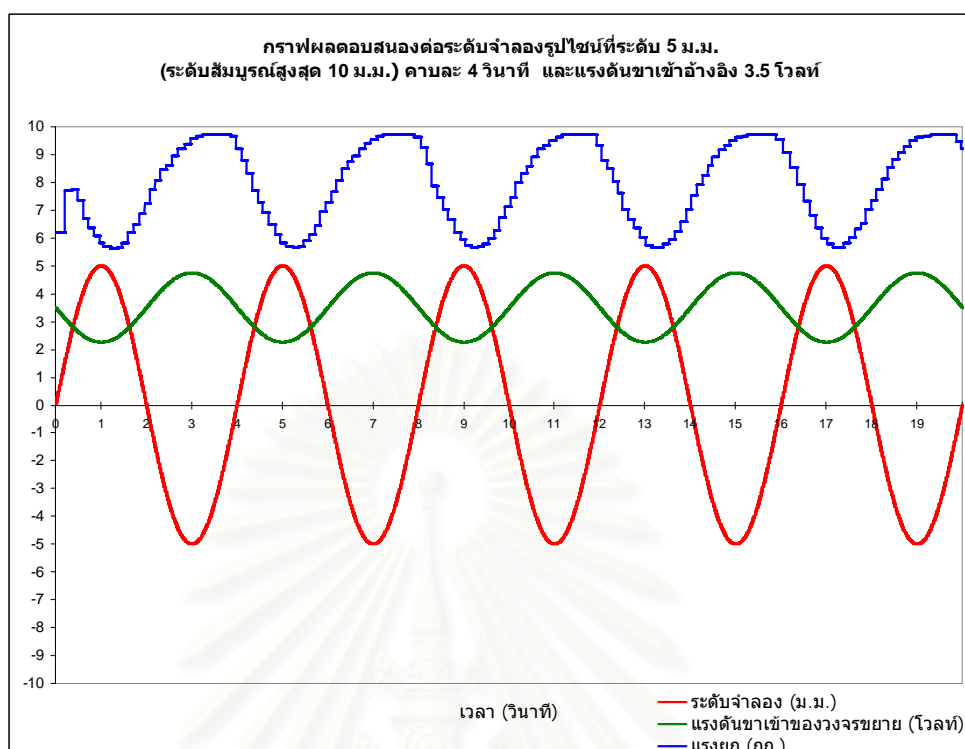
รูปที่ ก.5 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์มีคาบ 4 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2 โวลต์ และระดับสั้มบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



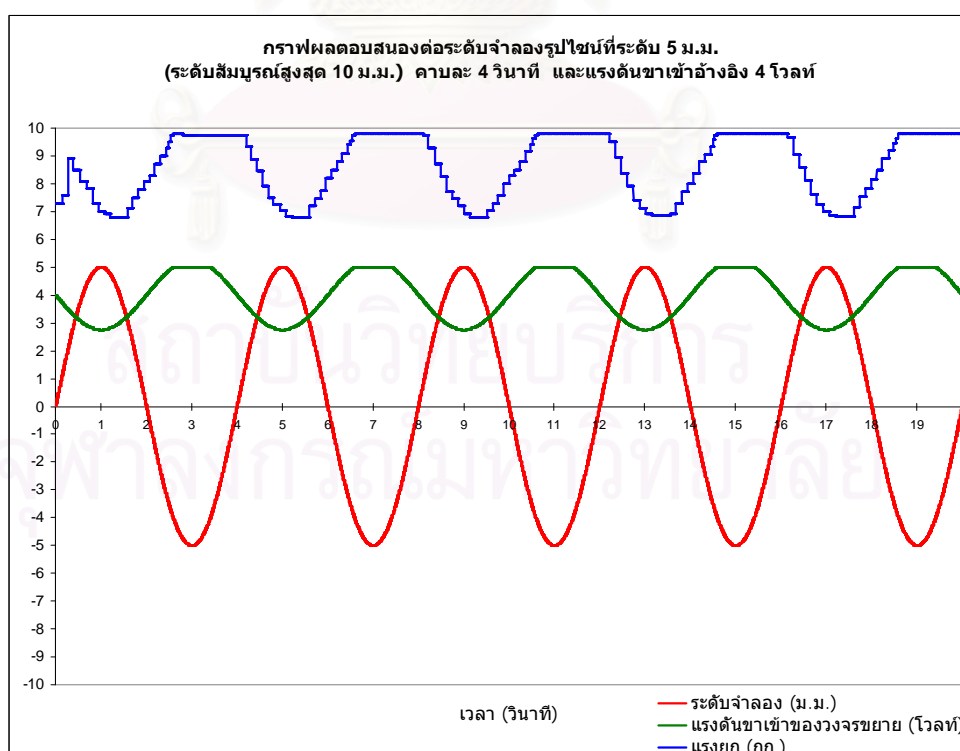
รูปที่ ก.6 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์มีคาบ 4 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม.
โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสั้มบุรกดที่ 10 ม.ม.



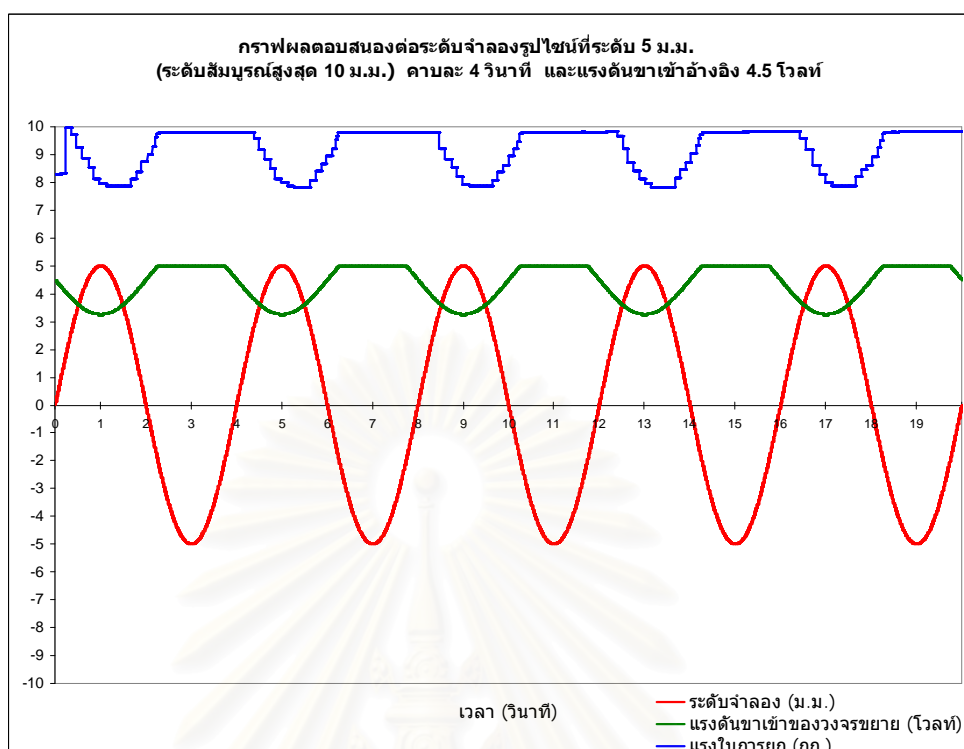
รูปที่ ก.7 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์มีคาบ 4 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม.
โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 3 โวลต์ และระดับสั้มบุรกดที่ 10 ม.ม.



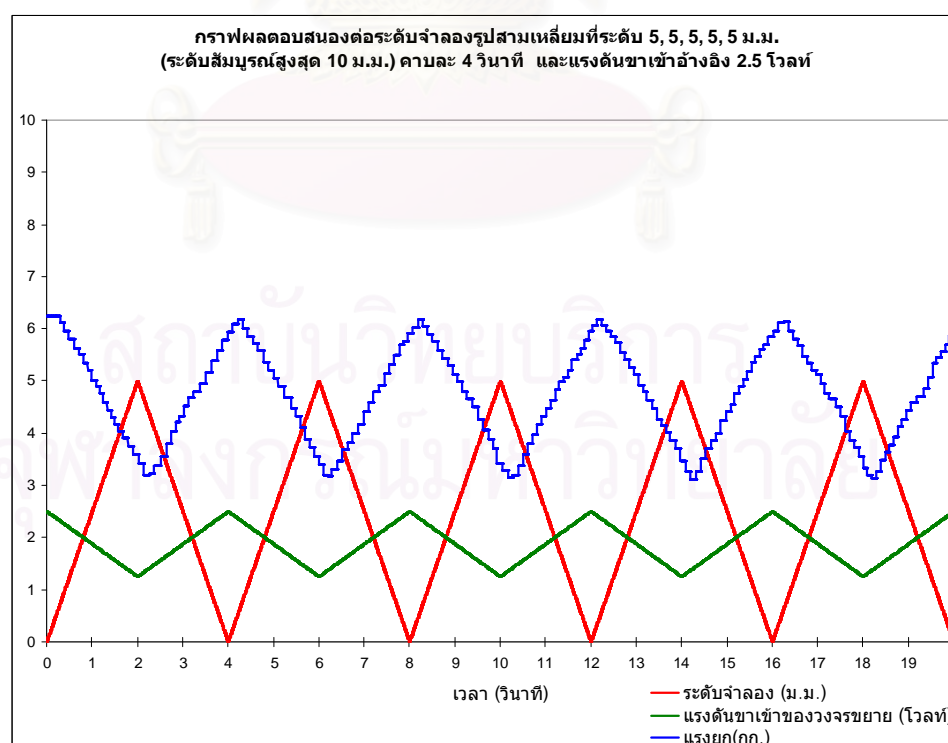
รูปที่ ก.8 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์มีคาบ 4 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม.
โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 3.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



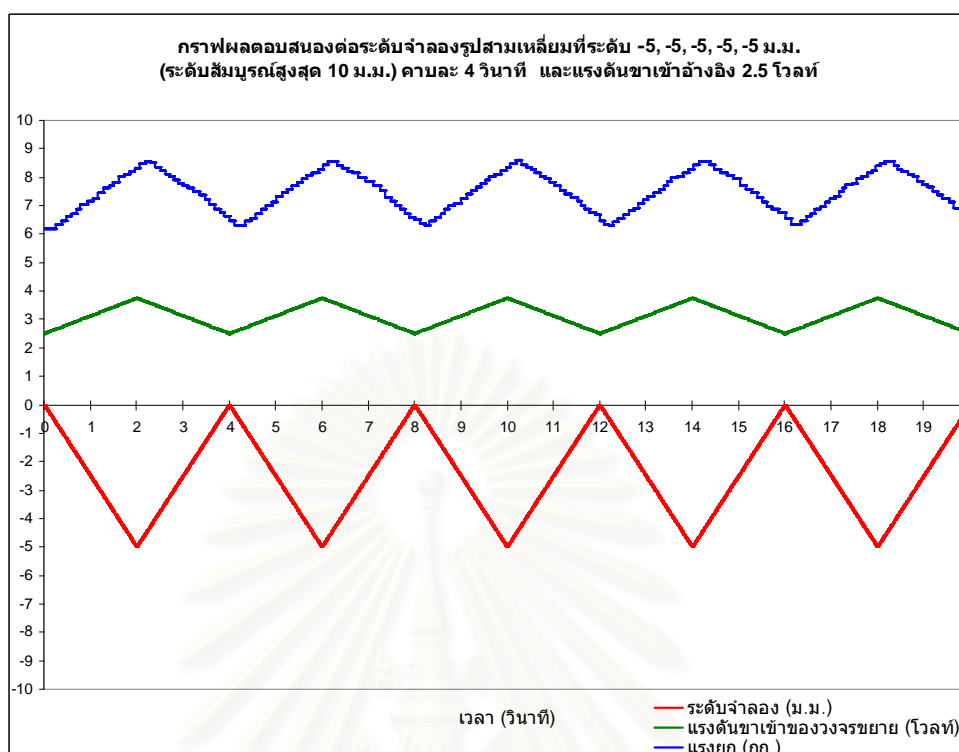
รูปที่ ก.9 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์มีคาบ 4 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม.
โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 4 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



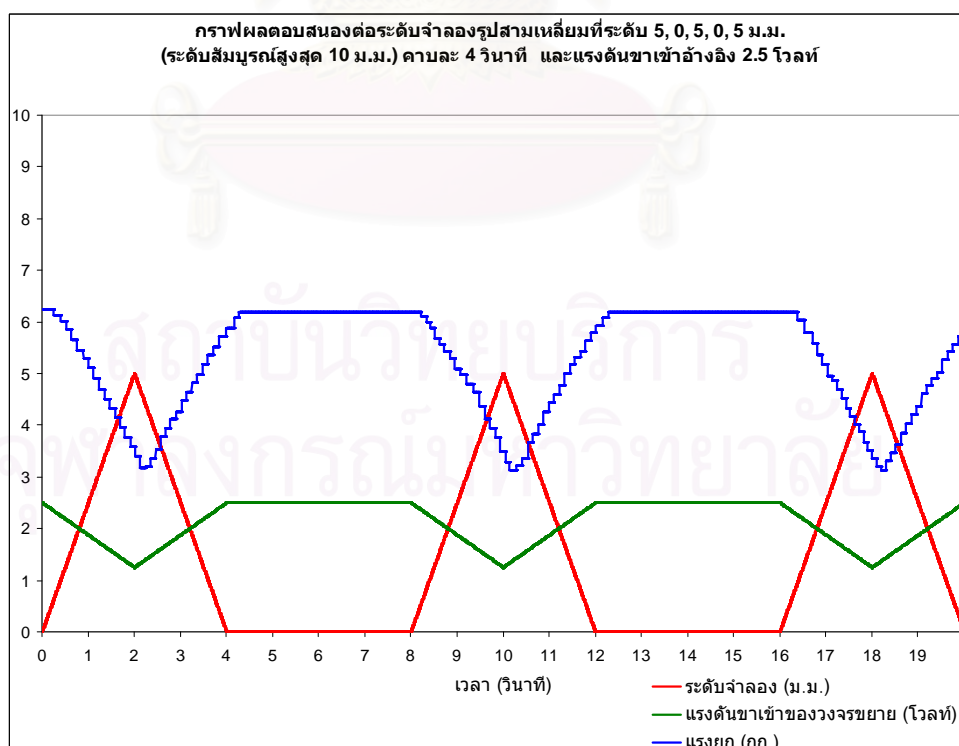
รูปที่ ก.10 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปไซน์มีคาบ 4 วินาที มีค่ายอดที่ 5 และ -5 ม.ม. โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 4.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



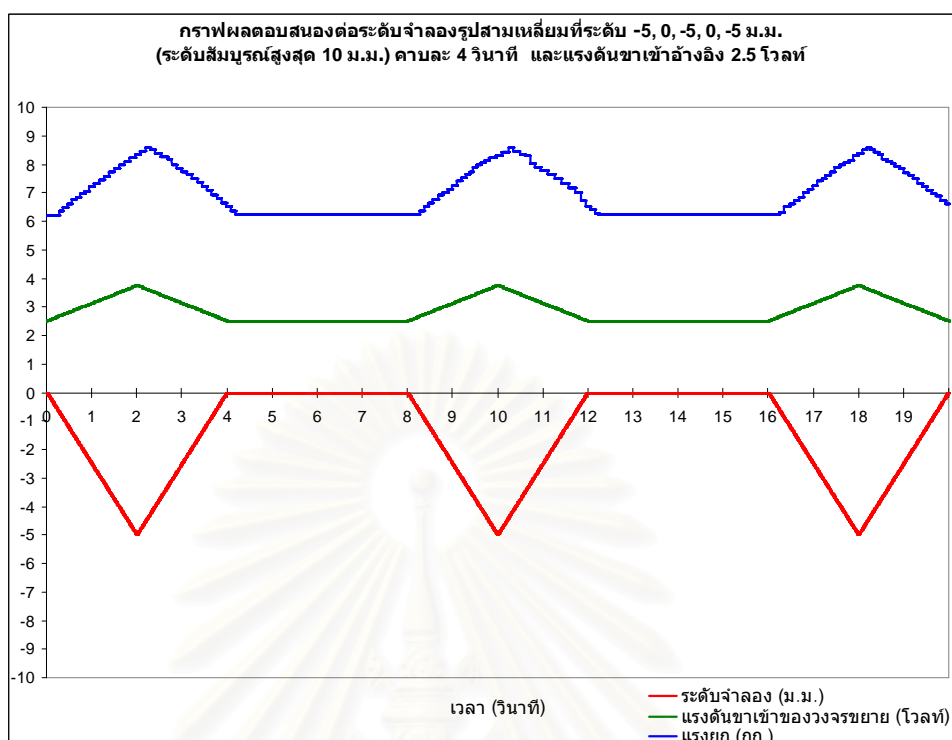
รูปที่ ก.11 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 5, 5, 5, 5, 5 ม.ม. มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



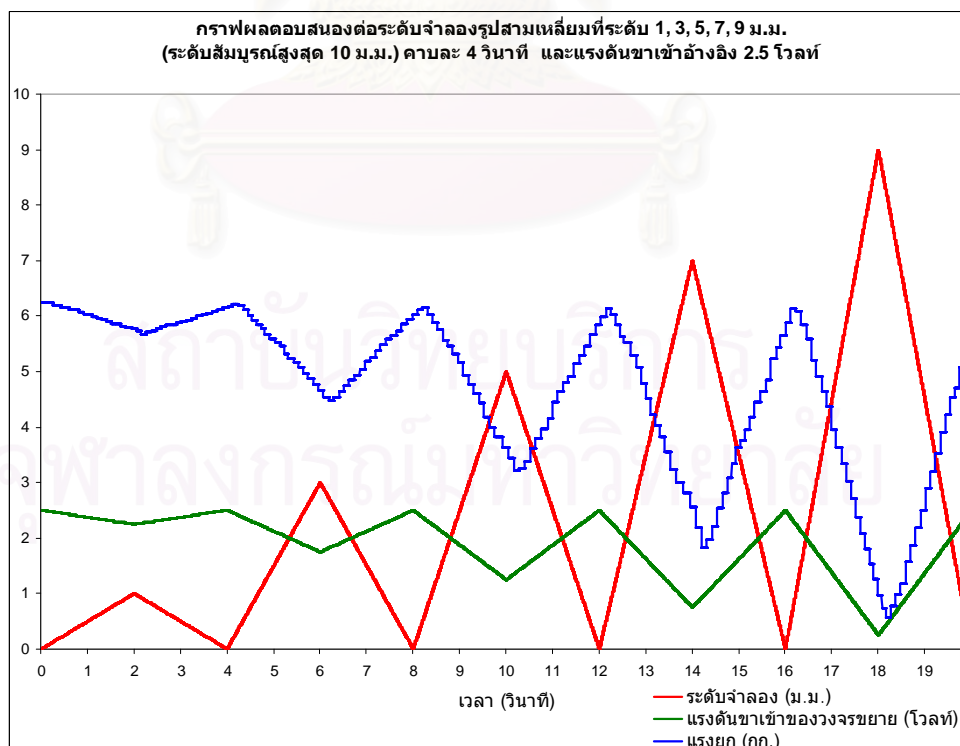
รูปที่ ก.12 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ -5, -5, -5, -5, -5 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสั้มบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



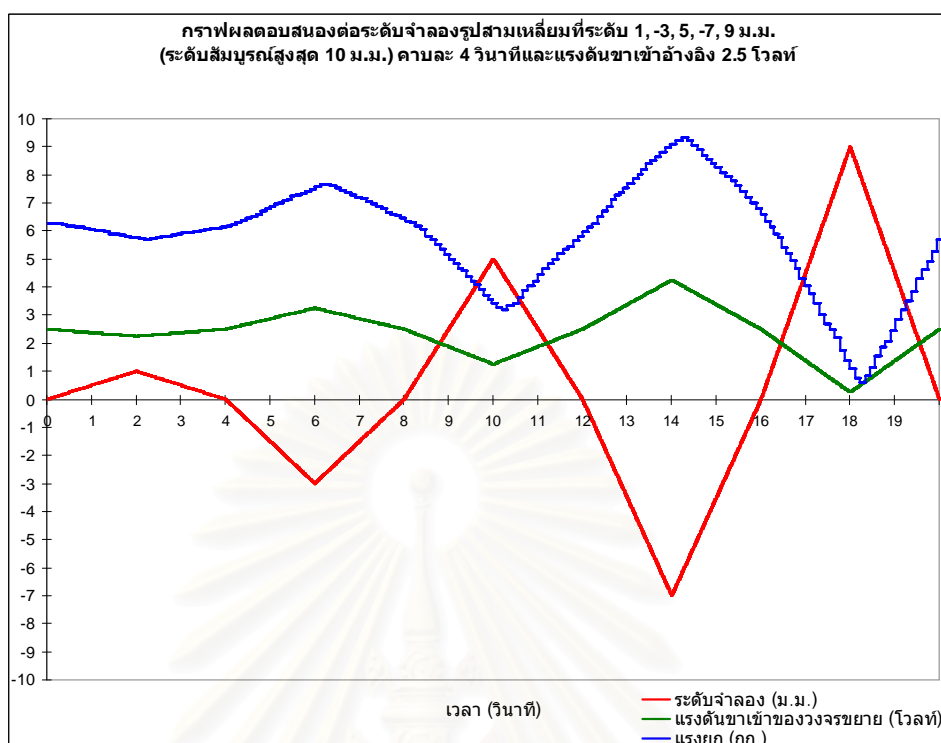
รูปที่ ก.13 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 5, 0, 5, 0, 5 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสั้มบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



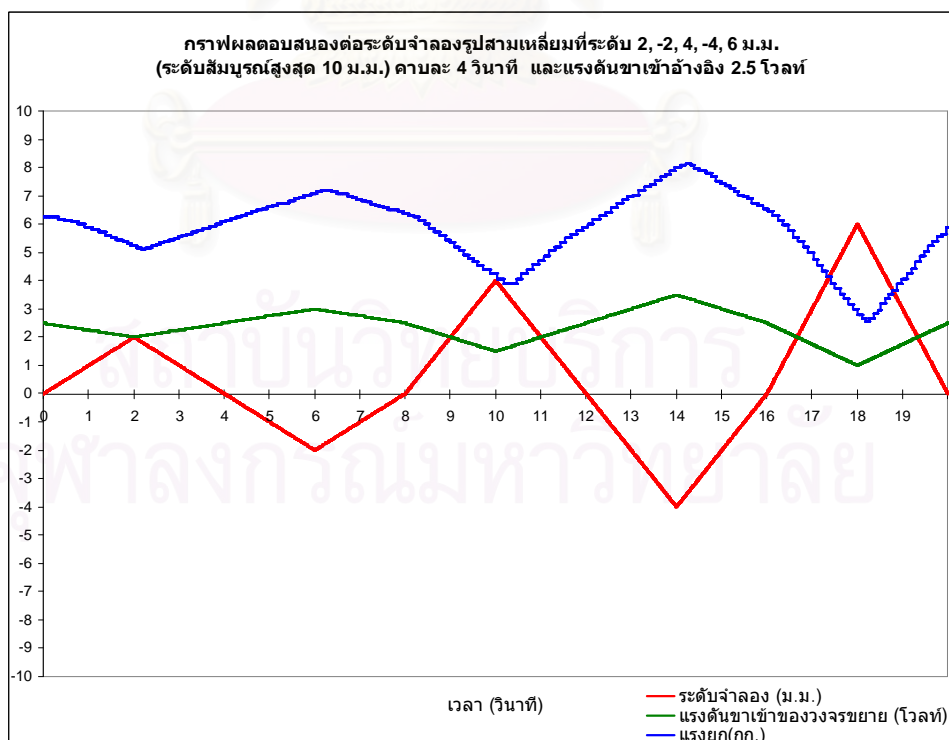
รูปที่ ก.14 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ -5, 0, -5, 0, -5 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



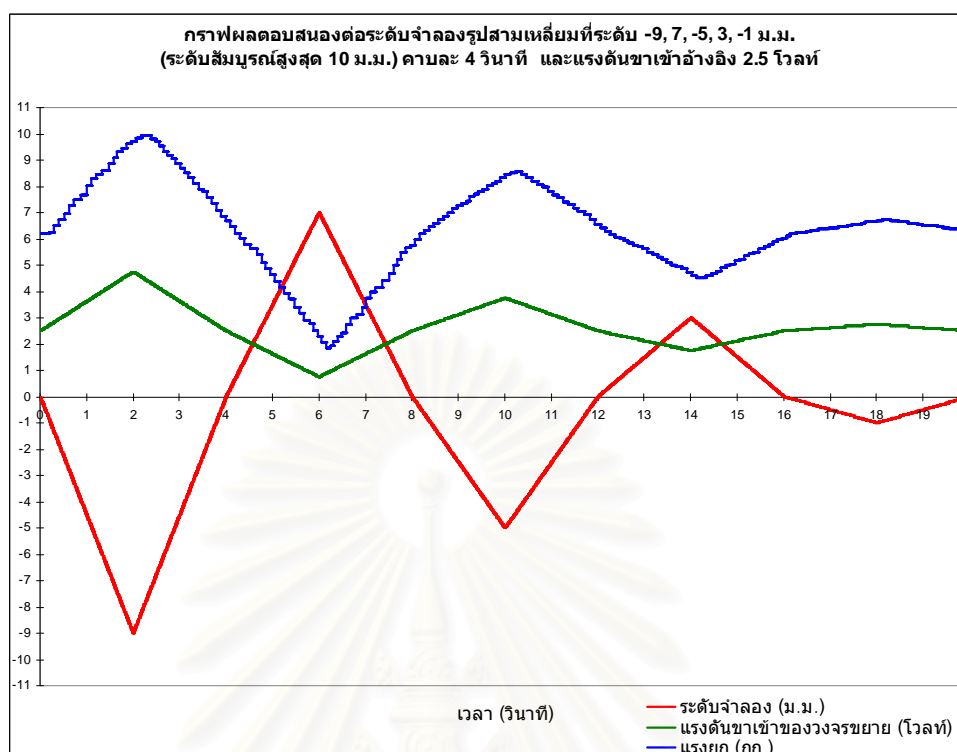
รูปที่ ก.15 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 1, 3, 5, 7, 9 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



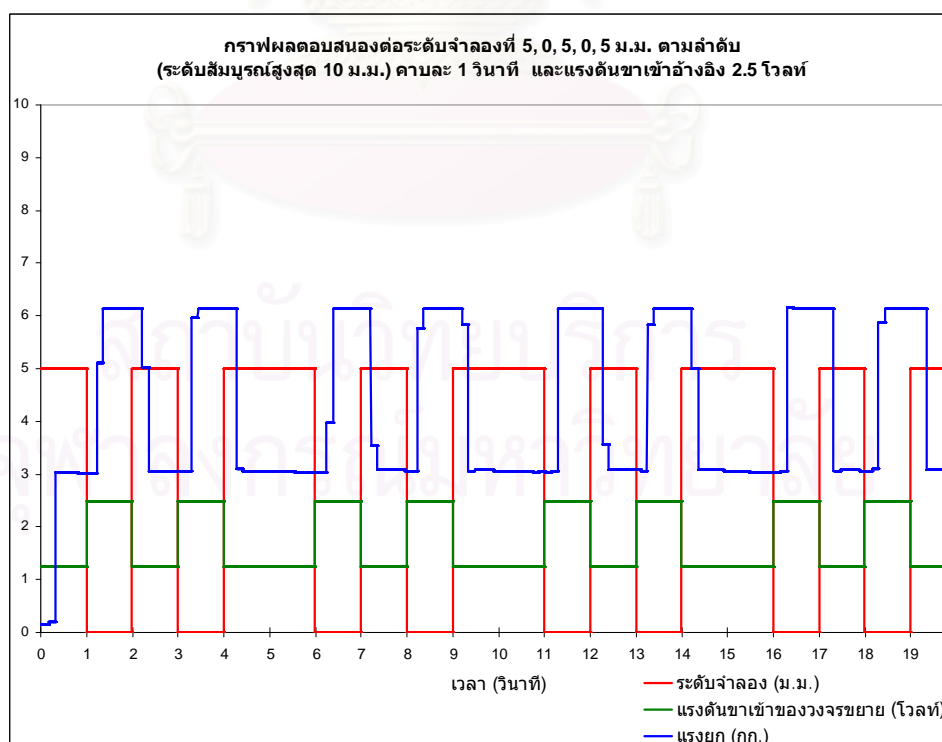
รูปที่ ก.16 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 1, -3, 5, -7, 9 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



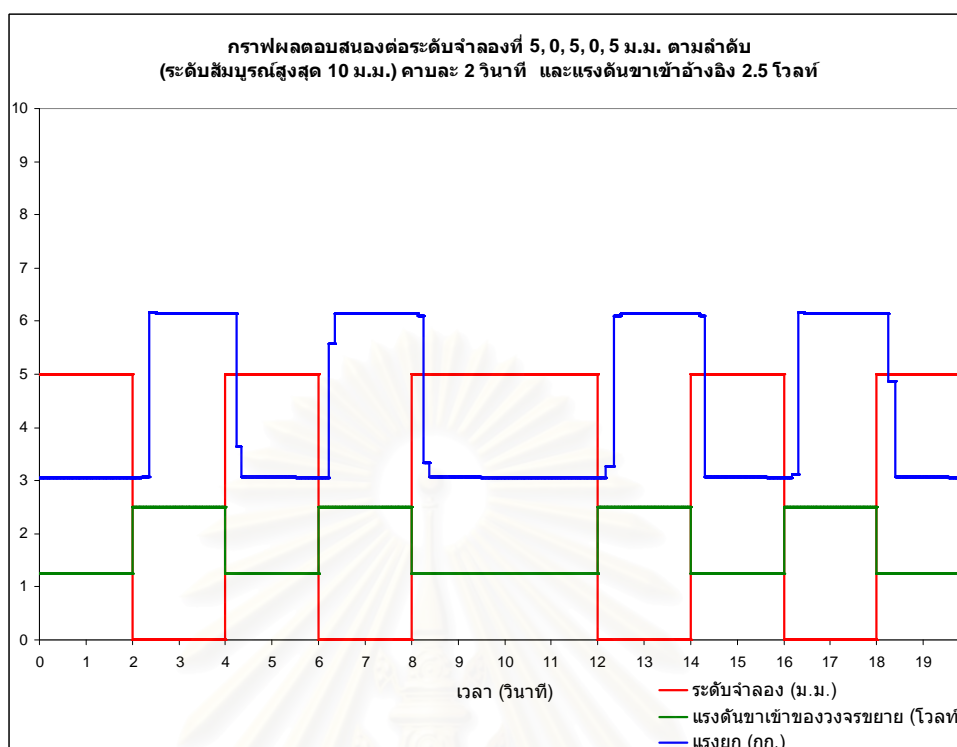
รูปที่ ก.17 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ 2, -2, 4, -4, 6 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



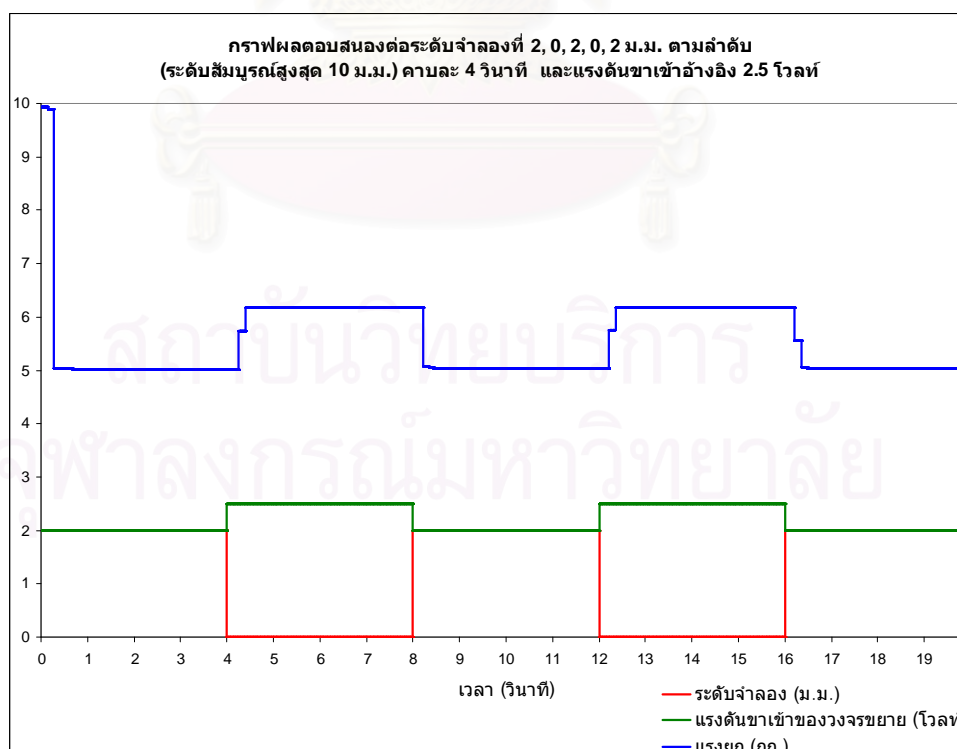
รูปที่ ก.18 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอดที่ -9, 7, -5, 3, -1 ม.ม.
มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



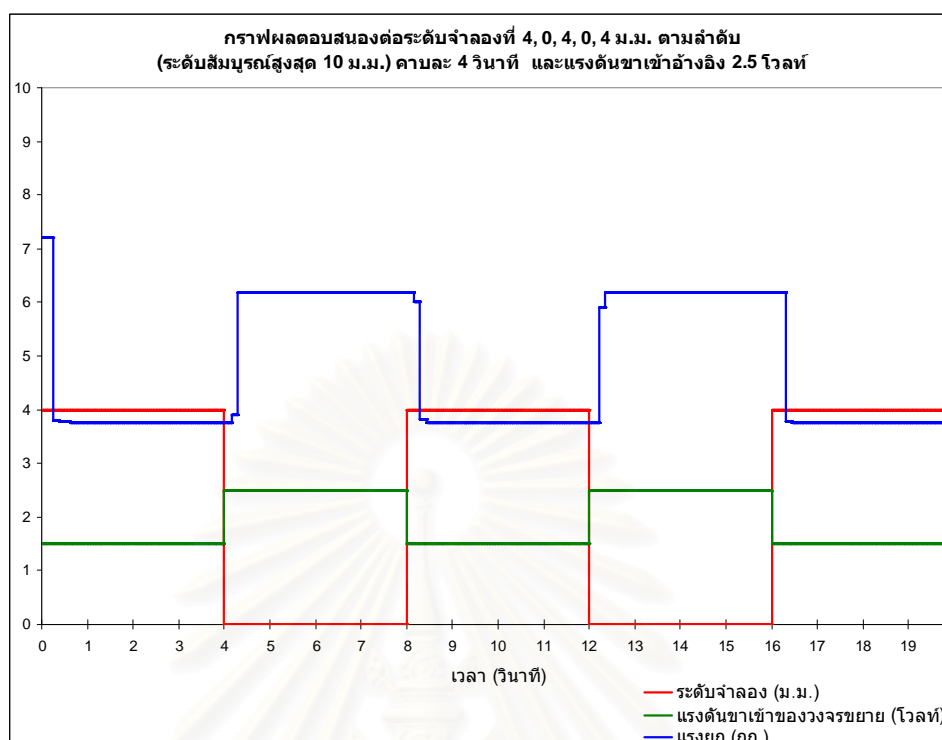
รูปที่ ก.19 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 5, 0, 5, 0, 5 ม.ม. ตามลำดับ
มีคาบ 1 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



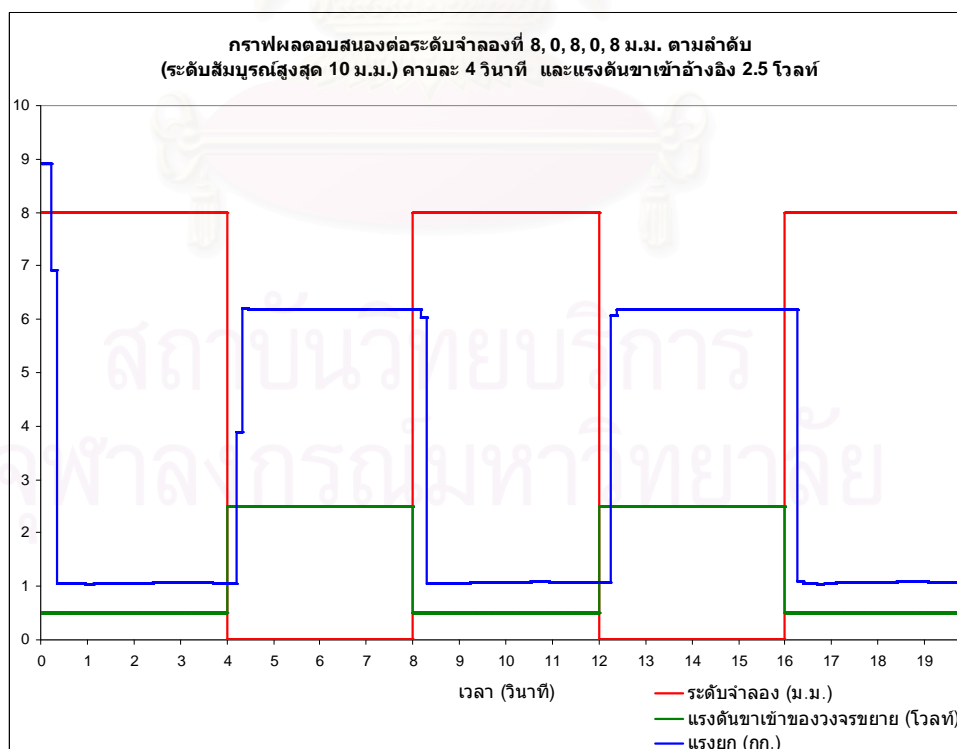
รูปที่ ก.20 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 5, 0, 5, 0, 5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 2 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



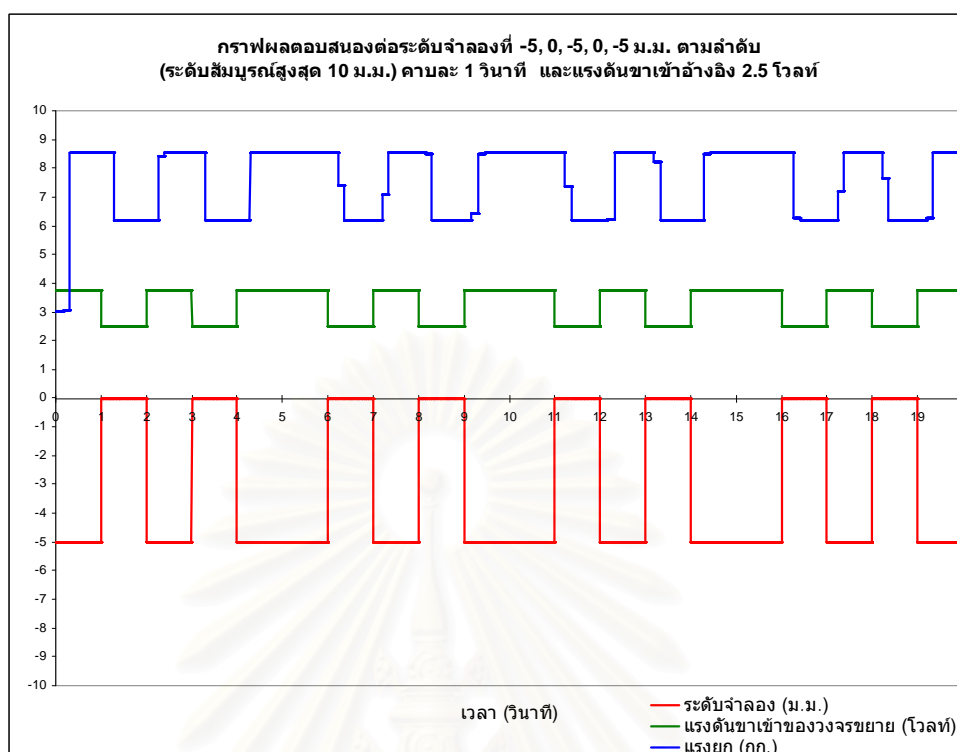
รูปที่ ก.21 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 2, 0, 2, 0, 2 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



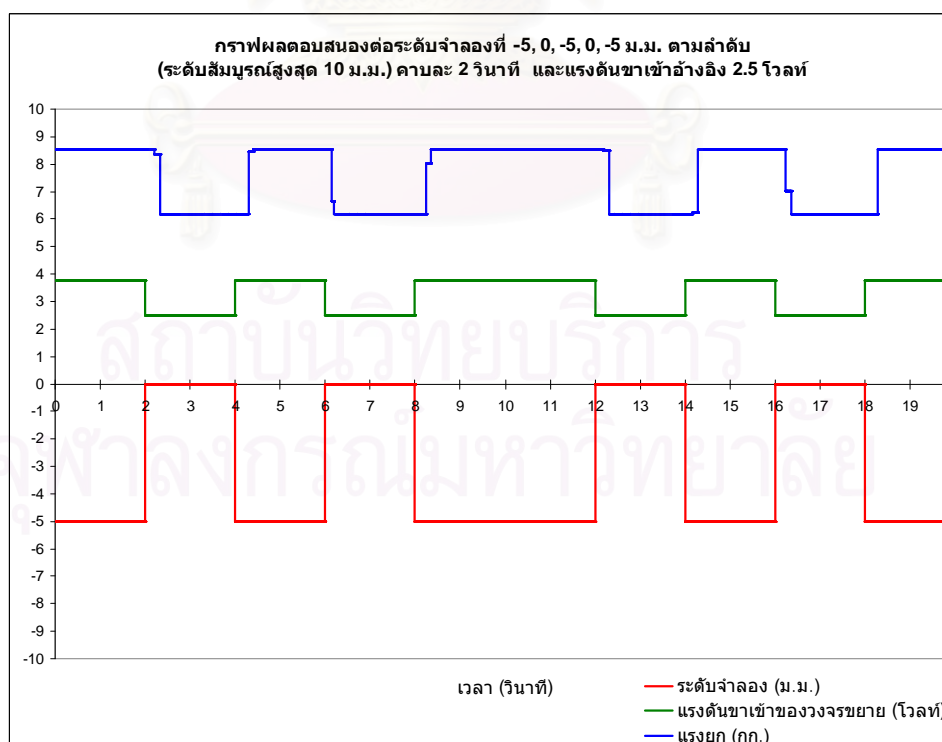
รูปที่ ก.22 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 4, 0, 4, 0, 4 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



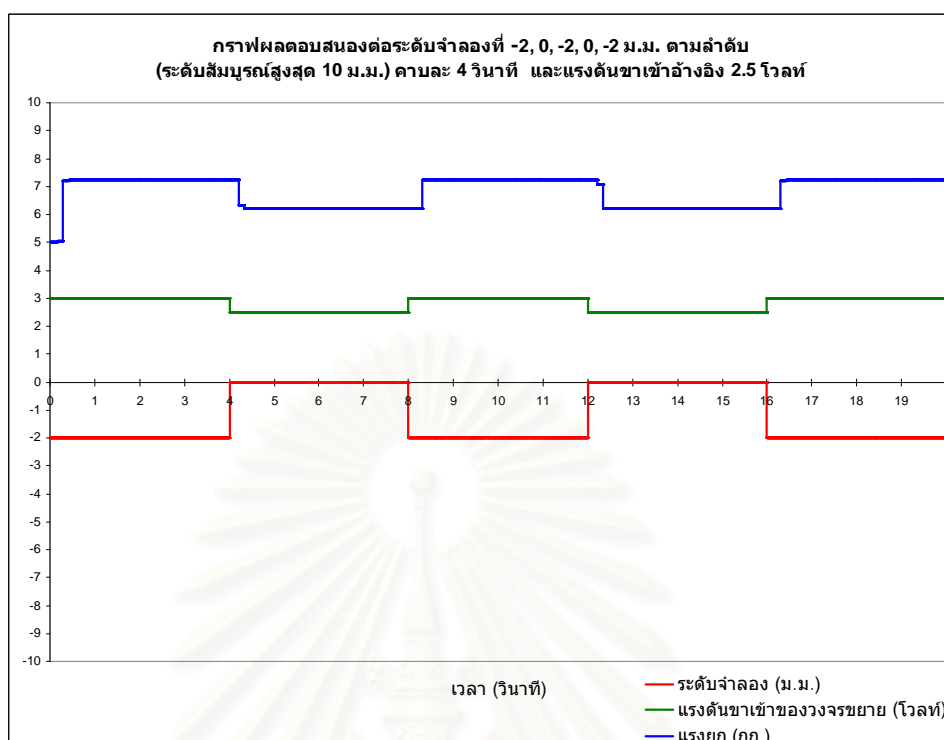
รูปที่ ก.23 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 8, 0, 8, 0, 8 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



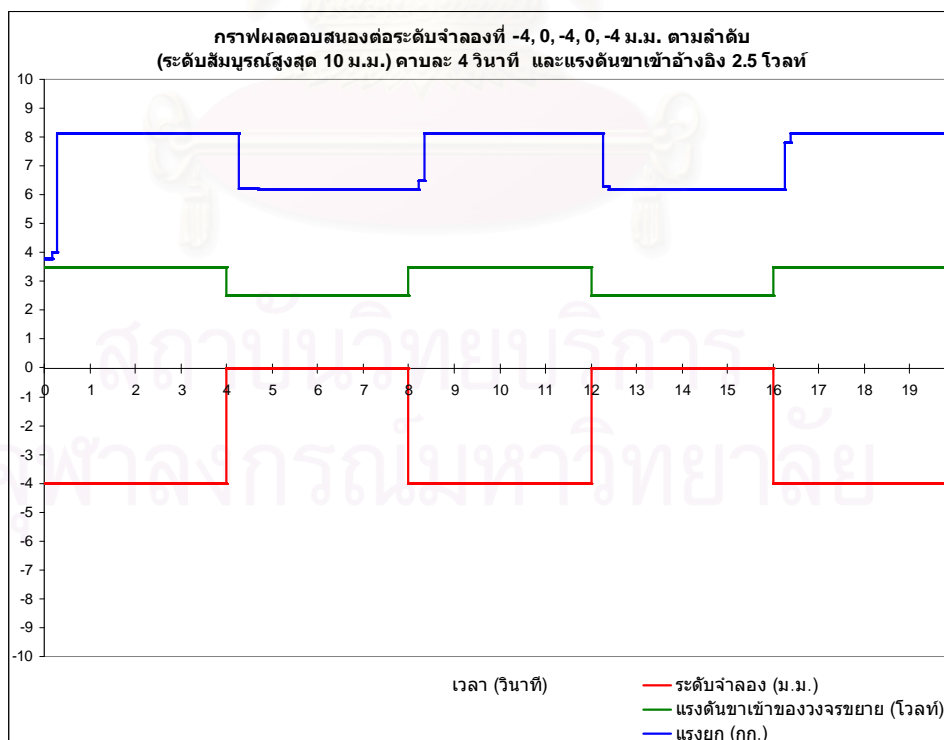
รูปที่ ก.24 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค้ำยอดที่ -5, 0, -5, 0, -5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 1 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



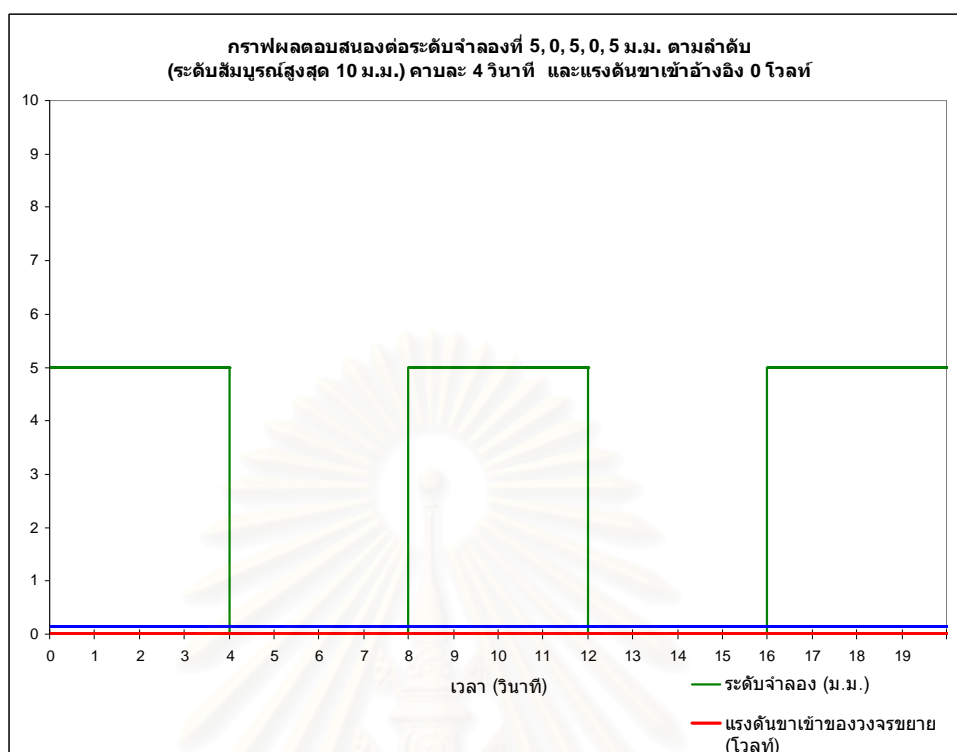
รูปที่ ก.25 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค้ำยอดที่ -5, 0, -5, 0, -5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 2 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



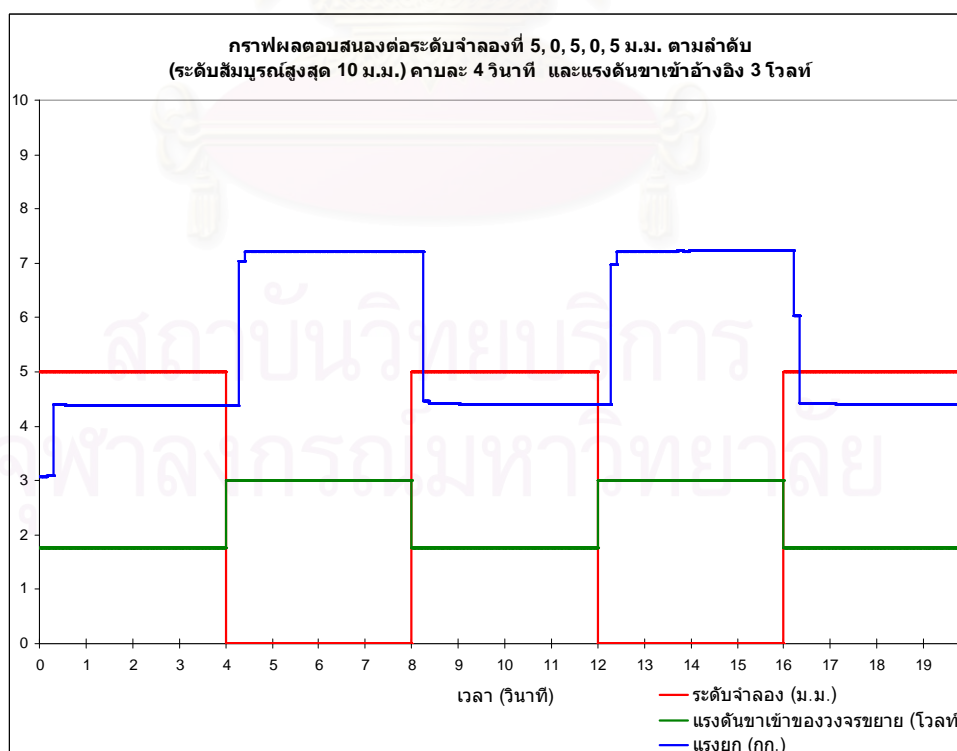
รูปที่ ก.26 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค้ำยอดที่ -2, 0, -2, 0, -2 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



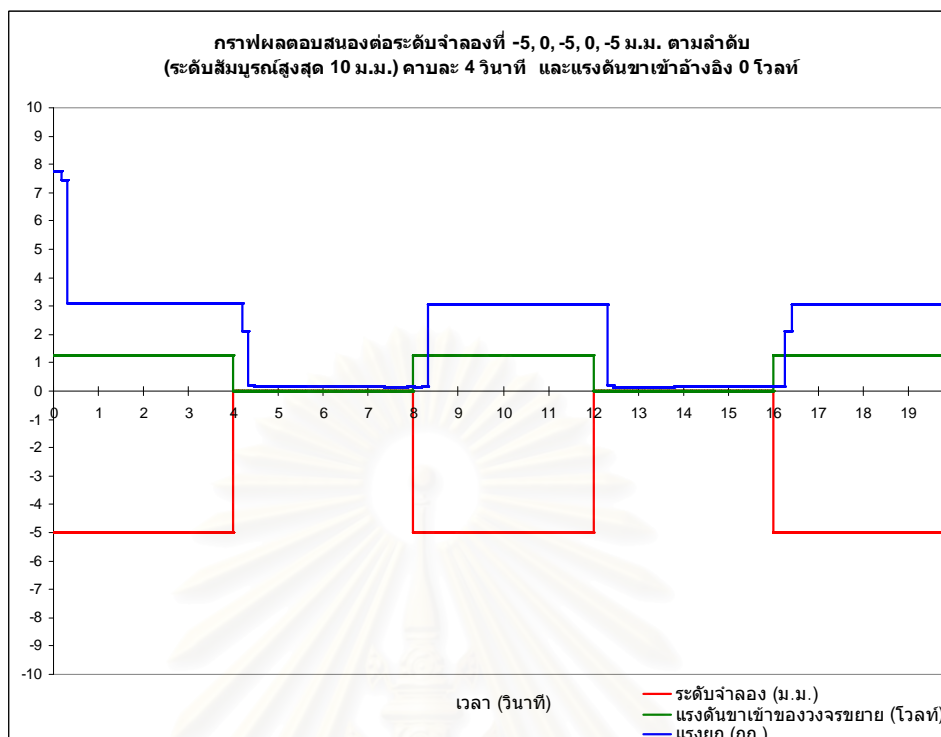
รูปที่ ก.27 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค้ำยอดที่ -4, 0, -4, 0, -4 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



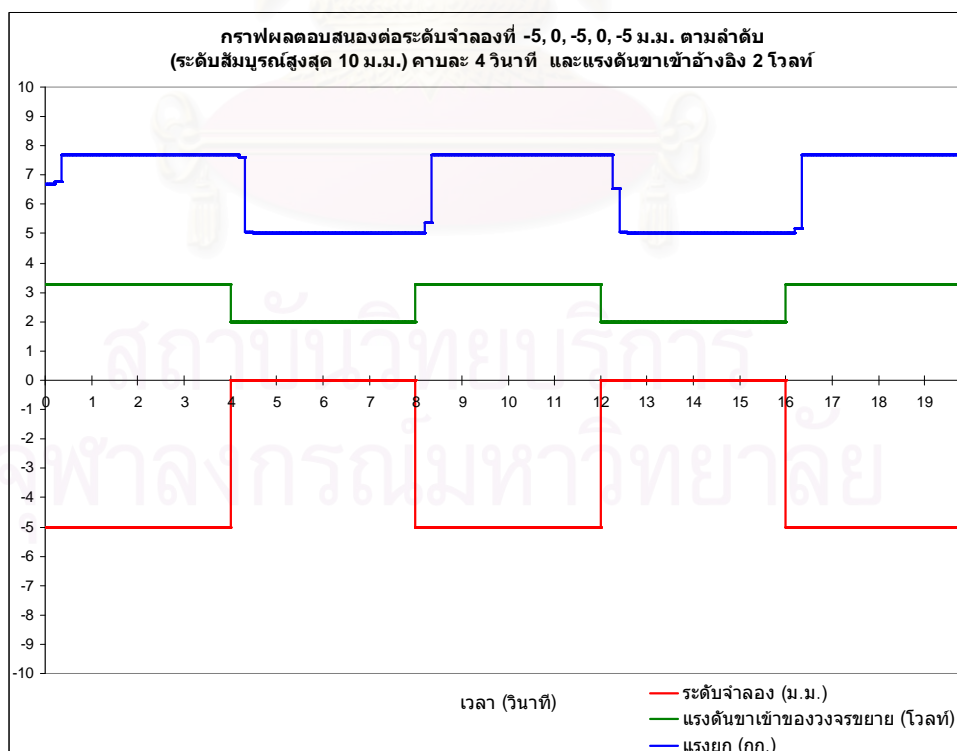
รูปที่ ก.28 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 5, 0, 5, 0, 5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 0 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



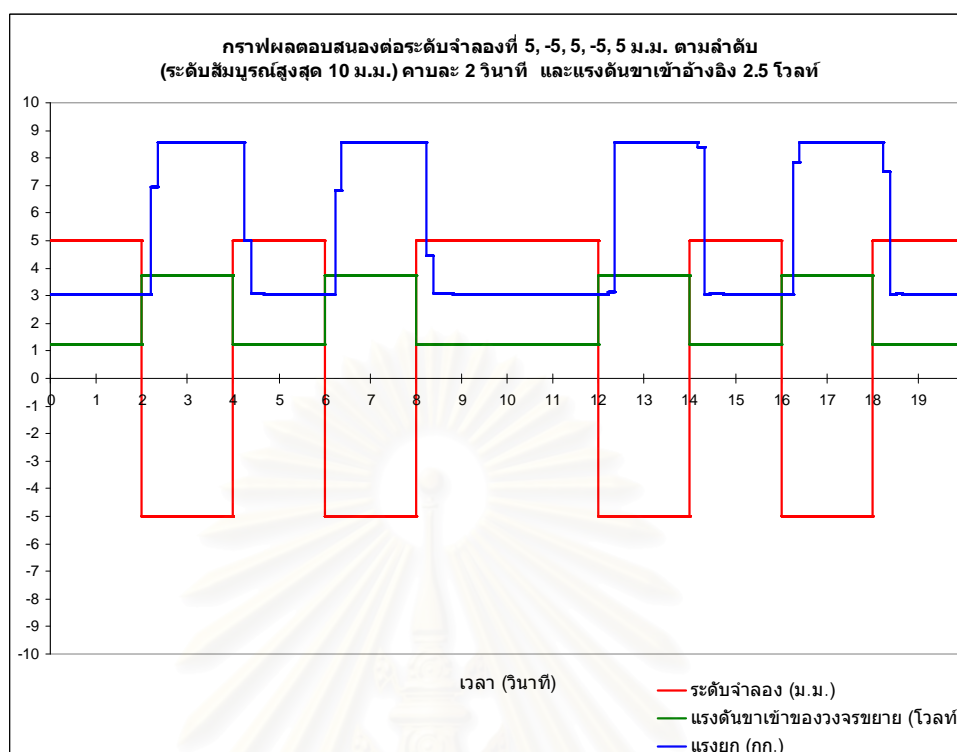
รูปที่ ก.29 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 5, 0, 5, 0, 5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 3 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



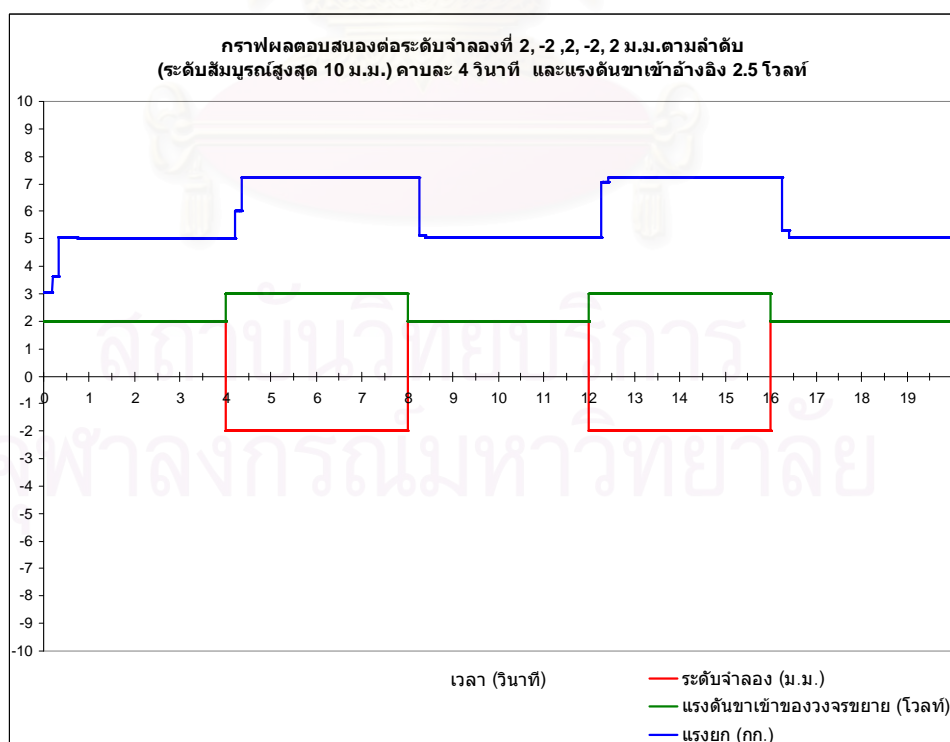
รูปที่ ก.30 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ -5, 0, -5, 0, -5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 0 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



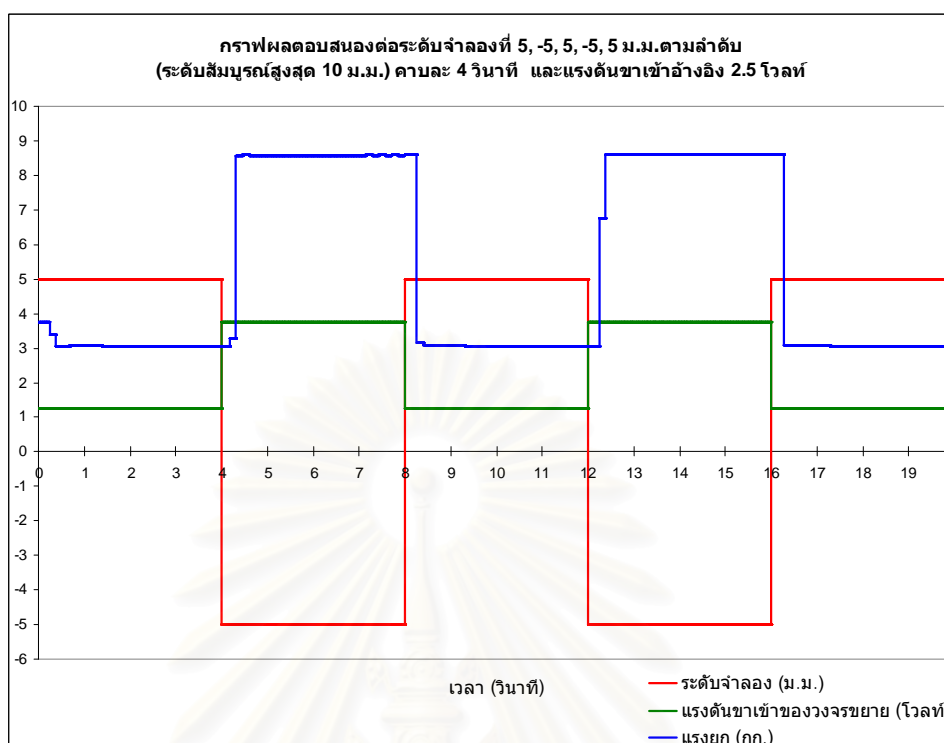
รูปที่ ก.31 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ -5, 0, -5, 0, -5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



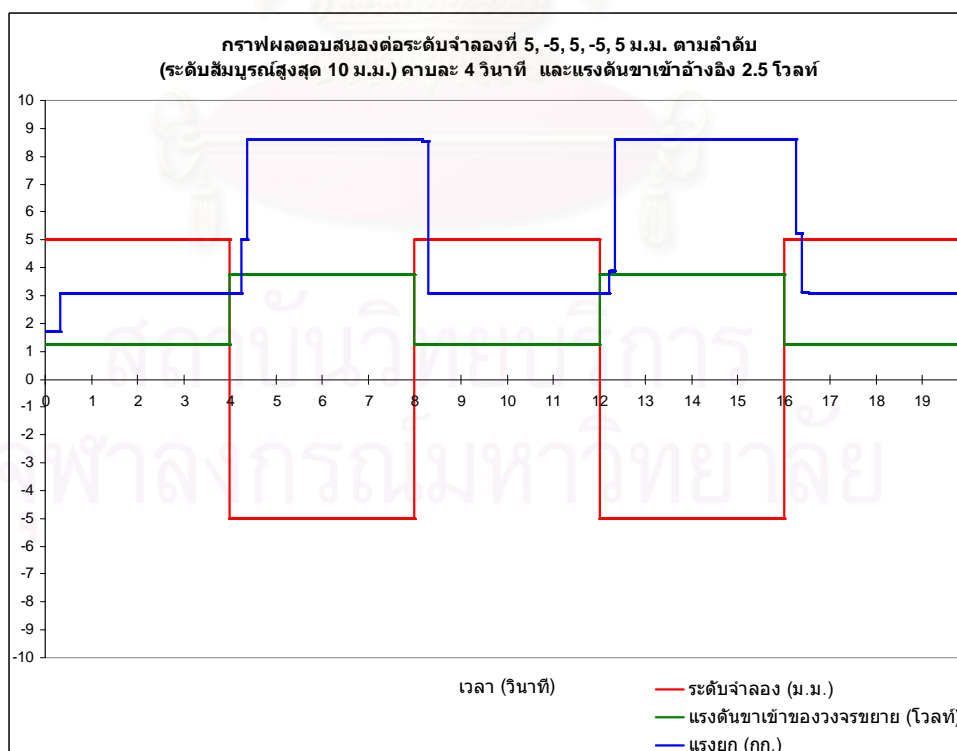
รูปที่ ก.32 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 5, -5, 5, -5, 5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 2 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับปรุกที่ 10 ม.ม.



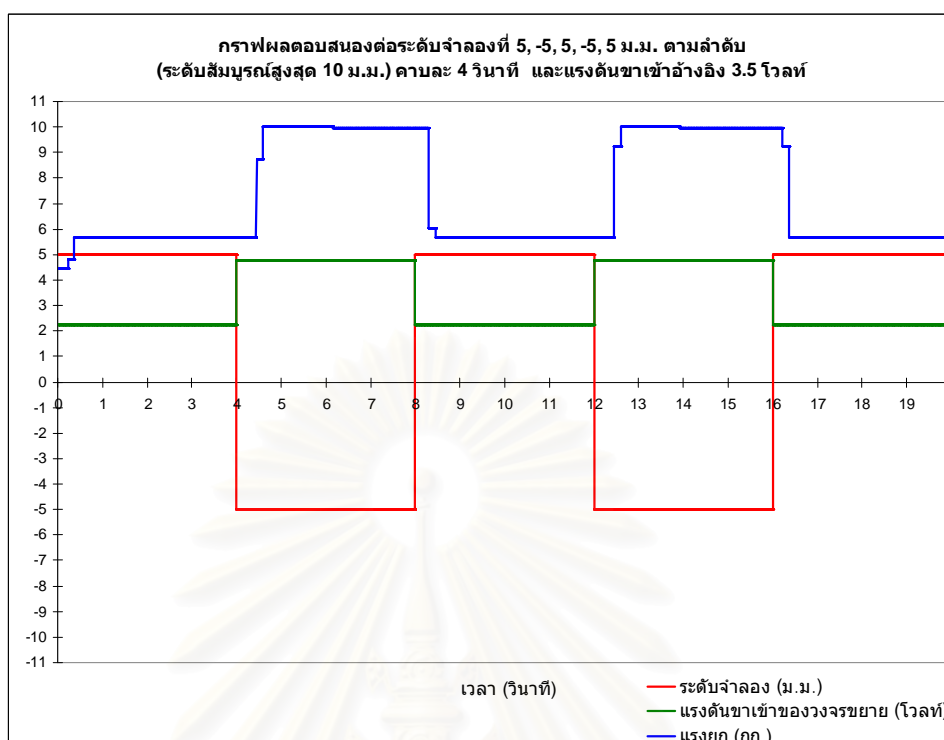
รูปที่ ก.33 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 2, -2, 2, -2, 2 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสับปรุกที่ 10 ม.ม.



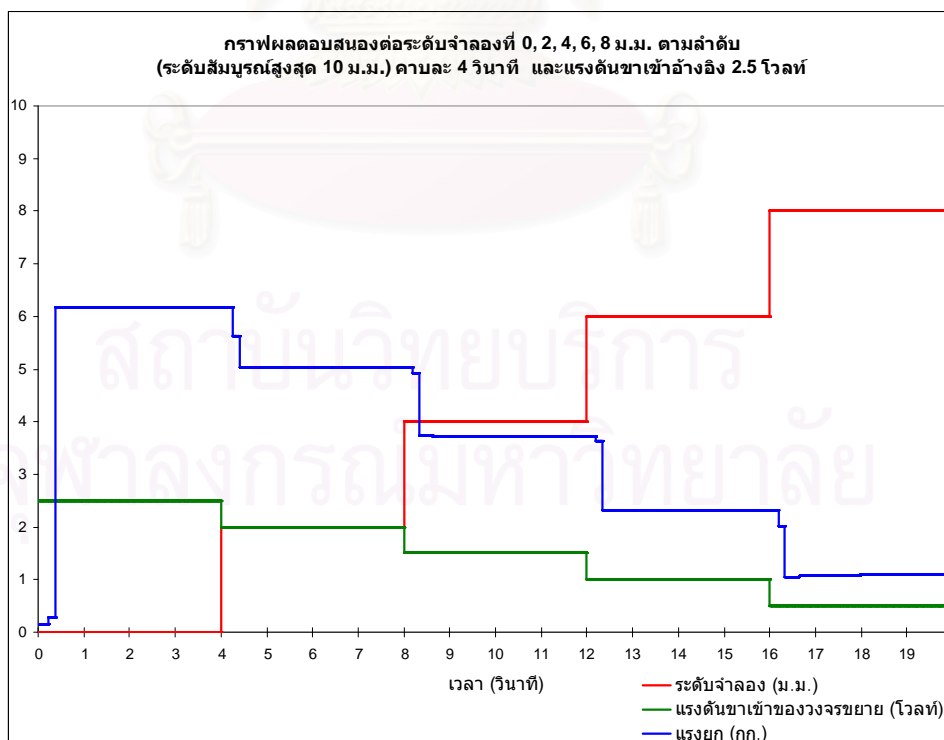
รูปที่ ก.34 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค้ำยอดที่ 5, -5, 5, -5, 5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



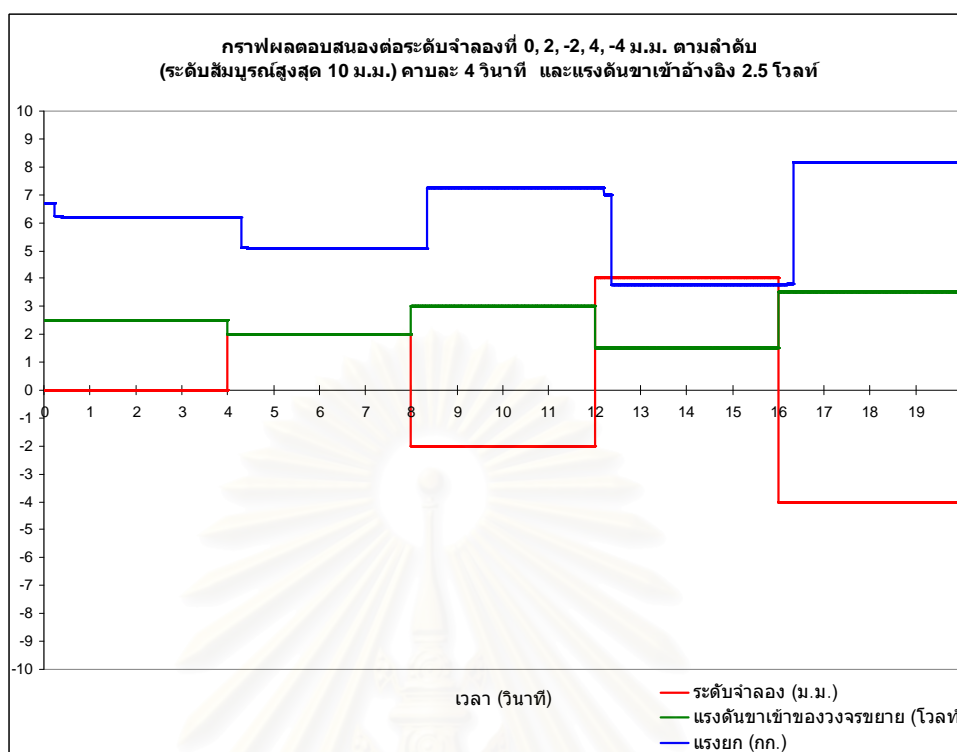
รูปที่ ก.35 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค้ำยอดที่ 5, -5, 5, -5, 5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



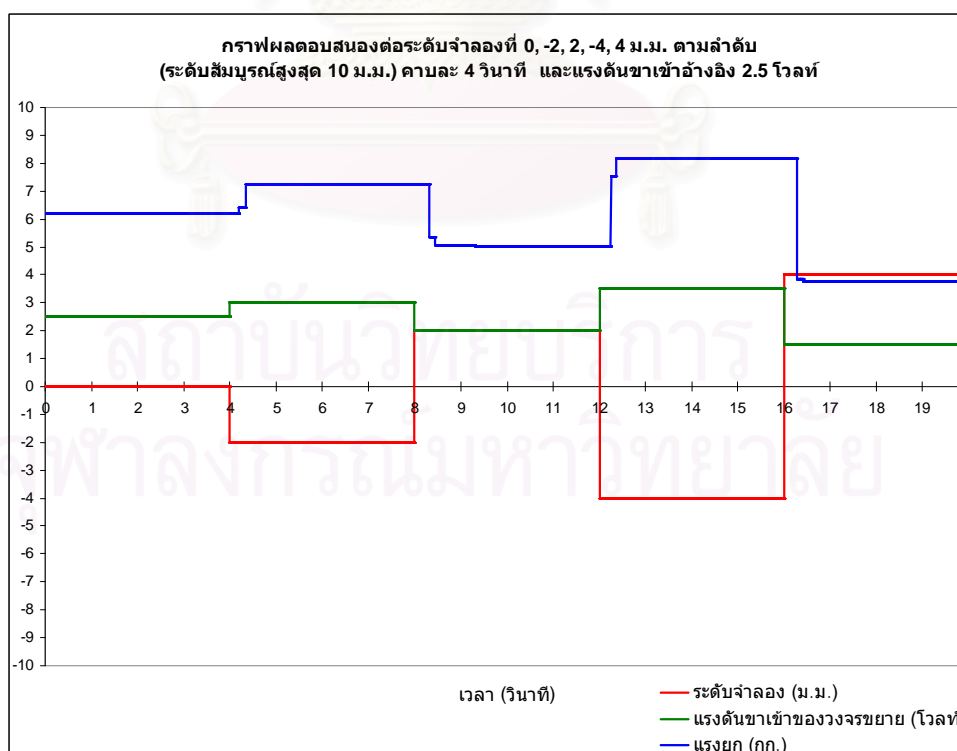
รูปที่ ก.36 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค้ำยอดที่ 5, -5, 5, -5, 5 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 3.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



รูปที่ ก.37 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค้ำยอดที่ 0, 2, 4, 6, 8 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสัมบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



รูปที่ ก.38 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 0, 2, -2, 4, -4 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสั้มบูรณ์ที่ 10 ม.ม.



รูปที่ ก.39 กราฟแรงยกเมื่อระดับจำลองเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่ายอดที่ 0, -2, 2, -4, 4 ม.ม. ตามลำดับ มีคาบ 4 วินาที โดยแรงดันอ้างอิงขาเข้ามีค่า 2.5 โวลต์ และระดับสั้มบูรณ์ที่ 10 ม.ม.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปรัชญ์ แจ่มแจ้ง เกิดเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2525 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า เมื่อปี 2547 ได้ทำงานเป็นวิศวกรการสื่อสารสองทางระหว่างรถยนต์และศูนย์บริการสารสนเทศ จราจร ที่บริษัท อีเอสอาร์ไอ(ประเทศไทย) จำกัด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย