

การยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด
FOUR POINT MAGNETIC LEVITATION
FOR STABILIZATION OF PLATE

ชวลิต ทองศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด

ชวลิต ทองศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด
Four Point Magnetic Levitation for Stabilization of Plate
ชื่อ - นามสกุล นายชวลิต ทองศรี
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.
ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาคร วุฒิพัฒน์พันธ์, วศ.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรินทร์ แห่งมงาม, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 8 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด
ชื่อ – นามสกุล	นายชวลิต ทองศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ ระบบควบคุมการยกตัวด้วยสนามแม่เหล็ก ให้ระบบเกิดการสมดุลของแรงยกตัวโดยทำการออกแบบระบบควบคุมการลอยตัวเพื่อปรับระดับแผ่นระนาบให้สมดุลจำนวน 4 จุด

โดยใช้ตัวควบคุมชนิด พีไอดี ควบคุมการลอยตัวของแต่ละแกน ซึ่งแต่ละแกนจะสร้างขั้วแม่เหล็ก และชุดลอยจะเป็นแม่เหล็กถาวร ขั้วแม่เหล็กที่สร้างขึ้น กับแม่เหล็กถาวรจะเป็นขั้วเดียวกัน ทำให้เกิดการผลักกัน แล้วสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ให้วัตถุลอยตัวอย่างสมดุล

จากผลการทดสอบของการลอยตัวของงานขณะยังไม่มีวัตถุวางบนแผ่นแนวระนาบได้ค่าแรงดันและความสูงแปรผันตรงกัน โดยแผ่นแนวระนาบลอยสูงสุด 3.7 เซนติเมตร 23.12 โวลต์ และแผ่นแนวระนาบลอยต่ำสุด 2.5 เซนติเมตร 15.6 โวลต์ โดยวิทยานิพนธ์นี้ตั้งระยะการลอยตัวที่ 3.7 เซนติเมตร โดยแสดงดังรูปการทดลองควบคุมด้วย พีไอดี ขณะที่แผ่นแนวระนาบรับน้ำหนักได้มากที่สุด 72 กรัม และน้ำหนักของแผ่นแนวระนาบรับน้ำหนัก 170 กรัม เมื่อวางวัตถุลงบนแผ่นแนวระนาบที่มีน้ำหนักไม่เกิน 56 กรัม สามารถรักษาระดับให้เกิดการสมดุลได้

คำสำคัญ: สนามแม่เหล็ก การควบคุมการลอยตัว การควบคุมแบบ พีไอดี

Thesis Title Four Point Magnetic Levitation for Stabilization of Plate
Name-Surname Mr.Chawalit Thongsri
Program Electrical Engineering
Thesis Advisor Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
Thesis Co-advisor Assitant Professor Nathabhat Phankong, Ph.D.
Academic Year 2016

ABSTRACT

This thesis was to present a study and an analysis of the four point magnetic levitation for stabilization of plate system which was designed to balance and to adjust the four point magnetic levitation for stabilization of plate.

Each leg of the magnetic levitation for stabilization of plate was controlled by the PID controller which each leg created the magnetic pole and the levitation for stabilization of plate was consisted of the temporary magnet. The created magnetic pole and the temporary magnet were put in the same pole which they pushed each other and made the objects float evenly according to the Mathematic equation.

The result of the study found that the magnetic levitation for stabilization of plate had various pressure and height when there was no object on the levitation of plate which the levitation of plate could lift the highest point at 3.7 centimeters, 23.12 voltage and the lowest point was 2.5 centimeters, 15.6 voltage. In this study, it was set the lifting point at 3.7 centimeters which was controlled by PID and it could carry the heaviest object at 72 grams and the levitation of plate could lift the objects evenly when the objects weighed less than 56 grams.

Keywords: magnetic levitation, PID

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ที่อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรอง ผลงานการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณนาย นายบริพัฒน์ อมรพิทักษ์วัฒนา นักศึกษาปริญญาโท เป็นผู้เชี่ยวชาญงานด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ ผู้เชี่ยวชาญระบบควบคุม มหาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา จนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการและความรู้ มาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่านที่อำนวยความสะดวกห้องปฏิบัติการและเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบคุณคณะผู้บริหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตลอดจนบุคลากรของบัณฑิตวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่องตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษา

ขอขอบคุณพี่น้อง ครอบครัว ทองศรี และเพื่อนทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจ คอยให้คำแนะนำ

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชวลิต ทองศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	15
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	15
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	16
1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.1 หลักการออกแบบทางกลไฟฟ้าของงานวิจัย.....	17
2.2 หลักการทำงานของวงจรควบคุม.....	38
2.3 ชนิดของการควบคุม และตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	52
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	67
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	73
3.1 แผนภูมิการดำเนินงาน และระยะเวลาดำเนินการ.....	73
3.2 การออกแบบขดลวดสนามแม่เหล็ก.....	78
3.3 การออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ และการเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	90
3.4 การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	99
3.5 แผนผังการควบคุม.....	107
3.6 การสร้างแบบทดสอบ.....	109

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์.....	111
4.1 การทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	111
4.2 การทดสอบระบบการลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก.....	114
4.3 การทดสอบเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในระบบ.....	116
4.4 การทดสอบผลการตอบสนองในการเริ่มต้นทำงานขณะไม่มีวัตถุ.....	120
4.5 การทดสอบแรงดันขณะวางน้ำหนักในแผ่นแนวระนาบที่จุดกึ่งกลาง.....	125
4.6 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองผลึกแต่ละจุด.....	127
4.7 การทดสอบแรงดันขณะวางน้ำหนักในแผ่นระนาบ แบบทันทีทันใด.....	131
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ปัญหา และข้อเสนอแนะ.....	137
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	137
5.2 ปัญหา.....	139
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	139
บรรณานุกรม.....	140
ภาคผนวก.....	142
ภาคผนวก ก แรงที่เกิดขึ้นของสมการคณิตศาสตร์.....	143
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	146
ประวัติผู้เขียน.....	162

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะต่างๆของวัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็ก.....	23
ตารางที่ 2.2 ข้อจำกัดทางด้านขนาดขดลวด.....	34
ตารางที่ 2.3 รูปแบบของแม่เหล็กนีโอไดเมียม.....	37
ตารางที่ 2.4 ค่าแกนที่เหมาะสมตามวิธีการของ Zigler Nichols	59
ตารางที่ 2.5 การเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสมตามวิธีการของ Chien-hrones-Reswick.....	60
ตารางที่ 2.6 ค่าแกนที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบ.....	61
ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาทำวิจัย 12 เดือน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาดำเนินงาน.....	76
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสมการทางคณิตศาสตร์.....	85
ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองระยะการลอยตัว.....	85
ตารางที่ 3.4 แรงดันเชื่อมต่อของแต่ละวงจรเพื่อการควบคุมความเป็นเชิงเส้น.....	90
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต ระยะลอยตัว เซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก.....	114
ตารางที่ 4.2 การทดสอบด้วยน้ำหนักและระยะลอยตัวของแผ่นแนวระนาบ.....	116



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างจำลองของการลอยตัว.....	16
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบทางกลไฟฟ้าของงานวิจัย.....	17
รูปที่ 2.2 กฎของนิวตัน.....	18
รูปที่ 2.3 การลอยตัวของวัตถุ.....	19
ภาพที่ 2.4 วงจรอนุกรมค่าความต้านทานและค่าเหนี่ยวนำ.....	20
รูปที่ 2.5 สนามแม่เหล็ก.....	24
รูปที่ 2.6 การกระจายของสนามแม่เหล็กในขดลวดแกนอากาศ.....	25
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H.....	25
รูปที่ 2.8 เส้นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดพันบนแกนแม่เหล็ก.....	26
รูปที่ 2.9 เส้นโค้งการสร้างสนามแม่เหล็ก.....	26
รูปที่ 2.10 วงรอบฮิสเตอร์รีซิส.....	27
รูปที่ 2.11 วงรอบฮิสเตอร์รีซิสกว้างมากขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ใช้งาน.....	28
รูปที่ 2.12 ผลกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนแม่เหล็กแผ่นหนาและแผ่นบาง.....	29
รูปที่ 2.13 ตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศ.....	31
รูปที่ 2.14 เส้นโค้ง B-H และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก.....	32
รูปที่ 2.15 พื้นหน้าตัดของแกนเหล็ก.....	33
รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมของ โครงงาน.....	38
รูปที่ 2.17 การออกแบบ Power Op-Amp ด้วยไอซี เบอร์ OPA549.....	39
รูปที่ 2.18 กราฟเส้นตรง.....	40
รูปที่ 2.19 กราฟเส้นตรงมีความชันเป็นบวก.....	41
รูปที่ 2.20 กราฟเส้นตรงมีความชันเป็นลบ.....	41
รูปที่ 2.21 วงจร Inverting Amp.....	42
รูปที่ 2.22 วงจร Summing Amp.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.23 วงจร Voltage Follower.....	43
รูปที่ 2.24 วงจร Zero และ Span.....	44
รูปที่ 2.25 วงจร Buttorworth.....	46
รูปที่ 2.26 กราฟความถี่ของวงจร Buttorworth.....	46
รูปที่ 2.27 ฮอลล์เซนเซอร์.....	47
รูปที่ 2.28 การต่อฮอลล์เซนเซอร์กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและโวลต์มิเตอร์.....	48
รูปที่ 2.29 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก.....	48
รูปที่ 2.30 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์.....	49
รูปที่ 2.31 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ V_H	50
รูปที่ 2.32 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4.....	52
รูปที่ 2.33 ตัวควบคุมแบบเปิดปิด.....	53
รูปที่ 2.34 ตัวควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส.....	53
รูปที่ 2.35 ตัวควบคุมพีไอ.....	53
รูปที่ 2.36 ตัวควบคุมแบบพีดี.....	54
รูปที่ 2.37 ตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	54
รูปที่ 2.38 ตัวควบคุมแบบพี.....	55
รูปที่ 2.39 ตัวควบคุมแบบไอ.....	55
รูปที่ 2.40 ตัวควบคุมแบบดี.....	56
รูปที่ 2.41 ผลตอบสนองขาออกของตัวควบคุมพีไอดีแบบต่างๆ ในระบบ Step input.....	57
รูปที่ 2.42 การทดสอบระบบด้วยวิธีการของ Zigler Nichols.....	58
รูปที่ 2.43 ลักษณะของผลตอบสนองที่ได้.....	58
รูปที่ 2.44 การทดสอบระบบด้วยวิธีการของ Chien-hrones-Reswick.....	60
รูปที่ 2.45 ลักษณะของผลตอบสนองที่ได้.....	60
รูปที่ 2.46 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบ Step input ที่ได้จากการทดสอบแบบต่างๆ.....	62
รูปที่ 2.47 ระบบอันดับสอง.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนภูมิแผนการดำเนินงาน.....	73
รูปที่ 3.2 แผนภูมิแผนงานการสร้างขดลวดสนามแม่เหล็กและทดสอบระยะลอยตัว.....	74
รูปที่ 3.3 แผนภูมิแผนงานการสร้างวงจรถออิเล็กทรอนิกส์และตัวควบคุม PID.....	75
รูปที่ 3.4 แผนภูมิการดำเนินงาน.....	76
รูปที่ 3.5 หลักการทำงานการควบคุมแกนเหล็ก 1 จุด.....	77
รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของแกนเหล็ก.....	78
รูปที่ 3.7 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการยกตัวของแรงแม่เหล็กและระยะลอยตัว.....	85
รูปที่ 3.8 ความเป็นเชิงเส้นระหว่างแรงดันที่จ่ายเข้าแกนเหล็กกับระยะความสูง.....	87
รูปที่ 3.9 ความเป็นเชิงเส้นระหว่างแรงดันเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กกับระยะความสูง.....	88
รูปที่ 3.10 โครงสร้างแผ่นเนวระนาบ.....	89
รูปที่ 3.11 โครงสร้างการวางขดลวดสนามแม่เหล็ก.....	89
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมวงจรการทำงาน.....	90
รูปที่ 3.13 วงจรควบคุมแรงดันด้วย Linear Op-Amp.....	91
รูปที่ 3.14 วงจรควบคุมกระแสด้วย Linear Op-Amp.....	93
รูปที่ 3.15 วงจร Butterworth.....	95
รูปที่ 3.16 การออกแบบ Power Op-Amp ด้วยไอซีเบอร์ OPA549.....	96
รูปที่ 3.17 ออกแบบวงจรควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรม DXP2004.....	98
รูปที่ 3.18 ออกแบบแผ่นปรี้นด้วยโปรแกรม DXP 2004.....	98
รูปที่ 3.19 กำหนดขาอินพุต-เอาต์พุตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4.....	99
รูปที่ 3.20 ไดอะแกรมการควบคุม PID ของชิ้นงาน.....	100
รูปที่ 3.21 แบบจำลองตัวควบคุม PID ในโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	100
รูปที่ 3.22 เส้นบนระนาบ S.....	102

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.23	คุณลักษณะของระบบ.....	102
รูปที่ 3.24	ตำแหน่งโพลที่ต้องการบนเส้นทางเดินราก.....	105
รูปที่ 3.25	แบบจำลองการออกแบบตัวควบคุม PID 20% Overshoot.....	106
รูปที่ 3.26	แผนผังการควบคุมด้วยพีไอดี.....	107
รูปที่ 3.27	แผนผังการทดสอบวงจรรีเลย์ทรอนิกส์.....	109
รูปที่ 4.1	แผนผังการทดสอบวงจรรีเลย์ทรอนิกส์.....	111
รูปที่ 4.2	การออกแบบ Model ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink	112
รูปที่ 4.3	สัญญาณจากบอร์ด STM32F4 ส่งผ่าน วงจรกรองความถี่ต่ำ.....	113
รูปที่ 4.4	สัญญาณจาก STM32F4 ทำงานร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำและ Zero-Span.....	114
รูปที่ 4.5	ความสูง แรงดันแกนเหล็กและแรงดันที่เซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก.....	115
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแกน และค่าควิตีไซเคิล.....	116
รูปที่ 4.7	การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของค่าสนามแม่เหล็ก.....	117
รูปที่ 4.8	รูปโครงการจริงที่สร้างขึ้น.....	117
รูปที่ 4.9	Model ด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink ของ Host.....	118
รูปที่ 4.10	Model ด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink ของ Target.....	119
รูปที่ 4.11	ตำแหน่งการวางน็อตบนแผ่นเนวระนาบ.....	119
รูปที่ 4.12	ผลการทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.7 เซนติเมตร.....	120
รูปที่ 4.13	ผลการทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.6 เซนติเมตร.....	121
รูปที่ 4.14	ผลการทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.5 เซนติเมตร.....	122
รูปที่ 4.15	ผลการทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.4 เซนติเมตร.....	123
รูปที่ 4.16	ผลการทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.3 เซนติเมตร.....	124
รูปที่ 4.17	ผลการทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองขณะมีน้ำหนัก 54 กรัมวางจุดกึ่งกลาง.....	125

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.18 การทดสอบปฏิกิริยาผลตอบสนองขณะมีน้ำหนัก 36 กรัมวางจุดกึ่งกลาง.....	126
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 1.	127
รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 2.	128
รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 3.	129
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 4.	130
รูปที่ 4.23 ตำแหน่งการวางของน้ำหนัก ขนาด 36 กรัม.....	131
รูปที่ 4.24 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองขณะวางแบบทันทีทันใด โดยน้ำหนัก 36 กรัม.....	132
รูปที่ 4.25 ตำแหน่งการวางของน้ำหนัก ขนาด 54 กรัม.....	133
รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองขณะวางแบบทันทีทันใด โดยน้ำหนัก 54 กรัม.....	134
รูปที่ 4.27 ตำแหน่งการวางของน้ำหนัก ขนาด 72 กรัม.....	135
รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองขณะวางแบบทันทีทันใด โดยน้ำหนัก 72 กรัม.....	136



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีของยานพาหนะถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องไม่ว่าจะเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์หรือไฟฟ้าจนกระทั่งได้มีการนำเสนอเทคโนโลยีซึ่งเป็นระบบการยกตัวและขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยระบบการยกตัวให้ขบวนรถลอยไม่สัมผัสกับรางด้วยพลังงานแม่เหล็กทำให้รถไฟขบวนนี้ไม่มีล้อส่งผลให้ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างล้อและรางลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการเคลื่อนที่มีแรงในการขับเคลื่อนสูงรถไฟระบบขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กนี้เรียกว่า รถไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก(Magnetic Levitation)

การควบคุมระบบการยกตัวเพื่อให้ขบวนรถลอยได้รวดเร็ว มีเสถียรภาพนั้น ได้มีการนำวิธีการควบคุมระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งโดยใช้ตัวควบคุมแบบอนาล็อกและตัวควบคุมแบบดิจิทัล มาประยุกต์ใช้ในระบบควบคุม ทั้งนี้ในระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะต้องใช้ระบบ การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์แบบจำลอง ประมาณการระบบ ให้เป็นเชิงเส้นก่อน อย่างไรก็ตามวิธีการควบคุมระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กที่ใช้แรงจากแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้ขบวนรถลอยตัวอยู่กลางอากาศนั้นมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้วิธีการควบคุมแบบพื้นฐานที่ใช้ในงานระบบควบคุมมี ดังนี้

1. ตัวควบคุมชนิดมูนนำเฟส (Phase Lead Controller)
2. ตัวควบคุมชนิดมูนตามเฟส (Phase Lag Controller)
3. ตัวควบคุมชนิดมูนนำเฟสและมูนตามเฟส (Phase Lead- Phase Lag Controller)
4. ตัวควบคุมพีดี (PD Controller :Proportional DerivativeController)
5. ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI Controller :Proportional IntegralController)
6. ตัวควบคุมชนิดพีไอดี(PID Controller :Proportional IntegralDerivative Controller)

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมการลอยตัวของแผ่นระนาบ เพื่อปรับระดับแผ่นระนาบให้สมดุล โดยมีจุดควบคุมทั้งหมดจำนวน 4 จุด โดยใช้ตัวควบคุมชนิด พีไอดี(PID) ในการควบคุมการลอยตัวของแต่ละจุด ซึ่งแต่ละจุดควบคุมจะสร้างขั้วแม่เหล็กขึ้นเพื่อสร้างแรงยกกระด้างเพื่อให้แผ่นแนวระนาบลอยตัวแบบสมดุล แผ่นระนาบที่ถูกยกตัวนั้นทั้ง 4 จุดนี้จะสร้างแรงผลักกัน

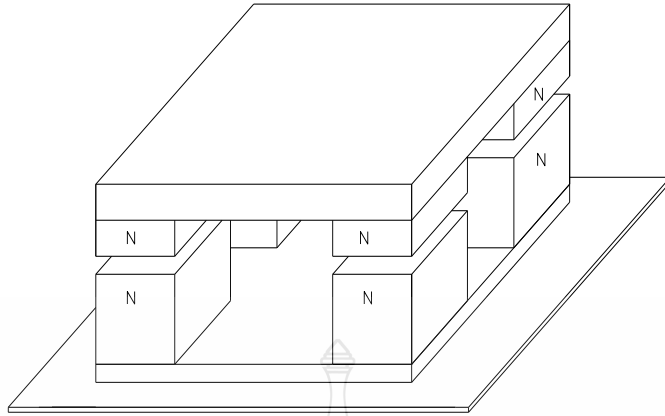
สนามแม่เหล็กผลัดไฟฟ้าที่ 4 จุดที่สร้างขึ้นทำให้เกิดแรงผลัดซึ่งถ้าแรงผลัดทั้ง 4 จุดนี้เท่ากันจะทำให้แผ่นระนาบถูกยกตัวได้อย่างสมดุล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการเกิดแรงผลัดด้วยสนามแม่เหล็ก
- 1.2.2 ศึกษาหลักการออกแบบและสร้างขดลวดสร้างแรงแม่เหล็ก สำหรับการลอยตัว
- 1.2.3 ศึกษาและเขียนสมการคณิตศาสตร์(Mathematical Model) ของระบบสร้างแรงแม่เหล็ก สำหรับการลอยตัว
- 1.2.4 ศึกษาและวิเคราะห์วงจรควบคุม สนามแม่เหล็กจำนวน 1 จุด
- 1.2.5 ศึกษาหลักการออกแบบและสร้างวงจรระบบควบคุม แรงผลัดจำนวน 4 จุดเพื่อทำงานร่วมกัน

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแต่ละจุด เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า ทั้ง 4 จุด โดยใช้แผ่นเหล็กลามิเนต และทองแดงพันรอบ เพื่อสร้างแรงผลัดขึ้นแต่ละจุด ส่วนแผ่นแนวระนาบที่วางด้านบนนั้นเป็นแม่เหล็กถาวร โดยมีขั้วเหมือนกันขุดสร้างสนามแม่เหล็กทั้ง 4 จุด เพื่อให้แผ่นแนวระนาบลอยตัว ในการวิจัยนี้ศึกษาและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ใช้สำหรับการลอยตัวของแผ่นแนวระนาบ และการควบคุมการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ลอยตัวให้สมดุล



รูปที่ 1.1 แสดง โครงสร้างจำลองของการลอยตัว

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 ออกแบบขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กยวักัดขนาด 200 กรัม จำนวน 4 ชุด ลอยสูง 4 เซนติเมตร

1.4.2 เขียนสมการคณิตศาสตร์จำลองของระบบที่ใช้ควบคุมสนามแม่เหล็กผลัก

1.4.3 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีของขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กแต่ละขด

1.4.4 ออกแบบและสร้างวงจรระบบควบคุม แรงผลักจำนวน 4 จุดเพื่อทำงานร่วมกัน

1.4.5 ทดสอบระบบควบคุมเพื่อปรับระดับแผ่นระนาบ

1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นแนวทางในการพัฒนางานยกระดับด้วยสนามแม่เหล็ก

1.5.2 หลักการควบคุมในงานอุตสาหกรรมในอนาคต

บทที่ 2

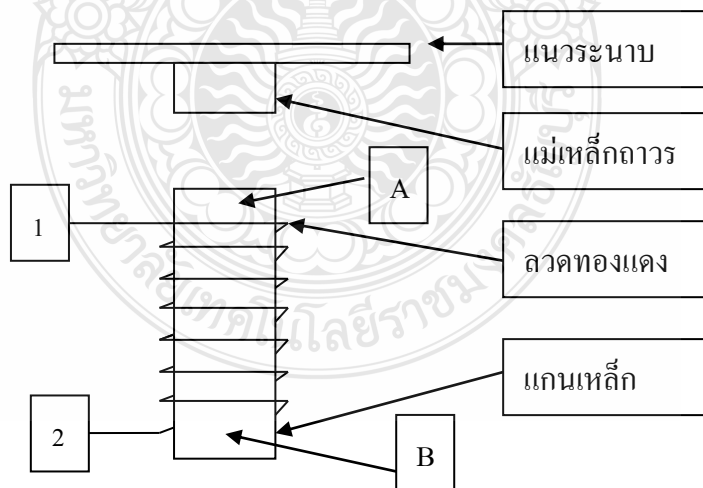
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในวิทยานิพนธ์ การยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด มีการศึกษาทฤษฎีต่างๆ โดยแยกออกเป็น 4 เนื้อหาดังต่อไปนี้

1. หลักการออกแบบทางกลไฟฟ้า
2. หลักการทำงานของวงจรควบคุม
3. ชนิดของการควบคุมและตัวควบคุม พีไอดี
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการออกแบบทางกลไฟฟ้าของงานวิจัย

ส่วนประกอบทางกลไฟฟ้าของงานวิจัยคือส่วนประกอบที่สำคัญในวิทยานิพนธ์นี้ การออกแบบจึงต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้า ค่าอิมิตซ์ของแกนเหล็ก และค่าแรงลอยตัวทางฟิสิกส์



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบทางกลไฟฟ้าของงานวิจัย

หลักการงานเบื้องต้นของส่วนประกอบทางกลไฟฟ้าของงานวิจัยดังรูปที่ 2.1 เมื่อจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดทองแดงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็กทำให้เกิดขั้วแม่เหล็ก ตามกฎมือขวาของฮันซ์ คริสเตียน เออร์สเทด เช่นจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่หมายเลข 1 A จะเป็นขั้วเหนือ และ B จะเป็นขั้วใต้ ถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่หมายเลข 2 B จะเป็นขั้วเหนือและ A จะเป็นขั้วใต้ ส่วนแม่เหล็กถาวรที่อยู่ด้านบนนั้นจะเป็นขั้วตรงกับ A ทำให้ขั้วเหมือนกันจะทำให้ผลักกันในขณะเดียวกัน แผ่นแนวระนาบก็จะลอยขึ้น

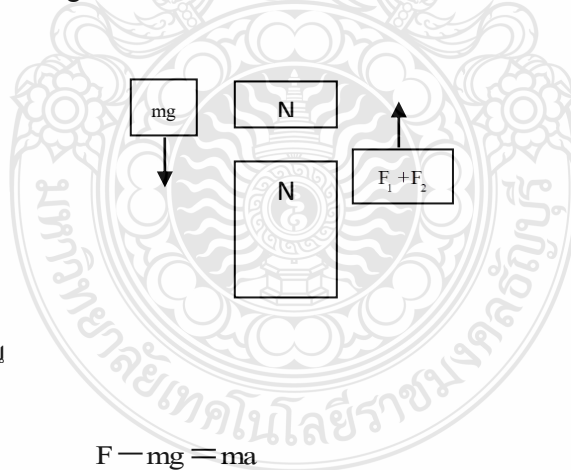
2.1.1 สมการแรงลอยตัวในแนวตั้ง

2.1.1.1 กฎข้อสองของนิวตัน

ความเร่งของวัตถุจะแปรผันตรงและมีทิศเดียวกับแรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุและแปรผันกับมวลของวัตถุ เมื่อมีแรงลัพธ์ขนาดไม่เป็นศูนย์มากระทำวัตถุ

$$\sum F = ma \quad (2.1)$$

แรงในแนวตั้งโดยมีการแรงผลักขึ้น(F) โดยมีน้ำหนัก(m) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม ค่ามาตรฐาน แรงโน้มถ่วงโลก(g) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม และ อัตราเร่ง(a)



รูปที่ 2.2 กฎของนิวตัน

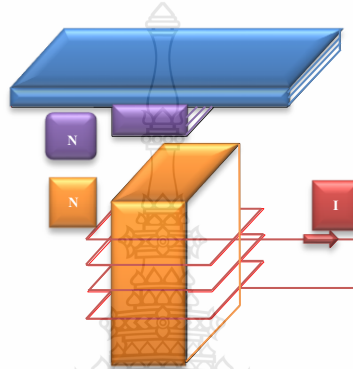
$$F - mg = ma \quad (2.2)$$

ในกรณีที่ใช้แรงผลักกันระหว่างของสองสิ่ง โดยสิ่งแรกเป็นแรงแม่เหล็กประคิษฐ์ (F_1) และสองเป็นแม่เหล็กถาวร (F_2)

$$F_1 + F_2 - mg = ma \quad (2.3)$$

2.1.1.2 แรงลอยตัวในแวนดิงของแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อนำขดลวดทองแดงมาพันรอบแกนเหล็กกลามินิทแล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นในแกนเหล็กทำให้เกิดขั้วเหนือและขั้วใต้ขึ้น โดยใช้กฎของ ฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด(Hans Christian Ørsted) ความเข้มของแม่เหล็กขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่จ่ายเข้าไปในขดลวด ส่วนแผ่นเพลท ขึ้นบนนั้นจะเป็นแม่เหล็กถาวร จากขั้วด้านบนจะลอยขึ้น



รูปที่ 2.3 การลอยตัวของวัตถุ

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu} = \frac{A\mu N^2 i^2}{l^2} \quad (2.4)$$

F = แรงทางฟิสิกส์ (Newton)

N = จำนวนรอบ (turn)

I = กระแสไฟฟ้า (Ampere)

B = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (flux / m²)

L = ความยาวแกนเหล็ก (m)

μ = ค่าความซึมซาบของแกนเหล็ก

2.1.3 สมการจำลองทางคณิตศาสตร์

จากสมการที่ 2.1

$$\sum F = ma$$

จากสมการที่ 2.2

$$F - mg = ma$$

C = ค่าคงที่ Viscross Friction

นำ m หาดตลอด

$$\frac{F}{m} - g - \frac{cv}{m} = a \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.4)
$$F_1 = \frac{A\mu N^2 i^2}{l^2}$$

ค่าคงที่ในแกนเหล็ก
$$\text{constant} = \frac{A\mu N^2}{l^2} = k \quad (2.6)$$

นำค่าสมการที่ (2.6) มาแทนในสมการที่ (2.5)

$$\frac{A\mu N^2 v^2}{l^2 R^2 m} + \frac{F_2}{m} - g - \frac{cv}{m} = a \quad (2.7)$$

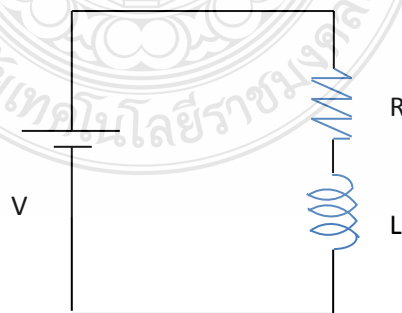
ให้ $a = \frac{d^2 x}{dt^2}$, $v = \frac{dx}{dt}$ และ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{kv^2}{mR^2} + \frac{F_2}{m} - 9.81 - \frac{c}{m} \frac{dx}{dt} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) เป็นสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการยกตัวของแรงแม่เหล็ก

2.1.2 สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง

เนื่องจากขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กนั้นเป็นขดลวดทองแดง ซึ่งมีทั้งความยาวและพื้นที่หน้าตัดของขดลวดทำให้เกิดค่าความต้านทาน (R) และค่าความนำไฟฟ้า (L) มีลักษณะการต่อวงจรแบบอนุกรม โดยมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรอนุกรมค่าความต้านทานและค่าเหนี่ยวนำ

จากสมการ แรงดันของเคอร์ชอฟ

$$V=V_R +V_L \quad (2.9)$$

สมการชั่วขณะ

$$V=RI(t)+L\frac{di(t)}{dt} \quad (2.10)$$

ทรานเขียนด้วยวิธีลาปลาซทรานฟอร์ม

$$\int[V]=\int[RI(t)]+\int[L\frac{di(t)}{dt}] \quad ; \quad \frac{V}{s}=RI(s)+sLI(s)-Li(0+)$$

ค่าเริ่มต้น $Li(0+)=0$

$$\frac{V}{s}=RI(s)+sLI(s) \quad (2.11)$$

นำ L หารตลอดสมการ

$$\frac{V}{sL}=\frac{R}{L}I(s)+sI(s)$$

$$\frac{V}{sL}=\left(\frac{R}{L}+S\right)I(s)$$

$$I(s)=\frac{V}{L}\left[\frac{1}{s\left(s+\frac{R}{L}\right)}\right] \quad (2.12)$$

พิจารณา ด้วยเศษส่วนย่อย

$$\left[\frac{1}{s(s + R/L)} \right] = \frac{A}{s} + \frac{B}{(s + R/L)} \quad (2.13)$$

นำ $s(s + R/L)$ คูณตลอด $1 = A(s + R/L) + Bs$

$$0s + 1 = (A + B)s + \frac{AR}{L} \quad (2.13)$$

ดังนั้นคำตอบของ A และ B

$$A = L/R \quad (2.14)$$

$$B = -L/R \quad (2.15)$$

แทนค่าสมการที่ 2.14 และ 2.15 ลงในสมการ 2.13

$$I(s) = \frac{V}{L} \left(\frac{L/R}{s} - \frac{L/R}{s + R/L} \right)$$

$$I(s) = \frac{V}{R} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + R/L} \right) \quad (2.16)$$

จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ของขดลวดพันรอบแกนเหล็ก

2.1.3 คุณลักษณะเฉพาะแกนเหล็ก

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีบทบาทที่สำคัญในการประกอบเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ต่างๆ โดยที่สารแม่เหล็กของหม้อแปลงและตัว

เหนียวนำทำขึ้นจากวัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน ซึ่งมักใช้งานที่ความถี่ต่ำ 50- 60 เฮิร์ต จนกระทั่งความถี่สูงระดับ เมกะเฮิร์ต ในขณะที่วัสดุแม่เหล็กแบบแข็งนิยมใช้ทำเป็นแม่เหล็กถาวร

2.1.3.1 วัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน

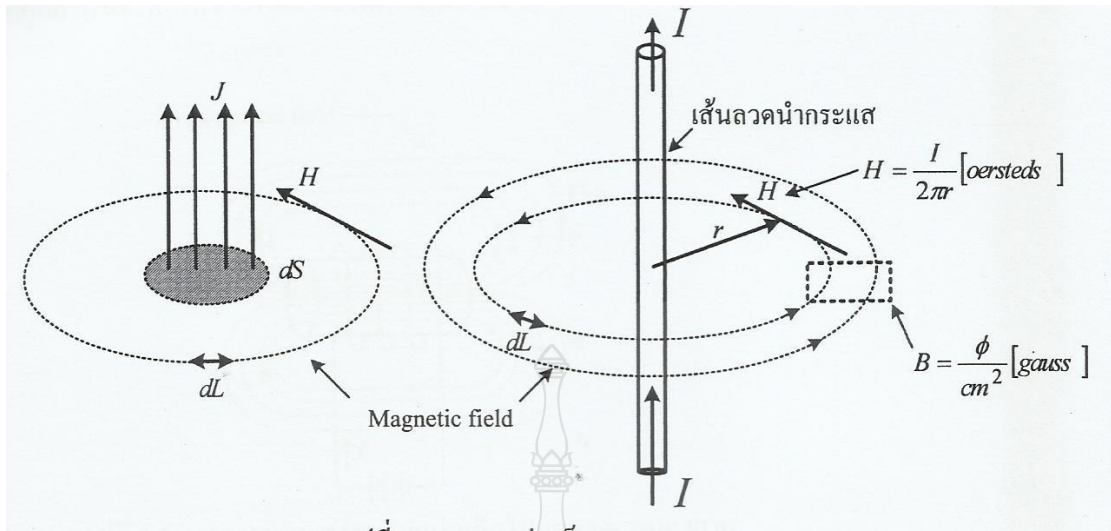
เป็นวัสดุแม่เหล็กที่กันอย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่นวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกนั้นมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำ ในขณะที่ความซึมซาบสัมพัทธ์สูงนิยมใช้ในการทำตัวเหนียวนำโดยแกนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกันอีกทั้งนิยมใช้ในการทำเครื่องจักรไฟฟ้าแบบหมุนอีกด้วย วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกนี้มักทำจากเหล็ก และนิเกิล ใช้งานที่ความถี่ต่ำ 50-60 เฮิร์ต ในขณะที่วัสดุแกนแม่เหล็กที่ทำจากเฟอร์ไรต์นั้นทำจากเซรามิกออกไซด์ของวัสดุ เช่น Mn, Zn, Ni, Cu, Ba และอื่นๆ ซึ่งถูกผสมกับออกไซด์ของเหล็ก ใช้งานตั้งแต่ย่านความถี่ต่ำประมาณ 1kHz จนถึงประมาณ 100MHz

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะต่างๆของวัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็ก[9]

วัสดุแกนแม่เหล็ก	B_{sat} (T)	μ_r	ρ ($\mu\Omega$ -cm)	$W_{g(max)}$ (J/cm ³)
Ferrite-i	0.2-0.3	150	10^{11}	0.035
Ferrite-ii	0.3-0.4	1000-4000	10^8	0.143
Nickel alloys	1.5	4000	45	0.895
Metallic glass/metglass	1.6	10000	125	1.018
Silicon-steel	2.0	5000	40	1.59
Core หรือ armature-iron	2.1	4500	25	1.755
Low silicon-iron	2.2	2700	10	1.925

2.1.3.2 หน่วยแม่เหล็ก

วงจรแม่เหล็กสามารถอธิบายได้จากกฎของแอมแปร์ตามรูปที่ 2.5 การหาพื้นที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กในวงปิดใดๆ จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลในวงปิดนั้น



รูปที่ 2.5 สนามแม่เหล็ก[9]

$$\int H dL = \int J dS = \sum I = NI = F \quad (2.17)$$

$$\int J dS = I_{\text{close}} \quad (2.18)$$

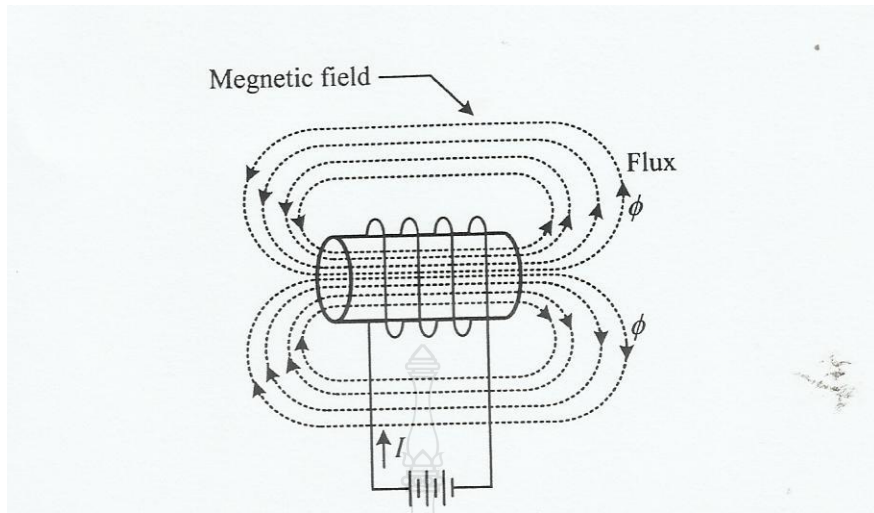
เมื่อ

dL = ความยาวช่วงสั้นของสนามแม่เหล็ก

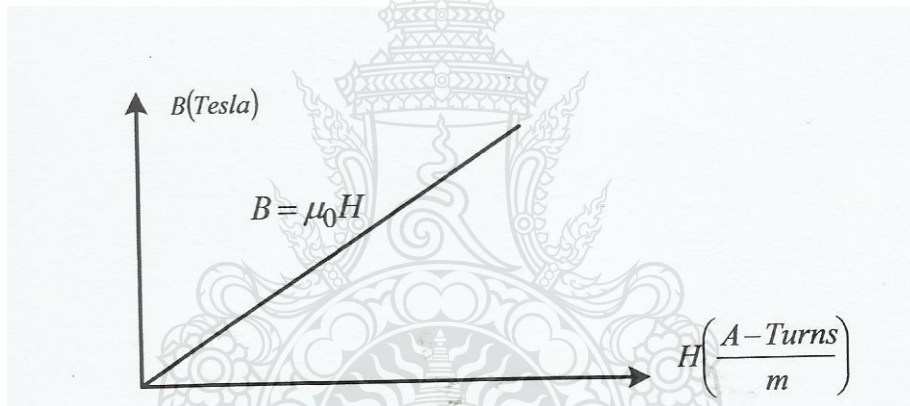
J = ความหนาแน่นของกระแส

ds = พื้นที่ที่กระแสไหลผ่าน

จากหลักการในรูปเมื่อนำขดลวดมาพันหลายๆ รอบในแกนอากาศตามรูปที่ 2.6 และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดจะเกิดการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าฟลักซ์อยู่รอบๆ ขดลวดและมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น โดยที่ขนาดของฟลักซ์นั้นถูกกำหนดจากผลคูณของกระแสและจำนวนรอบของขดลวดหรือเรียกอีกอย่างว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็ก เช่นเดียวกับแม่เหล็กถาวรแบบแท่ง ขดลวดแกนอากาศในบริเวณที่มีฟลักซ์ไหลออกถูกกำหนดให้เป็นขั้วเหนือและในตรงกันข้ามบริเวณขั้วใต้คือปลายขดลวดที่มีฟลักซ์ไหลเข้า

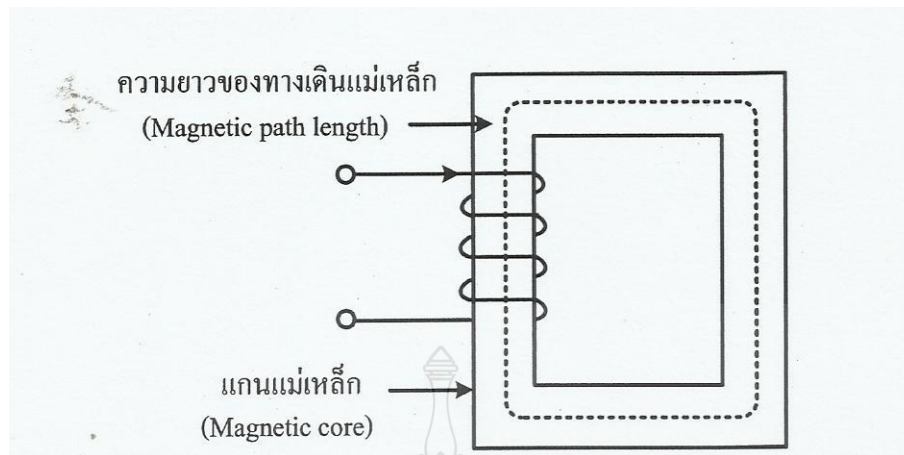


รูปที่ 2.6 การกระจายของสนามแม่เหล็กในขดลวดแกนอากาศ[9]

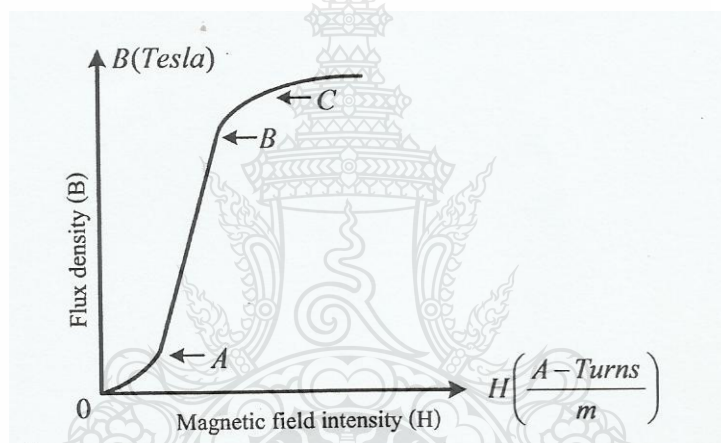


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H[9]

รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และความเข้มของแรงแม่เหล็ก อัตราส่วนระหว่างกันเรียกว่า ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสำหรับขดลวดแกนอากาศ อัตราส่วนมีค่าเป็น 1 เมื่อคำนวณในระบบ cgs หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า gauss per oersted ซึ่งเออร์สเตดกำหนดให้ $1 \text{ Oe} = 1000/4\pi$



รูปที่ 2.8 เส้นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดพันบนแกนแม่เหล็ก[9]



รูปที่ 2.9 เส้นโค้งการสร้างสนามแม่เหล็ก[9]

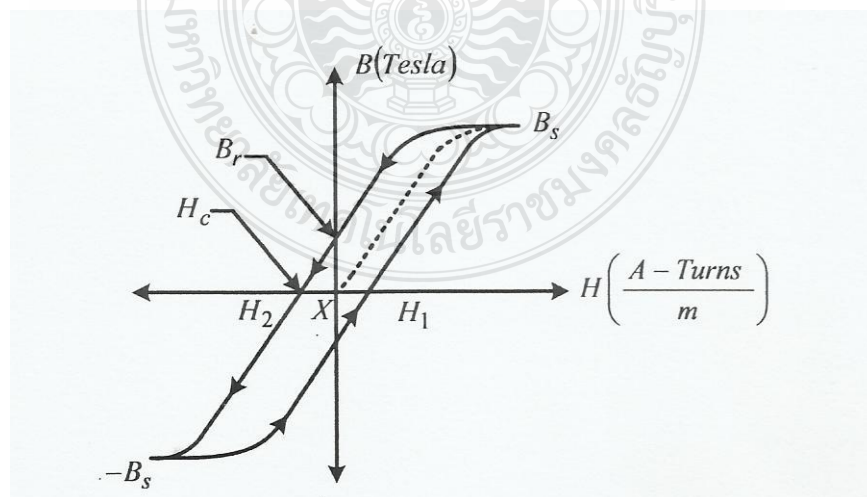
จากรูปที่ 2.8 เมื่อมีการจ่ายกระแสเข้าไปที่ขดลวดโดยที่แกนแม่เหล็กทำจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจากศูนย์อย่างช้าๆ ดังแสดงตามรูปที่ 2.9 ซึ่งค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงจุด A จากนั้นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุด B และถัดจากจุด B ดูเหมือนว่าเกือบจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของ H เนื่องจากตำแหน่งถัดจากจุด B แกนแม่เหล็กอัตราส่วนของ B/H จะเข้าใกล้หนึ่งยูนิตในหน่วยของ gauss per oersted เช่นเดียวกับกับขดลวดแกนอากาศซึ่งที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.1.3.3 วงรอบฮิสเตอร์รีซิส

เมื่อวัสดุแม่เหล็กผ่านการทำแม่เหล็กและหักล้างการทำแม่เหล็กในหนึ่งวงรอบการทำงานสามารถพล็อตกราฟ B-H ได้ดังรูปที่ 2.10 โดยที่วงรอบฮิสเตอร์รีซิสเริ่มจากที่จุด X ถึงจุดอิ่มตัว (B_s) และเมื่อ H ถูกทำให้ลดต่ำลงความหนาแน่นของฟลักซ์ก็ไม่ได้ลดลงมาตามเส้นประเดิมจนกระทั่ง H มีค่าเป็นศูนย์ความหนาแน่นของฟลักซ์มีค่าเท่ากับ B_r ซึ่งเรียก B_r นี้ว่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง

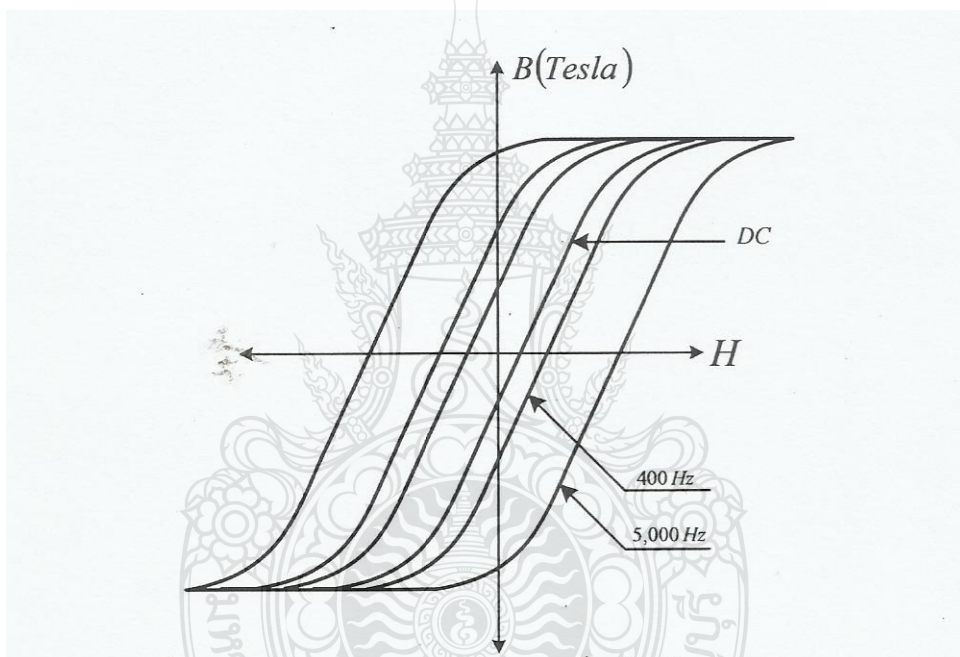
เมื่อ H กลับเข้ามาทางด้านลบที่ตำแหน่ง H_2 ความหนาแน่นของฟลักซ์มีค่าเป็นศูนย์เรียกความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่าการบังคับ coercive force (H_c) ในส่วนของวงรอบฮิสเตอร์รีซิสทางด้านลบนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นโค้ง B-H ทางด้านบวกโดยจะสังเกตว่าในขณะที่ H มีค่าเป็นศูนย์ยังมีฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างดังนั้นในการรีเซ็ตแกนแม่เหล็กให้มีความหนาแน่นของฟลักซ์เป็นศูนย์จึงต้องทำการจ่าย H เข้าไปในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อหักล้างฟลักซ์แม่เหล็กให้เป็นศูนย์

นอกจากนี้วงรอบฮิสเตอร์รีซิสยังแสดงค่าความสูญเสียพลังงานในแกนที่เรียกว่าค่าความสูญเสียฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้และความถี่ในการใช้งานของแกนค่าความสูญเสียฮิสเตอร์รีซิสเป็นส่วนหนึ่งของพลังงานสูญเสียที่พบในแกนแม่เหล็กสำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการกลับไปมาของสนามไฟฟ้าทำให้ฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงและเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสปริมาณน้อยในแกนแม่เหล็กที่เรียกว่ากระแสไหลวน

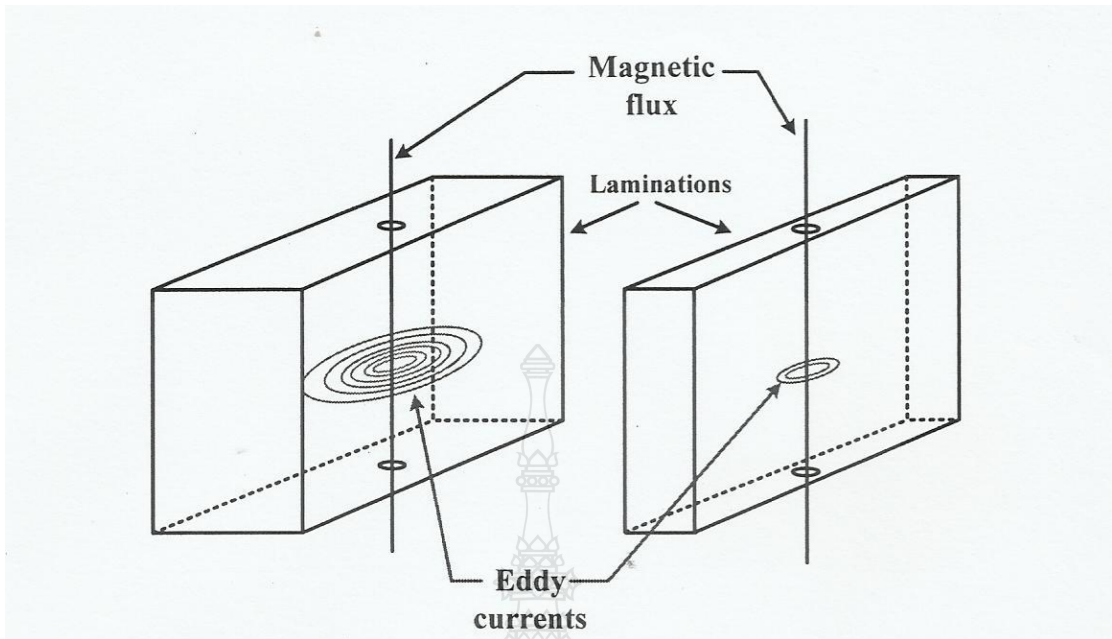


รูปที่ 2.10 วงรอบฮิสเตอร์รีซิส[9]

ขนาดของกระแสไหลวนนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ และความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก รวมไปถึงค่าความต้านทานและความหนาของวัสดุแกนแม่เหล็ก วงรอบฮิสเตอร์รีซิสจะมีขนาดกว้างมากขึ้นเมื่อความถี่ใช้งานสูงมากขึ้น นอกจากนี้กระแสไหลวนยังมีสัดส่วนขึ้นอยู่กับแรงดันเหนี่ยวนำในแกนแม่เหล็กโดยเมื่อเพิ่มแรงดันทำให้กระแสไหลวนเพิ่มสูงขึ้นในทางตรงกันข้ามกระแสไหลวนจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันลดลง ค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนจะอยู่ในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นกับแกนแม่เหล็ก ซึ่งสามารถลดผลของกระแสไหลวนได้จากการทำให้แกนแม่เหล็กเป็นแผ่นบางๆ ดังแสดงตามรูป



รูปที่ 2.11 วงรอบฮิสเตอร์รีซิสกว้างมากขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ใช้งาน[9]



รูปที่ 2.12 ผลกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนแม่เหล็กแผ่นหนาและแผ่นบาง[9]

2.2.1.4 การคำนวณตัวเหนี่ยวนำ และการออกแบบตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.2.1.4.1 การคำนวณตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดตัวนำจะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นรอบๆ ขดลวด โดยที่ค่าตัวเหนี่ยวนำจะสัมพันธ์กับฟลักซ์เกี่ยวคล้อง(Flux linkage, λ)เมื่อกำหนดให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็กคงที่ดังนั้นสมการของตัวเหนี่ยวนำกำหนดได้โดย

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (2.19)$$

จากกฎของแอมแปร์สมมติว่าไม่คิดผลของฟลักซ์รั่วไหลภายนอกแกนแม่เหล็กและฟลักซ์แม่เหล็กไหลอยู่ในแกนอย่างคงที่ไปตามความยาวแกนแม่เหล็ก (l_c)

$$H l_c = NI \quad (2.20)$$

จากการสมมาตรของแกนทำให้หน้าตัดขวางของพื้นที่แกน(A_c) มีค่าเท่ากัน เป็นผลให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าคงที่

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l_c} \quad (2.21)$$

ฟลักซ์ในแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ

$$\phi = BA_c = \mu_0 \mu_r A_c \frac{NI}{l_c} \quad (2.22)$$

ตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} = \mu_0 \mu_r A_c \frac{N^2}{l_c} \quad (2.23)$$

หรือ

$$L = \frac{N^2}{R_c} \quad (2.24)$$

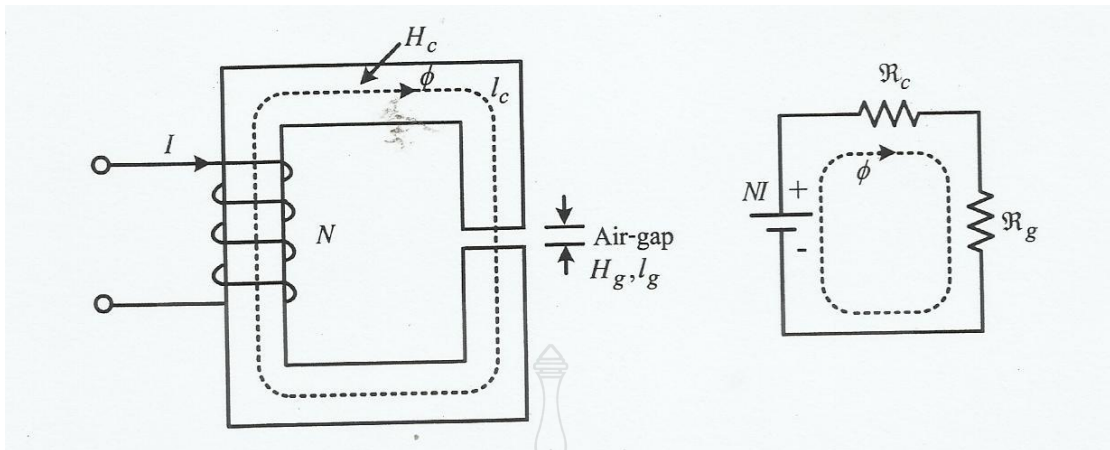
2.2.1.4.2 การคำนวณตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศ

ถ้าช่องว่างอากาศมีความยาวเท่ากับ l_g ดังนั้นค่าความต้านทานในแกนแม่เหล็ก R_c ในกรณีที่มีช่องว่างอากาศมีค่าเท่ากับ

$$R_c = \frac{l_c - l_g}{\mu_0 \mu_r A_c} \approx \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} \quad (2.25)$$

และความต้านทานช่องว่างอากาศ R_g มีค่าเท่ากับ

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_c} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.13 ตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศ[9]

ผลรวมของค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reactance) คือ $R = R_c + R_g$ เนื่องจาก l_c/μ_r มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ l_g/μ_0 ดังนั้นฟลักซ์ในแกนแม่เหล็กและช่องว่างอากาศคือ

$$\phi = \frac{\text{mmf}}{R} = \frac{NI}{R_c + R_g} = \frac{NI}{\frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} + \frac{l_g}{\mu_0 A_c}} \quad (2.27)$$

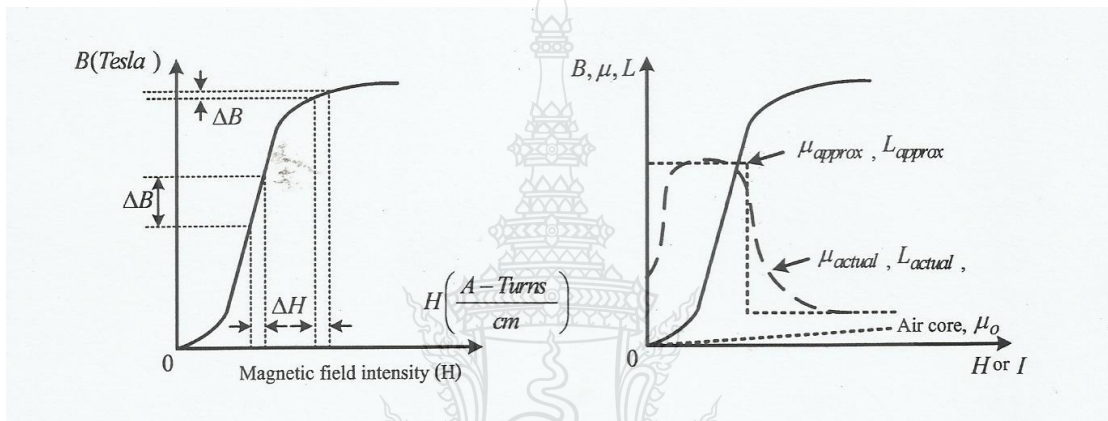
$$= \frac{NI}{\frac{1}{\mu_0 A_c} \left(\frac{l_c}{\mu_r} + l_g \right)} = \frac{NI}{\frac{l_g}{\mu_0 A_c}} \quad (2.28)$$

$$\phi = \frac{NI \mu_0 A_c}{l_g} \quad (2.29)$$

ประมาณขนาดตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศมีค่าเท่ากับ

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} = \mu_0 A_c \frac{N^2}{l_g} = \frac{N^2}{R_g} \quad (2.30)$$

กรณีที่ตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศค่าตัวเหนี่ยวนำจะไม่คงที่ถึงแม้ว่าค่าความซึมซาบแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กถูกกำหนดให้มีค่าคงที่แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่าของ μ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสที่แสดงในรูปที่ 2.14 และจะมีค่าลดลงเมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเกิดการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กในขณะเดียวกันตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศจะมีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องมีการเปลี่ยนแปลงกระแสเนื่องจาก μ_0 มีลักษณะเป็นเส้นตรงแต่อย่างไรก็ตามช่องว่างอากาศจะทำให้ค่าของตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลงตามสมการ



รูปที่ 2.14 เส้นโค้ง B-H และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก[9]

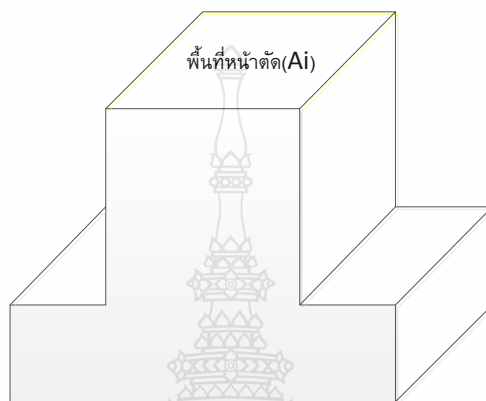
2.1.5 การกำหนดขนาดพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า[8]

ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนอื่นก็ต้องกำหนดพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้สัมพันธ์กับงานที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ถ้ามีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับแรงดันไฟฟ้า 110 โวลต์ และกินกระแสไฟฟ้า 10 แอมป์ ก็แสดงว่าอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับหรือมากกว่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ ซึ่งโดยปกติแล้วจะต้องใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังสูงกว่าประมาณ 1.1-1.3 เท่า กล่าวคือ ประมาณ 1200-1500 โวลต์-แอมป์ และมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเป็น 220/110 โวลต์

2.1.6 การหาพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก(A)

ในการหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก เพื่อให้ได้เหมาะสมกับพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงที่กำหนด จะสามารถทำได้โดยใช้สูตรซึ่งมีสำเร็จ โดยที่สูตรนี้จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่กล่าวถึงนี้ ก็คือพื้นที่หน้าตัดส่วนที่ถูก

พันด้วยขดลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า ถ้าเป็นแกนเหล็กแบบคอร์ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กก็คือ ความกว้างของขาค้านใดด้านหนึ่งคูณกับความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกัน ถ้าเป็นแกนเหล็กแบบเชลล์ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กส่วนที่พันขดลวดก็คือผลคูณของความกว้างของขากลางของแกนเหล็กตัวอี่กับความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกัน สูตรการหาพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กมีดังนี้



รูปที่ 2.15 พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

สูตรพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

$$A_i = 1.156 \sqrt{VA} \text{ หน่วย (ซม.)}^2 \quad (2.31)$$

2.1.7 การหาขนาดของลวดตัวนำที่ใช้พันหม้อแปลงไฟฟ้า[8]

2.1.7.1 ขนาดของลวดตัวนำที่ใช้พันเป็นขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ซึ่งจะต้องไม่ให้ขดลวดร้อนจนเกินไปเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปเต็มที กล่าวคือขดลวดจะต้องไม่รับกระแสไฟฟ้ามากเกินไป เมื่อเปรียบเทียบขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้กันมาก จะอยู่ในระหว่าง 400-700 เซอคูลาร์มิล/แอมแปร์ ค่าตัวเลขดังกล่าว สามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมกล่าวคือ ถ้าใช้ค่าตัวเลขน้อยเช่น 400 เซอคูลาร์มิล/แอมแปร์ ก็จะได้ขนาดของขดลวดตัวนำเล็ก ซึ่งจะมีผลเสียทางด้านเรกกูเลชัน ถ้าใช้ตัวเลข 700 เซอคูลาร์มิล/แอมแปร์ จะได้ขนาดของลวดตัวนำโตกว่า ซึ่งจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีเรกกูเลชันดี แต่มีราคาจะแพงกว่า ดังนั้นจะพิจารณาคุณลักษณะการใช้งานที่เหมาะสมด้วย ซึ่งลักษณะดังกล่าวอาจแบ่งออกได้ดังนี้

ก. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานชั่วคราว คือการที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานเป็นครั้งคราวไม่ต่อเนื่อง ก็ควรจะเลือก 400-500 เซอร์คูลาร์มิล/แอมแปร์

ข. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ต่อเนื่องเป็นเวลานาน ในลักษณะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ จะทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานานหลายชั่วโมง และมีอากาศถ่ายเทพอสมควรก็ควรจะ ใช้ตัวเลขประมาณ 500-650 เซอร์คูลาร์มิล/แอมแปร์

ค. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานต่อเนื่องหรือตลอดเวลา โดยการถ่ายเทของอากาศไม่ดีพอก็ควรจะเลือกค่าประมาณ 650-700 เซอร์คูลาร์มิล/แอมแปร์

ตารางที่ 2.2 ข้อจำกัดทางด้านขนาดขดลวด[8]

เบอร์ลวด	จำนวนรอบ/ พท. 1 ซม. ²	พื้นที่หน้าตัด (CM)	เบอร์ลวด	จำนวนรอบ/ พท. 1 ซม. ²	พื้นที่หน้าตัด (CM)
AWG			AWG		
10	13.9600	10384	25	407.6500	320.4
11	17.5150	8234	26	514.6010	254.1
12	21.8550	6530	27	642.4670	201.6
13	27.4350	5178	28	813.7520	159.8
14	34.2550	4106	29	1009.0520	126.8
15	42.9350	3257	30	1267.1270	100.6
16	53.9400	2583	31	1581.0030	79.71
17	67.7350	2048	32	1960.7540	63
18	84.9400	1624	33	2511.0050	50.1
19	105.5550	1288	34	3029.2360	39.75
20	132.0600	1021	35	3875.0070	35.3
21	165.0710	810	36	4913.5000	25
22	207.7000	642.6	37	6138.0120	19.83
23	258.0750	509.4	38	7610.5150	15.72
24	325.5000	404	39	9703.0190	12.47
-	-	-	40	12028.020	9.891

จากตารางความสัมพันธ์ของจำนวนรอบของขดลวดตัวนำกับพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำใน พื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเซนติเมตรซึ่งจะทำให้ทราบว่าในพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเซนติเมตร มีขดลวดพัน

อยู่ทีรอบหรือมีจำนวนตัวนำก็ตัวเมื่อหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องหน้าต่างของแกนเหล็กได้แล้วก็สามารถทราบได้ว่าลวดที่จะพันนั้นพอดีกับช่องหน้าต่างหรือไม่ จะเห็นได้ว่าจำนวนตัวนำที่บรรจุในช่องหน้าต่างของแกนเหล็กนั้นก็คือจำนวนรอบของขดลวดตัวนำนั่นเอง

2.1.7.3 ขั้นตอนการหาขนาดขดลวดตัวนำ

ก. หาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ โดยใช้สูตร

$$I = \frac{VA}{E} \text{ หน่วย (แอมแปร์)} \quad (2.32)$$

ข. หาขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ โดยใช้สูตร(A con.)

$$A_{\text{con}} = \frac{I}{d_i} \text{ หน่วย (ตร.ซม.)} \quad (2.33)$$

โดยค่า d_i คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เลือกใช้ค่า 2.5-5

2.1.7.4 การหาความยาวของขดลวดตัวนำ

$$h = Sd \text{ หน่วย (ซม.)} \quad (2.34)$$

เมื่อ S = จำนวนชั้นของขดลวดที่พัน(ชั้น)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำที่หุ้มฉนวน(ซม.)

ก. หาจำนวนชั้นจากสูตร

$$S = \frac{N}{N_s} \text{ หน่วย (ชั้น)} \quad (2.35)$$

เมื่อ N = จำนวนรอบของขดลวดตัวนำ(รอบ)

N_s = จำนวนรอบขดลวดต่อชั้น(รอบ)

ข. หาจำนวนชั้นจากสูตร

$$N_s = KY \text{ หน่วย (รอบ)} \quad (2.36)$$

เมื่อ K = จำนวนรอบต่อความยาว 1 ซม.

Y = ความยาวของชั้นของขดลวด(ซม.)

2.1.8 คุณสมบัติแม่เหล็กถาวร





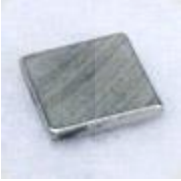

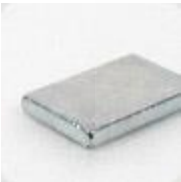



แม่เหล็กหมายถึง สารที่สามารถดึงดูดสารบางอย่างได้ เช่น เหล็ก นิกเกิล โดยทั่วไปแท่งแม่เหล็กจะมี 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือ และขั้วใต้เมื่อนำแท่งแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันวางไว้ใกล้กันจะเกิดการผลักกัน แต่ถ้าหากขั้วต่างกันจะดูดกัน แม่เหล็กแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือแม่เหล็กธรรมชาติและแม่เหล็กประดิษฐ์ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแม่เหล็กธรรมชาติ

Neodymium Magnet แม่เหล็กประเภทนี้จะมีแรงดูดสูง มีคุณสมบัติ และประสิทธิภาพสูงสุดในประเภทของแม่เหล็กถาวรทุกประเภท เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถส่วนมากใช้ประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องแม่เหล็กแยกเศษเหล็ก เครื่องจักรต่างๆ แม่เหล็กฮาร์ดดิสก์ แม่เหล็กมอเตอร์ แม่เหล็กเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แม่เหล็กเซนเซอร์ ฯลฯ ประโยชน์ส่วนมากใช้ประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้า, ฮาร์ดดิสก์, มอเตอร์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือกักเก็บไฟฟ้า ฯลฯ ใช้ในงานประดิษฐ์ที่ต้องการแม่เหล็กแรงสูง ใช้ในงานตกแต่งต่าง ๆ เช่น กระจุมแม่เหล็ก, กระจุมกระเป๋าก, กระจุมเสื้อ, กระจุมของมือถือใช้ในอุปกรณ์ทางด้านวิศวกรรม, วิทยาศาสตร์, อุปกรณ์การสื่อสาร, ของเล่น และอื่น ๆ

ส่วนประกอบ และคุณสมบัติแม่เหล็กแรงสูง เป็นแม่เหล็กแบบถาวร นีโอไดเมียม (Neodymium (NdFeB)) ส่วนประกอบหลักๆ ทำจาก นีโอไดเมียม (Neodymium), เหล็ก และ โบรอน

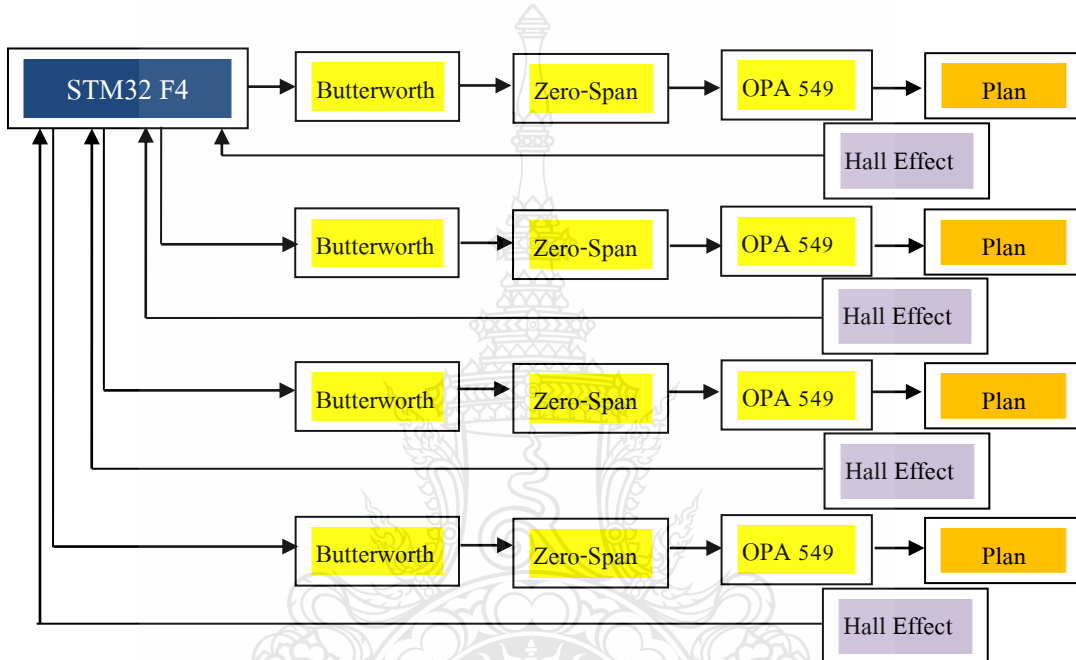
มีคุณสมบัติ ประสิทธิภาพ และขั้วสูงที่สุดในประเภทของแม่เหล็กถาวร เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายการกำจัดเศษเหล็กออกจากแม่เหล็กแรงสูงให้ใช้เทปใสต่างๆไป ดัดที่แม่เหล็กตรงเศษเหล็ก และดึงออกมา เศษเหล็กจะหลุดติดเทปใสออกมาอย่างง่ายดาย

ตารางที่ 2.3 รูปแบบของแม่เหล็กนีโอไดเมียม[10]

ภาพ	แบบ	ขนาด	ลักษณะขั้วเหนือ-ใต้
	A1	กว้าง 14 มม. xยาว 29 มม. หนา 1.8 มม. แบบสี่เหลี่ยม	 ขั้วบน-ล่าง
	A2	กว้าง 14 มม. xยาว 34 มม. หนา 1.75 มม. แบบสี่เหลี่ยม	 ขั้วบน-ล่าง
	A4	กว้าง 15 มม. xยาว 15 มม. หนา 1.5 มม. แบบสี่เหลี่ยม	 ขั้วบน-ล่าง
	A5	กว้าง 9.5 มม. xยาว 15 มม. หนา 1.8 มม. แบบสี่เหลี่ยม	 ขั้วบน-ล่าง
	A12	กว้าง 19 มม. xยาว 29 มม. หนา 1.75 มม. แบบสี่เหลี่ยม	 ขั้วบน-ล่าง

2.2 หลักการทำงานของวงจรควบคุม

แผนผังการทำงานของวงจรควบคุม ดังรูปที่ 2.15 เป็นการควบคุมกระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า เพื่อจ่ายให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อใช้ในการควบคุมระดับการยกตัวของแกนเหล็ก ระบายทั้งนี้จะใช้ตัวตรวจจับสัญญาณ(Sensor) เป็นตัวส่งสัญญาณป้อนกลับเพื่อให้แต่ละจุดควบคุม สามารถควบคุมแกนระบายให้อยู่ในสถานะสมดุล

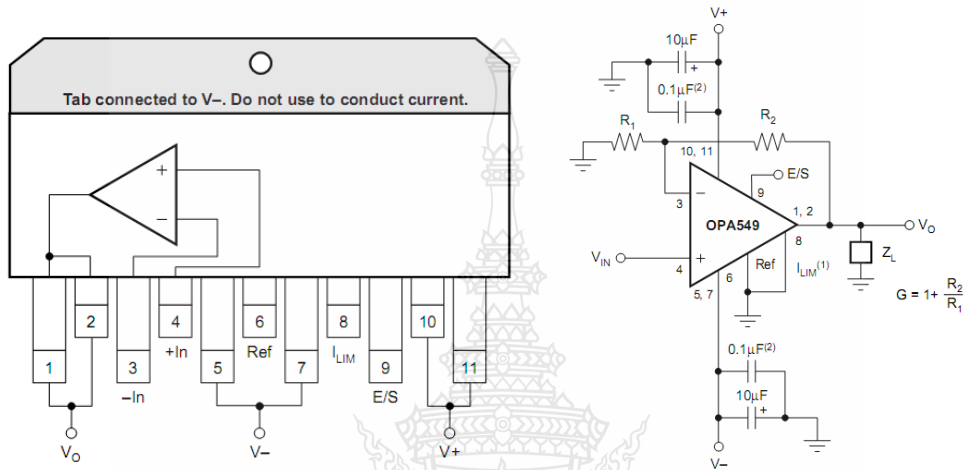


รูปที่ 2.16 แผนผังการควบคุมของวิทยานิพนธ์

สัญญาณในโครงการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4 ในการควบคุมหลัก โดยบอร์ดประมวลผลจะส่งสัญญาณเพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของขดลวดโดยผ่านวงจร แหล่งจ่ายแรงดันแบบปรับค่าได้(ในที่นี้ใช้ไอซี OPA549) อย่างไรก็ตาม OPA549 จะต้องมีการ ปรับแต่งให้ทำงานเป็นเชิงเส้นด้วยหลักการปรับแต่ง Zero และ Span โดยมีการกรองความถี่เข้า แบบ Butterworth

2.2.1 หลักการขยายแรงดันด้วยไอซี Op-Amp เบอร์ OPA 549

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จะใช้ควบคุมแกนแม่เหล็ก 4 จุด ในโครงการวิจัย จะใช้ไอซีสำเร็จรูป OPA549 ซึ่งตัวจ่ายแรงดัน Op-Amp เบอร์ OPA 549 เป็นออปแอมป์ลิเนียร์ สามารถจ่ายแรงดันได้ตั้งแต่ 8- 60 โวลต์ และจ่ายกระแสไฟฟ้่าต่อเนื่องได้ 8 แอมป์โดยมีค่ากระแสสูงสุด 10 แอมป์ ให้กับชิ้นงานโดยตรง โดยส่วนประกอบดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 การออกแบบ Power Op-Amp ด้วยไอซี เบอร์ OPA549

2.2.1.1 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า

โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมโดยจ่ายเข้าขา 4 ดังรูปโดยจ่ายไม่เกิน 0.12-2.5 โวลต์ แรงดันออก ถึง 8 - 60 โวลต์โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าหลักเข้าที่ขา 5,7 และ 10,11 โดยจ่ายขนาด ± 4 ถึง ± 30 และวิธีเซตแรงดันที่ต้องการของชิ้นงานจะใช้แรงดันที่นำมาจ่ายอยู่ในช่วง ± 4 ถึง ± 30

$$R_{CL} = \frac{75k}{I_{LIM}} - 7.5k \quad (2.37)$$

$$V_{CL} = \frac{R_{CL} \times 4.75V}{R_{CL} + 7.5k} \quad (2.38)$$

$$G = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.39)$$

$$V_o = V_{CL} (1 + R_1/R_2) \quad (2.40)$$

2.2.1.2 การควบคุมกระแส

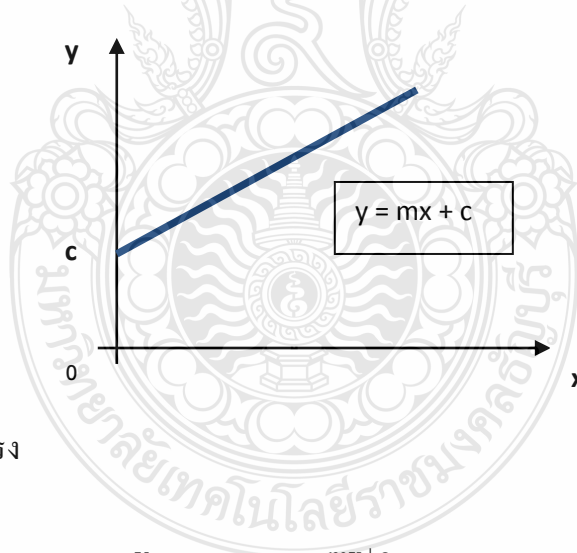
โดยใช้แรงดันที่ใช้ควบคุมโดยจ่ายเข้าขา 8 ดังรูปโดยจ่ายไม่เกิน 4.75 โวลต์ แรงดันออก ถึง 0-10 แอมป์ และวิีเซตแรงดันที่ต้องการของชิ้นงานจะใช้สูตร

$$V_{set} = (Ref) + 4.75 - (7500W)(I_{LIM}) / 15800 \quad (2.41)$$

$$I_o = \frac{15.8k(4.75)}{7.5k + R_{CL}} \quad (2.42)$$

2.2.2 การปรับความเป็นเชิงเส้นของวงจรมหาสัญญาณด้วยไอซี LF353

เนื่องจากไอซี เบอร์ OPA549 เป็น High power Op Amp ที่ทำงานเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน โดยปกติทำงานเป็นอัตรายาย จ่ายแรงดันขาออก 0-25 โวลต์ และรับแรงดันควบคุม 0-2.5 โวลต์ แต่ในโครงการนี้สัญญาณควบคุมที่รับมาจากบอร์ด STM32F4 อยู่ที่ 0-3.3 โวลต์ เมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำซึ่งแรงดันอยู่ระหว่าง 0-5 โวลต์ ดังนั้นจึงต้องให้หลักการ Zero-Span เพื่อปรับแรงดันควบคุมให้เหมาะสม



รูปที่ 2.18 กราฟเส้นตรง

จากสมการเส้นตรง $y = mx + c$ (2.43)

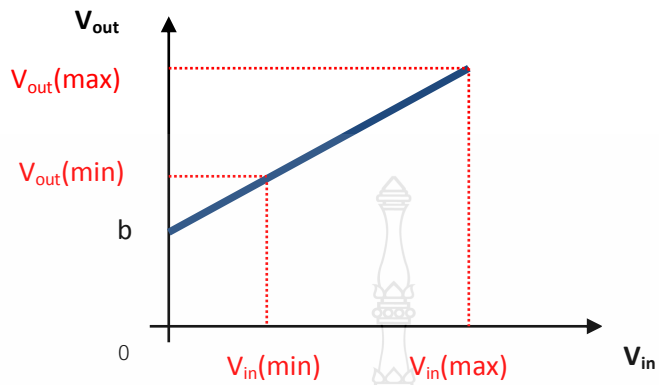
ดังนั้นสมการเส้นตรง $V_{out} = mV_{in} + b$ (2.44)

m = ความชันเรียกว่า (Span) b = ค่าขณะ V_{out} เริ่มต้นเป็นเส้นตรงเรียกว่า (Zero)

V_{in} = ค่าแรงดันอินพุต V_{out} = ค่าแรงดันเอาท์พุต

จากสมการคำนวณค่า Span ได้ 2 กรณีคือ

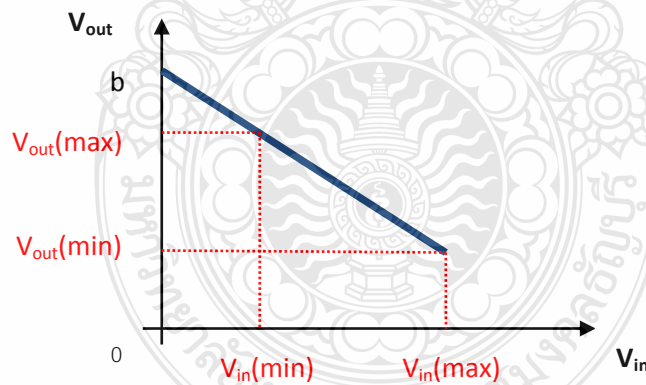
2.2.2.1 กรณีค่า Span เป็นบวก



รูปที่ 2.19 กราฟเส้นตรงมีความชันเป็นบวก

$$m = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{V_{out}(\max) - V_{out}(\min)}{V_{in}(\max) - V_{in}(\min)} \quad (2.45)$$

2.2.2.2 กรณีค่า Span เป็นลบ



รูปที่ 2.20 กราฟเส้นตรงมีความชันเป็นลบ

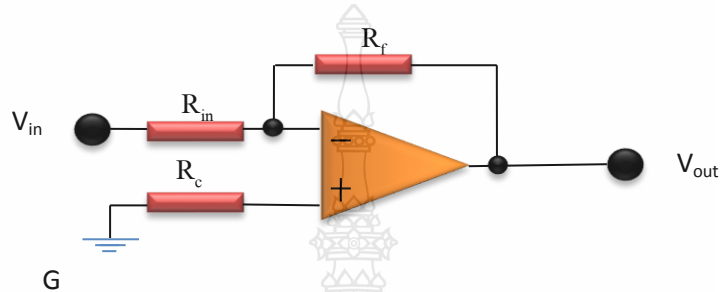
$$m = -\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = -\frac{V_{out}(\max) - V_{out}(\min)}{V_{in}(\max) - V_{in}(\min)} \quad (2.46)$$

สำหรับค่า Zero ในทั้งสองสมการคำนวณได้จาก

$$b = V_{out} - mV_{in} \quad (2.47)$$

2.2.3 วงจรพื้นฐาน Op-amp (Operational-Amplifier)

2.2.3.1 วงจร Inverting Amplifier



รูปที่ 2.21 วงจร Inverting Amp

เมื่อ $R_f = R_{feedback}$, $R_{in} = R_{input}$, $R_{out} = R_{output}$, $G = \text{Ground}$ และ $R_c = R_{compensate}$ โดย $R_{in} = R_f$

อัตราขยาย(AV)

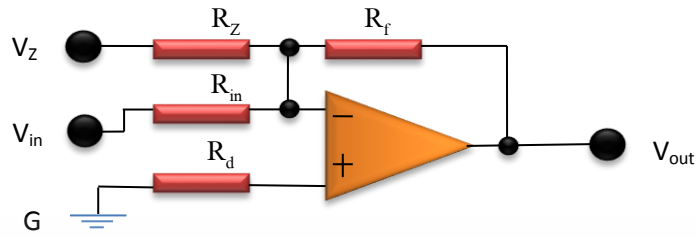
$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} \times V_{in} \quad (2.48)$$

R_c จะทำหน้าที่ชดเชยผลกระทบจากกระแสไบอัส มีค่าเท่ากับ

จะได้สมการเป็น
$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_{in}} \quad (2.49)$$

หรือ
$$R_c = \frac{R_f \cdot R_{in}}{R_f + R_{in}} \quad (2.50)$$

2.2.3.2 วงจร Summing Amplifier



รูปที่ 2.22 วงจร Summing Amp

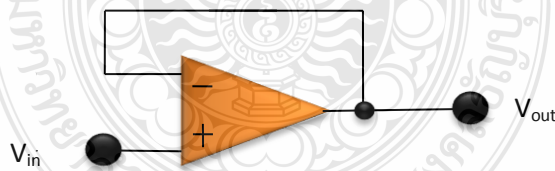
อัตราขยาย (AV)

$$V_{out} = - \left(\frac{R_f}{R_{in}} \times V_{in} \right) - \left(\frac{R_f}{R_Z} \times V_Z \right) \quad (2.51)$$

หาค่า R_d ได้จาก R_f , R_{in} และ R_Z ขนานกัน ดังสมการ

$$\frac{1}{R_d} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_{in}} + \frac{1}{R_Z} \quad (2.52)$$

2.2.3.3 Voltage Follower หรือ Buffer



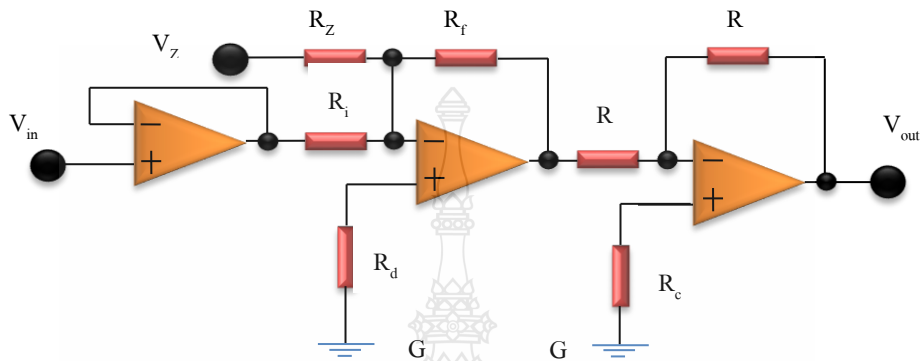
รูปที่ 2.23 วงจร Voltage Follower

อัตราขยาย (AV) = 1

$$V_{in} = V_{out} \quad (2.53)$$

2.2.4 การออกแบบ Zero และ Span ด้วยวงจรร Op-Amp

การออกแบบ Zero Span นั้นจะต้องใช้ Buffer ,Summing และ Inverting Amplifier เข้าด้วยกัน และคำนวณหาค่าความต้านทาน โดยต้องกำหนดแรงดันเข้า และแรงดันขาออก



รูปที่ 2.24 วงจร Zero และ Span

2.2.4.1 สำหรับการออกแบบวงจรร Zero Span ที่มีค่าความชันเป็นบวก

$$V_a = -\left(\frac{R_f}{R_{in}} \times V_{in}\right) - \left(\frac{R_f}{R_Z} \times V_Z\right) \quad (2.54)$$

$$V_{out} = -\frac{R}{R} \times V_a \quad (2.55)$$

$$V_{out} = -V_a \quad (2.56)$$

นำ $-V_a$ แทนค่า

$$V_{out} = \left(\frac{R_f}{R_{in}} \times V_{in}\right) + \left(\frac{R_f}{R_Z} \times V_Z\right) \quad (2.57)$$

$$V_{out} = R_f \left(\left(\frac{V_{in}}{R_{in}}\right) + \left(\frac{V_Z}{R_Z}\right) \right) \quad (2.58)$$

จากสมการ

$$V_{out} = mV_{in} + b$$

สมการ Zero Span จะได้

$$V_{out} = \left(\frac{R_f}{R_{in}} \times V_{in} \right) + \left(\frac{R_f}{R_Z} \times V_Z \right) \quad (2.59)$$

ดังนั้นได้ค่า

$$m(\text{Span}) = \left(\frac{R_f}{R_{in}} \right) \quad (2.60)$$

$$b_{(\text{Zero})} = \frac{R_f}{R_Z} \times V_Z \quad (2.61)$$

2.2.4.2 สำหรับการออกแบบวงจร Zero และ Span ที่มีค่าความชันเป็นลบ

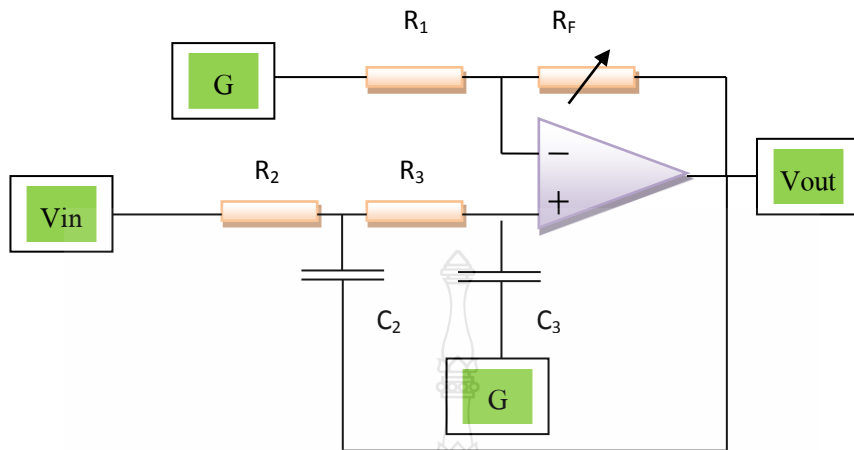
ทำได้โดยใช้วงจรเช่นเดียวกันแต่จะใช้วงจร Non-Inverting Amp ที่มีอัตราขยายเป็น 1 หรือใช้ Voltage follower มาแทนวงจร Inverting

$$m(\text{Span}) = - \left(\frac{R_f}{R_{in}} \right) \quad (2.62)$$

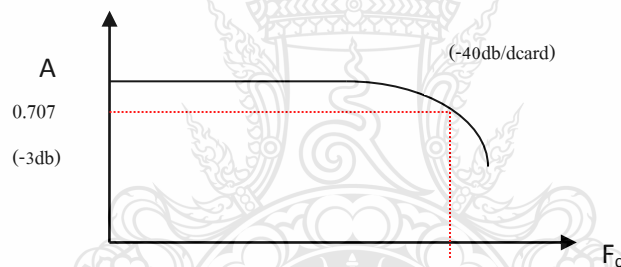
$$b(\text{Zero}) = - \frac{R_f}{R_Z} \times V_Z \quad (2.63)$$

2.2.5 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบ Butterworth

เนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 ที่ใช้ในโครงการมีช่อง Digital to Analog ไม่เพียงพอต่อการใช้งานจึงได้นำเอาช่องสัญญาณ PWM มาใช้ทดแทนโดยการนำวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ทซ์ (Butterworth) มาทำการกรอง PWM ให้อยู่ในรูปแบบลิเนียร์อนาลอก



รูปที่ 2.25 วงจร Butterworth



รูปที่ 2.26 กราฟความถี่ของวงจร Butterworth

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_3 C_2 C_3}} \quad (2.64)$$

ลำดับขั้นการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าความถี่ตัด(Frequency cut off ; f_c)

ขั้นตอนที่ 2 เพื่อให้การคำนวณได้สะดวก จะกำหนดค่า $R_2=R_3=R$ และ $C_2=C_3=C$

และกำหนดค่า $C \leq 1\mu F$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า R จากสมการ

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} \quad (2.65)$$

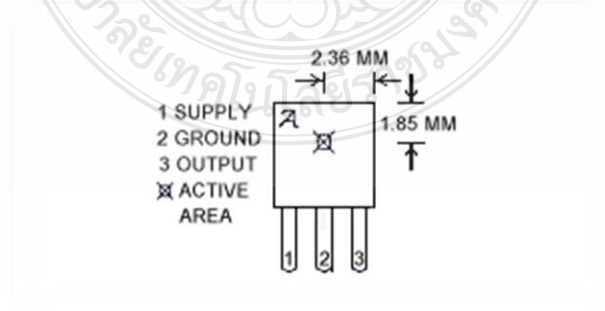
ขั้นตอนที่ 4 เนื่องจากได้กำหนดให้ค่า $R_2=R_3=R$ และ $C_2=C_3=C$ ดังนั้นอัตราขยาย

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (2.66)$$

จากวิธีการออกแบบข้างต้นสมมติอัตราขยายจะมีค่า 1.586 นั่นคือ $R_f = 0.586R_1$ โดยอัตราค่าขยายนี้จะป็นสัดส่วนผลตอบสนองของวงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ท ด้วยเหตุนี้เลือกค่า $R_1 \leq 100 \text{ k}\Omega$ และคำนวณหาค่า R_f

2.2.6 เซนเซอร์วัดความเข้มสนามแม่เหล็ก[13]ในโครงการนี้ใช้ Hall Effect Sensor เบอร์ A1301

แม่เหล็ก (magnet) เป็นสิ่งที่สามารถวัดความเข้มสนามแม่เหล็กได้ เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ เป็นต้น การที่แม่เหล็กดูดสารบางอย่างได้ เนื่องจากมีสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ในบริเวณโดยรอบแม่เหล็ก เราสามารถตรวจสอบว่าบริเวณใดมีสนามแม่เหล็กหรือไม่ โดยใช้เข็มทิศ แต่เราไม่สามารถทราบได้ว่ามีค่าเท่าใด นักวิทยาศาสตร์พยายามวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการต่าง ๆ แต่ในปัจจุบันเราสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้สะดวกและรวดเร็วโดยใช้ฮอลล์เซนเซอร์เชิงเส้น (Linear Hall sensor) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ฮอลล์เซนเซอร์เป็นวงจรรวมที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ซึ่งเป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวตั้ง เมื่อนำฮอลล์เซนเซอร์ไปต่อกับโวลต์มิเตอร์ แล้วนำไปวางใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กก็จะทำให้ทราบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้



รูปที่ 2.27 ฮอลล์เซนเซอร์

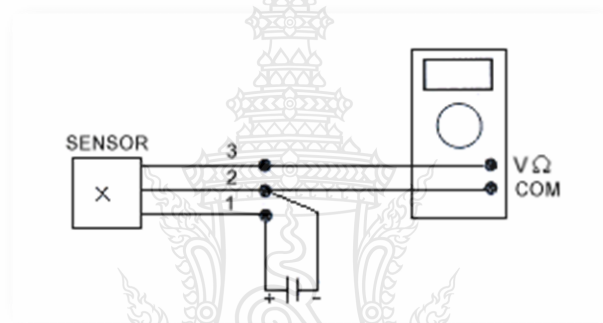
ฮอลล์เซนเซอร์เป็นวงจรรวม มีขนาดและลักษณะดังรูปที่ 1 และมีสมบัติดังนี้

input voltage 4.5-6V

offset voltage 2.5 V (ประมาณ)

sensitivity 13 V/T

เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงหรือเซลล์ไฟฟ้า 4.5-6 โวลต์ เข้ากับขา 1 และขา 2 และต่อโวลต์มิเตอร์เข้ากับขา 2 และขา 3 ดังรูปที่ 2 โวลต์มิเตอร์จะแสดงค่าประมาณ 2.5 โวลต์ ค่านี้เป็นความต่างศักย์ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก เรียกว่า offset voltage ค่านี้อาจเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับโวลเตจของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ต่อกับขา 1 และขา 2 แต่จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของโวลเตจของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง



รูปที่ 2.28 การต่อฮอลล์เซนเซอร์กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและโวลต์มิเตอร์



รูปที่ 2.29 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เมื่อนำแม่เหล็กเข้าใกล้พื้นที่ ของฮอลล์เซนเซอร์ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศของสนามแม่เหล็ก กล่าวคือถ้านำขั้วได้เข้าใกล้ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้านำขั้วเหนือเข้าใกล้ ความต่างศักย์จะมีค่าลดลง ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density)

$$B = (V_{\text{out (B)}} - V_{\text{out (O)}}) S^{-1} \quad (2.67)$$

เมื่อ $V_{\text{out (O)}}$ เป็นความต่างศักย์ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก

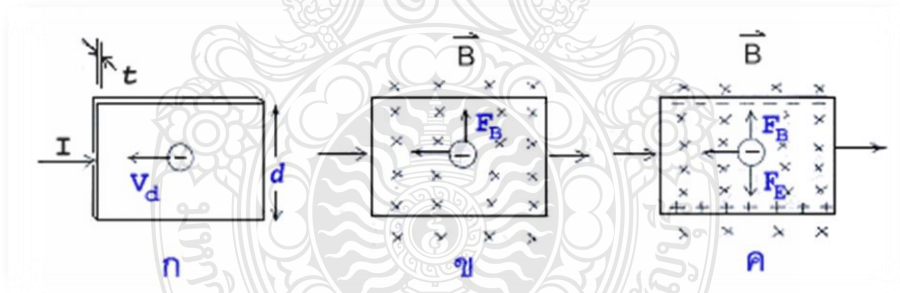
$V_{\text{out (B)}}$ เป็นความต่างศักย์ขณะมีสนามแม่เหล็ก

S เป็นสัมประสิทธิ์ความไว มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเทสลา (V/T)

สำหรับตัวรับรู้ฮอลล์ที่ใช้ในบทความนี้ $S = 13 \text{ V/T}$

B เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็ก หรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เทสลา (T)

ฮอลล์เซนเซอร์สามารถวัดสนามแม่เหล็กในบริเวณใกล้แม่เหล็กถาวร สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโซเลนอยด์และสนามแม่เหล็กใกล้เส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านได้ ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) นักศึกษามหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปกินส์ ซึ่งในขณะนั้นมีอายุ 24 ปี ได้พบว่า เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (charge carriers) ในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์



รูปที่ 2.30 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์อธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.30 ก-ค ดังนี้

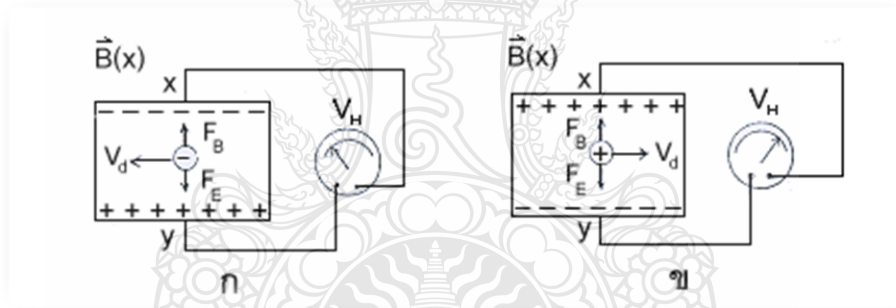
รูป ก แสดงแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง d หนา t และมีกระแสไฟฟ้า (conventional current) I ผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน v_d) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า I จากด้านขวาไปด้านซ้าย

รูป ข เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก B ในทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบางหรือกระดาษ จะเกิดแรงแม่เหล็ก F_B กระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบาง

รูป ค เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสอง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (hall field) E_H ในแผ่นตัวนำบางมีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบน สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า F_E กระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่าง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้าย โดยไม่เบนสนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำบางมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือโวลเตจ V ดังนี้

$$E_H = \frac{V_H}{d} \quad (2.68)$$

แรงดันที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (hall potential difference หรือ hall voltage) V_H พบว่า ความต่างศักย์ฮอลล์มีค่ามากที่สุด เมื่อแผ่นตัวนำบางทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซีลีคอน และเจอร์เมเนียม ส่วนตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความต่างศักย์ฮอลล์จะมีค่าน้อยกว่ามาก



รูปที่ 2.31 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ V_H

เราสามารถวัด V_H โดยต่อ มิลลิโวลต์มิเตอร์เข้ากับจุด x และจุด y ดังรูป ก สภาพชี้ของ V_H ทราบได้จากเครื่องหมายที่อ่านได้จาก มิลลิโวลต์มิเตอร์ จากรูป ก พาหะประจุมิอิเล็กตรอนจึงมีประจุลบ ถ้าพาหะประจุมิประจุบวก ทิศของ V_d และ E_H จะตรงข้ามกับในรูป ก แต่ทิศของ F_B และ E_E ยังคงเดิม ดังแสดงในรูป ข ทำให้ประจุบวกถูกผลักไปที่ขอบด้านขวา ส่วนประจุลบถูกผลักไปที่ขอบด้านซ้าย และสภาพชี้ของ V_H จะตรงข้ามกับกรณีที่พาหะประจุมิประจุลบ ขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน เราจะได้

$$(-e)E_H = (-e)V_d B \quad (2.69)$$

$$E_H = V_d B \quad (2.70)$$

จากสมการ $V_H = E_H d$ จะได้

$$V_H = V_d B d \quad (2.71)$$

เนื่องจากอัตราเร็วลอยเลื่อน V_d มีค่า

$$V_d = \frac{I}{neA} \quad (2.72)$$

เมื่อ

n เป็นจำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตร (หรือความหนาแน่นของพาหะประจุ)

A คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำบาง

แทนสมการ (2.72) ลงในสมการ (2.71) จะได้

$$V_H = \frac{IBd}{neA} \quad (2.73)$$

เนื่องจาก $t = \frac{A}{d}$ คือความหนาของแผ่นตัวนำบาง ดังนั้น

$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (2.74)$$

สมการ (2.65) เขียนได้ใหม่เป็น

$$B = neti^{-1} V_H \quad (2.75)$$

ปริมาณ V_H และ t ในสมการ (8) หาได้จากการวัด ส่วนค่า n ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัด วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนพาหะประจุน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ก็ยังมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ส่วนฉนวนมีจำนวนพาหะประจุน้อยมาก แต่ก็ยอมให้กระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยผ่าน จากการศึกษาพบว่า สารกึ่งตัวนำที่เจือสิ่งเจือปน $n \cong 10^{22} \text{ m}^{-3}$ และโลหะทั่วไปมีค่า $n \cong 10^{28} \text{ m}^{-3}$ ดังนั้น เราจึงสามารถหาความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าจากสมการ 2.75 ได้

ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นเทสลา (tesla) แทนด้วยสัญลักษณ์ T หน่วยเดิมของความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ เกาส์ (gauss) แทนด้วยสัญลักษณ์ G โดยที่ $1T = 10^4 G$

2.2.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM 32 F4

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นบอร์ดที่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทางพอร์ต USB จะทำงานร่วมกับ โปรแกรม Matlab โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดของ Arduino Atmega 328 เป็นอุปกรณ์ประเมินผลในการควบคุม และใช้ Accelerometre พร้อมกับ Gyroscope ซึ่งรวมอยู่ในโมดูลเดียวกันมาเป็นตัวช่วยในการวัดหาค่า ส่วนทางตัวควบคุมในการลดค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตนั้นได้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) โดยปรับค่า PID จากคอมพิวเตอร์ ในการควบคุมเพื่อให้รักษาสมดุลตัวเอง



รูปที่ 2.32 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4

คุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4ความเร็วในการประมวลผล 120 MIPS 192 kBytes สามารถบันทึกข้อมูลลงในบอร์ด แรงดันใช้งานหลักของบอร์ด 5 โวลต์ บนชิพมีเซนเซอร์ อุณหภูมิ ช่องแอนalog ประสงค์ 4 ช่อง 16 บิต และ 4 ช่องสำหรับ IC/OC/PWM 2 ช่อง ตัวนับการควบคุม ขั้นสูง 16 bit 2 ช่อง 12 bit สำหรับ DAC และเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ด้วย USB 2.0

2.3 ชนิดของการควบคุมและตัวควบคุมแบบพีไอดี

2.3.1 ชนิดของการควบคุมที่พบบ่อยในงานอุตสาหกรรม

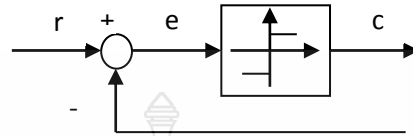
ระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรมมักเกี่ยวข้องกับการควบคุมใน 2 ลักษณะคือ

2.3.1.1 การควบคุมระบบด้วยการเปิดปิดการทำงาน

2.3.1.2 การควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณควบคุมที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าต่อเนื่องเป็น

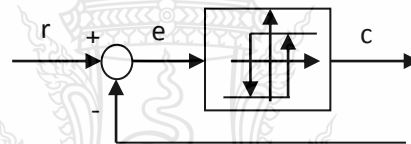
สัญญาณอนาล็อก

ตัวควบคุมแบบเปิดปิด(On-off หรือ Bang-bang Control)ลักษณะการทำงานก็คือการสั่งเปิดปิดการทำงานเมื่อผลตอบสนองมากกว่าสัญญาณอ้างอิง บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูป



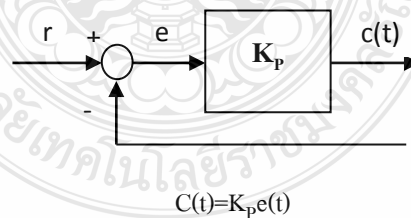
รูปที่ 2.33 ตัวควบคุมแบบเปิดปิด

ตัวควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Control) ลักษณะการทำงานก็คือการสั่งเปิดปิดการทำงานเมื่อผลตอบสนองมากกว่าหรือน้อยกว่าสัญญาณอ้างอิงบวกหรือลบด้วยย่านการสั่งการเปิดปิด บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูป



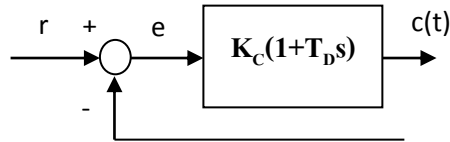
รูปที่ 2.34 ตัวควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional Control)ลักษณะการทำงานก็คือการส่งสัญญาณเอาที่พุดออกมาเป็นสัดส่วน โดยตรงกับสัญญาณค่าความผิดพลาด บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูป



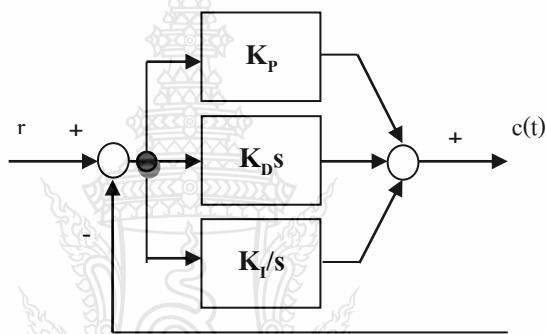
รูปที่ 2.35 ตัวควบคุมพีไอ

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ หรือ ตัวควบคุมแบบพีดี(Proportional-Derivative Control)แบบใช้ค่าเกินร่วม ลักษณะการทำงานก็คือการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบสัดส่วนและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูป



รูปที่ 2.36 ตัวควบคุมแบบพีดี

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์และอนุพันธ์หรือตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional Integral Control: PID Control) ลักษณะการทำงานก็คือการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบปริพันธ์และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูป 2.37



รูปที่ 2.37 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

2.3.2 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นตัวควบคุมที่นิยมมากในอุตสาหกรรมเพราะเป็นตัวควบคุมที่ใช้งานง่าย การปรับค่าเกินอาศัยหลักการที่ไม่ได้ซับซ้อนมากนักก็ให้ผลตอบสนองเป็นที่ยอมรับได้ สามารถปรับแต่งการควบคุมได้ง่ายเมื่อต้องการระบบควบคุมแบบพีไอดีมีตัวควบคุมย่อย 3 ตัวคือ

2.3.2.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมพี

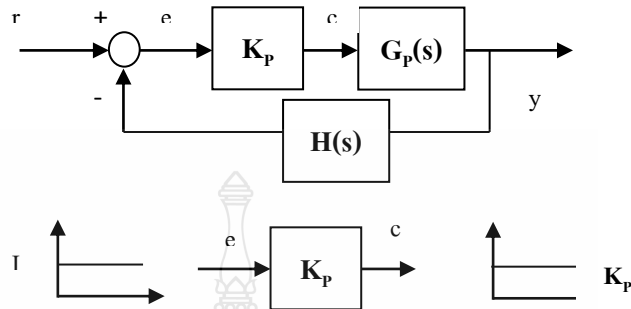
2.3.2.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมไอ

2.3.2.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุมดี

ในการควบคุมระบบทั่วไปมักใช้งานตัวควบคุมร่วมกันเช่น การควบคุมแบบพีไอ การควบคุมแบบพีดี และการควบคุมแบบพีไอดี

2.3.2.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน หรือตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม

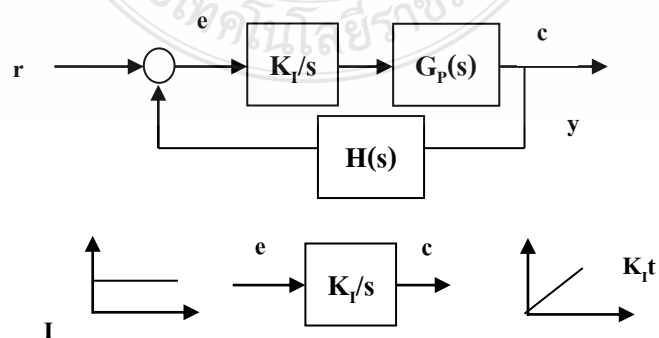
แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการขยายสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวด้วยค่า
 เกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูป



รูปที่ 2.38 ตัวควบคุมแบบพี

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ การปรับค่าเกนให้สูงขึ้นจะมีผล
 ทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือถ้านำไปใช้งานกับ
 ระบบชนิด 0 ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถขจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้แต่ก็สามารถทำ
 ให้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าน้อยลงได้ด้วยการปรับค่าเกนให้สูง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการปรับค่า
 เกนให้สูงมากขนาดไหนเอาต์พุตที่ออกจริงๆ จากตัวควบคุมมักมีค่าจำกัดและการปรับเกนให้มีค่าสูง
 สำหรับระบบที่มีอันดับสูง อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ เช่นการปรับเกนให้
 สูงขึ้นสำหรับระบบอันดับสอง ผลที่ตามมาก็คือค่าพุงเกินก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งอาจจะเป็น
 อันตรายต่อระบบได้

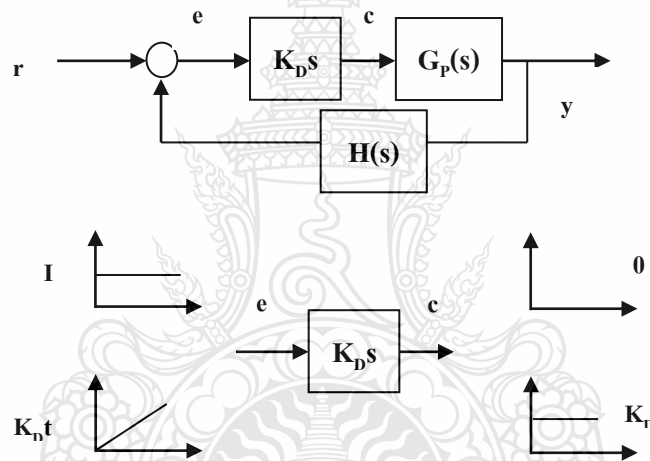
2.3.2.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมแบบไอ ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอา
 สัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้ว
 ตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอินทิเกรตสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวแล้วคูณ
 ด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูป



รูปที่ 2.39 ตัวควบคุมแบบไอ

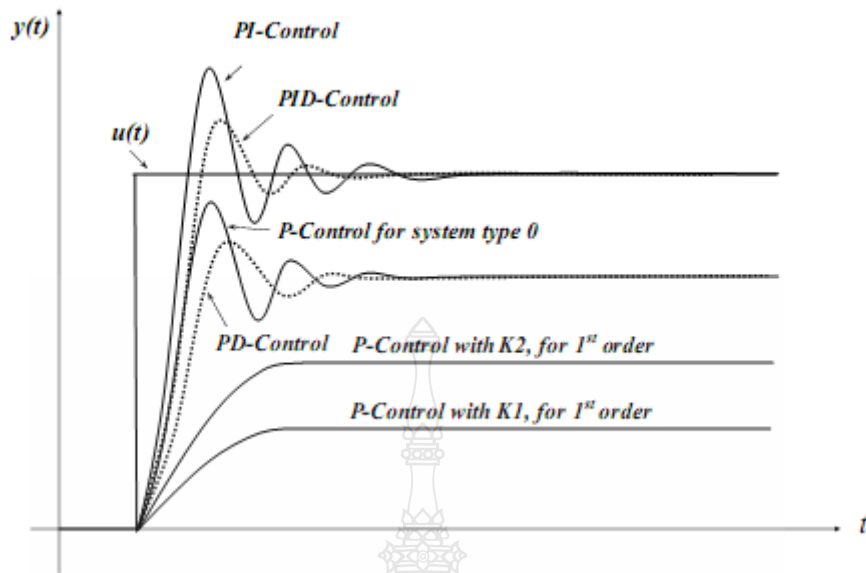
จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ถ้านำไปใช้กับระบบชนิด 0 ตัวควบคุมแบบนี้จะสามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ ข้อดีที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ไม่สามารถลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้และการปรับเกนให้มีค่าสูงอาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์เช่นการปรับเกนให้สูงขึ้นอาจจะมีผลทำให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งตัวได้

2.3.2.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุมแบบดี ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุมแล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอนุพันธ์สัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว แล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูป



รูปที่ 2.40 ตัวควบคุมแบบดี

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ใช้สำหรับลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้ ลดผลตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาได้ แต่ต้องปรับค่าเกนให้เหมาะสมด้วย ไม่เช่นนั้น อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำเอาตัวควบคุมนี้ไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ และการใช้ตัวควบคุมนี้อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ช้าลงได้



รูปที่ 2.41 ผลตอบสนองขาออกของตัวควบคุมพีไอดีแบบต่างๆ ในระบบ Step input

จากรูปจะเห็นว่าถ้าหากนำตัวควบคุมแบบพีไปใช้กับระบบที่เป็นอันดับหนึ่ง ผลตอบสนองที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวซึ่งสามารถลดผลกระทบได้ด้วยการเพิ่มค่าเกนของตัวควบคุมให้สูงขึ้น สำหรับการนำไปใช้กับระบบที่มีอันดับสูงกว่านั้นและเป็นระบบชนิด 0 ค่าความผิดพลาดสภาวะคงตัวก็จะมีค่าอยู่ และการลดผลกระทบด้วยการปรับค่าเกนของตัวควบคุมพีให้สูงขึ้นอาจจะส่งผลให้การพุ่งเกินมีค่าสูงขึ้นได้ ถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่างพีกับไอ หรือตัวควบคุมแบบพีไอกับระบบนี้แล้ว ตัวควบคุมแบบไอก็จะช่วยจำกัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวแต่ผลตอบสนองที่ได้จะยังมีค่าพุ่งเกินเหมือนเดิม ถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่างพีและดี หรือตัวควบคุมแบบพีดีกับระบบนี้แล้ว การพุ่งเกินของผลตอบสนองก็จะลดลง แต่ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวก็จะมีค่าอยู่ดังนั้นก็หากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่างพีไอ และดีด้วยการปรับค่าเกนให้เหมาะสมกับระบบนั้นๆ ก็จะได้ผลตอบสนองแบบหนึ่งวงต่ำกว่าวิกฤตที่มีค่าพุ่งเกินเหมาะสมกับระบบนั้น

2.3.3 การทดสอบหาค่าเกนที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดี

การที่จะได้ผลตอบสนองที่เหมาะสมของตัวควบคุมแต่ละแบบนั้นขึ้นอยู่กับอันดับและชนิดของระบบเป็นสำคัญ และระบบแต่ละระบบมีค่าเกนที่เหมาะสมต่างหากออกไป ทั้งนี้ยังต้องรวมไปถึงข้อกำหนดคุณลักษณะในการออกแบบด้วย เพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่ผู้ใช้และผู้ออกแบบพึงพอใจ

การให้ได้มาซึ่งค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบต่างๆไปที่อาจจะมีอันดับสูง เป็นเรื่องที่ยากลำบาก ในที่นี้จะนำเสนอวิธีการทดสอบระบบเพื่อหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เป็นที่นิยมมีด้วยกันอยู่ 2 วิธี

2.3.3.1 วิธีการของ Ziegler-Nichols

2.3.3.2 วิธีการของ Chien-hrones-Reswick หรือ CHR

2.3.3.1 การทดสอบด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols

การทดสอบวิธีนี้มีขั้นตอนดังนี้

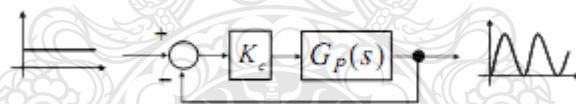
ขั้นตอนที่ 1 ต่อระบบควบคุมเป็นแบบวงรอบปิดด้วยตัวควบคุมแบบพีด้วยการป้อนกลับแบบหนึ่งหน่วย

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบระบบด้วยสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได

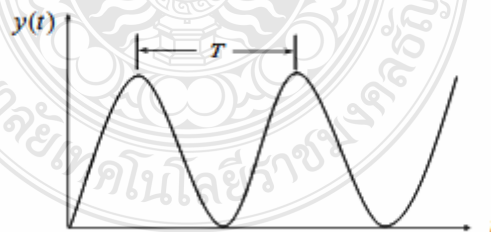
ขั้นตอนที่ 3 ปรับค่าเกณฑ์ให้สูงขึ้นจนกระทั่งเกิดผลตอบสนองแบบไม่มีการหน่วง(Undamped)

ขั้นตอนที่ 4 บันทึกค่าเกณฑ์ (K_u) และคาบเวลาของการแกว่งตัว (T)

ขั้นตอนที่ 5 นำค่าเกณฑ์และคาบเวลาของการแกว่งตัวที่ได้ไปเข้าสู่สูตรเพื่อหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบ



รูปที่ 2.42 การทดสอบระบบด้วยวิธีการของ Zigler Nichols



รูปที่ 2.43 ลักษณะของผลตอบสนองที่ได้

นำค่าเกณฑ์และคาบเวลาของการแกว่งมาเข้าสู่สูตรเพื่อหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของระบบควบคุมพีไอดีตามฟังก์ชันถ่ายโอนนี้

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.76)$$

หรือ

$$G_C(S) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \quad (2.77)$$

โดยที่

$$K_I = \frac{K_P}{T_I}, K_D = K_P T_D \quad (2.78)$$

ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบเป็นดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมตามวิธีการของ Ziegler Nichols

	KP	KI	KD
P-Control	$0.5K_C$	-	-
PI-Control	$0.45K_C$	$0.45K_C/0.83T$	-
PID-Control	$0.6K_C$	$0.6K_C/0.5T$	$(0.6K_C)(0.125T)$

ข้อจำกัดของการทดสอบระบบด้วยวิธีนี้ก็คือ ใช้ได้กับระบบที่มีผลตอบสนองแบบไม่มีการหน่วงเท่านั้นสำหรับระบบที่ไม่มีผลตอบสนองแบบนี้สามารถใช้การทดสอบด้วยวิธีการของ Chien-hrones-Reswick แทนได้ แต่ผลตอบสนองที่ได้จะมีค่าการพุ่งเกินต่ำกว่านี้

2.3.3.2 การทดสอบด้วยวิธีการของ Chien-hrones-Reswick

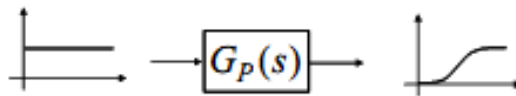
การทดสอบวิธีนี้มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทดสอบระบบแบบวงรอบเปิดหรือเป็นการทดสอบสิ่งที่ต้องการควบคุมด้วยสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดโดยตรง ดังรูป 2.44

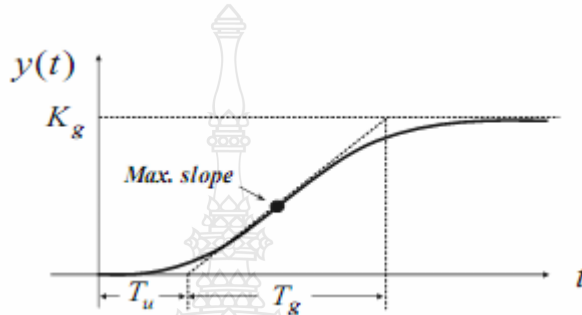
ขั้นตอนที่ 2 บันทึกค่าของผลตอบสนองในสภาวะคงตัว K_y และบันทึกลักษณะของผลตอบสนองที่ได้ ดังรูป 2.45

ขั้นตอนที่ 3 จากบันทึกลักษณะของผลตอบสนองที่ได้ หาจุดที่มีความชันสูงสุด ลากเส้นตรงตัดกับเส้นผลตอบสนองในสภาวะคงตัวและแกนเวลา จะได้คาบเวลา T_u และ T_y

ขั้นตอนที่ 4 นำค่าผลตอบสนองในสภาวะคงตัว K_g คาบเวลา T_u และ T_g ที่ได้ไปเข้าสู่สูตรเพื่อหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบ



รูปที่ 2.44 การทดสอบระบบด้วยวิธีการของ Chien-hrones-Reswick



รูปที่ 2.45 ลักษณะของผลตอบสนองที่ได้

นำคาบเวลา T_u และ T_g ที่ได้มาหา R เพื่อเลือกตัวควบคุมตามตาราง

ตารางที่ 2.5 การเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสมตามวิธีการของ Chien-hrones-Reswick

Conroller	$R=T_g/T_u$
P-Conroller	$R>10$
PI-Conroller	$7.5<R<10$
PID-Conroller	$3<R<7.5$
Higher Order	$R<3$

จากตารางจะเห็นว่าถ้าค่า $R<3$ วิธีการนี้ได้แนะนำให้เลือกตัวควบคุมแบบ Higher Order ซึ่งระบบควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมที่มีโพลเพียงตัวเดียว คือตัวควบคุมแบบพี ฟังนั้นระบบจึงมีอันดับเป็นหนึ่งเท่านั้นการใช้ตัวควบคุมที่มีอันดับสูงกว่านี้จะได้กล่าวถึงต่อไปในเรื่องการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีการของเส้นทางเดินราก และการออกแบบตัวควบคุมสำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่

เมื่อได้เลือกตัวควบคุมแล้วก็นำค่าผลตอบสนองในสภาวะคงตัว K_g คาบเวลา T_u และ T_g ที่ได้มาเข้าสู่สูตรเพื่อหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของระบบควบคุมพีไอดี ตามฟังก์ชันโอนนี้

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.79)$$

หรือ

$$G_C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.80)$$

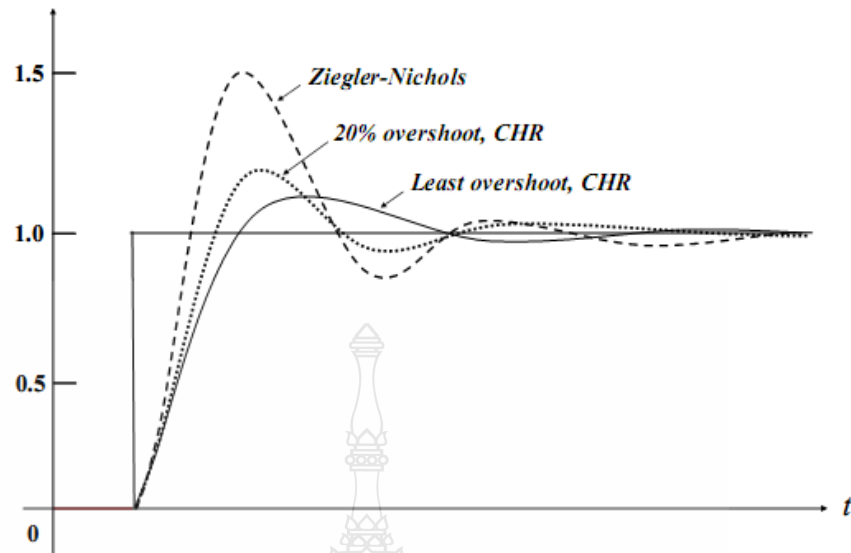
โดยที่

$$K_I = \frac{K_p}{T_i}, K_D = K_p T_d \quad (2.81)$$

ตารางที่ 2.6 ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบ

Conroller	20% Overshoot	Least Overshoot
P-Conroller	$K_p = 0.7R/K_g$	$K_p = 0.3R/K_g$
PI-conroller	$K_p = 0.6R/K_g$ $K_I = K_p/T_g$	$K_p = 0.35R/K_g$ $K_I = K_p/1.2T_g$
PID-conroller	$K_p = 0.95R/K_g$ $K_I = K_p/1.35T_g$ $K_D = K_p \times 0.47T_u$	$K_p = 0.35R/K_g$ $K_I = K_p/1.2T_g$ $K_D = K_p \times 0.5T_u$

จากตาราง 2.6 การหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับวิธีการทดสอบแบบนี้จะเห็นว่าสามารถเลือกผลตอบสนองที่ต้องการได้ว่าจะให้ผลตอบสนองมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินขนาด 20% หรือมีการพุ่งเกินน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบนี้จะให้ผลตอบสนองที่มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินค่อนข้างต่ำ เหมาะสำหรับระบบที่ไม่สามารถยอมรับการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้มากนัก และสิ่งที่ตามมาอีกอย่างหนึ่งก็คือผลตอบสนองที่ได้ อาจจะมีความเร็วของผลตอบสนองที่ต่ำ เมื่อเทียบกับวิธีการของ Zigler Nichols



รูปที่ 2.46 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบ Step input ที่ได้จากการทดสอบแบบต่างๆ

รูปที่ 2.43 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols และ Chien-hrones-Reswick วิธีการทดสอบทั้งแบบนี้มีข้อจำกัดที่อาจจะทำให้ผลตอบสนองที่ได้ไม่เป็นไปตามที่คาดหมายไว้ เช่นผลตอบสนองที่ได้อาจจะมีการพุ่งเกินไม่เป็นไปตามที่ตั้งใจไว้ เป็นต้น ข้อจำกัดในการใช้งานนี้คือ การทดสอบทั้งสองแบบใช้ได้กับระบบที่เป็นชนิด 0 และมีโพลและซีโรเป็นค่าจริง การนำวิธีการทดสอบทั้งสองแบบไปใช้กับระบบอื่นๆนอกเหนือจากนี้ก็ยังไม่สามารถใช้ได้แต่อาจจะต้องทำการปรับค่าเกณฑ์อีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นดังที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อทดสอบด้วยวิธีการของ Ziegler Nichols กับระบบหนึ่งๆ ที่อาจจะไม่ทราบชนิดและตำแหน่งของโพลของระบบแล้วเมื่อคำนวณค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมและนำไปใช้กับการควบคุมด้วยพีไอดีแล้ว ผลปรากฏว่ามีการพุ่งเกินของผลตอบสนองมากกว่า 50% ก็อาจจะต้องปรับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบดีกรีรอบเพื่อลดผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินดังกล่าว เป็นต้น

2.3.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีไอดี

สรุปขั้นตอนในการทดสอบและปรับจูนค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบที่ไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีขั้นตอนที่แนะนำดังนี้

2.3.4.1 ต่อระบบควบคุมแบบวงรอบปิดด้วยตัวควบคุมแบบพี

2.3.4.2 ปรับค่าเกณฑ์ให้สูงขึ้นเรื่อยๆ สังเกตผลตอบสนองที่ได้

2.3.4.3 ถ้าปรับค่าเกณฑ์ให้สูงขึ้นเรื่อยๆ แล้วผลตอบสนองที่ได้ไม่มีการพุ่งเกิน(ระบบมีอันดับเป็นหนึ่ง) ให้สังเกตดูว่าระบบมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวหรือไม่

2.3.4.3.1 ถ้าไม่มีค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวก็ใช้ตัวควบคุมแบบพีอย่างเดียว โดยปรับค่าเกนของตัวควบคุมให้สูงๆเข้าไป

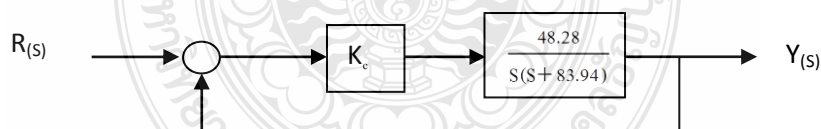
2.3.4.3.2 ถ้ามีค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวก็ให้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยปรับค่าเกนของตัวควบคุมพีให้สูงพอประมาณ แล้วจึงปรับค่าเกนของตัวควบคุมไอจนกระทั่งค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวเป็นศูนย์

2.3.4.4 ถ้าผลตอบสนองที่ได้มีการพุ่งเกินของผลตอบสนอง(ระบบมีอันดับสูงกว่าหนึ่ง)

2.3.4.4.1 ถ้าต้องการลดการพุ่งเกินของผลตอบสนองอย่างเดียวโดยยอมรับค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวได้ก็ให้ใช้ตัวควบคุมแบบพีดี โดยปรับค่าเกนพีให้สูงพอประมาณจนกระทั่งได้ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวเป็นที่พอใจ แล้วจึงปรับค่าเกนของตัวควบคุมดีเพื่อลดการพุ่งเกินของผลตอบสนอง

2.3.4.4.2 ถ้าต้องการปรับทั้งความเร็วและการพุ่งเกินของผลตอบสนอง รวมไปถึงค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวก็ให้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ให้ลองทดสอบแบบ Zigler-Nichols ก่อนโดยปรับจนกระทั่งผลตอบสนองเป็นแบบไม่มีการหน่วงแล้วทำตามขั้นตอนของการทดสอบแบบ Zigler Nichols แต่ถ้าทดสอบแบบ Zigler Nichols แล้วไม่เกิดผลตอบสนองแบบไม่มีการหน่วง ก็ให้ทดสอบด้วยวิธีการของ Chien-hrones-Reswick ซึ่งในการเลือกใช้วิธีการของ Zigler Nichols จะให้ผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินที่สูงกว่าวิธีการของ Chien-hrones-Reswick แต่ผลตอบสนองที่ได้จะมีความเร็วสูงกว่าวิธีการของ Chien-hrones-Reswick

2.3.5 การออกแบบระบบควบคุมกับระบบอันดับสองมาตรฐาน



รูปที่ 2.47 ระบบอันดับสอง

จัดให้อยู่ในฟอร์มมาตรฐาน

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{48.28K_C}{S^2 + 83.94S + 48.28K_C} \quad (2.82)$$

ระบบนี้มีสมการคุณลักษณะของระบบเป็น

$$S^2 + 83.49S + 48.28K_C \quad (2.83)$$

เปรียบเทียบกับสมการคุณลักษณะของระบบอันดับสองมาตรฐาน

$$S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2 \quad (2.84)$$

ค่าความถี่ธรรมชาติเมื่อไม่มีการหน่วงหาได้จาก

$$\omega_n = \sqrt{48.28K_C} \quad (2.85)$$

ค่าอัตราหน่วงของระบบหาได้จาก

$$\zeta = \frac{83.49}{2\sqrt{48.28K_C}} \quad (2.86)$$

$$\zeta = \frac{6}{\sqrt{K_C}}$$

จากเส้นทางเดินรากที่ได้ ต้องการออกแบบระบบนี้ให้มีผลตอบสนองแบบต่ำกว่าวิกฤตด้วยเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงสุดประมาณ 4.3% หรือเท่ากับค่าอัตราหน่วงของระบบที่ $\zeta = 0.707$ จากความสัมพันธ์

$$\zeta = \cos \theta$$

ดังนั้น

$$\theta = \cos^{-1} 0.707 = 45^\circ$$

ซึ่งตรงกับตำแหน่งโพลที่ $\zeta = 1$ โดย $S = -43.275, -40.685$

ซึ่งตรงกับตำแหน่งโพลที่ $\zeta = 0.707$ โดย $S = -58.96 + j41.7, -58.96 - j41.7$

ซึ่งตรงกับตำแหน่งโพลที่ $\zeta = 0.4$ โดย $S = -83.38 + j109.05, -83.38 - j109.05$

2.3.5.1 ออกแบบให้ผลตอบสนองเป็นแบบหน่วงวิกฤต

สำหรับผลตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต ค่าอัตราหน่วงของระบบมีค่า $\zeta = 1$

จากสมการ 2.86 คำนวณค่าเกินของตัวควบคุมได้ $K_C = 36$

จากสมการ 2.85 คำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ $\omega_n = 41.69$

จากสมการ 2.83 โพลทั้งสองตัวอยู่ที่ตำแหน่ง $S = -43.275, -40.685$

ผลตอบสนองวิกฤตนี้ สามารถใช้สูตรคำนวณข้อกำหนดคุณลักษณะได้อย่างเดียวคือช่วงเวลาเซ็ตตัว
ของผลตอบสนอง

$$t_s (5\% \text{ tolerance}) = \frac{4.7}{\zeta \omega_n} = 0.112 \quad (2.87)$$

2.3.5.2 ออกแบบให้ผลตอบสนองเป็นแบบหน่วงต่ำกว่าจุดวิกฤต

สำหรับผลตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าจุดวิกฤตด้วยค่าพุงเกินสูงสุดมีค่าน้อยๆ

เลือกค่าอัตราหน่วงของระบบมีค่า $\zeta = 0.707$

จากสมการ 2.86 คำนวณค่าเกินของตัวควบคุมได้ $K_C = 72.02$

จากสมการ 2.85 คำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ $\omega_n = 58.96$

จากสมการ 2.83 โพลทั้งสองตัวอยู่ที่ตำแหน่ง $S = -58.96 + j41.7, -58.96 - j41.7$

ผลตอบสนองแบบต่ำกว่าจุดวิกฤตนี้ สามารถใช้สูตรคำนวณข้อกำหนดคุณลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้
-ช่วงเวลาไต่ขึ้น

$$t_r = \frac{\pi - \cos^{-1} \zeta}{\omega_d} \quad (2.88)$$

แทนค่า จะได้ช่วงเวลาไต่ขึ้น $t_p = 0.04 \text{ sec}$

-ช่วงเวลาจุดยอด

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (2.89)$$

แทนค่า จะได้ช่วงเวลาจุดยอด $t_p = 0.0525 \text{ sec}$

-เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด

$$M_p = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \times 100\% \quad (2.90)$$

จะได้เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด $M_p = 96.30\%$

-ช่วงเวลาเซตตัวของผลตอบสนอง $\zeta = 0.707$

$$t_s(5\% \text{ tolerance}) = \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad (2.91)$$

จะได้ช่วงเวลาเซตตัวของผลตอบสนอง $t_s(5\% \text{ tolerance}) = 0.071968 \text{ sec}$

2.3.5.3 ออกแบบให้ผลตอบสนองเป็นแบบหน่วงต่ำกว่าจุดวิกฤต

สำหรับผลตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าจุดวิกฤตด้วยค่าพุ่งเกินสูงสุดมีค่า

พอประมาณ เลือกราค่าอัตราหน่วงของระบบมีค่า $\zeta = 0.4$

จากสมการ 2.86 คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมได้ $K_C = 225$

จากสมการ 2.85 คำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ $\omega_n = 104.225$

จากสมการ 2.83 โพลทั้งสองตัวอยู่ที่ตำแหน่ง $S = -83.38 + j109.05, -83.38 - j109.05$

ผลตอบสนองแบบต่ำกว่าจุดวิกฤตนี้ สามารถใช้สูตรคำนวณข้อกำหนดคุณลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

-ช่วงเวลาไต่ขึ้น

$$t_r = \frac{\pi - \cos^{-1}\zeta}{\omega_d} \quad (2.92)$$

แทนค่า จะได้ช่วงเวลาไต่ขึ้น $t_r = 0.023 \text{ sec}$

-ช่วงเวลาคุดยอด

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (2.93)$$

แทนค่า จะได้ช่วงเวลาคุดยอด

$$t_p = 0.0376 \text{ sec}$$

-เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด

$$M_p = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \times 100\% \quad (2.94)$$

จะได้เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด

$$M_p = 98.5\%$$

-ช่วงเวลาเซ็ดตัวของผลตอบสนอง $\zeta = 0.707$

$$t_s(5\% \text{ tolerance}) = \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad (2.95)$$

จะได้ช่วงเวลาเซ็ดตัวของผลตอบสนอง $t_s(5\% \text{ tolerance}) = 0.071959 \text{ sec}$

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิจัยในหัวข้อเรื่องการยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด ซึ่งจากการค้นคว้า ทำให้ทราบถึงงานวิจัยอื่นที่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังกล่าวมาตั้งรายละเอียดดังนี้

2.4.1 Faa-Jang และ Syuan-Yi Chen บทความเรื่อง Intelligent Integral Backstopping Sliding Mode Control (IIBSMC) โดยใช้วิธีควบคุมการลอยตัวของลูกเหล็กด้วยวิธีการควบคุม Multi Input Multi Output (MIMO) และ Recurrent Neural Network (RNN) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมสถานะของการเคลื่อนที่ของวัตถุด้วยสนามแม่เหล็ก การพิจารณาถึงความไม่เป็นเชิงเส้น จากการศึกษาแบบจำลองระบบพลวัตของการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กด้วยวิธีการ Integral Backstopping Sliding Mode Control (IBSMC) โดยการแสดงถึงส่วนประกอบที่สำคัญโดยอ้างอิงวิธีของ Trojectory ขอบเขตของ

ชิ้นงานขดลวดสนามแม่เหล็ก และการเปลี่ยนของ Function ใน IBSM และระบบ IBSMC โดยการใช้วิธีการ MIMO และ RNN เป็นตัวประมาณการ มีหน้าที่ในการปรับปรุง การดำเนินการควบคุม และการเพิ่มขึ้นของความแม่นยำในระบบการเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก และการปรับตัวเกี่ยวกับการเรียนรู้ระบบอัลกอริทึม ถูกนำมาใช้ในทฤษฎีเสถียรภาพของ Lypunov เมื่อพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงของ RNN Online ทำยสุดผลการทดลองของการอ้างอิงของ Periodic Sinusoidal Trojectory และความสมบูรณ์ด้วยวิธีการควบคุมระบบ IBSMC เพื่อประยุกต์การใช้งาน

จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการพัฒนาและการใช้งานด้วยวิธีการของระบบ IBSMC สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก โครงสร้างหลักการของการศึกษาในครั้งนี้คือ

1. ความสำเร็จในการพัฒนาวิธีการควบคุมของระบบ IBSMC โดยใช้ MIMO RNN คือตัวที่ใช้ประเมินผลความไม่ชัดเจนของระบบพลวัต
2. ความสำเร็จในการใช้งานของระบบ IBSMC เพื่อควบคุมสถานะของการเคลื่อนที่วัตถุในระบบแม่เหล็กไฟฟ้า และพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง

2.4.2 Mrunal Deshpande และ Mathur Badrilal ศึกษาบทความเรื่องระบบการลอยตัวของแม่เหล็กซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ของการลอยตัวของวัตถุ โดยไม่มีการสนับสนุนทางกล ตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยทั่วไปถูกตรวจพบโดยการใช้ Hall Effect หรือระบบการตรวจจับเพิ่มเติมเนื่องจากความผิดพลาดของระบบ (Mechanical fixture) ทำให้ทราบถึงสถานะของการลอยตัวของวัตถุ ทำให้น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้งาน การดำเนินการสถานะของการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นสามารถรับรู้ค่าการวัด และการเปลี่ยนแปลงการเหนี่ยวนำของการยกด้วยสนามแม่เหล็ก วิธีการ Resonance ได้ถูกใช้เพื่อวัตถุประสงค์ Sliding Mode Control เทคนิคซึ่งมีความเที่ยงตรงและง่ายโดยใช้ด้วยเทคนิคการแปรผันค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง และความจำกัดของชิ้นงาน ความถูกต้องของแบบจำลอง ผลของการจำลองทางสมการคณิตศาสตร์ ได้แสดงถึงความมีเสถียรภาพ แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของ Chattering ในการประยุกต์แรงดันในการยกสนามแม่เหล็ก และคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กที่อำนาจแม่เหล็ก Hysteresis

บทสรุปของการทดลองนี้ การนำเสนอระบบ Sensor Less Magnetic Levitation บนพื้นฐานของวิธีการ Resonance และเป็นวิธีดำเนินการตรวจจับตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของวัตถุ การจำกัดตำแหน่งเครื่องตรวจจับ Hall effect ในการควบคุมความแม่นยำของระบบไม่เป็นเชิงเส้นของ

สนามแม่เหล็กลอยตัวด้วยวิธี Sliding Control เป็นวิธีการสำหรับระบบควบคุมตำแหน่งของการลอยตัวของวัตถุในสนามแม่เหล็ก ค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง และสมการชั่วขณะ ยกตัวจากพื้นที่ที่เป็นระยะแก้ปของขดลวดสนามแม่เหล็ก โดยผลการจำลองแบบ Corresponding การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ถูกบันทึกค่า ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง มีการปรับตัวของตำแหน่งระยะการยกตัว และด้วยเหตุผลนี้เองระบบจึงมีความแม่นยำแต่ก็มีข้อจำกัด Chattering ได้ถูกลดลงเหมือนกันโดยกระแส Hysteresis

2.4.3 Charles Fallaha ,Hadi Kanaan และ Maarorf Sadd การนำเสนอบทความการทดลองโดยใช้กระแสควบคุมการลอยตัวของสนามแม่เหล็กแบบจำลอง Magnetic Levitation System (MLS) ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น และมีความไม่แน่นอนในการควบคุมในระบบเปิด ซึ่งเน้นตัวควบคุมชนิดแม่นยำในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยการหารูปแบบสมการคณิตศาสตร์และแบบตัวควบคุมที่สอดคล้องกัน การกระแสควบคุมการลอยตัวของสนามแม่เหล็กในการจำลอง (MLS) มีความซับซ้อนน้อยกว่าการควบคุมแรงดัน ในบทความฉบับนี้เครื่องมือที่ใช้ควบคุมด้วยวิธีการ Sliding Mode คือการทดลองการนำไปปฏิบัติการจำลองใน (MLS) ตัวควบคุมไม่เป็นเชิงเส้นถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในโปรแกรม MATLAB และถูกใช้งานใน RTW ของโปรแกรม MATLAB/Simulink แบบ Real Time ซึ่งผลของการทดลองจะแสดงถึงประสิทธิภาพของความแม่นยำของตัวควบคุมไม่เป็นเชิงเส้น

ในบทความฉบับนี้การใช้วิธีการ Sliding Mode Controller ในการตรวจสอบการทดสอบระบบการลอยตัวของแม่เหล็ก ปัญหาที่พบคือการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลอง (MLS Model) ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ปัญหานี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับขั้วแม่เหล็กที่เกี่ยวกับคุณสมบัติแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์และระยะลอยตัว ดังนั้นเหตุใดค่า K จึงมีตำแหน่งและค่าไม่คงที่ ทั้งนี้ทั้งนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมไม่เป็นเชิงเส้นมันมีประสิทธิภาพ และแม่นยำถ้าแม้ว่าจะมีปัญหาข้างต้น

2.4.4 Faa-Jang และ Syuan-Yi Chen บทความเรื่อง Robust Dynamic Sliding Mode Control (RDSMC) โดยใช้วิธีการ Recurrent Elman Neural Network (RENN) มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาความไม่แน่นอนของการควบคุมการลอยตัวของวัตถุของสนามแม่เหล็กลอยตัว รูปแบบระบบการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กขับเคลื่อน และการควบคุมชนิดของ PID Sliding Mode Control

System (SMC) เป็นที่ยอมรับโดยวิธีการ Trajectories ประยุกต์ด้วยการควบคุมชนิดของ PID Dynamic Sliding Mode (DSMC) เพื่อทำการลดปรากฏการณ์ Chattering หาก ฮาร์ดแวร์ที่มีความจำกัดของขอบเขต ความไม่ชัดเจนของขอบเขต ในการเปลี่ยนแปลงของแต่ละ Function สำหรับการควบคุมชนิด DSMC และ RDSMC มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงการควบคุมการปฏิบัติงาน และความแม่นยำที่จะเพิ่มขึ้นของแบบการลอยตัวของสนามแม่เหล็ก เพื่อใช้ประมาณค่า ของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ และ Function ของ DSMC โดยตรง การปรับการเรียนรู้ของ Algorithms จะได้รับการพัฒนาจากพารามิเตอร์ของ RENN โดยได้รับการขับเคลื่อนโดยทฤษฎีของ Lyapunov นอกจากนี้การชดเชยความแม่นยำ ความไม่แน่นอน และรวมไปถึงการประมาณค่าความผิดพลาด และค่าที่เหมาะสมที่สุดของขดลวดสนามแม่เหล็ก เวกเตอร์พารามิเตอร์ และการทดลองที่มีระยะเวลาในอนุกรมทดลอง ท้ายสุดแล้วผลการทดลองระยะที่แตกต่างกัน ได้แสดงถึงความแตกต่างของหน้าที่ RDSMC สำหรับการประยุกต์ใช้งาน

สรุป จากการศึกษาแสดงให้เห็นความสำเร็จของการแสดงผลของการใช้งานของ RDSMC เพื่อควบคุมสถานะของการลอยตัวของวัตถุในสนามแม่เหล็กคือ แบบจำลองสมการคณิตศาสตร์ของระบบการลอยตัวของแม่เหล็ก และทฤษฎีของวิธีการควบคุม RDSMC ได้ใช้การประมาณการเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่มีความแน่นอนของฟังก์ชันไม่เป็นเส้น และการเปลี่ยนแปลงของ Function การทดลองได้ถูกทำการทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของ RDSMC โดยการใช้ Periodic Sinusoid และ Trapezoidal Reference การศึกษามีดังนี้

1. ความสำเร็จของการพัฒนาระบบ RDSMC ในสิ่งที่ RENN ถูกใช้ประโยชน์ในการประมาณค่าที่ไม่ทราบค่าของ Function ไม่เป็นเชิงเส้นและการแทนที่ของฟังก์ชัน
2. ความสำเร็จการใช้งานของหน้าที่ของระบบ RDSMC เพื่อควบคุมสถานะ การเคลื่อนที่วัตถุในสนามแม่เหล็กโดยพิจารณาถึงความคงอยู่ของความไม่แน่นอน

2.4.5 วิชา อุปถัมภ์และพิพัฒน์ ปราโมทย์ บทความเรื่องระบบควบคุมตำแหน่งของแผ่นระนาบตามแนวระนาบ งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมแผ่นระนาบของเตียงที่ใช้ในการขนย้ายผู้ป่วยให้อยู่ในแนวที่ขนานกับพื้นตลอดเวลาโดยอัตโนมัติ การดำเนินการวิจัยได้จากการสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่

ของแผ่นระนาบ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ในการปรับระดับแผ่นระนาบให้อยู่ในแนวที่ขนานกับพื้นโดยอัตโนมัติ

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเตียงขนย้ายผู้ป่วยเกิดการเปลี่ยนมุมไปทางแกน x หรือแกน y หรือทั้งสองแกนพร้อมกันเตียงเตียงจะสามารถปรับระดับกลับคืนจากมุม 20 องศา เป็น 0 องศาโดยอัตโนมัติ ในเวลา 0.75 วินาที

2.4.6 สัญญา แวนิล การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก ระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กที่ใช้แรงจากแม่เหล็กไฟฟ้ารักษาให้ลูกบอลลอยอยู่กลางอากาศนั้นเป็นกรณีตัวอย่างของระบบซึ่งไม่เสถียรที่ได้นำมาศึกษากันอย่างแพร่หลาย ตัวควบคุมแบบต่างๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการรักษาเสถียรภาพและควบคุมระบบดังกล่าวตัวควบคุมหนึ่งที่ได้นำมาใช้และได้ผลดีคือตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมคซึ่งทำงานด้วยค่าของตำแหน่งและความเร็วของลูกบอล บทวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมค สำหรับระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กโดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบ จากนั้นออกแบบตัวชดเชยแบบมูมนำ แล้วทำการพัฒนาตัวควบคุมดังกล่าวด้วยแนวทางการควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมคทำให้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีการวัดความเร็วของลูกบอล จากผลจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ดีกว่าตัวชดเชยแบบมูมนำ แต่เมื่อเทียบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมคแล้วตัวควบคุมที่สร้างขึ้นมีการแกว่งมากกว่าในการเข้าสู่สภาวะสงบและเมื่อนำไปทดสอบกับระบบจริงพบว่าได้ผลในลักษณะเดียวกัน

จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ได้ถูกสร้างด้วยโปรแกรมสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพิสูจน์การควบคุมระบบภายใต้สมมติฐาน ผลการจำลองให้ผลของการควบคุมแรงดันของตัวตรวจจับสัญญาณเป็นค่าความผิดพลาดของระบบน้อยลงสัญญาณออกของอุปกรณ์ตรวจจับเข้าใกล้สภาวะคงตัวซึ่งมีผลมาจากชุดควบคุมที่ได้สร้างขึ้นจากการออกแบบและจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ช่วยลดค่าความผิดพลาดของระบบเพื่อรักษาเสถียรภาพของการควบคุมกระแส ในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อรักษาสมดุลของลูกบอลลอยอยู่ในอากาศตามที่กำหนด

เมื่อทำการทดสอบพบว่าวงจรที่มี Hysteresis หลังวงจรควบคุมมีลักษณะเหมือนกับการควบคุมแบบสไลด์ดิง แต่การควบคุมแบบสไลด์ดิงพบปัญหาแซทเทอริง(Chattering) ซึ่งปัญหาเกิด

จากการแกว่งของสัญญาณในช่วงเวลาสั้นๆหรือที่ความถี่สูงเกิดขึ้นจากรูปแบบของกฎควบคุม (Control Law) และฟังก์ชันแบบไม่ต่อเนื่อง(Discontinuous Function)ทำให้ค่าสัญญาณควบคุมเกิดการสวิตช์ไปมาที่ความถี่สูง ในทางปฏิบัติแล้วผลของแซทเทอริงนี้ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และปัญหาจากตัวอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณมีสิ่งรบกวน(Noise) เกิดขึ้นเป็นสัญญาณขนาดเล็กทำให้การทดสอบไม่เป็นไปตามการจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังนั้นจึงต้องศึกษาหาวิธีลดปัญหาดังกล่าวในขั้นต่อไป



บทที่ 3

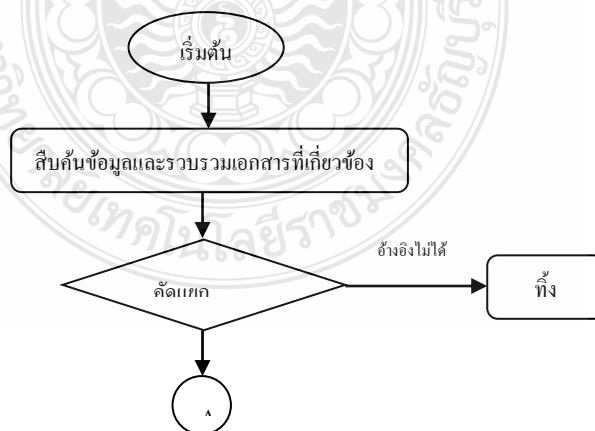
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานการวิจัยวิทยานิพนธ์ การยกตัวแปรขนาดด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด ซึ่งจะแสดงให้เห็นขั้นตอนการออกแบบ การสร้างโมเดลจำลองทางคณิตศาสตร์ และการออกแบบสร้างชุดทดลองจริง

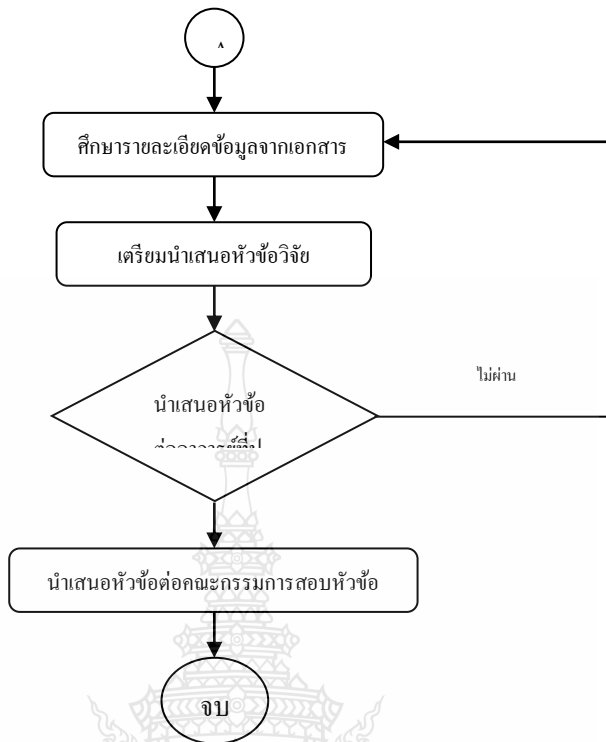
1. แผนภูมิการดำเนินงาน และระยะเวลาดำเนินการ
2. การออกแบบชุดทดลองสนามแม่เหล็ก
3. การออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ และการเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
4. การออกแบบตัวควบคุม PID
5. แผนผังการควบคุม
6. การสร้างแบบทดลอง

3.1 แผนภูมิการดำเนินงาน และระยะเวลาดำเนินการ

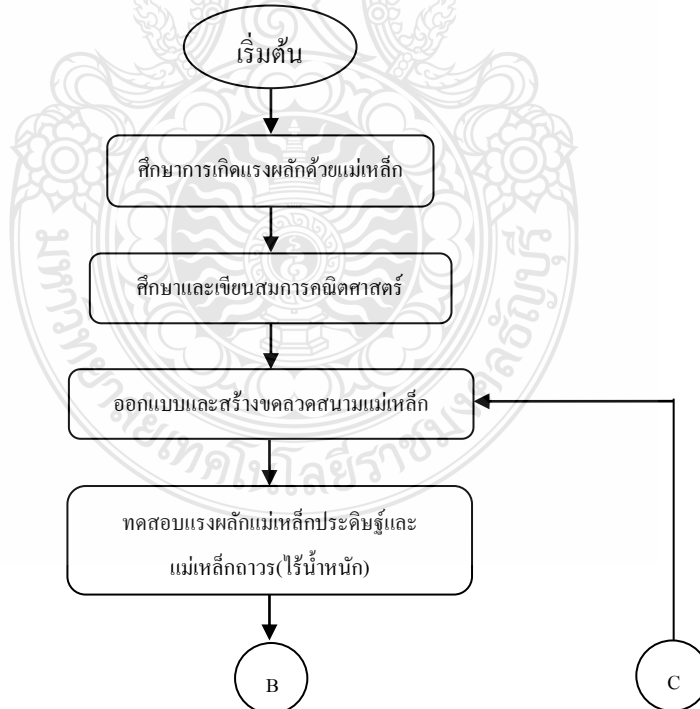
การศึกษาวเคราะห์ลำดับขั้นการดำเนินการของเรื่องการยกตัวแปรขนาดด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด มีวิธีการดำเนินงาน มีขั้นตอนตามแผนภูมिरูปที่ 3.1 - 3.5



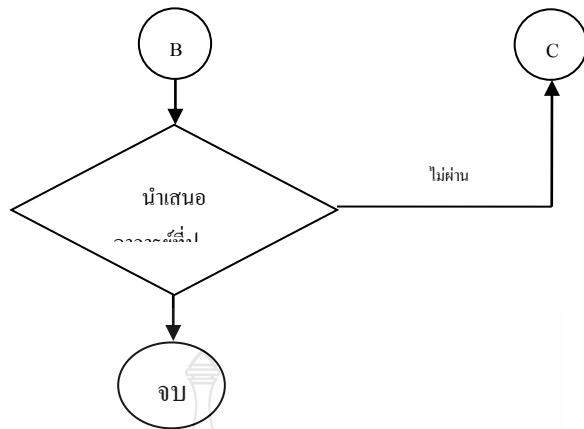
รูปที่ 3.1 แผนภูมิแผนการดำเนินงาน



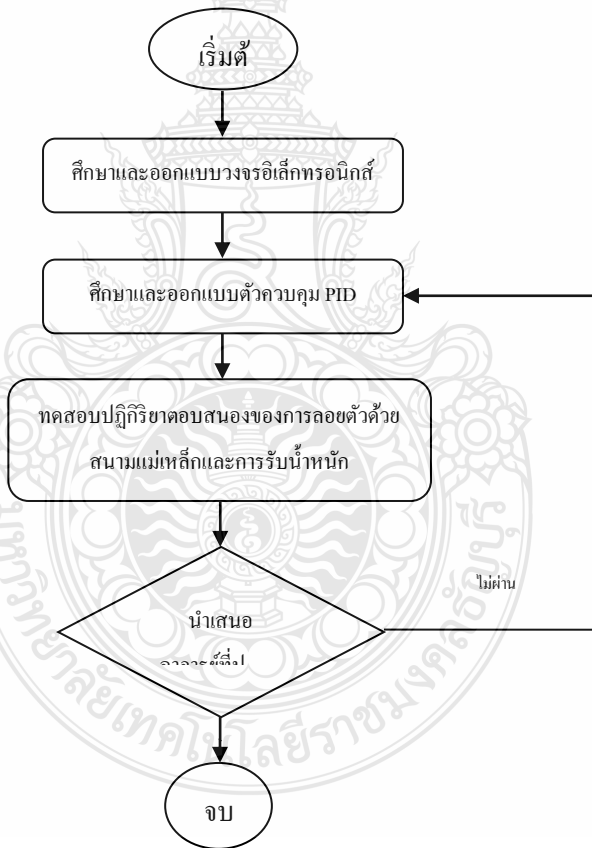
รูปที่ 3.1 แผนภูมิแผนการดำเนินงาน(ต่อ)



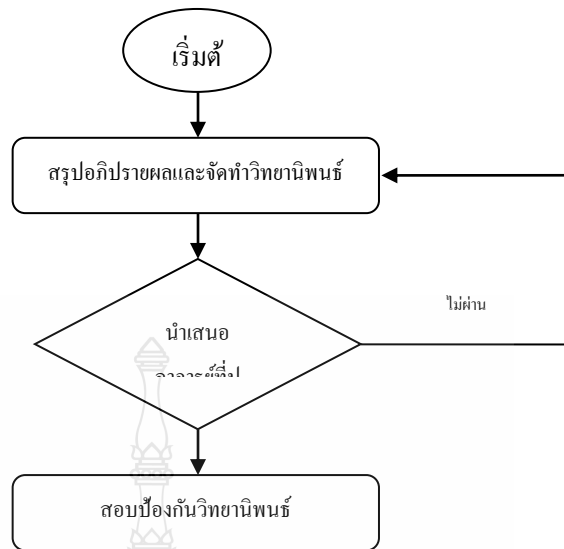
รูปที่ 3.2 แผนภูมิแผนงานการสร้างขดลวดสนามแม่เหล็กและทดสอบระยะลอยตัว



รูปที่ 3.2 แผนภูมิแผนงานการสร้างขดลวดสนามแม่เหล็กและทดสอบระยะลอยตัว(ต่อ)



รูปที่ 3.3 แผนภูมิแผนงานการสร้างวงจรถออิเล็กทรอนิกส์และตัวควบคุม PID

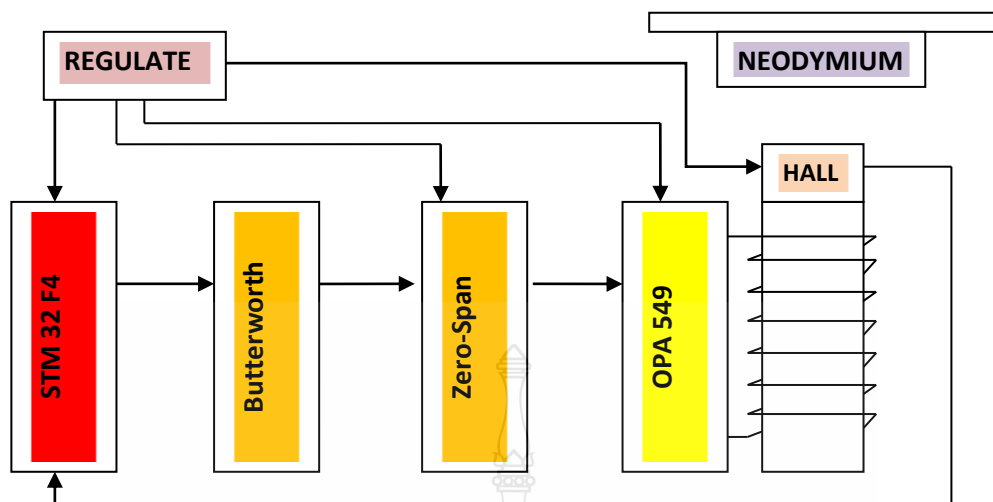


รูปที่ 3.4 แผนภูมิการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาทำวิจัย 12 เดือน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาดำเนินงาน

การดำเนินการ	ระยะเวลา (เดือน)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาการเกิดแรงผลักดันด้วยแม่เหล็ก	←→												
2. ศึกษาและเขียนสมการทางคณิตศาสตร์		←→											
3. ออกแบบและสร้างขดลวด			←→										
4. ทดสอบน้ำหนักรองโดยไม่มีน้ำหนักรอง			←→										
5. ออกแบบและสร้างวงจรควบคุม PID					←→								
6. ศึกษาและออกแบบวงจรควบคุม						←→							
7. ออกแบบตัวควบคุม PID							←→						
8. ทดสอบปฏิบัติการตอบสนองของระบบ								←→					
9. วิเคราะห์และสรุปผล											←→		

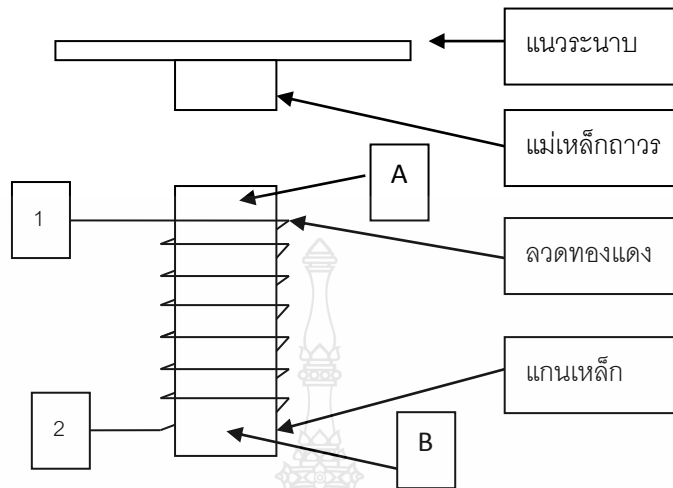
ในการออกแบบโครงสร้างของวิทยานิพนธ์ เรื่องการยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด โดยแบ่งตามลำดับขั้นการออกแบบ ดังรูป 3.5 เป็นการควบคุมแบบ 1 จุด



รูปที่ 3.5 หลักการทำงานการควบคุมแกนเหล็ก 1 จุด

หลักการทำงานเบื้องต้น เริ่มการทำงานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4 จะจ่ายแรงดัน 2.7-3.3 โวลต์ เข้าไปที่วงจรกรองสัญญาณแบบ Butterworth และเข้ากระบวนการลดทอนแรงดันด้วยออฟแอมป์ลิเนียร์ Zero และ Span เพื่อควบคุมแหล่งจ่ายแรงดัน OPA549 ทำงานด้วยแรงดัน 17-23 โวลต์ เพื่อให้แผ่นระนาบลอยตัวก่อน(เพื่อให้แกนเหล็กปรับสภาพเป็นแม่เหล็กประดิษฐ์) หลังจากนั้นในขณะที่มีวัตถุมาวางบนแผ่นแนวระนาบเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กเป็นแรงดันไฟฟ้า 1.3 mV-2.5 V ส่งแรงดันไฟฟ้ากลับมาที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4 จากนั้นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4 จะส่งสัญญาณพัลส์ 0-100 เปอร์เซ็นต์หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-3.3 โวลต์ เข้าไปที่วงจร Butterworth ซึ่งเป็นวงจรขยายแบบลิเนียร์ ขยายสัญญาณ 0-5 โวลต์ เข้าไปที่ลิเนียร์ออฟแอมป์ โดยลิเนียร์ออฟแอมป์ลดทอนสัญญาณลงมาเหลือ 0-2.5 โวลต์เพื่อเข้าไปที่ขยายแรงดันด้วยไอซี Op-Amp เบอร์ OPA549 แรงดันเอาพุต 0-25 โวลต์ เพื่อบังคับขดลวดสนามแม่เหล็กทำงาน และแผ่นแนวระนาบลอยตัว

3.2 การออกแบบขดลวดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของแกนเหล็ก

หลักการทำงานเบื้องต้นเมื่อจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดทองแดงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็กทำให้เกิดขั้วแม่เหล็ก ตามกฎมือขวาของฮันส์ คริสเตียน เออร์สเทด เช่น จ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่หมายเลข 1 A จะเป็นขั้วเหนือและ B จะเป็นขั้วใต้ ถ้า จ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่หมายเลข 2 B จะเป็นขั้วเหนือและ A จะเป็นขั้วใต้ ส่วนแม่เหล็กถาวรที่อยู่ด้านบนนั้นจะเป็นขั้วตรงข้ามกับ A ทำให้ขั้วเหมือนกันจะทำให้ผลักกันในขณะที่เดียวกันแผ่นแฉนวนก็จะลอยขึ้น

3.2.1 การออกแบบแกนเหล็ก

ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงภาระ โหลดทั้งหมดในตัวเหนี่ยวนำทั้งหมด ขนาดกำลังไฟฟ้า(VA) 12.5 VA แรงดันที่ใช้ในการควบคุมแกนเหล็ก(V_{coil}) 25 Vdc และหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก(A_i) จากสมการที่ 2.31 พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

$$A_i = 1.156\sqrt{VA} \quad (3.1)$$

$$A_i = 1.156\sqrt{12.5}$$

จะได้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

$$A_i = 4.87 \text{ cm}^2$$

จากสมการที่ 2.31 ความกว้างแกนเหล็ก(W)

$$W = 0.878 \sqrt[4]{VA} \quad (3.2)$$

$$W = 0.878 \sqrt[4]{12.5}$$

$$W = 1.651 \text{ cm}$$

ดังนั้นเลือก ความกว้างแกนเหล็ก

$$W = 2.54 \text{ cm}$$

ความลึกหรือแฉกแกนเหล็ก(T)

$$T = \frac{A_i}{W} \quad (3.3)$$

$$T = \frac{4.87}{2.54}$$

$$T = 1.917 \text{ cm}$$

ดังนั้นเลือก ความลึกของแกนเหล็ก

$$T = 2.54 \text{ cm}$$

จากสมการที่ 2.32 กระแสที่จ่ายให้ขดลวดทองแดง

$$I = \frac{VA}{V} \quad (3.4)$$

$$I = \frac{12.5}{25}$$

จะได้กระแสที่จ่ายให้ขดลวดทองแดง

$$I = 0.5 \text{ A}$$

การหาขดลวดที่ใช้พันแกนเหล็ก โดยแกนเหล็กใช้งานไม่ต่อเนื่องจะมีค่า 450-500 เซอคูด่ามิล/แอมแปร์ โดยการออกแบบนี้จะใช้ค่าสูงสุดมีค่า 500 เซอคูด่ามิล/แอมแปร์ จากสมการที่ 2.33 หาพื้นที่หน้าตัดของทองแดง(A)

$$A = 500 \times I \quad (3.5)$$

$$A = 500 \times 0.5$$

จะได้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

$$A = 250 \text{ Circular Mils}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.2 จะได้ขนาดขดลวดทองแดง เบอร์ 26 Sq.mm. AWG

จากตารางที่ 2.2 หาจำนวนรอบต่อความยาว 1 เซนติเมตร (K) โดยความกว้างแกนเหล็ก(W) 2.54 เซนติเมตร ความลึกแกนเหล็ก(T) 2.54 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางทองแดงเบอร์ 26 Sq.mm. AWG[8] ยาว 0.0405 เซนติเมตร

$$K = \frac{4 \times 2.54}{0.0405} \quad (3.6)$$

$$K = 24.5 \text{ รอบ / 1 เซนติเมตร}$$

จากสมการที่ 2.36 หาจำนวนรอบต่อ 1 ชั้น(Ns) โดยความยาว(Y)เป็นความยาวแกนเหล็กที่ใช้ พันขดลวดยาว 3.81 เซนติเมตร

$$N_s = KY \quad (3.7)$$

$$N_s = 3.81 \times 24.5$$

$$N_s = 93.344 \text{ รอบ/ 1 ชั้น}$$

จากสมการที่ 2.34 หาจำนวนชั้น(s) โดยเส้นผ่าศูนย์กลางทองแดงเบอร์ 26 Sq.mm. AWG[8] ยาว 0.04 เซนติเมตรและความกว้างในช่องที่พันขดลวด(h)

$$S = \frac{h}{d} \quad (3.8)$$

$$S = \frac{0.8}{0.04}$$

$$S = 20 \text{ ชั้น}$$

จากสมการที่ 2.35 หาจำนวนรอบของการพันแกนเหล็ก โดยใช้จำนวนชั้น(S)และจำนวนรอบต่อหนึ่งชั้น(N_s)

$$N = SN_s \quad (3.9)$$

$$N = 20 \times 93.345$$

$$N = 1866.9 \text{ รอบ}$$

การพันขดลวดมีค่าช่องว่างอากาศของทองแดงกลม จะมีช่องว่างที่เหลือลงขดลวดประมาณ 0.9 - 1.1 ดังนั้นจำนวนรอบขดลวด เป็นดังนี้

$$N = 1866.9 \times 1.1 \quad (3.10)$$

$$N = 2053.59 \text{ รอบ}$$

$$N = 2100 \text{ รอบ}$$

จากสมการที่ 2.17 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (F) จะเป็นดังนี้

$$F = NI \quad (3.11)$$

$$F = 2100 \times 0.5$$

$$F = 1050 \text{ A-T}$$

จากสมการที่ 2.20 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ที่ความยาวแกนเหล็ก เท่ากับ 6.31 cm จะเท่ากับ

$$H = \frac{F}{l} \quad (3.12)$$

$$H = \frac{1050}{6.31}$$

$$H = 166.40 \frac{\text{A-T}}{\text{cm}}$$

ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก โดยพิจารณาจากค่าความซึมซับสัมพัทธ์ของวัสดุในตารางที่ 2.1 (μ_0) 4500 และค่าความซึมซับสุญญากาศ (μ_r) $4\pi \times 10^{-7}$ ตามสมการที่ 2.21 จะได้

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (3.13)$$

$$B = 4\pi \times 10^{-7} \times 4500 \times 166.40$$

ดังนั้นได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $B = 0.94 \text{ Tesla}$

จากสมการที่ 2.22 ค่าเส้นแรงแม่เหล็ก(ϕ) เมื่อพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก(A) $(2.56 \times 10^{-2})^2$ จะได้

$$\phi = BA \quad (3.14)$$

$$\phi = 0.94 \times (2.56 \times 10^{-2})^2$$

$$\phi = 0.0616 \text{ mWb}$$

จากสมการที่ 2.30 เส้นแรงแม่เหล็กของจำนวนรอบทั้งหมด(λ) เท่ากับ

$$\lambda = N\phi \quad (3.15)$$

$$\lambda = 2100 \times 0.0616 \times 10^{-3}$$

เส้นแรงแม่เหล็กของจำนวนรอบทั้งหมด $\lambda = 129.436 \text{ mWb-T}$

จากสมการที่ 2.23 ค่าความเหนี่ยวนำ(L) จะได้

$$L = \frac{\lambda}{\frac{I}{2}} \quad (3.16)$$

$$L = \frac{129.436}{0.5} \times 2$$

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำ $L = 517.744 \text{ mH}$

ในโครงการพันขดลวดจะใช้ลวดทองแดงขนาด 30 Sq.mm. พันเส้นคู่ ค่าความยาวลวดทองแดง (l_{copper}) เพื่อพันขดลวดรอบแกนเหล็กกว้าง(W) 2.54 เซนติเมตรและ ลึก(T) 2.54 เซนติเมตร 1 รอบใช้ 10.16 เซนติเมตร พันจำนวน 2100 รอบ จะได้

$$l_{\text{copper}} = 4 \times W \times N \quad (3.17)$$

$$l_{\text{copper}} = 4 \times 2.54 \times 2100$$

$$l_{\text{copper}} = 213.36 \text{ เมตร}$$

ค่าความต้านทานของทองแดง(R) โดยค่าความถ่วงจำเพาะทองแดง(ตามภาคผนวก ข) $1.77 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ จะได้

$$R = \rho \frac{l_{\text{copper}}}{A_{\text{copper}}} \quad (3.18)$$

$$R = \frac{1.77 \times 10^{-6} \times 213.36 \times 10^{-2}}{3.14 \times (0.0405 \times 10^{-2})^2}$$

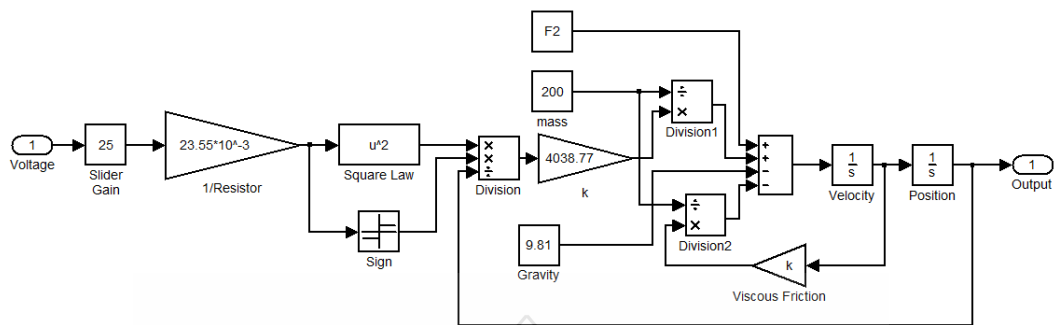
$$R = 42.468 \Omega$$

3.2.2 สมการจำลองทางคณิตศาสตร์(Mathematical)

สมการการยกตัวของแรงแม่เหล็กจากสมการที่ 2.8 สามารถเขียนเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{kv^2}{mR^2} + \frac{F_2}{m} - 9.81 - \frac{c}{m} \frac{dx}{dt} \quad (3.19)$$

ทั้งนี้เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเข้าและระยะลอยตัวของชิ้นงาน สมการจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink และเอาท์พุทคือระยะการลอยตัว



รูปที่ 3.7 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการยกตัวของแรงแม่เหล็กและระยะลอยตัว

ตาราง 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสมการทางคณิตศาสตร์

ตัวแปร/พารามิเตอร์	ค่าคงที่	หน่วย
แรงดัน(v)	0-25	Voltage
ค่าความต้านทาน(R)	42.468	Ohm
ค่าแรงโน้มถ่วงโลก(g)	9.81	m/s ²
น้ำหนัก(m)	0-200	g
ค่าคงที่แกนเหล็ก(k)	4038.77	(wb-T)/(m-A)

3.2.3 ทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของการยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด
เมื่อทดสอบแกนเหล็กในการทำงานจริงของระบบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน
ระยะความสูงการลอยตัว และเซนเซอร์วัดระยะสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองระยะการลอยตัว

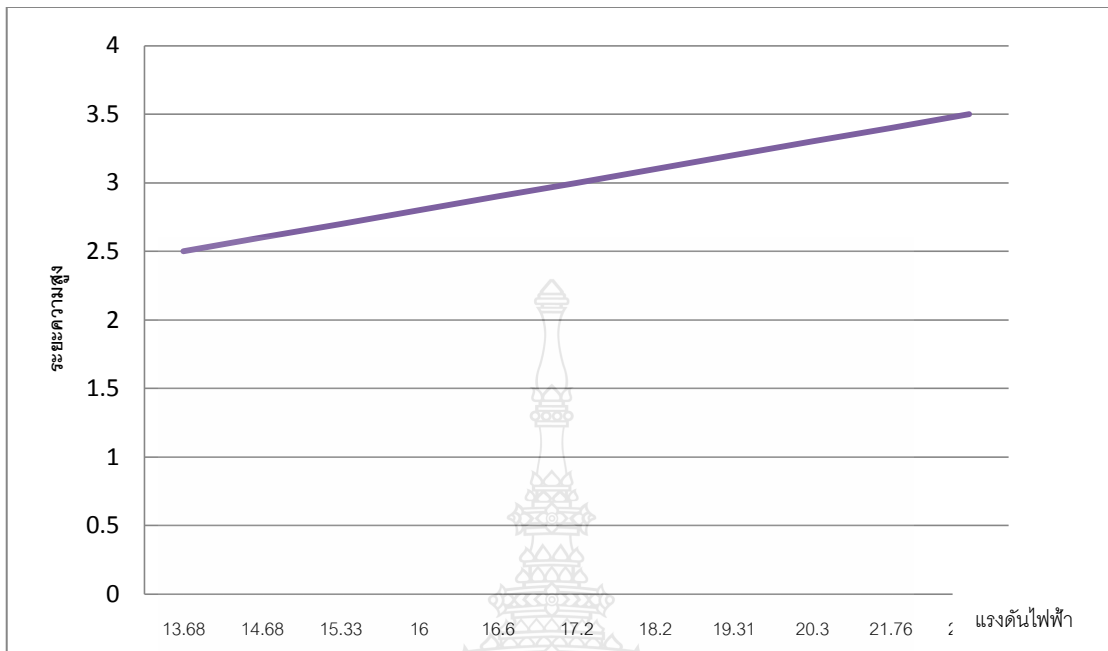
ระยะ	Coil 1		Coil 2		Coil 3		Coil 4	
	V ₁	H ₁	V ₂	H ₂	V ₃	H ₃	V ₄	H ₄
3.7	24.87	2.156	24.87	2.153	24.87	2.138	24.87	2.287
3.6	23.12	2.189	23.12	2.192	23.12	2.188	23.12	2.318

ตารางที่ 3.3(ต่อ) ผลการทดลองระยะการลอยตัว

ระยะ เซนติเมตร	Coil 1		Coil 2		Coil 3		Coil 4	
	V ₁	H ₁	V ₂	H ₂	V ₃	H ₃	V ₄	H ₄
3.5	21.76	2.230	21.76	2.224	21.76	2.211	21.76	2.339
3.4	20.30	2.264	20.30	2.258	20.30	2.244	20.30	2.363
3.3	19.31	2.292	19.31	2.289	19.31	2.279	19.31	2.386
3.2	18.2	2.352	18.2	2.336	18.2	2.320	18.2	2.425
3.1	17.2	2.360	17.2	2.356	17.2	2.341	17.2	2.436
3.0	16.60	2.388	16.60	2.367	16.60	2.356	16.60	2.447
2.9	16	2.411	16	2.395	16	2.388	16	2.467
2.8	15.33	2.446	15.33	2.411	15.33	2.405	15.33	2.493
2.7	14.68	2.483	14.68	2.445	14.68	2.441	14.68	2.521
2.6	13.68	2.561	13.68	2.517	13.68	2.489	13.68	2.541

ตั้งนั้นแกนเหล็กไฟฟ้าทำงานอยู่ในช่วงแรงดันระหว่าง 13.68 – 23.12 โวลต์ และลอยตัวได้สูง 2.6 – 3.7 เซนติเมตร โดยเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กวัดได้ 2.516 - 2.156 โวลต์ เมื่อนำกราฟไปพล็อตเพื่อหาค่าความเป็นเชิงเส้น

3.2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความสูงของชิ้นงาน



รูปที่ 3.8 ความเป็นเชิงเส้นระหว่างแรงดันที่จ่ายเข้าแกนเหล็กกับระยะความสูง

การหาค่าสมการทางคณิตศาสตร์ระหว่างแรงดันแกนเหล็กและค่าความสูง

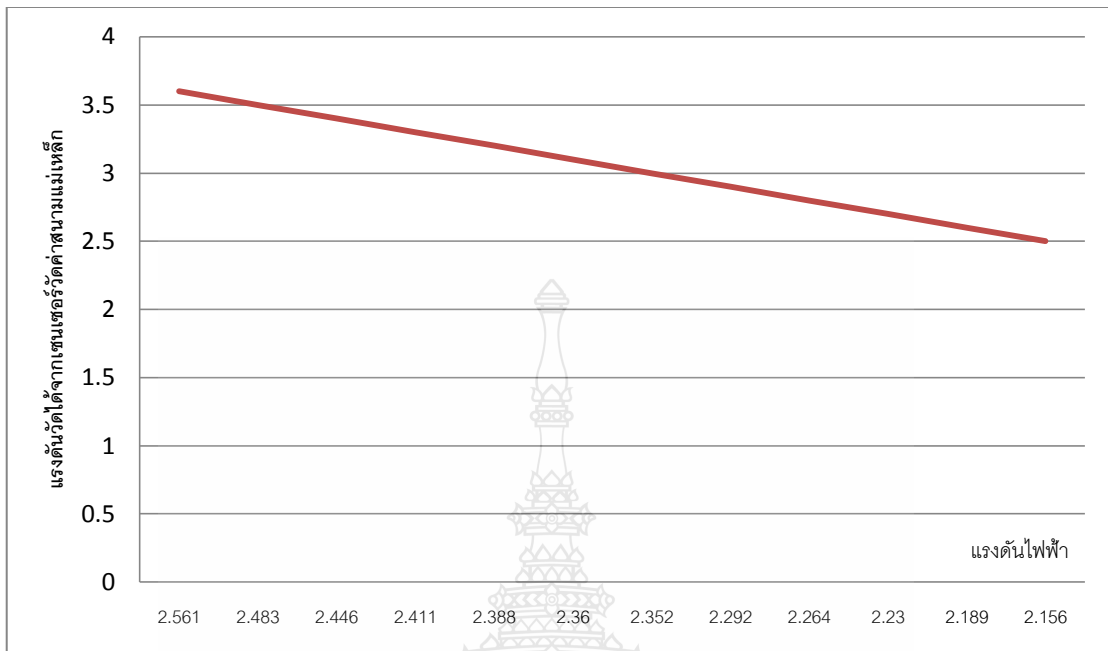
สมการเส้นตรง $y = mx + c$

ความชัน โดยให้ความสูงเป็นแกน y และ แรงดันเป็นแกน x

ดังนั้นจะได้สมการ $(y - 2.5) = 0.1(x - 13.68)$

$$y = 0.1x + 1.132$$

3.2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูง และแรงดันที่ได้จากเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.9 ความเป็นเชิงเส้นระหว่างแรงดันเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กกับระยะความสูง

การหาค่าสมการทางคณิตศาสตร์ระหว่างความสูงและแรงดันเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก

สมการเส้นตรง $y = mx + c$

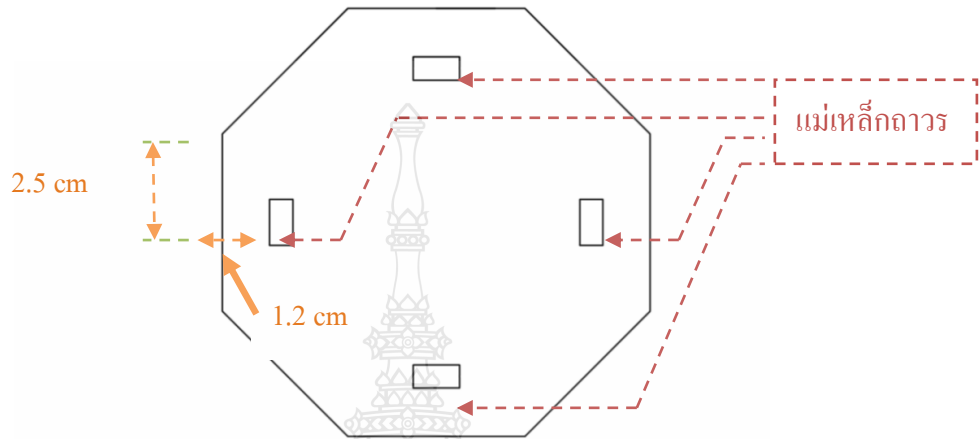
ความชัน โดยให้ความสูงเป็นแกน x และ แรงดันเป็นแกน y

ดังนั้นจะได้สมการ $(y - 3.7) = -2.716(x - 2.561)$

$$y = -2.716x + 10.655$$

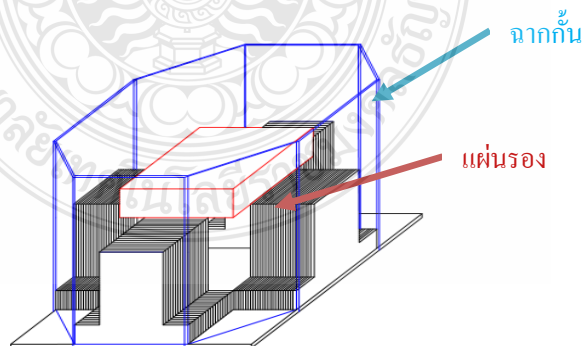
3.2.4 การออกแบบโครงสร้างของการยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด

ในการออกแบบโครงสร้างทำจากแผ่นอะลูมิเนียม ลักษณะทำในรูป 8 เหลี่ยมด้านเท่า จากนั้นจะติดแม่เหล็กถาวรเข้าไปโดยให้ขั้วเหมือนกันในระยะตามรูปที่ 3.10



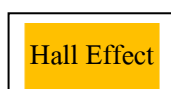
รูปที่ 3.10 โครงสร้างแผ่นแนวระนาบ

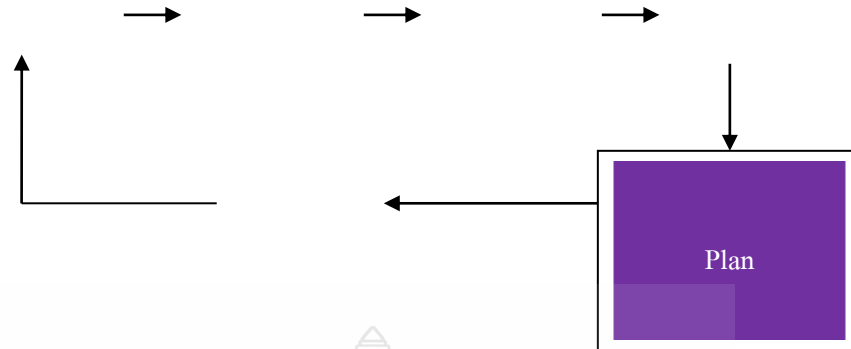
ในการออกแบบโครงสร้างการวางขดลวดสนามแม่เหล็กทั้งหมด 4 จุด จะทำในลักษณะ 8 เหลี่ยมด้านเท่า โดยจะวางขดลวดสนามแม่เหล็กลักษณะด้านเว้าด้านซึ้ง แนวระนาบ 8 เหลี่ยมจะพอดีกับฐาน และมีแผ่นอะลูมิเนียมขอบเพื่อป้องกันแผ่นแนวระนาบเลื่อนตำแหน่ง ซึ่งจะทำให้แม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กประดิษฐ์ไม่ตรงกัน และฉากกั้นสูงจากขดลวดสนามแม่เหล็ก 4 เซนติเมตร และมีแผ่นรองระหว่างแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กประดิษฐ์



รูปที่ 3.11 โครงสร้างการวางขดลวดสนามแม่เหล็ก

3.3 การออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ และการเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์





รูปที่ 3.12 แผนผังวงจรการทำงาน 1 จุด

ในการออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นการออกแบบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน โดยการหาค่าความต้านทานนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรพื้นฐาน และให้ชิ้นงานทำงานได้โดยขอบเขตชิ้นงานนั้น แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0-25 โวลต์ และแรงดันบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4 จ่ายและรับแรงดันไฟฟ้าที่ 0-3.3 โวลต์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีวงจรซึ่งตัวกลางเพื่อเชื่อมต่อในการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ควบคุมการทำงานของชิ้นงาน วงจรลิเนียร์ และวงจรบิตเตอร์เวิร์ช โดยแสดงแรงดันในการควบคุมในตารางที่ 3.4

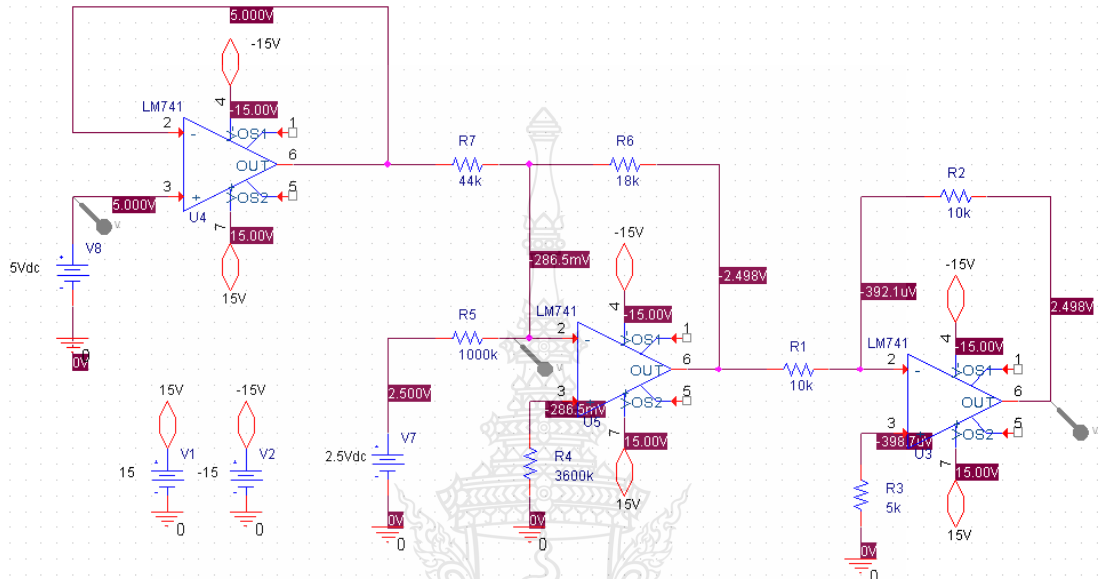
ตารางที่ 3.4 แรงดันเชื่อมต่อของแต่ละวงจรเพื่อควบคุมความเป็นเชิงเส้น

ลำดับ		Input	Output
1	STM32F4	0-3.3 V	0-3.3 V
2	Butterworth	0-3.3 V	0-5 V
3	Linear Op-Amp(Voltage)	0-5 V	0-2.5 V
4	OPA549(Voltage)	0-2.5 V	0-25 V
5	Linear Op-Amp(Current)	0-5 V	0-4.75 V
6	OPA549(Current)	0-4.75 V	0-8 A
7	Hall Effect Sensor	5 V	0.014-3.3 V

3.3.1 การออกแบบลิเนียร์ออปแอมป์

3.3.1.1 วงจรควบคุมแรงดัน

ตามตารางที่ 3.3 แรงดันที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างแรงดันจาก Butterworth ขนาดแรงดันไฟฟ้า 0-5 โวลต์ โดยปรับลดลง เพื่อไปจ่าย OPA549 ขนาดแรงดันไฟฟ้า 0-2.5 โวลต์ และเลือกใช้ IC ตระกูล LM353 Op-Amp ในการออกแบบ



รูปที่ 3.13 วงจรควบคุมแรงดันด้วย Linear Op-Amp

กำหนดให้ ค่าความต้านทานคงที่

$$R_f = 18\text{K}\Omega, V_z = 2.5\text{V} \text{ และ } R = 10\text{K}\Omega$$

ความต้องการแรงดันใช้งานกับตัวอุปกรณ์ เพาเวอร์ออปแอมป์ 0.003-2.5 โวลต์ โดยแรงดันอินพุตออกจาก Butterworth 0-5 โวลต์

$$V_{in(\max)} = 5\text{V}, V_{out(\max)} = 2.498\text{V} \text{ และ } V_{in(\min)} = 0\text{V}, V_{out(\min)} = 0.452\text{V}$$

หาค่าความชันจากสมการที่ 2.45

$$m = \text{Span} = \frac{V_{out(\max)} - V_{out(\min)}}{V_{in(\max)} - V_{in(\min)}} = 0.4092 \quad (3.20)$$

หาค่า R_i จากสมการที่ 2.60

$$R_i = \frac{R_f}{m} = 43.98 \text{ k}\Omega \quad (3.21)$$

หาค่า จุดเริ่มต้นของกราฟเส้นตรงสมการที่ 2.41

$$b = V_{out(\min)} - mV_{in(\min)} = 0.427 \quad (3.22)$$

หาค่า R_Z และ R_d จากสมการที่ 2.61 และสมการที่ 2.52

$$R_Z = \frac{R_f}{b} \times V_Z = 1.05 \text{ M}\Omega \quad (3.23)$$

$$R_d = \left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_Z} + \frac{1}{R_i} \right)^{-1} = 11.38 \text{ k}\Omega \quad (3.24)$$

จากสมการที่ 2.58 ตรวจสอบค่าความต้านทานที่คำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุต

$$V_{out(\max)} = \frac{R_f}{R_i} V_{in(\max)} + \frac{R_f}{R_Z} V_Z = 2.473 \text{ V} \quad (3.25)$$

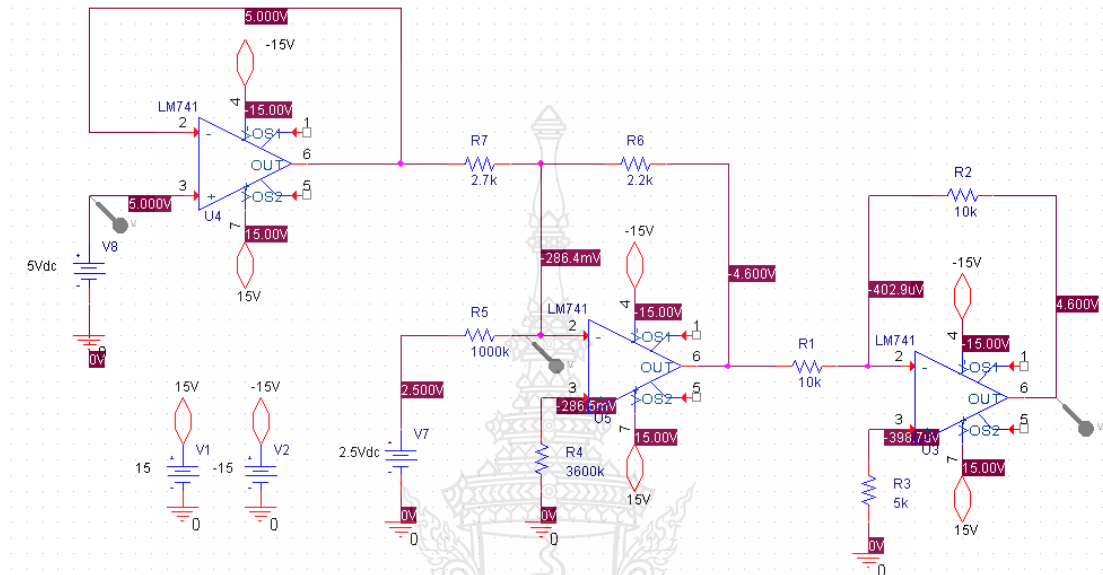
$$V_{out(\min)} = \frac{R_f}{R_i} V_{in(\min)} + \frac{R_f}{R_Z} V_Z = 0.427 \text{ V} \quad (3.26)$$

ค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจรนี้ขยายแรงดัน โดยให้แรงดันเอาต์พุต 0.003-2.5 โวลต์ และแรงดันอินพุต 0-5 โวลต์ แรงดันจ่ายให้กับวงจร Summing ($V_Z = 2.5 \text{ V}$) และเทียบขนาดค่าความต้านทานที่คำนวณได้กับค่าความต้านทานที่ใช้จริง $R_f(\text{Adj}) = 20 \text{ k}\Omega$, $R_i = 10 \text{ k}\Omega$,

$$R_i(\text{Adj}) = 50 \text{ k}\Omega, R_Z = 1 \text{ M}\Omega, R_d = 11 \text{ k}\Omega \text{ และ } R_c = 5 \text{ k}\Omega$$

3.3.1.2 วงจรควบคุมกระแส

ตามตารางที่ 3.3 แรงดันที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างแรงดันจาก Butterworth ขนาดแรงดันไฟฟ้า 0-5 โวลต์ โดยปรับลดลง เพื่อไปจ่าย OPA549 ขนาดแรงดันไฟฟ้า 0 - 4.75 โวลต์ และเลือกใช้ IC ตระกูล LM353 Op-Amp ในการออกแบบ



รูปที่ 3.14 วงจรควบคุมกระแสด้วย Linear Op-Amp

กำหนดให้ ค่าความต้านทานคงที่

$$R_f = 2.2\text{K}\Omega, V_z = 2.5\text{V} \text{ และ } R = 10\text{K}\Omega$$

ความต้องการแรงดันใช้งานกับตัวอุปกรณ์ เพาเวอร์ออปแอมป์ 0-2.5 โวลต์ โดยแรงดันอินพุต ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ 0-3 โวลต์

$$V_{in(\max)} = 5\text{V}, V_{out(\max)} = 4.6\text{V} \text{ และ } V_{in(\min)} = 0\text{V}, V_{out(\min)} = 0.526\text{V}$$

หาค่าความชันจากสมการที่ 2.45

$$m = \text{Span} = \frac{V_{out(\max)} - V_{out(\min)}}{V_{in(\max)} - V_{in(\min)}} = 0.8148 \quad (3.27)$$

หาค่า R_i จากสมการที่ 2.60

$$R_i = \frac{R_f}{m} = 2.7\text{k}\Omega \quad (3.28)$$

หาค่า จุดเริ่มต้นของกราฟเส้นตรงสมการที่ 2.44

$$b = V_{out(\min)} - mV_{in(\min)} = 0.526 \quad (3.29)$$

หาค่า R_z และ R_d จากสมการที่ 2.61 และสมการที่ 2.52

$$R_z = \frac{R_f}{b} \times V_z = 823\text{k}\Omega \quad (3.30)$$

$$R_d = \left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_z} + \frac{1}{R_i} \right)^{-1} = 1.129\text{k}\Omega \quad (3.31)$$

จากสมการที่ 2.58 ตรวจสอบค่าความต้านทานที่คำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุต

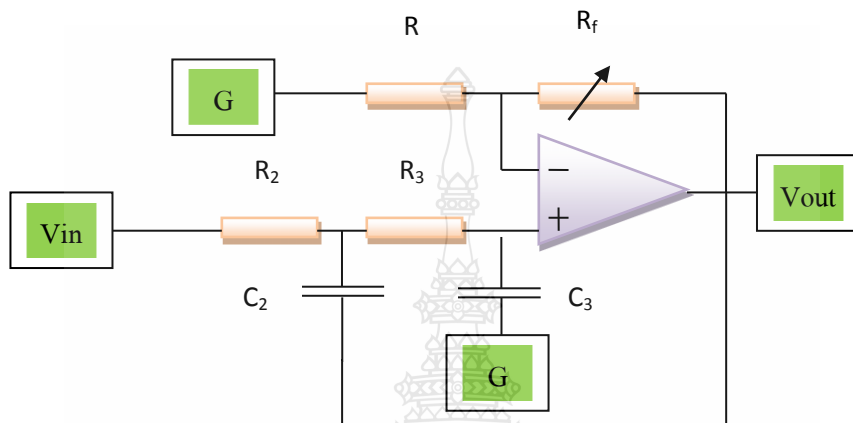
$$V_{out(\max)} = \frac{R_f}{R_i} V_{in(\max)} + \frac{R_f}{R_z} V_z = 4.6\text{V} \quad (3.32)$$

$$V_{out(\min)} = \frac{R_f}{R_i} V_{in(\min)} + \frac{R_f}{R_z} V_z = 0.526\text{V} \quad (3.33)$$

หาค่าความต้านทานที่มีขายจริง โดยให้แรงดันเอาต์พุต 0.0055-4.75 โวลต์ แรงดันจ่ายให้กับวงจร Summing ($V_z = 2.5\text{V}$) และแรงดันอินพุต 0-5 โวลต์ ขนาดค่าความต้านทานที่คำนวณได้กับค่าความต้านทานที่ใช้ $R_f(\text{Adj}) = 5\text{k}\Omega$, $R = 10\text{k}\Omega$, $R_i(\text{Adj}) = 5\text{k}\Omega$, $R_z = 1\text{M}\Omega$, $R_d = 1.1\text{k}\Omega$ และ $R_c = 5\text{k}\Omega$

3.3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำ (Butterworth)

ตามตารางที่ 3.3 แรงดันที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างแรงดันจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4 ขนาดแรงดันไฟฟ้า 0-3.3 โวลต์ โดยควบคุมเป็นลิเนียร์ให้แรงดันสูงขึ้น โดยใช้แสงจากอุปกรณ์ Op-to เป็นตัวเปรียบเทียบ เพื่อไปจ่าย Linear Op Amp ขนาดแรงดันไฟฟ้า 0-5 โวลต์ และเลือกใช้ IC ตระกูล PC817 Op-Amp ในการออกแบบ



รูปที่ 3.15 วงจร Butterworth

กำหนดค่าความถี่ตัด 1 kHz (Frequency cut off ; f_c) เพื่อให้การคำนวณ จะกำหนดค่า $R_2=R_3=R$ และ $C_2=C_3=C$ และกำหนดค่า $C = 0.0047 \mu\text{F}$ จากสมการที่ 2.64 คำนวณหาค่า R

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} \quad (3.34)$$

แทนค่า

$$R = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 1 \times 10^3 \times 0.0047 \times 10^{-6}}$$

ค่าความต้านทาน $R = 33,879.9 \Omega$

ดังนั้นใช้ค่าความต้านทานขนาด $R_1 = R_2 = R_3 = 33 \text{ k}\Omega$

อัตราขยายจะมีค่า 1.586 นั่นคือ $R_f = 0.586 R_1$ โดยอัตราค่าขยายนี้จะเป็นสัดส่วนผลตอบสนองของวงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ท ด้วยเหตุนี้เลือกค่า $R_1 \leq 100 \text{ k}\Omega$

$$R_f = 0.586 \times R \quad (3.35)$$

$$R_f = 0.586 \times 33,000$$

$$R_f = 19,338 \Omega$$

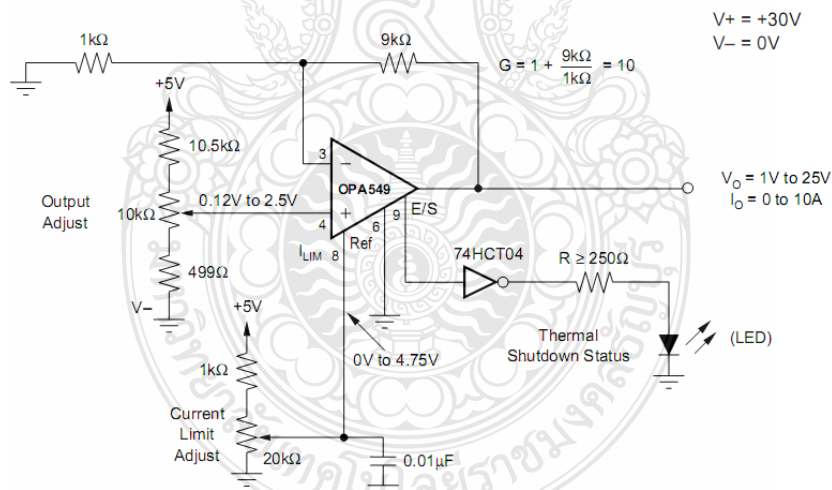
ดังนั้นเลือกค่าความต้านทาน $22k\Omega$

3.3.3 การคำนวณ ค่าความต้านทานในวงจร Power Op-Amp ด้วย IC เบอร์ OPA549

จากตารางที่ 3.3 แรงดันที่ใช้ในการควบคุมกำลังไฟของไอซี OPA549 มีทั้งหมด 2 แบบ

1 โดยใช้แรงดันควบคุม ขนาด 0-2.5 โวลต์ เพื่อทำการควบคุมแรงดันขาออก ขนาด 0-25 โวลต์ เพื่อจ่ายให้หลอดสนามแม่เหล็ก

2 โดยใช้แรงดัน ขนาด 0-4.75 โวลต์ เพื่อทำการควบคุมกระแสไฟขาออก เพื่อจ่ายให้หลอดสนามแม่เหล็ก ขนาดแรงดันไฟฟ้า 0-8 แอมป์ (ในโครงการนี้ใช้ประมาณ 0.5 แอมป์)



รูปที่ 3.16 การออกแบบ Power Op-Amp ด้วยไอซีเบอร์ OPA549

กำหนด $I_{LIM} = 7.9A$

$$R_{CL} = \frac{75k}{I_{LIM}} - 7.5k = \frac{75k}{7.9} - 7.5k = 2k\Omega \quad (3.36)$$

$$V_{CL} = \frac{R_{CL} \times 4.75V}{R_{CL} + 7.5k} = \frac{2k \times 4.75V}{2k + 7.5k} = 1V \quad (3.37)$$

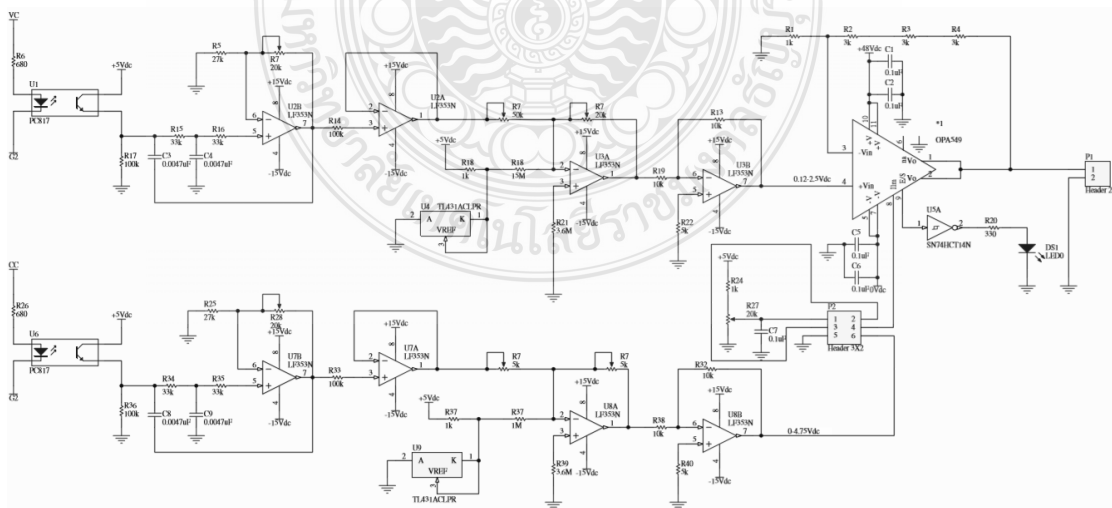
$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{9k}{1k} = 10 \quad (3.38)$$

$$V_o = V_{CL} (1 + R_1 / R_2) = 1(1 + 9k / 1k) = 10V \quad (3.39)$$

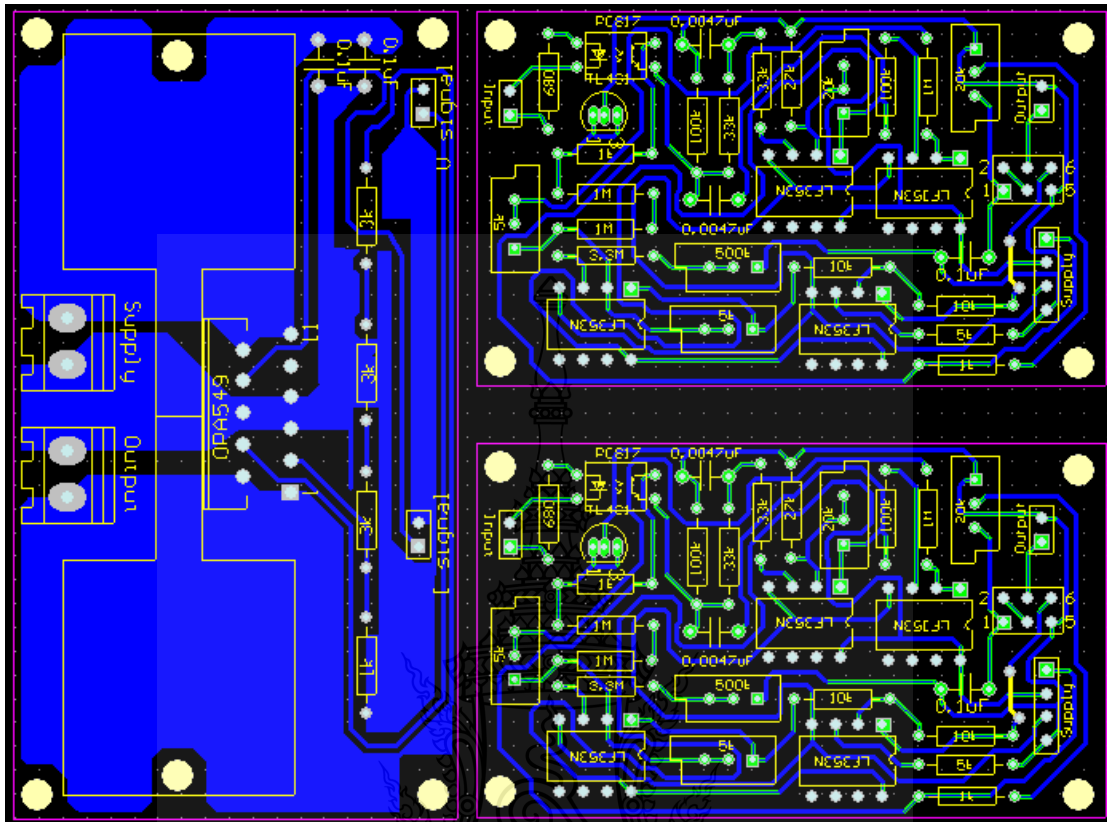
$$V_{set} = (Ref) + 4.75 - (7500W)(I_{LIM}) / 15800 \quad (3.40)$$

$$I_o = \frac{15.8k(4.75)}{7.5k + R_{CL}} = \frac{15.8k(4.75)}{7.5k + 2k} = 7.9A \quad (3.41)$$

เมื่อคำนวณค่าความต้านทานของวงจรแต่ละวงจร และเลือกใช้อุปกรณ์ของแต่ละวงจรเบื้องต้นที่กล่าวมา นำไปออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่ใช้ในการควบคุมของวิทยานิพนธ์ และออกแบบแผ่นปริ้นต์ด้วยโปรแกรม DXP 2004

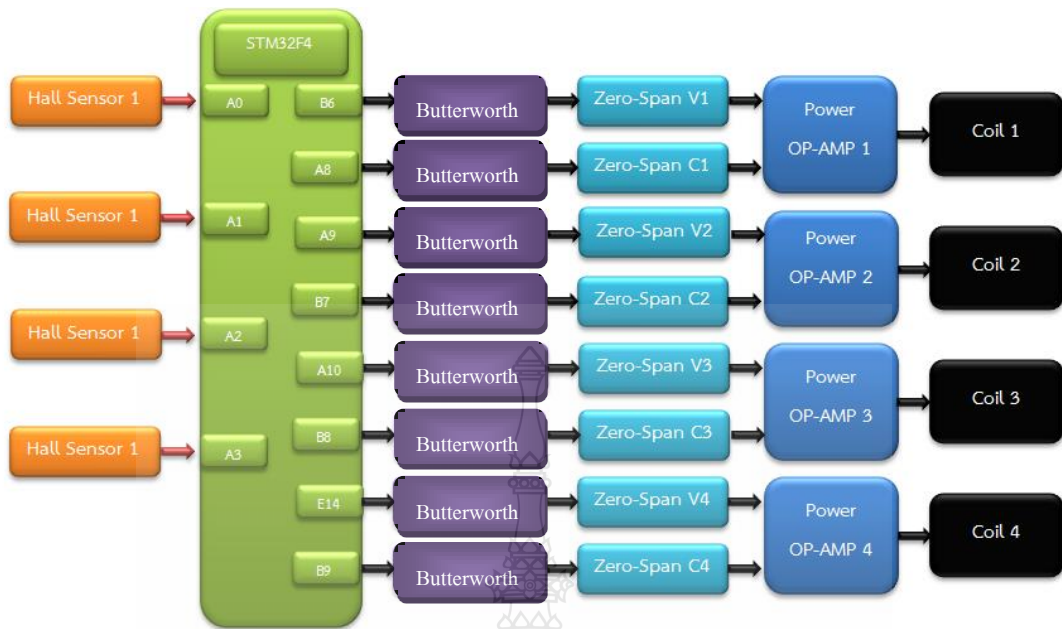


รูปที่ 3.17 ออกแบบวงจรควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรม DXP 2004



รูปที่ 3.18 ออกแบบแผ่นปรี้นด้วยโปรแกรม DXP 2004

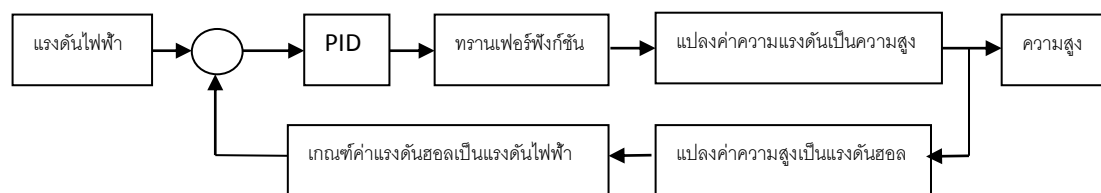
ในการออกแบบโครงการนี้ได้กำหนดขาอินพุต-เอาต์พุตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F4 ดังรูป 3.20 โดยมี 2 ทางให้เลือกในการควบคุม คือ การควบคุมแรงดัน และการควบคุมกระแส ในโครงการนี้เลือกการควบคุมแรงดัน



รูปที่ 3.19 กำหนดขาอินพุต-เอาต์พุตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4

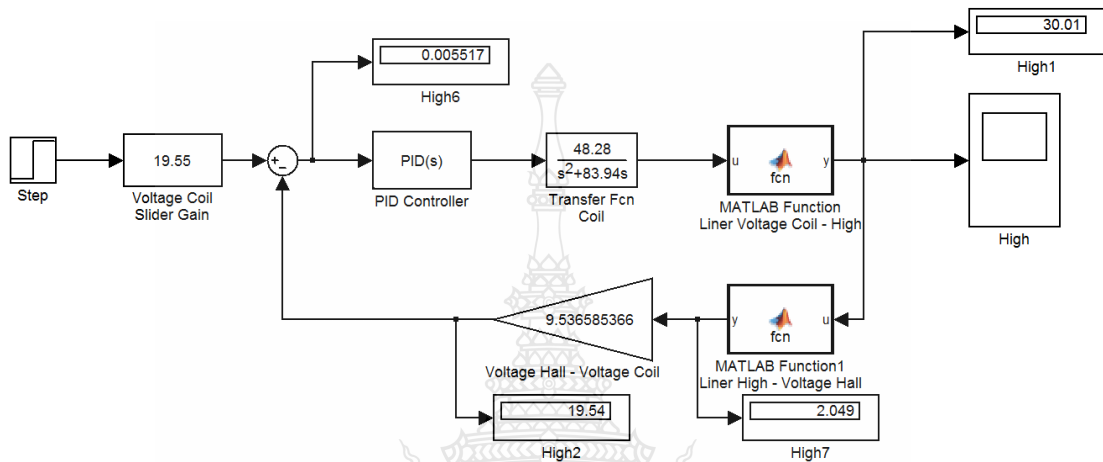
3.4 การควบคุมด้วย ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID)

บล็อกไดอะแกรมวงจรควบคุมด้วย PID 1 จุดเพื่อใช้ในการควบคุม ตามรูปที่ 3.20 ประกอบด้วยแรงดันอินพุต คือแรงดันที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4 , วงจรลิเนียร์แรงดัน (Zero และ Span), อัตราขยายแรงดัน (OPA549) คือวงจรใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (OPA549), ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรของ R-L อนุกรม, สมการเปลี่ยนค่าแรงดันเป็นความสูง และแรงดันไฟฟ้างดตารางที่ 3.2 ถ้าในขณะเดียวกันค่าเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กวัดค่าเป็นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งคูณด้วยกับค่าแรงดันสนามแม่เหล็กเพื่อหาค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าขดลวดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.20 ไดอะแกรมการควบคุม PID ของชิ้นงาน

การสร้าง Model ในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อทดสอบผลตอบสนองของการควบคุม PID จะต้องมีการออกแบบค่า K_p , K_i , K_d , T_U และ T_G เพื่อใช้ในการปรับจูนค่า PID ให้เหมาะสม



รูปที่ 3.21 แบบจำลองตัวควบคุม PID ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

ในการออกแบบแบบตัวควบคุมด้วยพีไอได้นั้นจะต้องทราบถึงค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ทางเดินรากของทรานเฟอร์ฟังก์ชัน และหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมตามวิธีการของ Chien-hrones-Reswick

3.4.1 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันแกนเหล็ก ต่อจุด

จากสมการที่ 2.12 หาค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจร โดยวิธานิพนธ์นี้เป็นวงจร R-L อนุกรม และจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าทางแดงที่พันรอบขดลวด

$$I(s) = \frac{V}{L} \left[\frac{1}{s(s + R/L)} \right] \quad (3.42)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ของวงจร โดยค่าความต้านทานจากสมการที่ 3.18 และค่าความเหนี่ยวนำจากสมการที่ 3.16

$$I(s) = \frac{25}{0.51774} \left[\frac{1}{s(s + 43.46/0.51774)} \right]$$

ดังนั้นค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน(T.F.)ของวงจรถือ

$$I(s) = 48.28 \left[\frac{1}{s(s + 83.94)} \right]$$

3.4.2 ทางเดินรากของสนามแม่เหล็ก 1 จุด

จากสมการ 3.42 เป็นค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก 1 จุด

$$T.F. = \frac{48.28}{s(s + 83.94)}$$

ระบบสมการ มีค่าซีโร(Zero) = 0

มีค่าโพล (Pole) = 0, -83.94

3.4.2.1 จำนวนเส้นของทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก 1 จุด โดยระบบมีจำนวนโพล(m) อยู่ 2 ตัว แต่ละมีจำนวนซีโร(n) อยู่ 0 ตัว

$$n - m = 2 - 0 = 2 \text{ เส้น} \quad (3.43)$$

3.4.2.2 ระบบไม่มีซีโร ดังนั้นโพล ทุกตัวจะวิ่งเข้าหาค่าอนันต์

3.4.2.3 ระบบจะมีมุมวิ่งเข้าหาค่าอนันต์ของโพลเป็น

$$\phi_A = \frac{(2q + 1)180}{n - m}; q = 0, 1 \quad (3.44)$$

$$\phi_A = \frac{(2(0) + 1)180}{2} = 90^\circ \quad (3.45)$$

$$\phi_A = \frac{(2(1) + 1)180}{2} = 270^\circ \quad (3.46)$$

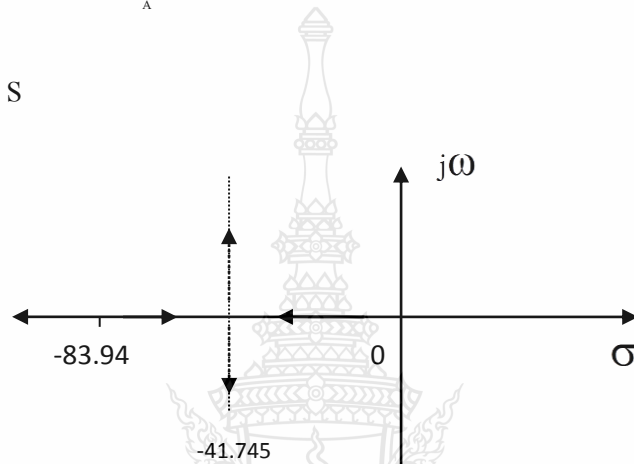
มีจุดเริ่มต้นของมุมวิ่งเข้าหาค่าอนันต์ทุกมุมเป็น

$$\sigma_A = \frac{\sum \text{Pole} + \sum \text{Zero}}{n - m} \quad (3.47)$$

$$\sigma_A = \frac{0 - 83.94 + 0}{2}$$

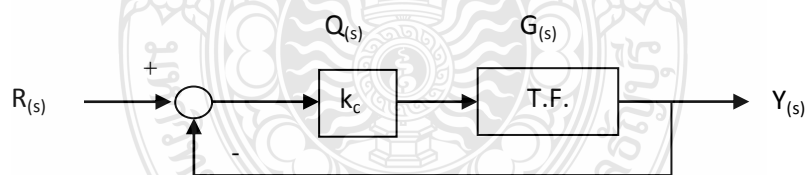
$$\sigma_A = -41.745$$

ดังนั้นเส้นในระนาบ S



รูปที่ 3.22 เส้นบนระนาบ S

3.4.2.4 การหาค่าจุดตัดบนแกนจินตภาพ



รูปที่ 3.23 คุณลักษณะของระบบ

สมการคุณลักษณะของระบบ

$$Q(s)G(s) = \frac{k(48.28)}{S(S + 83.49)} \quad (3.48)$$

$$\frac{Q_{(s)} G_{(s)}}{1 + Q_{(s)} G_{(s)}} = \frac{48.28k}{1 + \frac{48.28k}{S(S+83.49)}} \quad (3.49)$$

พิจารณา $1 + Q_{(s)} G_{(s)} = 1 + \frac{48.28k}{S(S+83.49)} \quad (3.50)$

จะหาโพลของระบบ ให้ $1 + Q_{(s)} G_{(s)} = 0 \quad (3.51)$

แทนสมการ 3.50 ลงใน สมการ 3.51

$$0 = \frac{S(S+81.49) + 48.28k}{S(S+83.49)}$$

$$0 = S^2 + 83.49S + 48.28k$$

สมการโพลของระบบคือ $P_{(s)} = S^2 + 83.49S + 48.28k \quad (3.52)$

S^2	1	48.28k
S^1	83.49	0
S^0		

$$\frac{-1(0) + 48.28k(83.49)}{83.49} = 48.28k$$

หาค่าจุดวิกฤติ โดยพิจารณา จากสมการ S_2

$$48.28k = 0$$

ดังนั้น ค่า $k=0$ ระบบนี้ไม่มีซีโรเชิงซ้อนแสดงว่าไม่มีมุมเข้าหาซีโรเชิงซ้อนจุดแยกของแกนจริงบน
 ราก

$$\frac{dk}{ds} = 0 \quad (3.53)$$

จาก สมการ 3.64 $Q_{(s)} G_{(s)} = -1 \quad (3.54)$

และสมการของระบบ $Q_{(s)} G_{(s)} = \frac{48.28k}{S(S+83.49)} \quad (3.55)$

แทนสมการ 3.53 ลงในสมการ 3.54

$$k = \frac{-1}{48.28 S(S+83.49)}$$

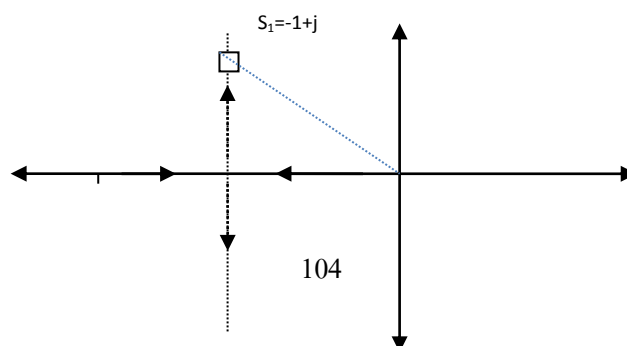
$$\frac{dk}{ds} = \frac{d}{ds} \left[\frac{-1}{48.28 (S^2 + 83.49S)} \right]$$

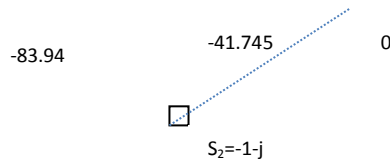
$$0 = \frac{-1}{48.28} [2S + 83.49]$$

ดังนั้น จุดตัดบนแกนจินตภาพ จะมีค่าเท่ากับ

$$S = -41.745$$

ดังนั้นตำแหน่งดังกล่าวบนเส้นทางเดินรากดังรูป 3.24





รูปที่ 3.24 ตำแหน่งโพลที่ต้องการบนเส้นทางเดินราก

3.4.3 การหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมตามวิธีการของ Chien-hrones-Reswick

ออกแบบให้ผลตอบสนองเป็นแบบหน่วงวิกฤต จากตารางที่ 2.6 ออกแบบ 20%

Overshoot

จากตารางที่ 2.6 ค่าเกณฑ์ K_p ตามวิธีการของ Chien-hrones-Reswick โดยกำหนดค่า $R=6.7$ (ตามตาราง 2.5) และ $K_g = 0.032$

$$K_p = \frac{0.95 \times R}{K_g} \quad (3.56)$$

$$K_p = \frac{0.95 \times 6.7}{0.032}$$

$$K_p = 198.90$$

ดังนั้น K_p มีค่าเท่ากับ 200

จากตารางที่ 2.6 ค่าเกณฑ์ K_I ตามวิธีการของ Chien-hrones-Reswick

โดยกำหนดให้ $T_g = 0.5$

$$K_I = \frac{K_p}{1.35 T_g} \quad (3.57)$$

$$K_I = \frac{200}{1.35 \times 0.5}$$

$$K_I = 296.29$$

ดังนั้น K_I มีค่าเท่ากับ 300

จากตารางที่ 2.6 ค่าเกณฑ์ K_D ตามวิธีการของ Chien-hrones-Reswick

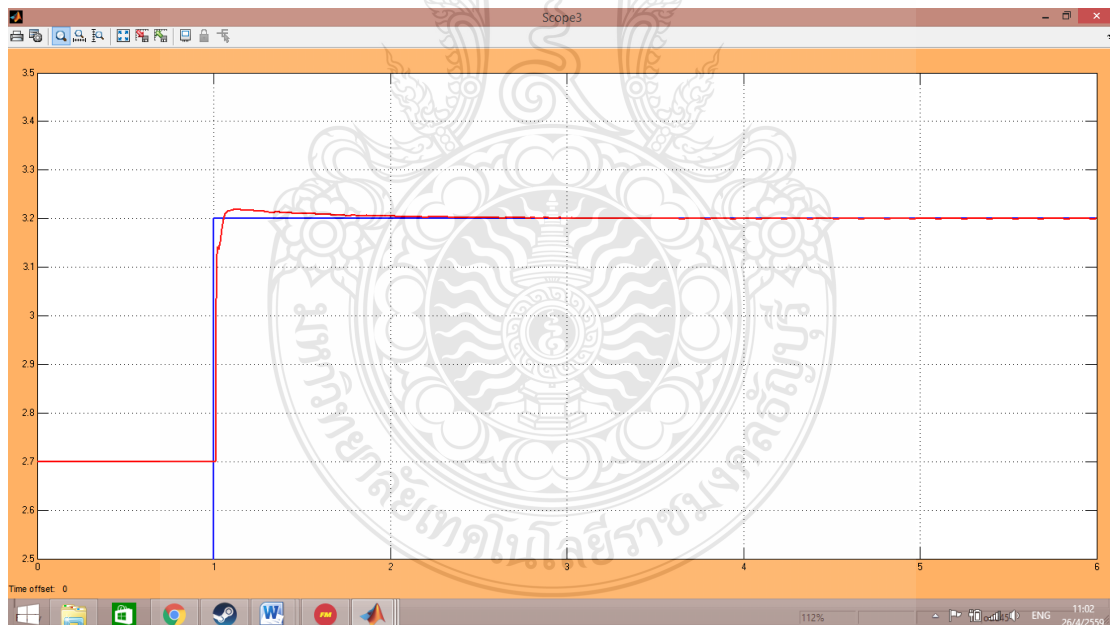
โดยกำหนดค่า $T_U = 0.025$

$$K_D = K_p \times 0.47T_U \quad (3.58)$$

$$K_D = 200 \times 0.47 \times 0.025$$

$$K_D = 2.35$$

ดังนั้น K_D มีค่าเท่ากับ 2.35

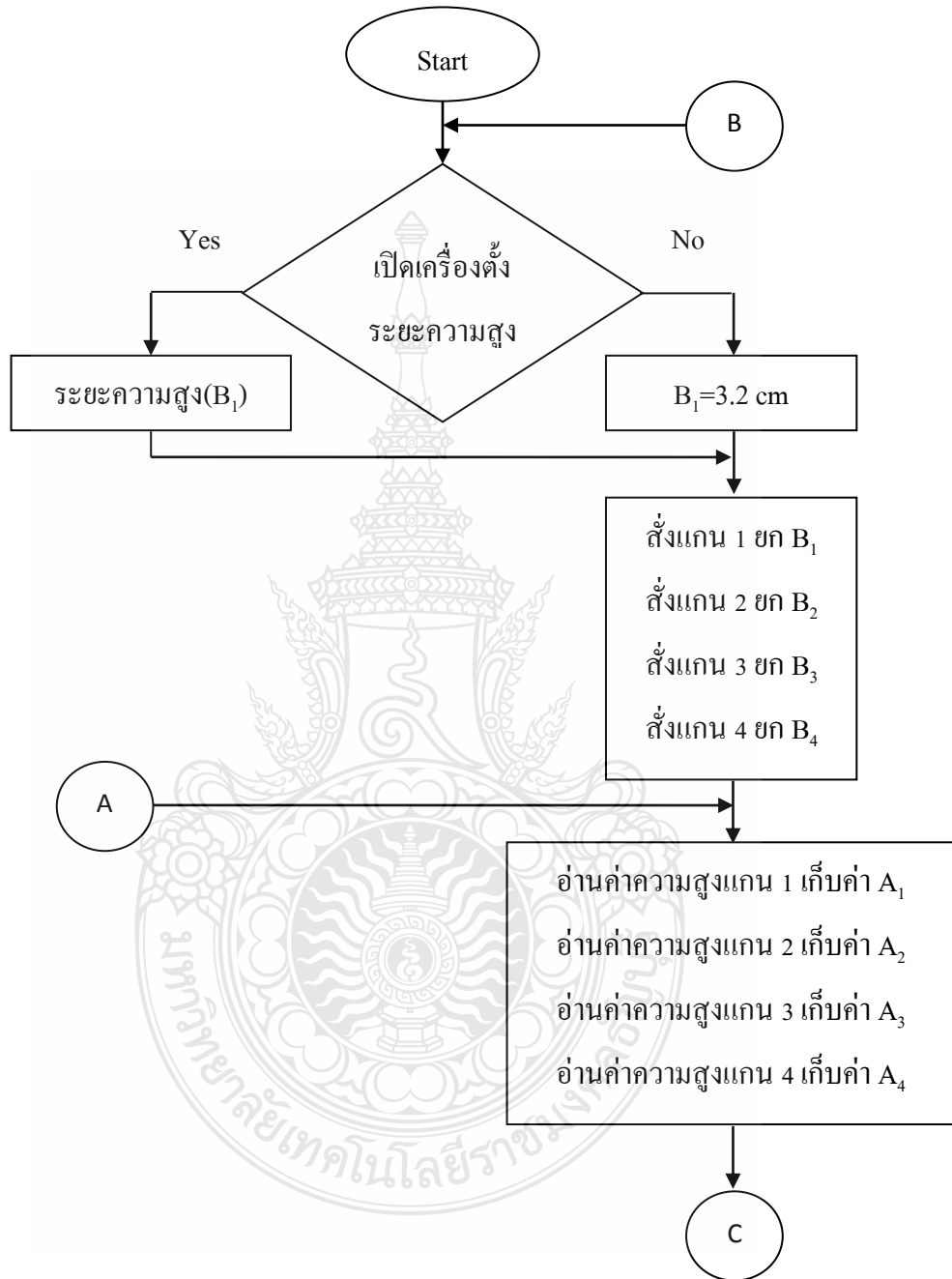


รูปที่ 3.25 แบบจำลองการออกแบบตัวควบคุม PID 20% Overshoot

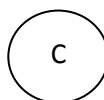
3.5 แผนผังการควบคุม

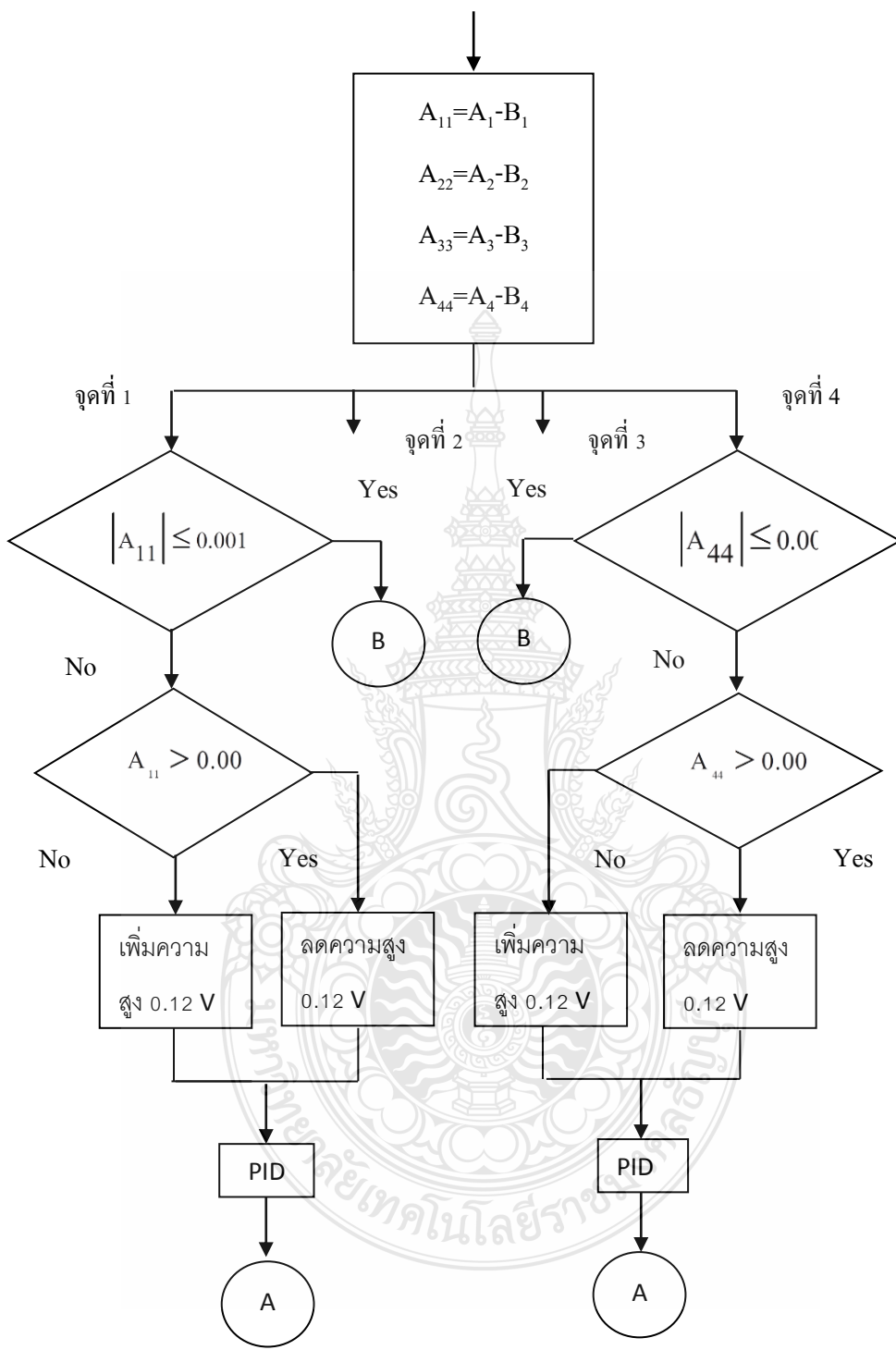
เริ่มจ่ายแรงดันเข้าไปที่ขดลวดโดยใช้ PID control ระยะเริ่มต้นให้แผ่นแนวระนาบลอยขึ้น

สูง 3.2 เซนติเมตร



รูปที่ 3.26 แผนผังการควบคุมด้วยพีไอดี



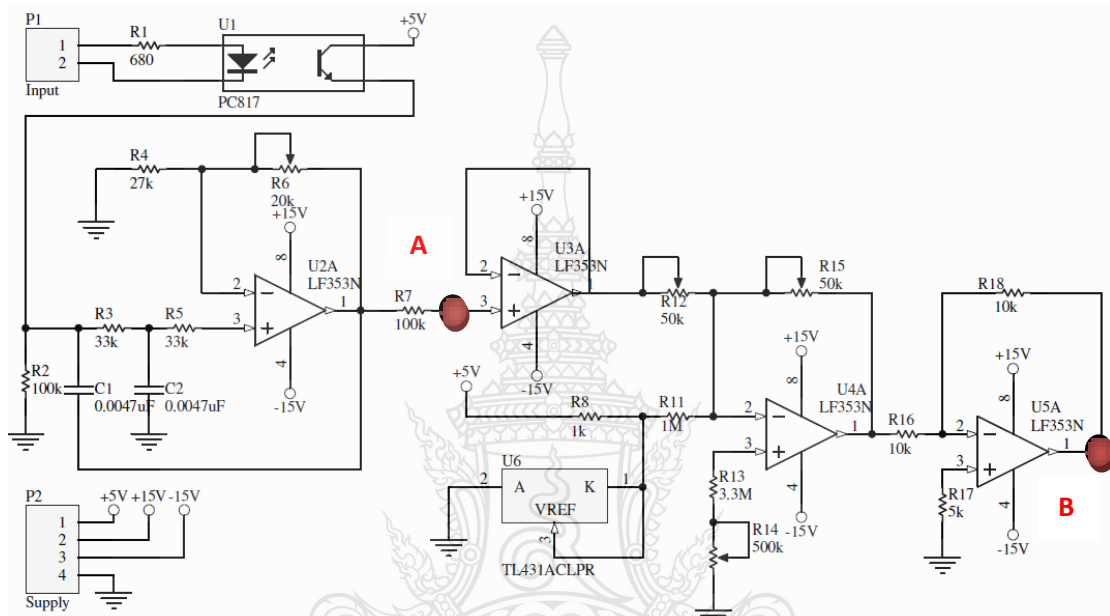


รูปที่ 3.26(ต่อ) แผนผังการควบคุมด้วยพีไอดี

3.6 การสร้างแบบทดสอบ

ชุดทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยสร้างตารางการทดสอบ และผลของการทดลองเมื่อวัดจากเครื่องมือวัด เริ่มจากเริ่มต้นของเครื่อง ทดสอบเมื่อมีน้ำหนักรางจุดกึ่งกลางแผ่นระนาบ และวางวัตถุภายในแผ่นแนวระนาบบนพื้นที่พื้นใด ประกอบด้วย

3.6.1 การทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.27 แผนผังการทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ทดสอบการทำงานของวงจรที่ใช้ในการควบคุมเพื่อทดสอบว่าเป็นไปตามคำนวณและทดสอบสัญญาณพัลส์ 0-100 เปอร์เซ็นต์ เข้าไปทางด้านอินพุตเพื่อทดสอบขอบเขตของสัญญาณควบคุม และแรงดันเพื่อใช้ในการควบคุมแกนแม่เหล็กทางด้านเอาต์พุต 17-23.13 โวลต์ โดยทดสอบโดยใช้ฮอสซิลอสโคปทดสอบโดยแบ่งเป็น 4 จุด ดังนี้

A ทดสอบสัญญาณจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด STM32F4 ส่งผ่าน วงจรกรองความถี่ต่ำ

B ทดสอบสัญญาณจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด STM32F4 ส่งผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ และ วงจร Zero และ Span

3.6.2 การทดสอบการลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายค่าดิวตี้ไซเกิลต่ำสุดที่โครงการนี้สามารถทำงานได้ เริ่มต้น และปรับดิวตี้ไซเกิลเพิ่มขึ้นและสังเกตระยะเวลาการลอยตัวของแผ่นแนวระนาบ จนค่าดิวตี้ไซเกิลถึงค่า 100 เปอร์เซนต์ ในขณะที่ทำการเพิ่มลดค่าดิวตี้ไซเกิล จะสังเกตค่าเซนเซอร์ และกำหนดระยะเวลาการลอยตัวของแผ่นแนวระนาบพร้อมกันโดยทดสอบดังแสดงในตาราง 4.1

3.6.3 การทดสอบเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในระบบ

การทดสอบโดยการจ่ายแรงดันไปที่โหลด 23.12 โวลต์ลอยตัวสูง 3.4 เซนติเมตร และนำเหรียญ 5 บาท ซึ่งมีน้ำหนัก 6 กรัมมาวางที่ละเหรียญ เพื่อตรวจสอบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงของค่าสนามแม่เหล็กดังแสดงในตาราง 4.2

3.4.4 การทดสอบผลการตอบสนองในการเริ่มต้นทำงานขณะไม่มีวัตถุ

เพื่อทดสอบผลตอบสนองในการเริ่มต้นการทำงาน เนื่องจากการเริ่มต้นทำงาน แกนทั้ง 4 จุด จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าทำให้แผ่นแนวระนาบกระเพื่อม และเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กวัดได้ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการแกว่งของแผ่นแนวระนาบจนถึงระยะเวลาหยุดนิ่ง

3.6.5 การทดสอบแรงดันขณะวางน้ำหนักในแผ่นแนวระนาบที่จุดกึ่งกลาง

ในกรณีวางวัตถุบริเวณตรงกลางแผ่นแนวระนาบ ทั้ง 4 จุดมีผลกระทบต่อน้ำหนักเท่ากัน การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการลดและเพิ่มแรงดันและระยะความสูงต่อน้ำหนักที่วางและระยะเวลาการตอบสนองของพีไอดี โดยใช้น้ำหนักไม่เกิน 50 กรัมในการทดสอบ

3.6.6 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองสนามแม่เหล็กผลึกแต่ละจุด

เพื่อทดสอบ แต่ละแกนรับน้ำหนักประมาณเท่าไร และเมื่อวางน้ำหนักลงบนจุดสนามแม่เหล็กผลึก สนามแม่เหล็กตัวอื่นมีผลอย่างไร โดยแสดงผลการทดสอบด้วยกราฟ และการตอบสนองด้วยพีไอดี โดยใช้น้ำหนักไม่เกิน 50 กรัมในการทดสอบ

3.6.7 การทดสอบแรงดันขณะวางน้ำหนักวางในแผ่นแนวระนาบ แบบทันทีทันใด

ในกรณีวางวัตถุทันทีทันใดบนแผ่นแนวระนาบ จะทำให้ ทั้ง 4 จุดมีผลกระทบต่อน้ำหนักที่วางไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อสร้างความสมดุลของแผ่นแนวระนาบ อาจจะมีการปรับหรือลดแรงดันให้เหมาะสมตามขอบเขตของชิ้นงานการทดลองนี้จะทำการทดสอบ 3 ครั้งแต่ละครั้งจะไม่ซ้ำจุดกันเพื่อหาระยะความสูงที่เกิดขึ้นและเวลาที่ใช้ในการสร้างความสมดุลของแผ่นแนวระนาบ

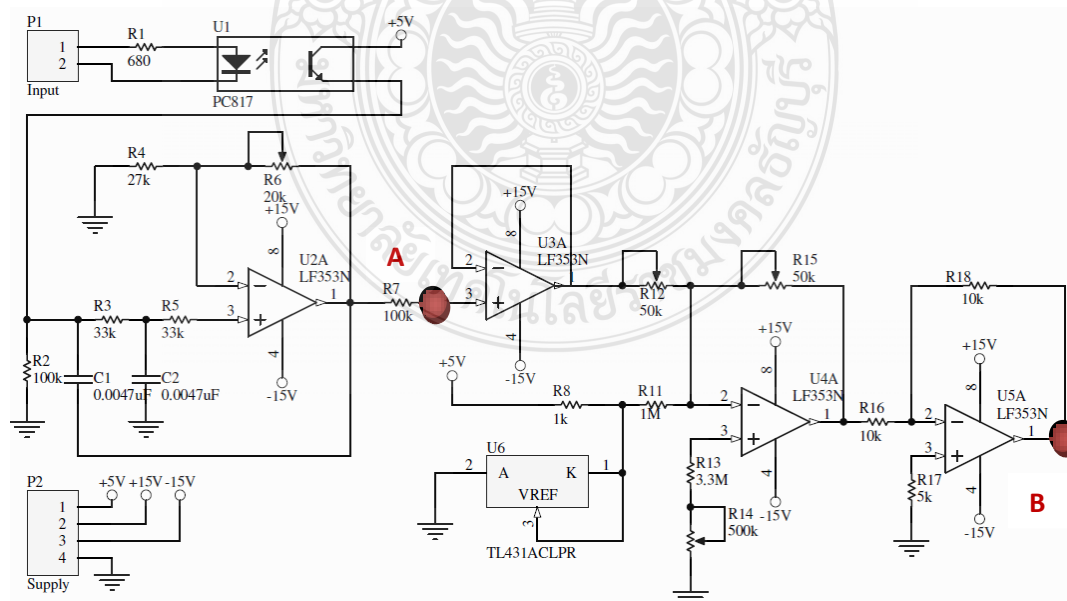
บทที่ 4

ผลการดำเนินการและการวิเคราะห์

ในบทที่ 4 เป็นการทดสอบแรงดันขณะเริ่มทำงาน ทดสอบแรงดันขณะมีน้ำหนัก โดยวางน้ำหนักที่จุดกึ่งกลางของแผ่นระนาบ และทดสอบแรงดันขณะมีน้ำหนัก โดยการวางน้ำหนักด้านใดด้านหนึ่งของแผ่นแนวระนาบ โดยแผ่นแนวระนาบมีน้ำหนัก 170 กรัม

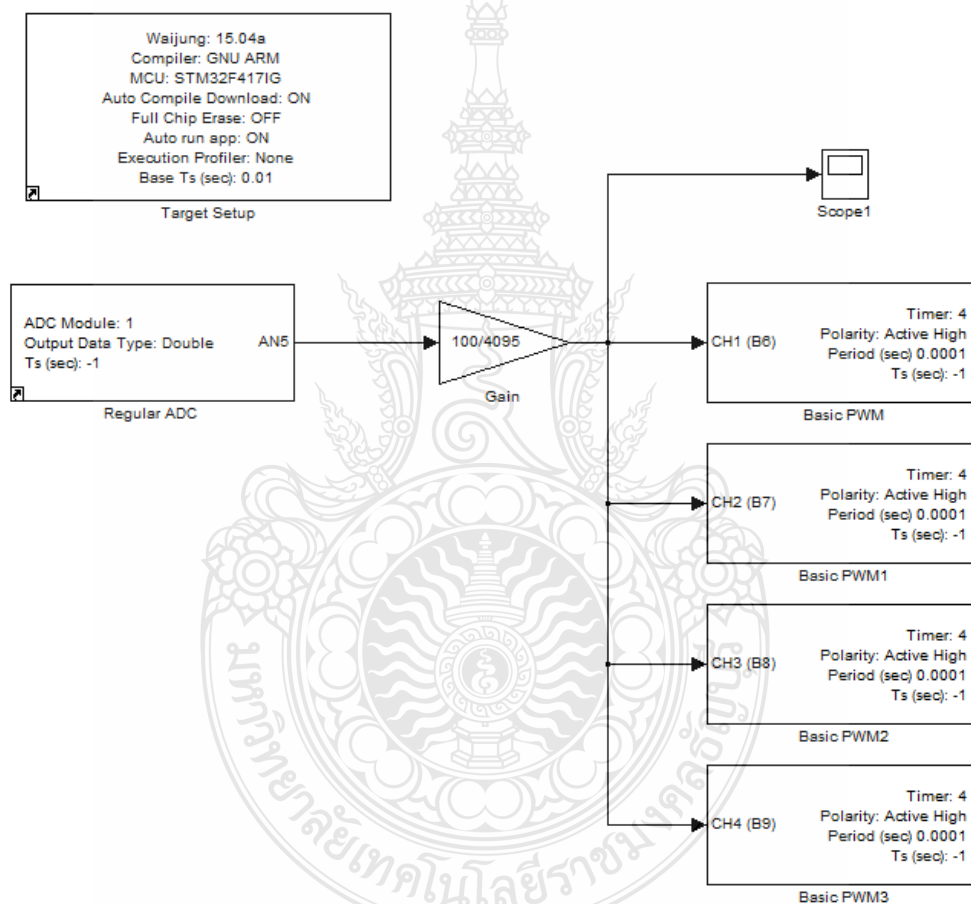
- 4.1 การทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 4.2 ทดสอบระบบการลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก
- 4.3 การทดสอบเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในระบบ
- 4.4 การทดสอบผลการตอบสนองในการเริ่มต้นทำงานขณะไม่มีวัตถุ
- 4.5 การทดสอบแรงดันขณะวางน้ำหนักในแผ่นแนวระนาบที่จุดกึ่งกลาง
- 4.6 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองสนามแม่เหล็กพลิกแต่ละจุด
- 4.7 การทดสอบแรงดันขณะวางน้ำหนักวางในแผ่นแนวระนาบ แบบทันทีทันใด

4.1 การทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.1 แผนผังการทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์

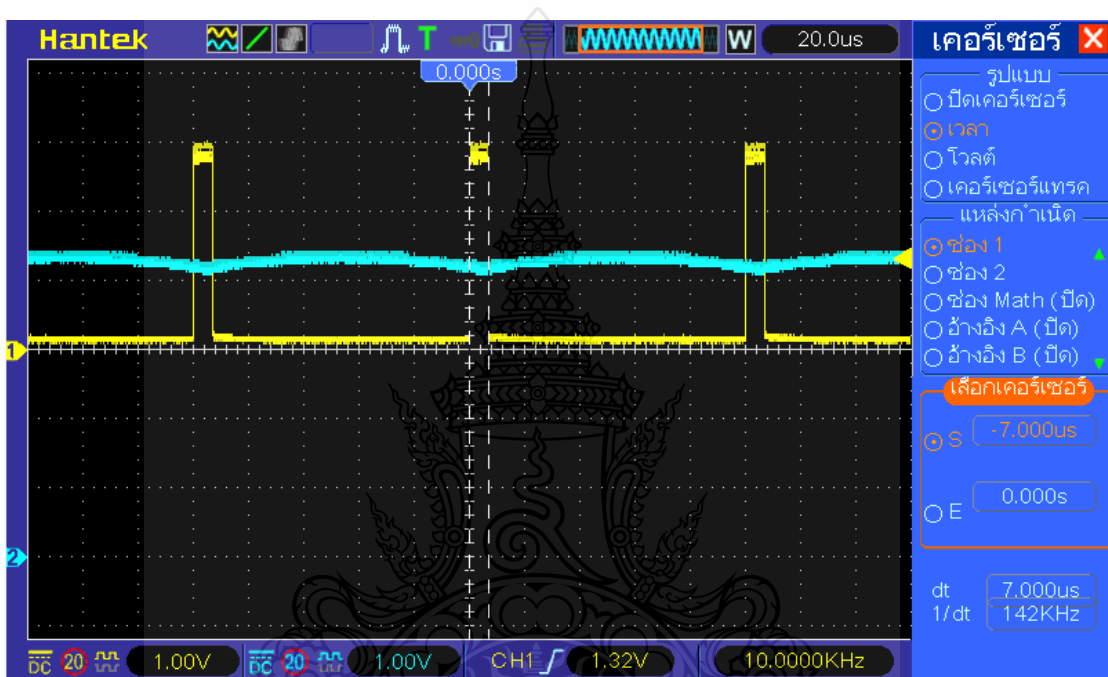
ขณะเริ่มต้นทำงานจากเดิมแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กประคิษฐ์นั้นติดติดกัน ดังนั้นจะต้องจ่ายค่าแรงดันเริ่มต้น เข้าที่แม่เหล็กประคิษฐ์ เพื่อให้ แม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กประคิษฐ์ผลัดกัน ในหัวข้อ 4.1 จะทำการทดสอบวงจรเพียง 2 จุด โดยโหลดทำงานที่ 17-23.12 แอมป์ ลอยตัวสูง 2.7-3.7 เซนติเมตร ในการออกแบบ Model ด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink ความถี่ 10 kHz เพื่อทดสอบสัญญาณพัลส์ใช้ร่วมในวงจรระหว่างจุด A และจุด B โดยเลือกช่องสัญญาณ PWM B6,B7,B8 และ B9 โดยมี ADC ช่องสัญญาณ A5 เป็นตัวปรับค่าตัวที่ใช้เคลตั้งแต่ 7 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.2 การออกแบบ Model ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

A การทดสอบสัญญาณจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F4 ส่งผ่าน วงจรกรองความถี่ต่ำ

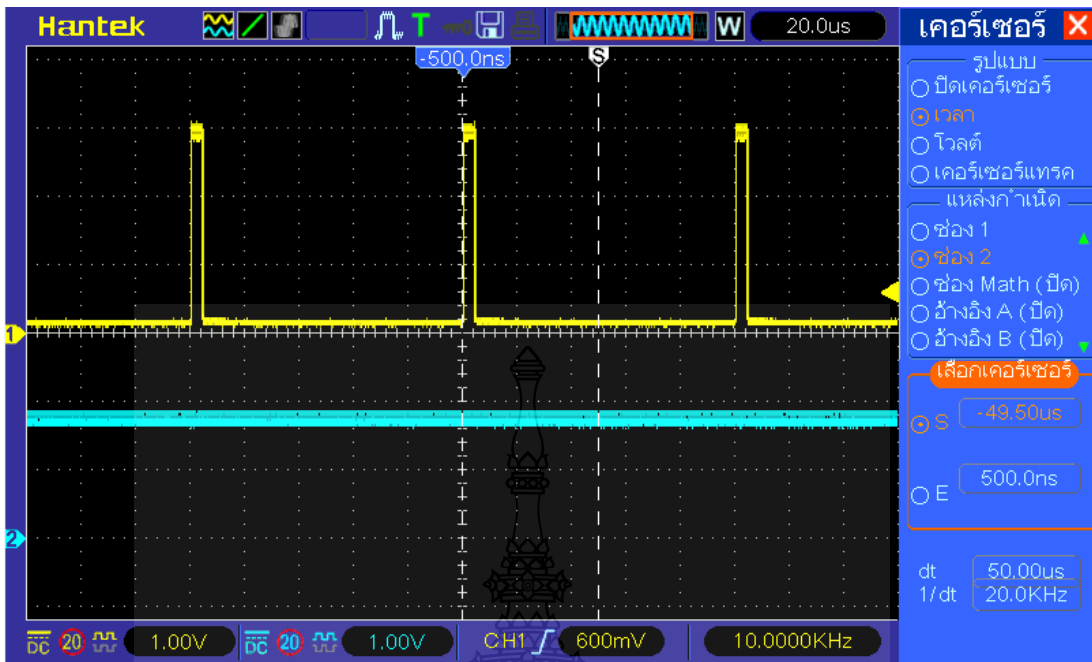
การทดสอบเนื่องจากความถี่ 10 kHz โดยคำนวณค่าความถี่ตัด 1 kHz และเปรียบเทียบดูความสัมพันธ์กับค่าคัตออฟที่ 5-100 เฮอร์เซ็นต์ของบอร์ด STM32F4(อินพุต) และค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรกรองความถี่ต่ำ(เอาต์พุต) 0-5 โวลต์ เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ความเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 4.3 สัญญาณจากบอร์ด STM32F4 ส่งผ่าน วงจรกรองความถี่ต่ำ

B การทดสอบสัญญาณจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F4 ส่งผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ และ วงจร Zero และ Span

การทดสอบสัญญาณพัลส์ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F4 และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรZero-Span (เอาต์พุต) 17 – 23.12 โวลต์ เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์เชิงเส้นในขณะที่ชิ้นงานทำงานเริ่มต้นที่ 1.7 โวลต์ ซึ่งนำไปใช้ร่วมกับไอซี Power Op-Amp เบอร์ OPA549 โดยมีอัตราขยายเป็น 10 เท่า ดังนั้นแรงดันที่ออกมาจากไอซี Power Op-Amp เบอร์ OPA549 เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 17 – 23.12 โวลต์



รูปที่ 4.4 สัญญาณจาก STM32F4 ทำงานร่วมกับวงจรรองความถี่ต่ำและ Zero-Span

4.2 การทดสอบระบบการลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายค่าดิ้วไชเกิดต่ำสุดที่โครงการนี้สามารถทำงานได้ เริ่มต้น และปรับดิ้วไชเกิดเพิ่มขึ้นและสังเกตระยะการลอยตัวของแผ่นแนวระนาบ จนค่าดิ้วไชเกิดถึงค่า 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ทำการเพิ่มลดค่าดิ้วไชเกิด จะสังเกตค่าเซนเซอร์และระยะการลอยตัวของแผ่นแนวระนาบพร้อมกัน

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต ระยะลอยตัว เซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก

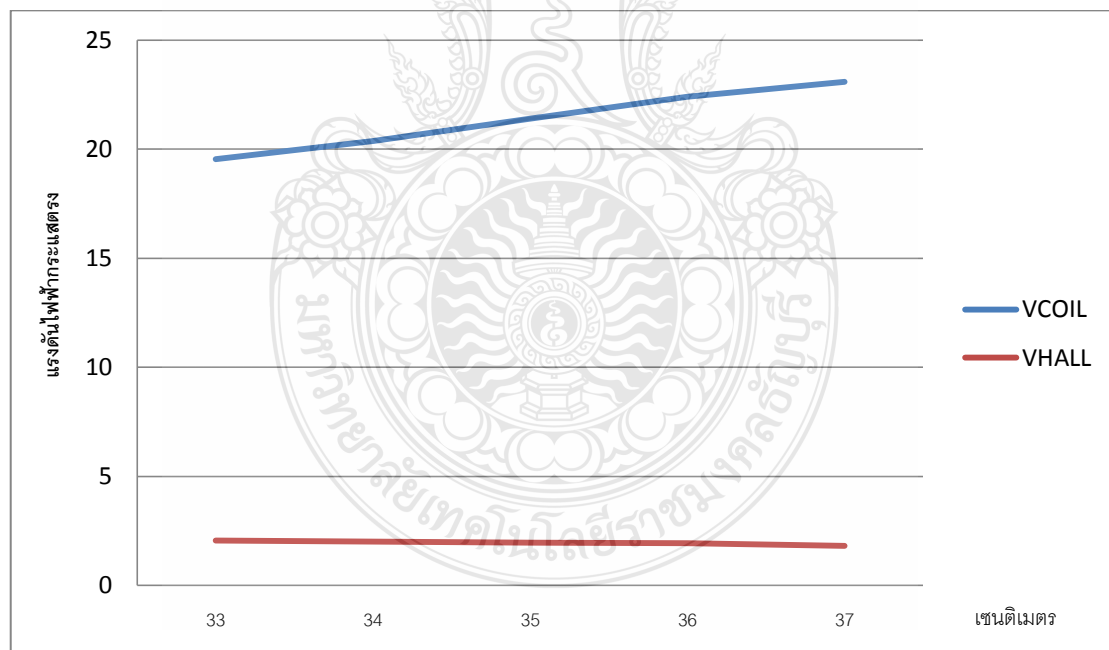
ความสูง (mm)	ดิ้วไชเกิด (%)	แรงดันที่จ่ายในขดลวด				แรงดันเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก			
		Coil		Coil		Hall		Hall	
		1	2	3	4	1	2	3	4
33	5	19.55	19.50	18.80	18.80	2.100-	2.100-	2.100-	2.180-
						2.000	2.000	2.000	2.107
34	7.5	20.37	20.25	19.89	19.95	2.060-	2.060-	2.050-	2.150-
						1.960	1.970	1.960	2.050
35	14	21.40	21.27	20.88	21.08	2.000-	2.020-	2.030-	2.150-
						1.920	1.930	1.940	2.030

ตารางที่ 4.1(ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต ระยะลอยตัว เซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก

ความสูง (mm)	คิวตี้ ไซเคิล (%)	แรงดันที่จ่ายในขดลวด				แรงดันเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก			
		Coil	Coil	Coil	Coil	Hall	Hall	Hall	Hall
		1	2	3	4	1	2	3	4
36	40	22.31	22.22	22.38	22.30	1.970- 1.880	1.930- 1.850	1.920- 1.840	2.020- 1.930
37	60	23.09	23.04	23.00	22.93	1.845- 1.778	1.805- 1.784	1.842- 1.779	1.927- 1.856

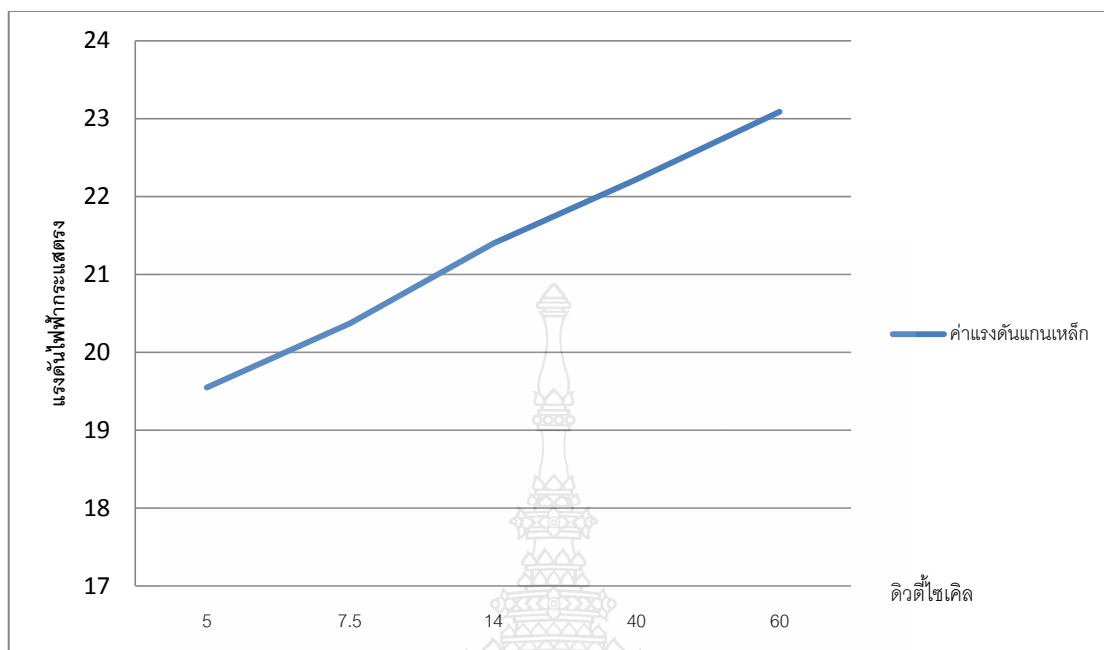
เมื่อประกอบวงจรและทดสอบที่ค่าคิวตี้ไซเคิลชิ้นงานจะเริ่มดับ โดยค่าแรงดันที่แกนเหล็ก 23.09-19.55 โวลต์ ชิ้นงานลอยสูง 33 - 37 มิลลิเมตร และวัดสนามแม่เหล็กวัดค่าได้ 2.100-1.778 โวลต์ และเกิดการแกว่งของแผ่นแนวระนาบ

4.2.1 ความสัมพันธ์ ความสูง แรงดันแกนเหล็กและแรงดันที่เซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.5 ความสูง แรงดันแกนเหล็กและแรงดันที่เซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแกนเหล็ก และค่าคิวตีไซเคิล



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแกน และค่าคิวตีไซเคิล

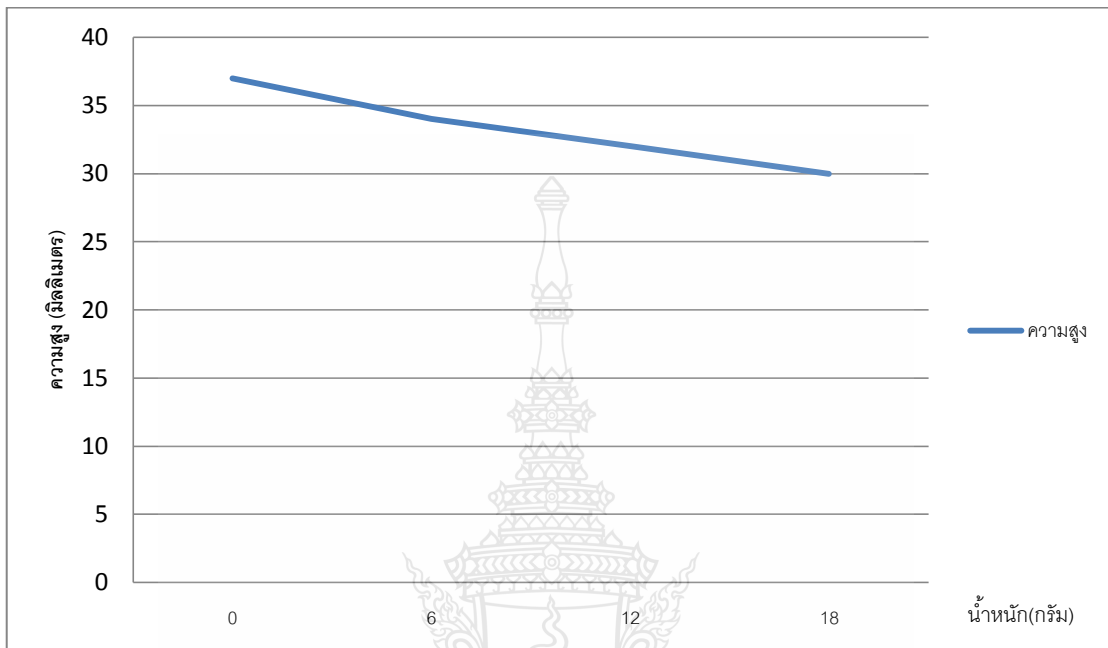
4.3 การทดสอบเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในระบบ

การทดสอบโดยการจ่ายแรงดันไปที่โหลด 23.12 โวลต์ลอยตัวสูง 3.7 เซนติเมตร และนำเหรียญ 5 บาท ซึ่งมีน้ำหนัก 6 กรัมมาวางที่ละเหรียญ เพื่อตรวจสอบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของค่าสนามแม่เหล็ก

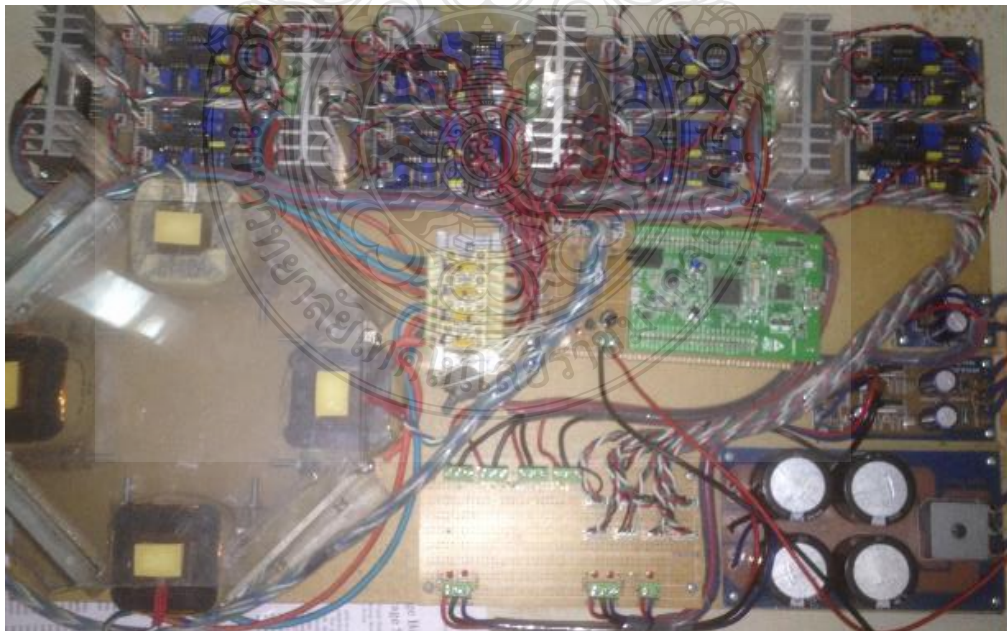
ตารางที่ 4.2 การทดสอบด้วยน้ำหนักและระยะลอยตัวของแผ่นแนวระนาบ

น้ำหนัก (กรัม)	ความสูง (มิลลิเมตร)	แรงดันที่เซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก			
		Hall 1	Hall 2	Hall 3	Hall 4
0	37	1.845-1.778	1.850-1.785	1.842-1.779	1.927-1.856
6	34	1.880-1.814	1.876-1.860	1.873-1.808	1.980-1.910
12	32	1.911-1.842	1.928-1.856	1.912-1.850	2.000-1.927
18	30	1.950-1.880	1.944-1.871	1.950-1.870	2.042-1.970
24	27	-	1.967-1.895	2.012-1.908	2.111-2.028

ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กเกิดการแกว่งแสดงดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก



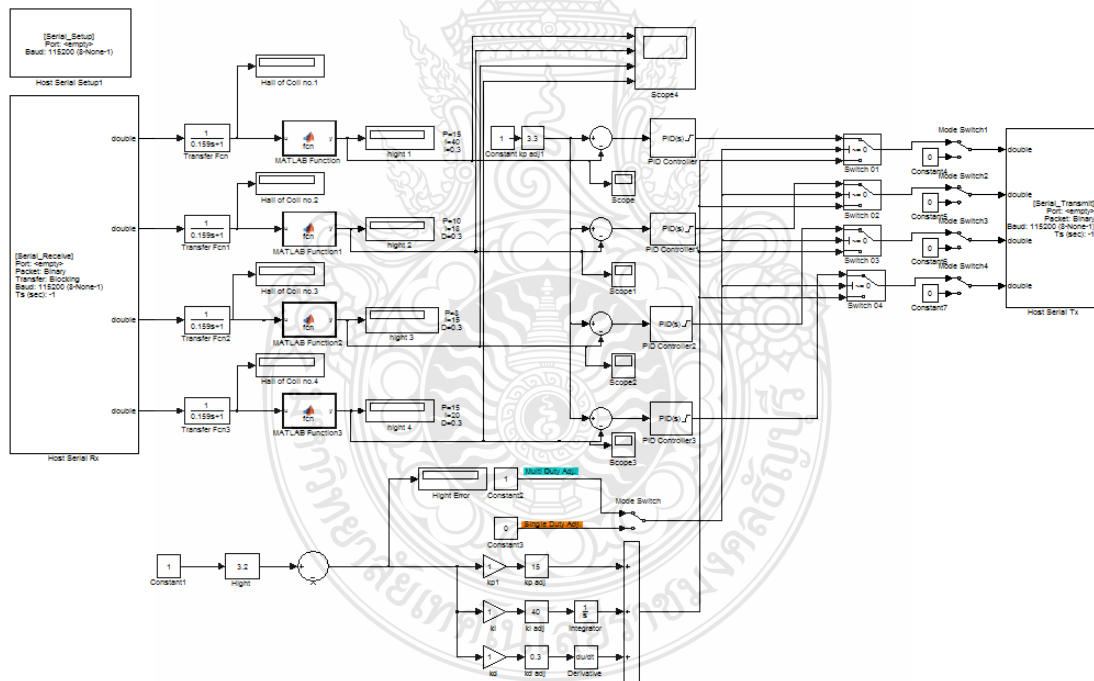
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของค่าสนามแม่เหล็ก



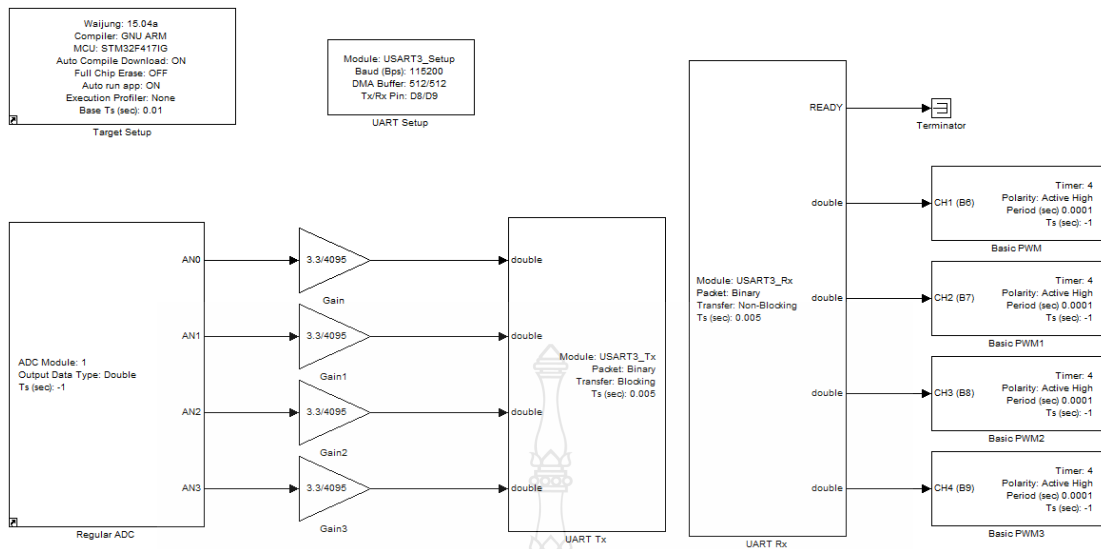
รูปที่ 4.8 รูปโครงการจริงที่สร้างขึ้น

เมื่อนำมาเขียน Model ด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink โดย A0, A1, A2 และ A3 รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก โดยปรับ PID ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ STM32F4 ซึ่งขา B6,B7,B8 และ B9 จะจ่ายสัญญาณพัลส์ต่อไปที่วงจร Butterworth ต่อไป ซึ่งค่า MATLAB Function จะเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าจากค่าเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้กับค่าความสูงของระยะการลอยตัวของแผ่นแนวระนาบ

เนื่องจากผู้วิจัยต้องการแสดงภาพการตอบสนองของสัญญาณแรงดันที่วัดได้จากค่าเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก และความสูงของแผ่นแนวระนาบของระบบ จึงได้สร้าง Model สำหรับรับส่งสัญญาณดังกล่าวขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ทั้งนี้ กราฟผลตอบสนองแรงดันของระบบแสดงในรูปที่ 4.13-4.29 โดยการใช้อุปกรณ์ Converter-N เชื่อมต่อเพื่อวัดสัญญาณทางด้านอินพุตและเอาต์พุตแสดงผลที่คอมพิวเตอร์ โดยแยกเป็น 2 ส่วนคือ Host และ Target

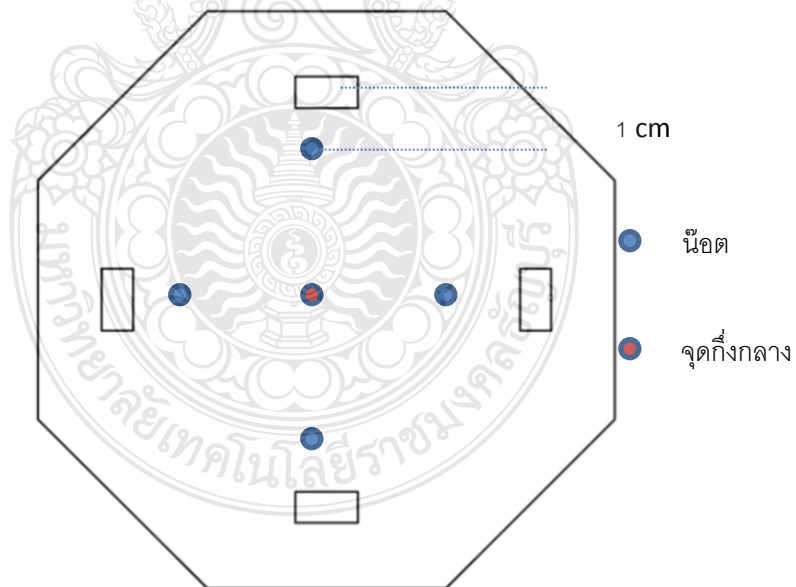


รูปที่ 4.9 Model ด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink ของ Host



รูปที่ 4.10 Model ด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink ของ Target

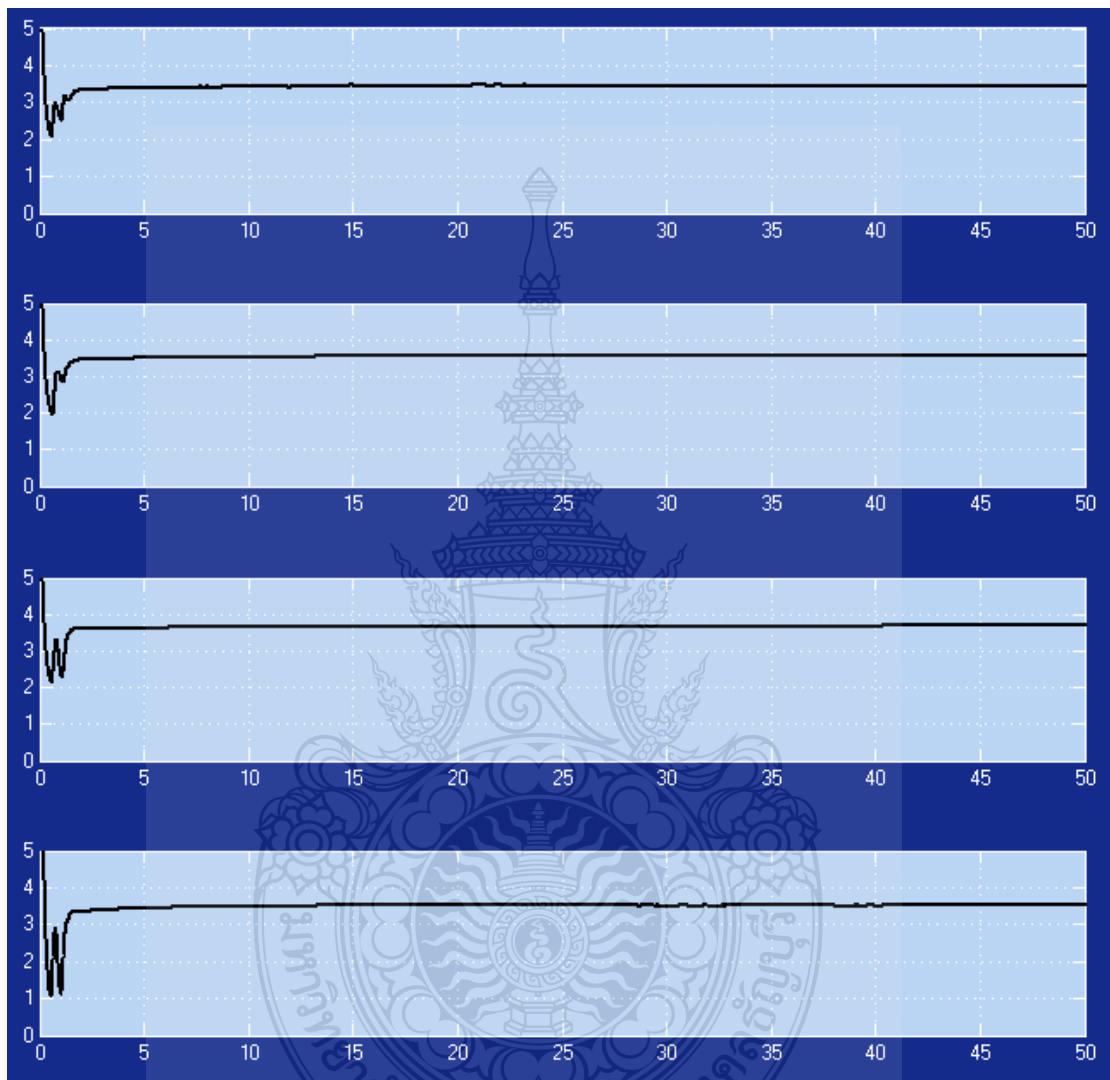
โดยแผ่นเนวระนาบมีน้ำหนักทั้งหมด 170 กรัม ในแผ่นเนวระนาบ มีน๊อตยาว 4 จุดเพื่อใช้รับน้ำหนัก ขนาด 18-36 กรัมเพื่อไม่ให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ในแผ่นเนวระนาบเนื่องปฏิกิริยาตอบสนองของพีไอดี



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งการวางน๊อตบนแผ่นเนวระนาบ

4.4 การทดสอบผลการตอบสนองในการเริ่มต้นทำงานขณะไม่มีวัตถุ

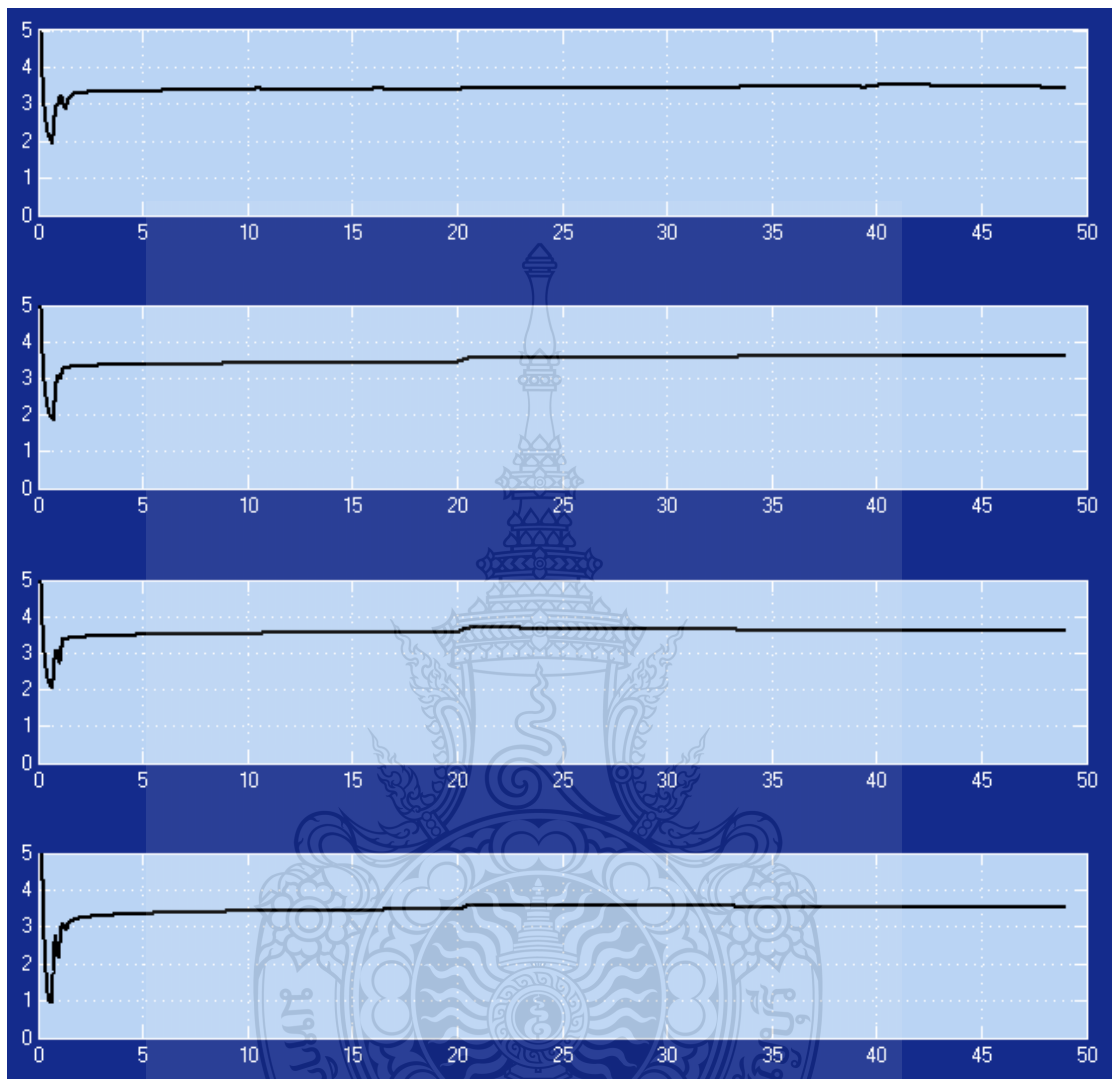
4.4.1 การทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.7 เซนติเมตร



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.7 เซนติเมตร

ความเร็วในการเข้าสู่สถานะเริ่มต้นจากความสูง 2.7 เซนติเมตร ถึงความสูง 3.7 เซนติเมตรใช้เวลา 2.115 วินาที

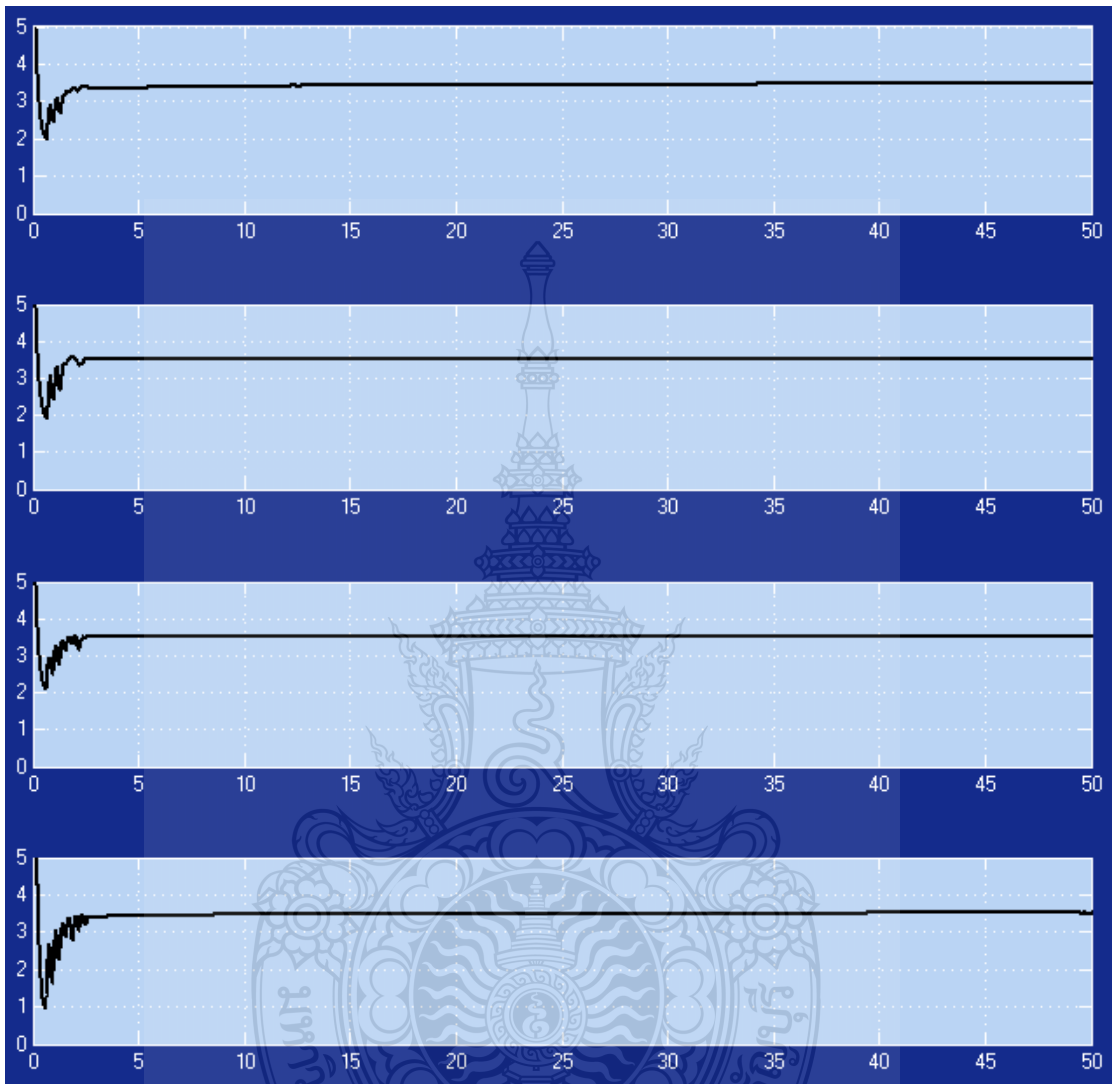
4.4.2 การทดสอบปฏิบัติการตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบปฏิบัติการตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.6 เซนติเมตร

ความเร็วในการเข้าสู่สถานะเริ่มต้นจากความสูง 2.7 เซนติเมตร ถึงความสูง 3.6 เซนติเมตรใช้เวลา 2.307 วินาที

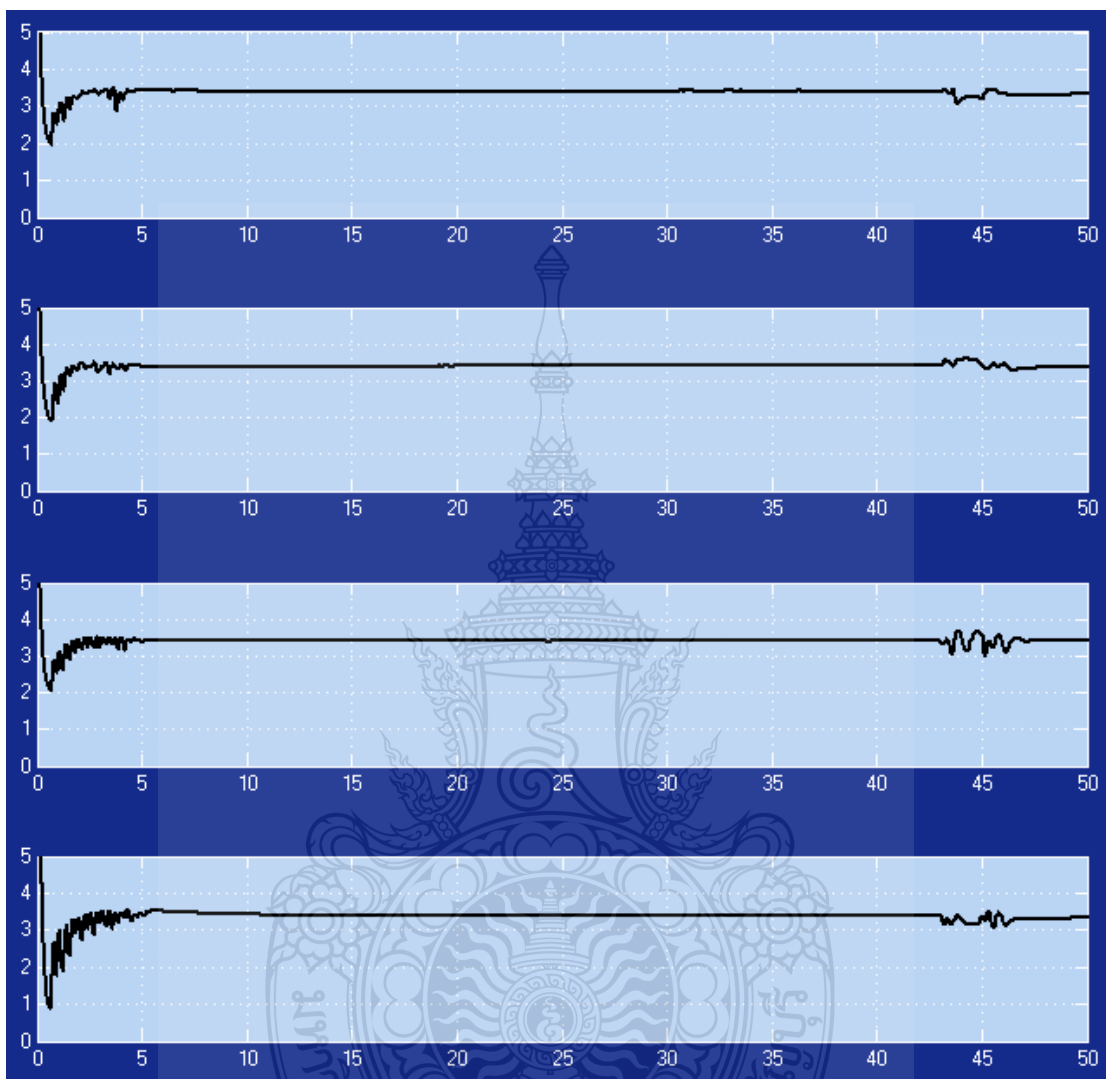
4.4.3 การทดสอบปฏิบัติการตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบปฏิบัติการตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.5 เซนติเมตร

ความเร็วในการเข้าสู่สถานะเริ่มต้นจากความสูง 2.7 เซนติเมตร ถึงความสูง 3.5 เซนติเมตร
ใช้เวลา 3.076 วินาที

4.4.4 การทดสอบปฏิบัติการตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.4 เซนติเมตร

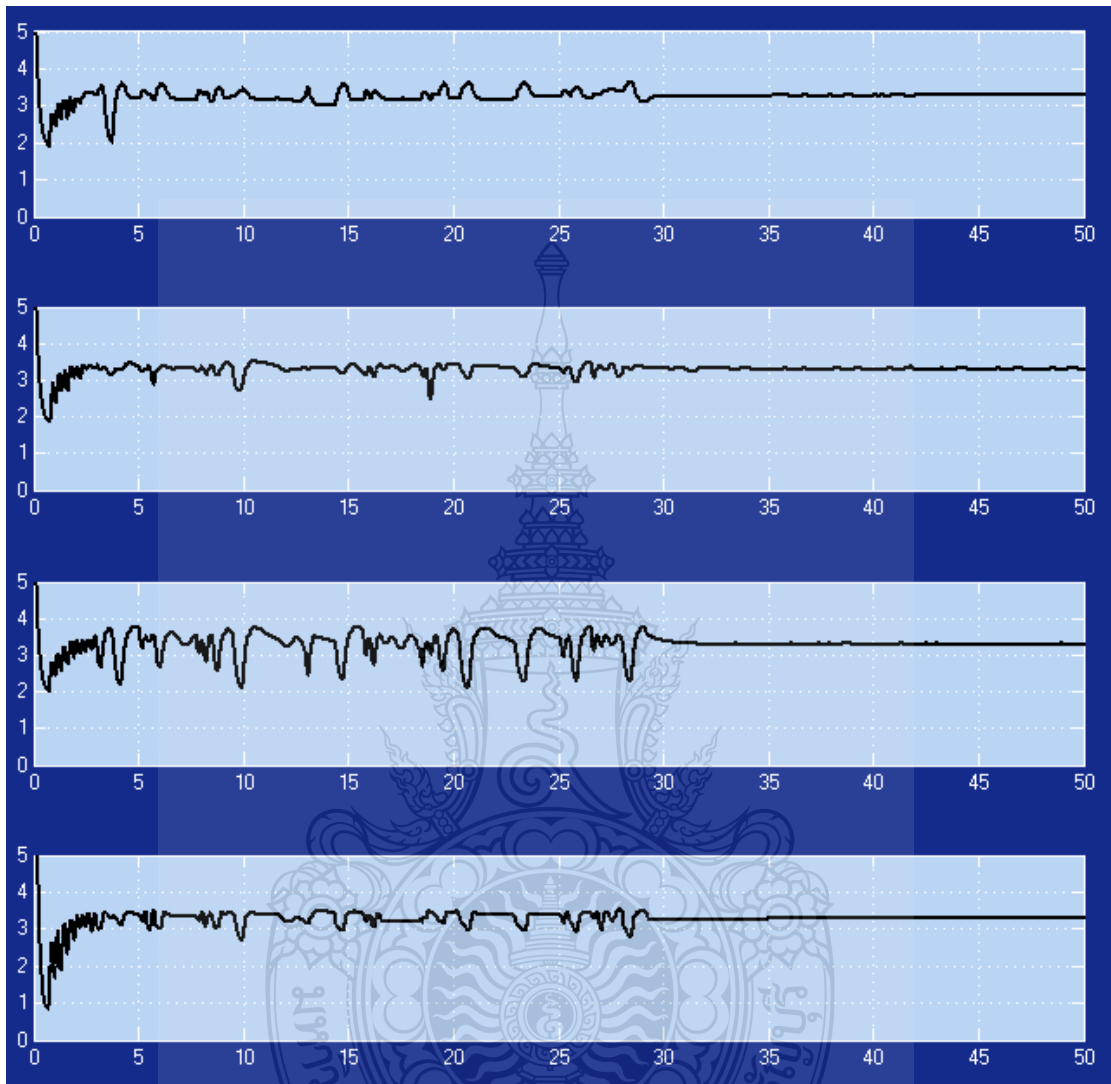


รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบปฏิบัติการตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.4 เซนติเมตร

ความเร็วในการเข้าสู่สถานะเริ่มต้นจากความสูง 2.7 เซนติเมตร ถึงความสูง 3.4 เซนติเมตร

ใช้เวลา 6.111 วินาที

4.4.5 การทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.3 เซนติเมตร



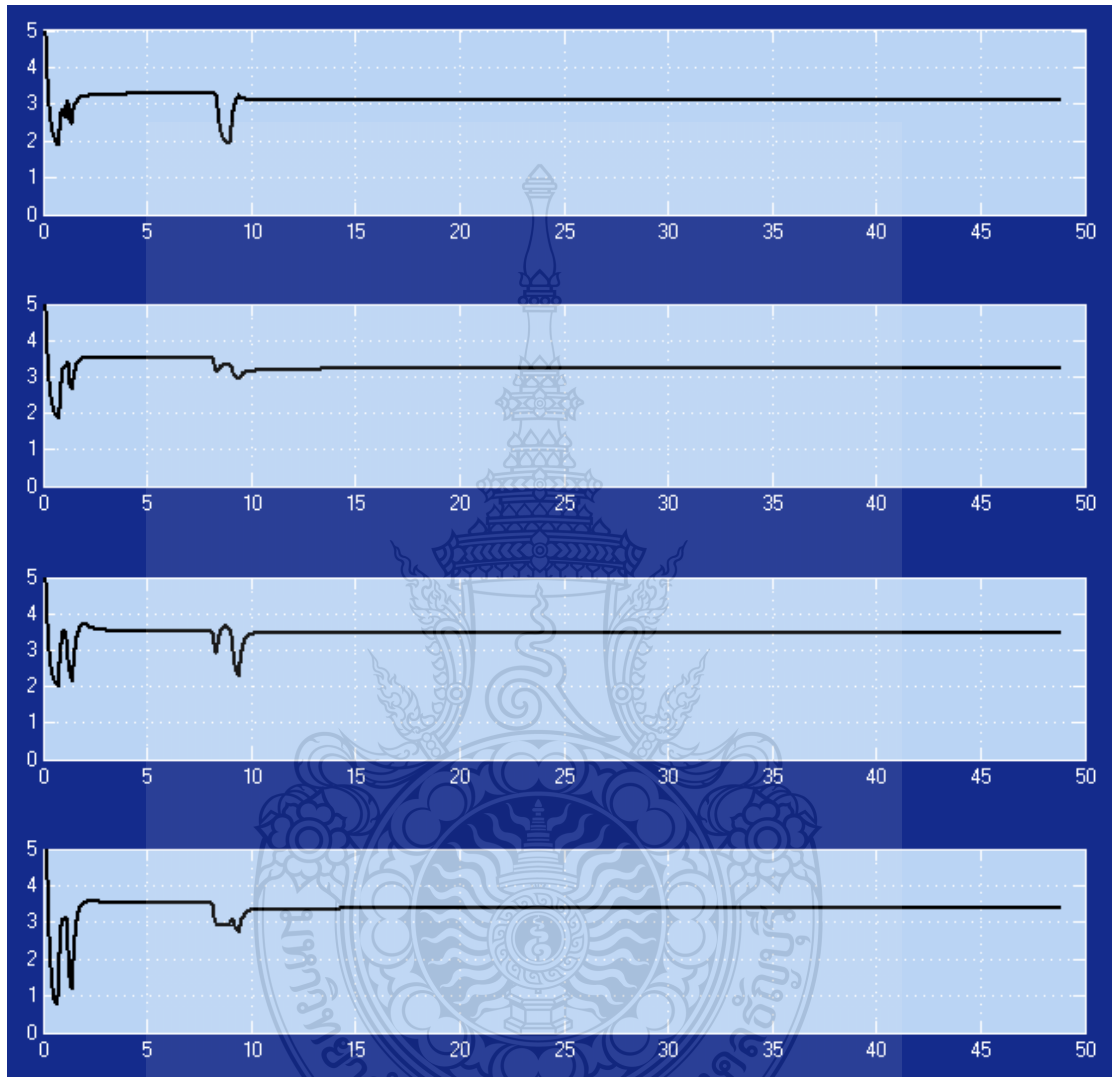
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อ Set ความสูงที่ 3.3 เซนติเมตร

ความเร็วในการเข้าสู่สถานะเริ่มต้นจากความสูง 2.7 เซนติเมตร ถึงความสูง 3.3 เซนติเมตรใช้เวลา 31.956 วินาที

ดังนั้นในโครงการนี้ใช้ค่าความสูง 3.5 เซนติเมตร ในการเริ่มต้นขณะทำงาน โดย ความสูง 3.5 เซนติเมตร ใช้เวลาในการเริ่มต้น 3.076 วินาที และ ความสูง 3.7 เซนติเมตร คือระยะสูงสุดในการลอยตัว ถ้าใช้ระยะ 3.7 เซนติเมตร เมื่อวางวัตถุจะไม่เห็นถึงความแตกต่างของค่า พีไอดี ที่เกิดขึ้น และถ้าใช้ค่าต่ำสุด แผ่นแนวระนาบจะลอยตัวหยุดนิ่งได้ช้า

4.5 การทดสอบแรงดันขณะวางน้ำหนักในแผ่นแนวระนาบที่จุดกึ่งกลาง

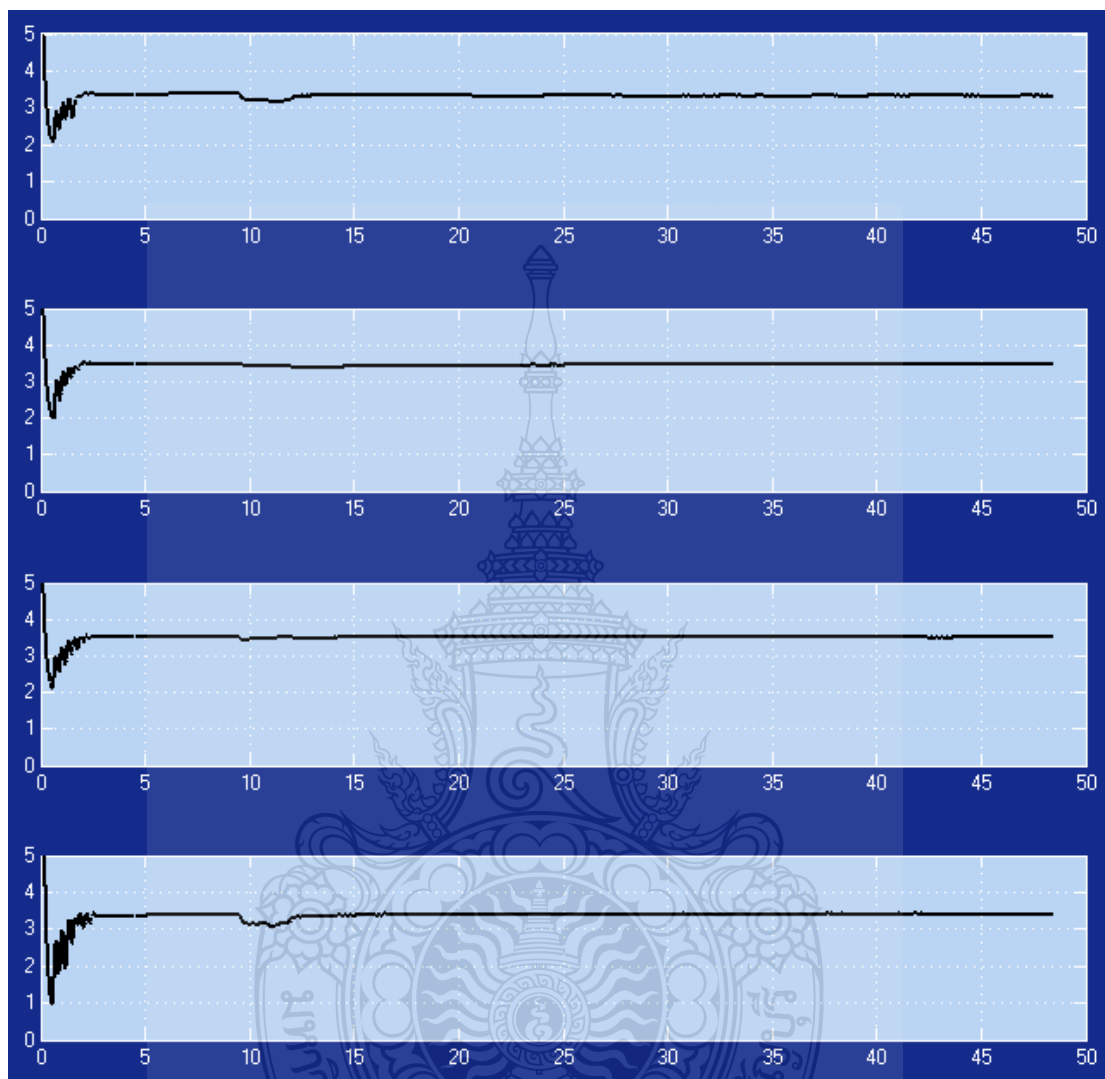
4.5.1 การทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองขณะมีน้ำหนัก 54 กรัม วางจุดกึ่งกลางแผ่นแนวระนาบ



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองขณะมีน้ำหนัก 54 กรัม วางจุดกึ่งกลาง

เมื่อวางวัตถุ 54 กรัม สังเกตจากผลการทดลอง พบว่าเมื่อวางน้ำหนักวินาทีที่ 7.368 วินาที พบว่า แม่เหล็กแกน ทั้งที่ 4 พยายามคืนสภาวะที่ 10.443 วินาที และแกนเหล็กจุดที่ 2,4 จะเข้าสู่ความสูง 3.5 เซนติเมตรช้ากว่า แกนเหล็กจุดที่ 1,2

4.5.2 การทดสอบปฏิกิริยาผลตอบสนองของขณะมีน้ำหนัก 36 กรัม วางจุดกึ่งกลางแผ่นแนวระนาบ



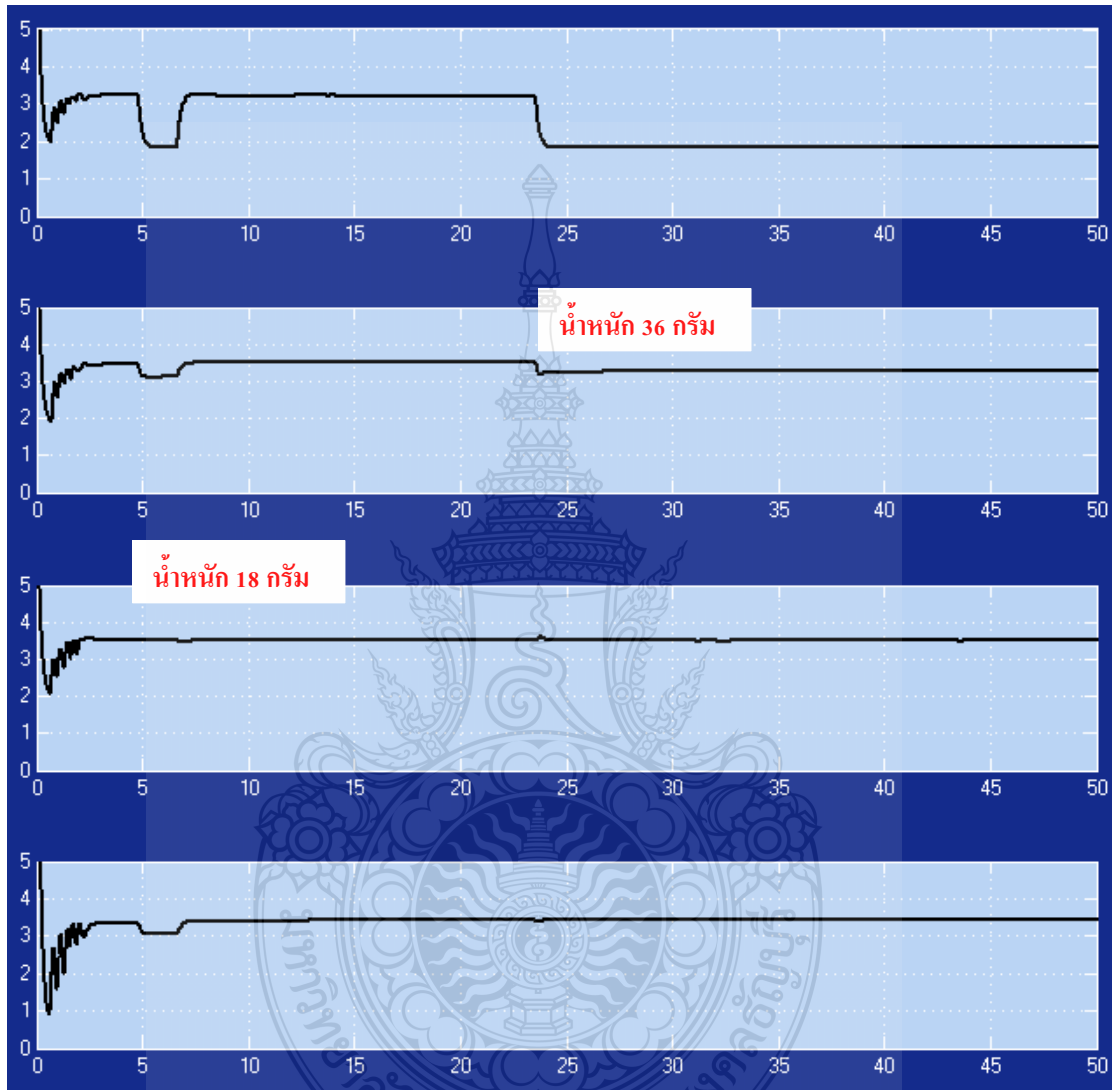
รูปที่ 4.18 การทดสอบปฏิกิริยาผลตอบสนองของขณะมีน้ำหนัก 36 กรัม วางจุดกึ่งกลาง

เมื่อวางวัตถุ 36 กรัม สังเกตจากผลการทดลอง พบว่าเมื่อวางน้ำหนักที่เวลา 9.615 วินาที พบว่า แม่เหล็กแกนทั้งหมดเข้าสู่สภาวะความสูง 3.5 เซนติเมตร ที่เวลา 13.076 วินาที

ดังนั้น โครงการนี้รับน้ำหนักได้ทั้งหมด 54 กรัม และสามารถทำงานได้ดีที่ 36 กรัม โดยสังเกตจากรูปกราฟที่ 4.19 และ 4.20 ถ้าน้ำหนักมากกว่า 54 กรัมขึ้นไป เมื่อวางวัตถุลงบนจุดกึ่งกลาง เมื่อตั้งความสูงไว้ที่ 3.5 เมื่อทำการควบคุมพีไอดี จะทำให้ไม่ได้ ระยะที่ตั้งไว้ 3.5 เซนติเมตร

4.6 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองพลักแต่ละจุด

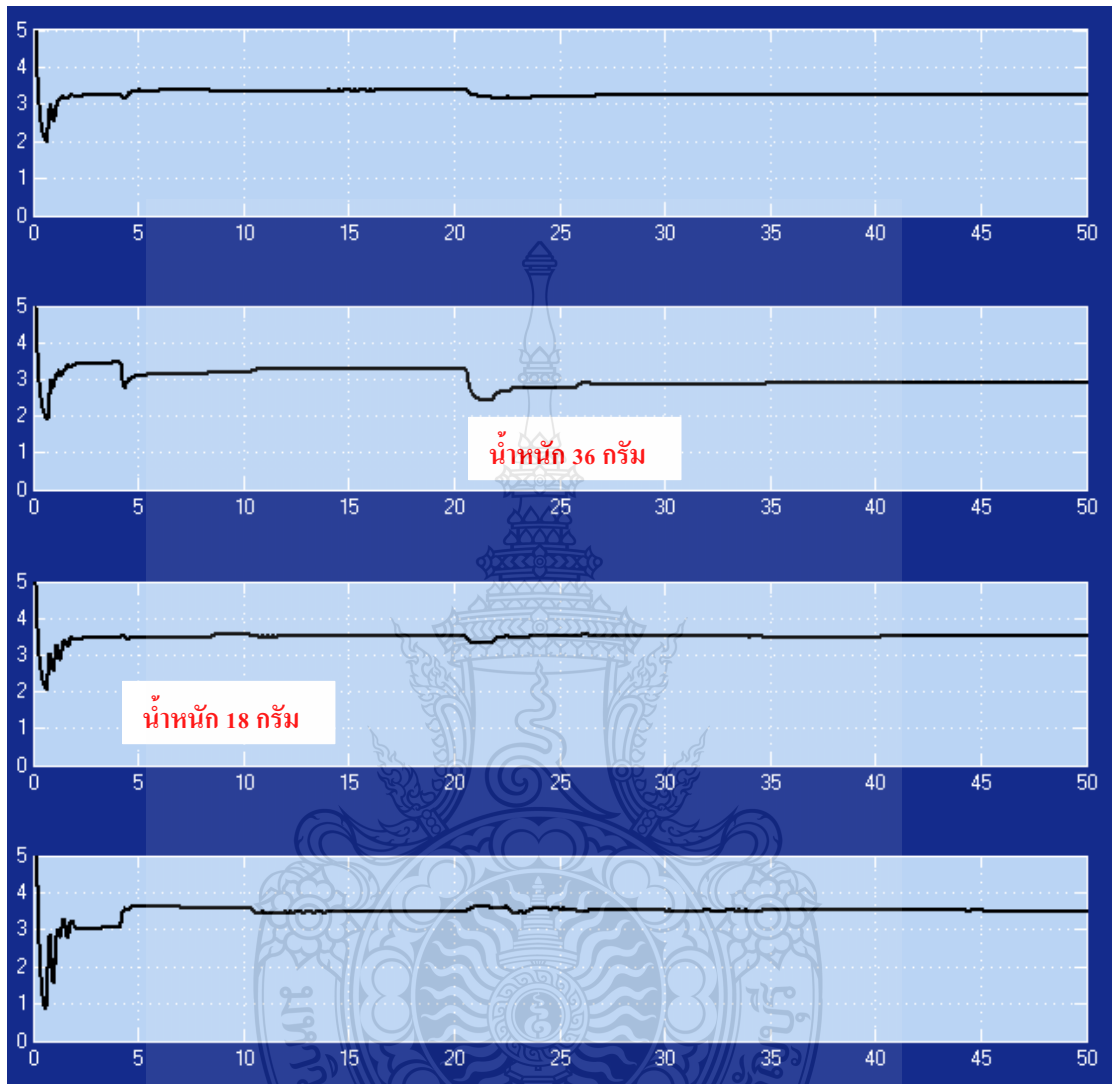
4.6.1 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 1



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 1

ในกรณีที่วางน้ำหนักลงบนแกนที่ 1 ขนาด 18 กรัม ในเวลา 4.629 วินาที ทำให้กราฟทั้ง 4 จุดมีผลเปลี่ยนแปลง และเข้าสู่สถานะเดิม ในเวลา 7.09 วินาที โดยแกนเหล็กที่ 1 มีความสูงลดลงและแกนเหล็กที่ 3 จะมีความสูงเท่าเดิม ในกราฟเดียวกัน วางน้ำหนักเพิ่มอีก 18 กรัมเข้าไปในแกนที่ 1 ทำให้แกนที่ 1 สูญเสียระบบ

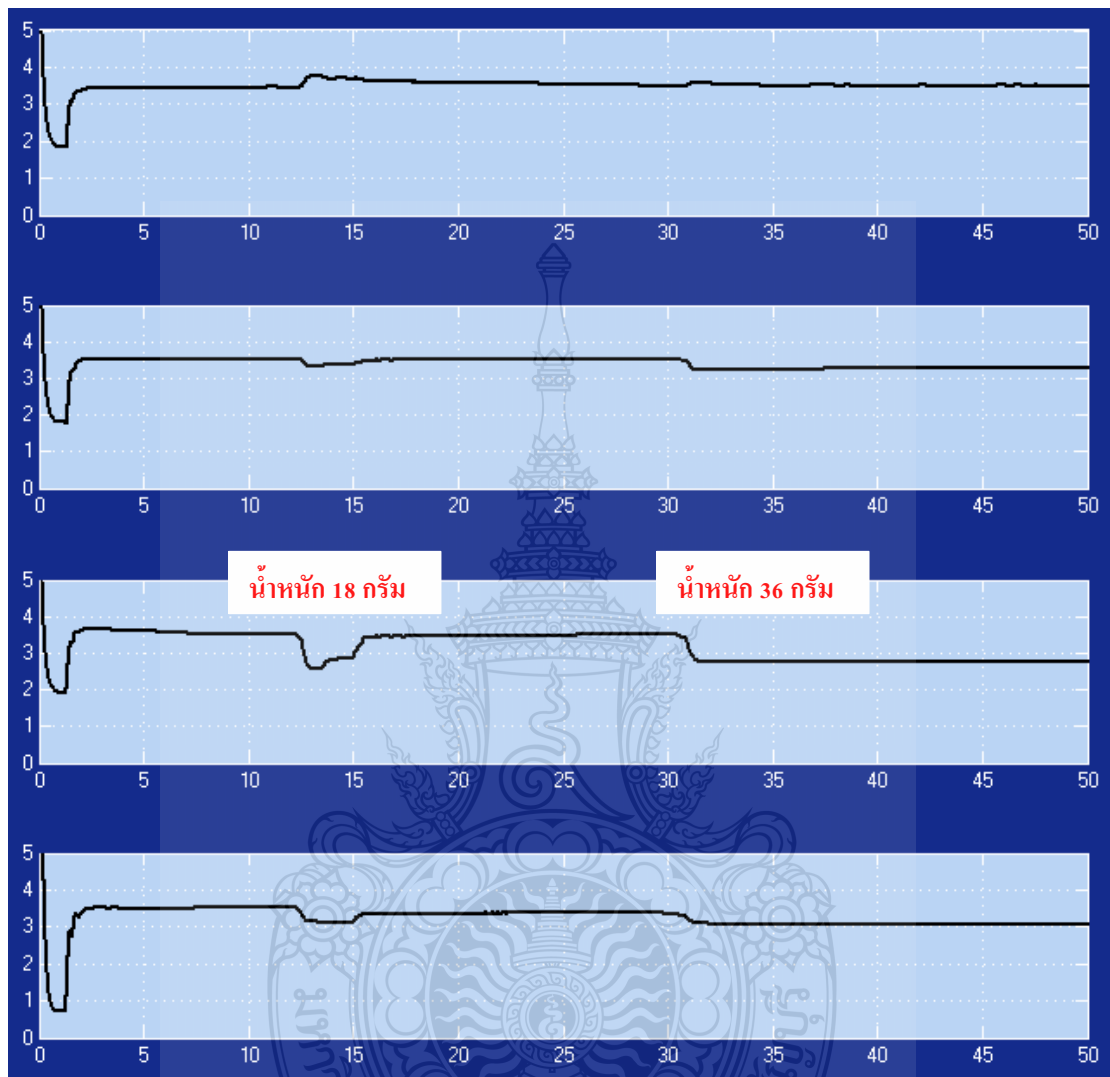
4.6.2 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 2



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 2

ในกรณีที่วางน้ำหนักลงบนแกนที่ 2 ขนาด 18 กรัม ในเวลา 4.32 วินาที ทำให้กราฟทั้ง 4 จุดมีผลเปลี่ยนแปลง และเข้าสู่สถานะเดิม ในเวลา 10.687 วินาที โดยแกนเหล็กที่ 2 มีความสูงลดลงและแกนเหล็กที่ 4 จะมีความสูงเพิ่มขึ้น ในกราฟเดียวกัน วางน้ำหนักเพิ่มอีก 18 กรัมเข้าไปในแกนเหล็กที่ 2 ที่เวลา 26.625 นาที ทำให้ความสูงแกนเหล็ก 2 ลดลงมากที่สุด และ แกนเหล็กที่ 4 เพิ่มขึ้น และเข้าสู่ความสูงที่ 3.5 ที่เวลา 22.75 วินาที แต่ระยะของแกนเหล็กที่ 2 จะมีความสูง 2.9 เซนติเมตร

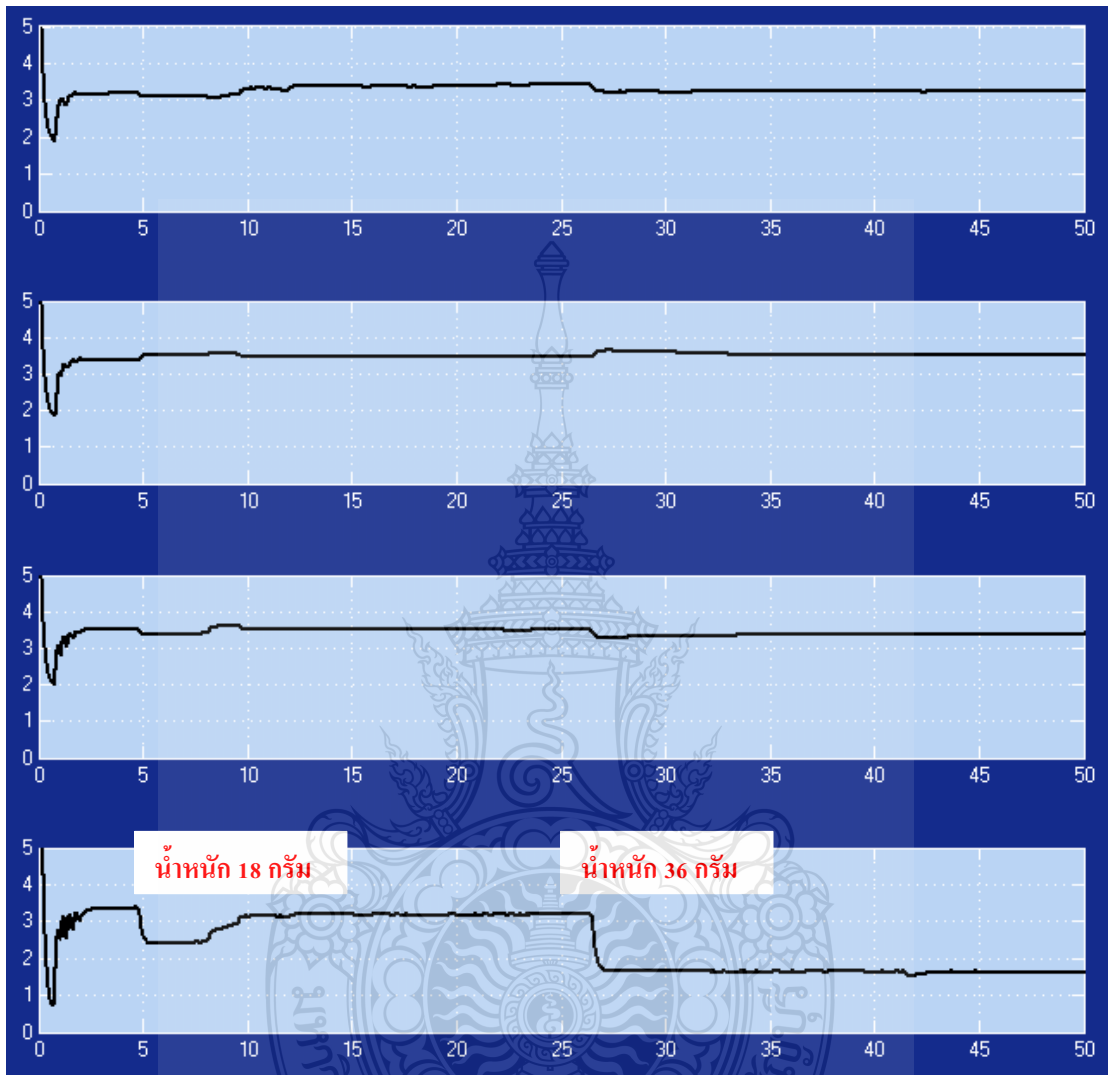
4.6.3 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 3



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 3

ในกรณีที่วางน้ำหนักลงบนแกนที่ 3 ขนาด 18 กรัม ในเวลา 12.341 วินาที ทำให้กราฟทั้ง 4 จุดมีผลเปลี่ยนแปลง และเข้าสู่สถานะเดิม ในเวลา 16.078 วินาที โดยแกนเหล็กที่ 3 มีความสูงลดลง และแกนเหล็กที่ 1 จะมีความสูงเพิ่มขึ้น ในกราฟเดียวกันวางน้ำหนักเพิ่มอีก 18 กรัมเข้าไปในแกนที่ 3 ทำให้แกนที่ 3 ลอยตัวสูง 2.9 เซนติเมตร และไม่สามารถเข้าสู่ความสูงระดับเดิมได้

4.6.4 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 4



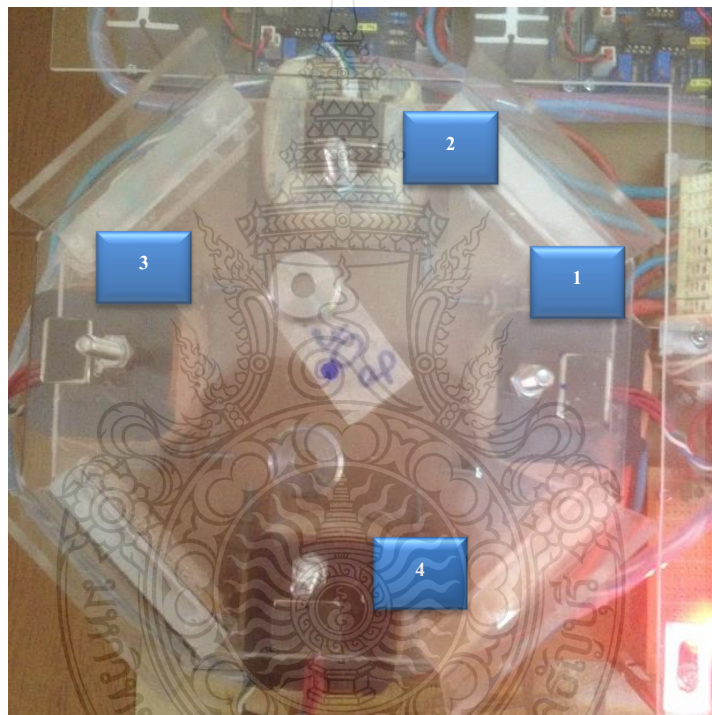
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองเมื่อมีน้ำหนัก 18-50 g ขณะวางบนแกนเหล็กที่ 4

ในกรณีที่วางน้ำหนักลงบนแกนที่ 4 ขนาด 18 กรัม ในเวลา 4.955 วินาที ทำให้กราฟทั้ง 4 จุดมีผลเปลี่ยนแปลง ในเวลา 9.964 วินาที โดยแกนเหล็กที่ 4 มีความสูงลดลงและแกนเหล็กที่ 2 จะมีความสูงเพิ่มขึ้น โดยพยายามจะเข้าสู่สถานะเดิม แต่ไม่สามารถเข้าสู่ภาวะเดิมได้เนื่องจากปัญหาทางด้านแม่เหล็กนี้โอไดเนียมมีความอ่อนกว่าแม่เหล็กอื่นทั้ง 3 จุด วางน้ำหนักเพิ่มอีก 18 กรัมเข้าไปในแกนเหล็กที่ 3 ที่เวลา 26.36 วินาที ทำให้ความสูงลดลงในแกนแม่เหล็กที่ 4 และสูญเสียการยกตัว

4.7 การทดสอบแรงดันขณะวางน้ำหนักในแผ่นระนาบ แบบทันทีทันใด

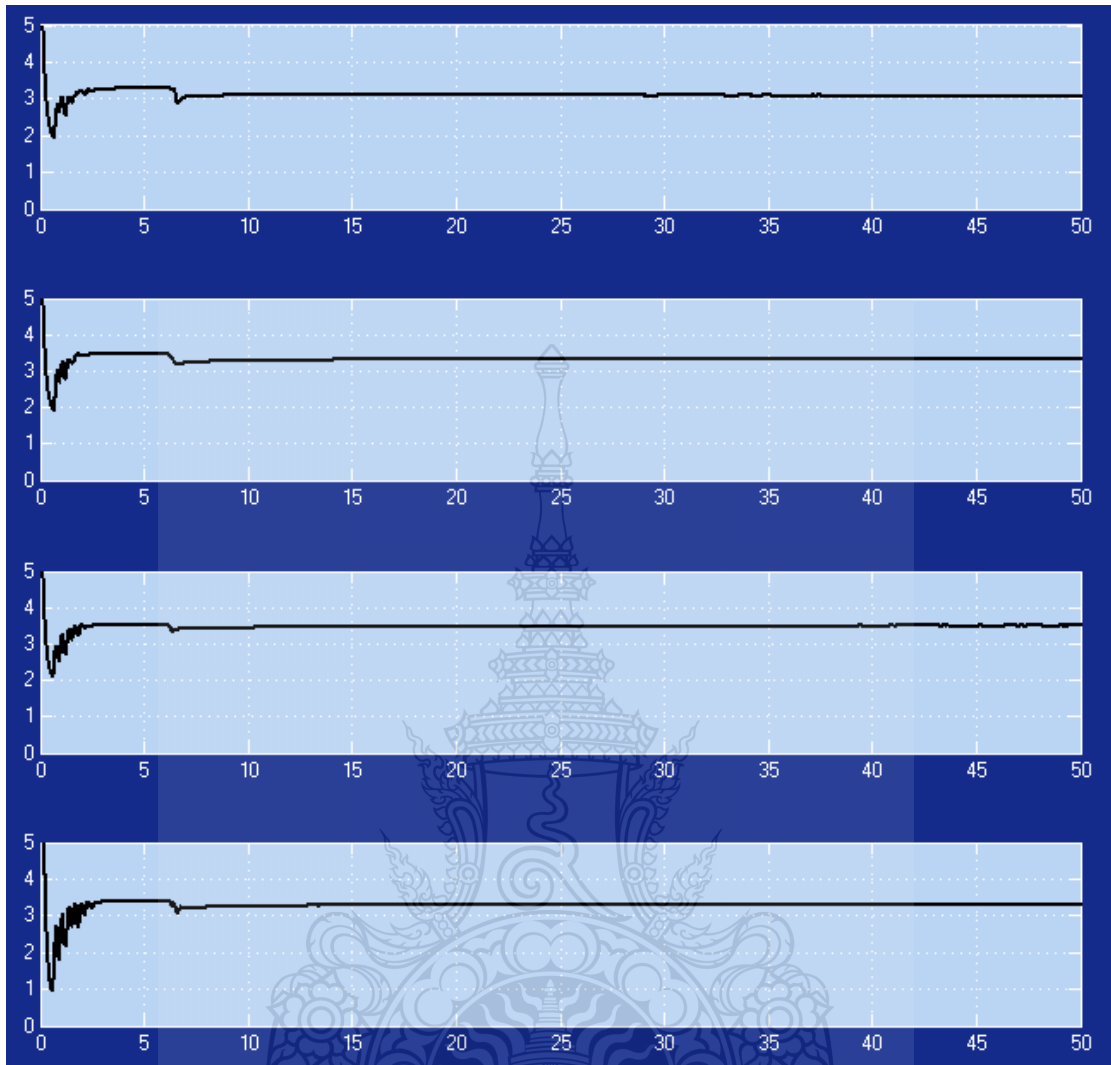
ในกรณีวางวัตถุทันทีทันใดบนแผ่นแนวระนาบ จะทำให้ ทั้ง 4 จุดมีผลกระทบต่อน้ำหนักที่วางไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อสร้างความสมดุลของแผ่นแนวระนาบ อาจจะมีการปรับหรือลดแรงดันให้เหมาะสมตามขอบเขตของชิ้นงานการทดลองนี้จะทำการทดสอบ 3 ครั้งแต่ละครั้งจะไม่ซ้ำจุดกันเพื่อหาระยะความสูงที่เกิดขึ้นและเวลาที่ใช้ในการสร้างความสมดุลของแผ่นแนวระนาบ โดยแสดงผลการทดสอบด้วยกราฟ

4.7.1 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองขณะวางแบบทันทีทันใด โดยน้ำหนัก 36 กรัม



รูปที่ 4.23 ตำแหน่งการวางของน้ำหนัก ขนาด 36 กรัม

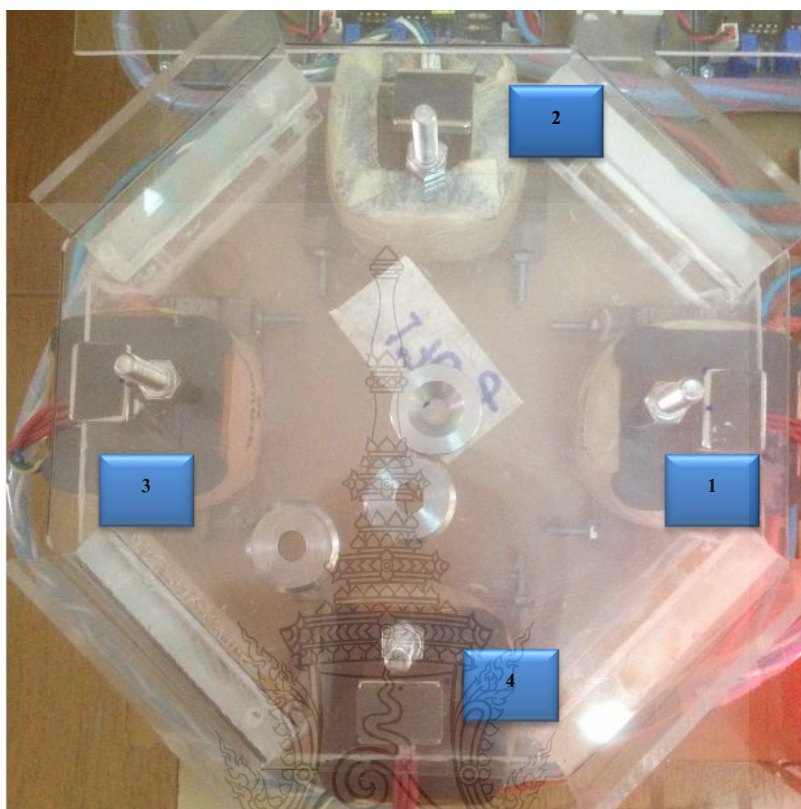
เมื่อบางน้ำหนัก 36 กรัมแบบ โดยวางแบบทันทีทันใดเพื่อสังเกตผลการตอบสนองของการยกทั้ง 4 จุด โดยการลุ่มวางดังรูปที่ 4.23 และแสดงผลตามรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองของแนวแบบทันทีทันใด โดยน้ำหนัก 36 กรัม

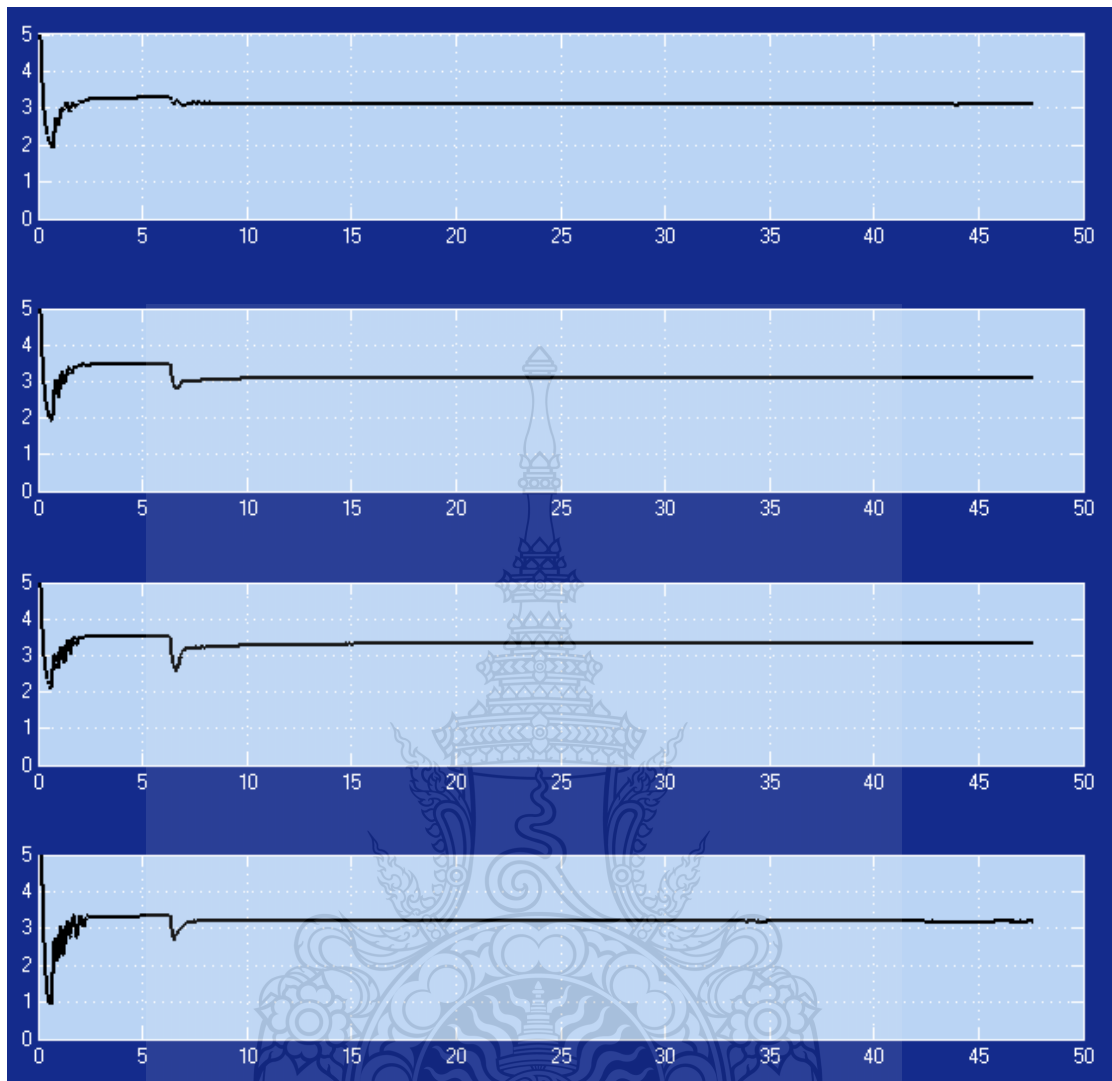
ขณะสู่มวางน้ำหนัก 36 กรัม แบบทันทีทันใด ซึ่งสู่มวางบริเวณที่วางน้ำหนักแบบทันทีทันใด ในเวลา 6.037 วินาที ความสูงของแกนแม่เหล็กแกนที่ 1 ลดลง ไม่สามารถเข้าสู่สถานะเดิม และทั้งหมดเข้าระยะลอยตัวนิ่งในเวลา 14.437 วินาที

4.7.2 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองขณะวางแบบทันทีทันใด โดยน้ำหนัก 54 กรัม



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งการวางของน้ำหนัก ขนาด 54 กรัม

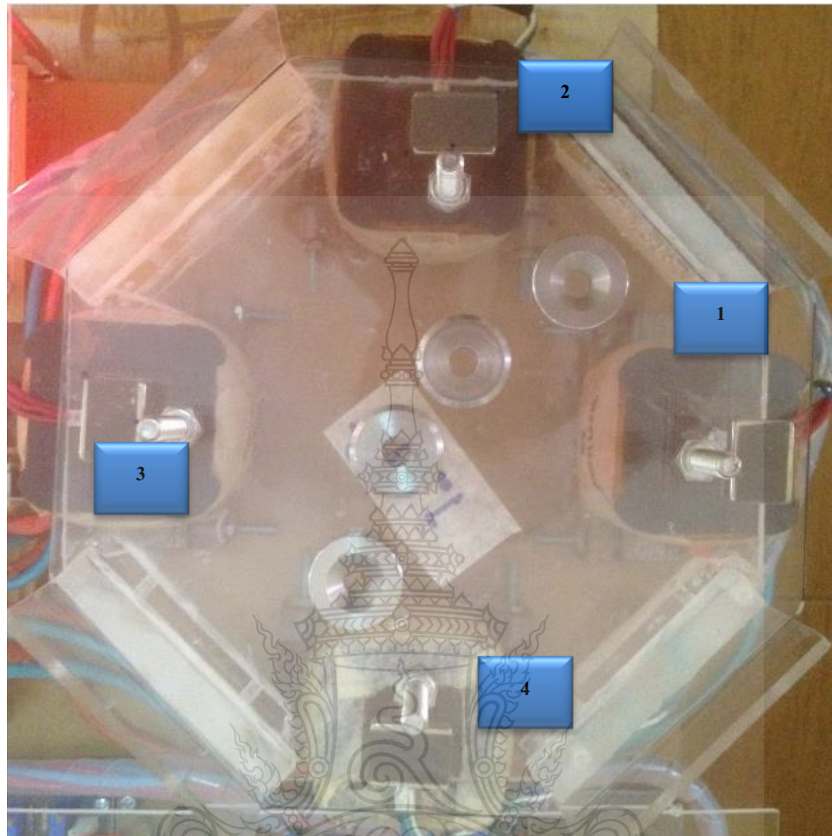
เมื่อวางน้ำหนัก 36 กรัมแบบ โดยวางแบบทันทีทันใดเพื่อสังเกตผลการตอบสนองของการยก
ทั้ง 4 จุด โดยการสู่วางดังรูปที่ 4.25 และแสดงผลตามรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองของวงแหวนแบบทันทีทันใด โดยน้ำหนัก 54 กรัม

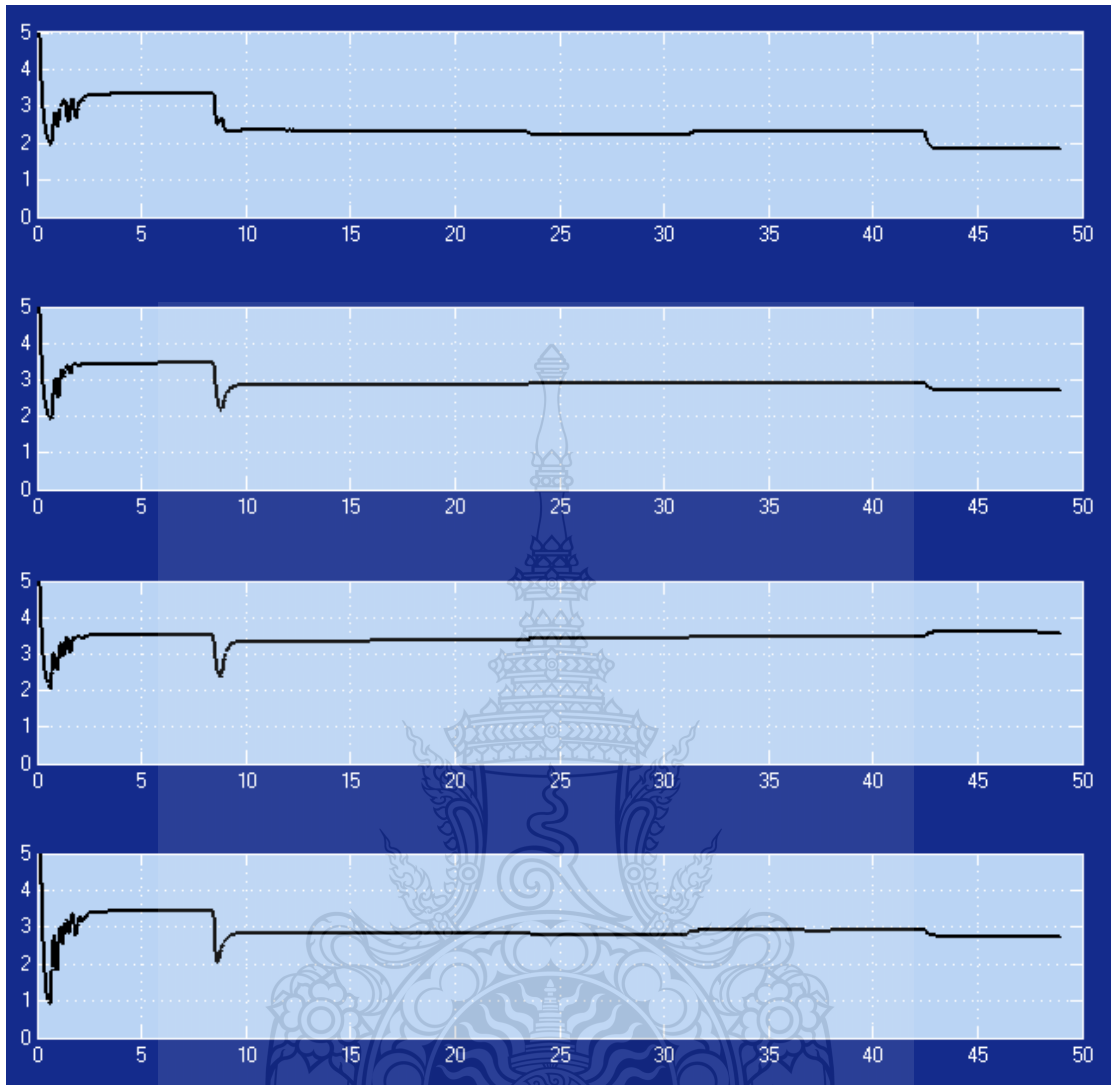
ขณะสู่มวางน้ำหนัก 54 กรัม แบบทันทีทันใด ซึ่งสู่มวางบริเวณที่วางน้ำหนักแบบทันทีทันใด ในเวลา 5.925 วินาที ความสูงของแกนแม่เหล็กแกนทั้งหมดลดลง ไม่สามารถเข้าสู่สถานะเดิม และทั้งหมดเข้าระยะลอยตัวนี้ในเวลา 15 วินาที โดยแกนแม่เหล็กที่ 3 จะนิ่งช้าที่สุด

4.7.3 การทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองขณะวางแบบทันทีทันใด โดยน้ำหนัก 72 กรัม



รูปที่ 4.27 ตำแหน่งการวางของน้ำหนัก ขนาด 72 กรัม

เมื่อวางน้ำหนัก 36 กรัมแบบ โดยวางแบบทันทีทันใดเพื่อสังเกตผลการตอบสนองของการยกทั้ง 4 จุด โดยการสูบลมดังรูปที่ 4.27 และแสดงผลตามรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบผลปฏิกิริยาตอบสนองของระบบแบบทันทีทันใด โดยน้ำหนัก 72 กรัม

ขณะสู่มวางน้ำหนัก 72 กรัม แบบทันทีทันใด ซึ่งสู่มวางบริเวณที่วางน้ำหนักแบบทันทีทันใด ในเวลา 8.461 วินาที ความสูงของแกนแม่เหล็กแกนทั้งหมดลดลง ไม่สามารถเข้าสู่สถานะเดิม และทั้งหมดเข้าระยะลอยตัวนิ่งในเวลา 9.615 วินาที แต่ระยะเวลา 42.5 วินาที ระบบก็จะเสียเนื่องจากแกนแม่เหล็กที่ 1 ยกไม่ขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ปัญหา และข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองที่กล่าวมาในบทที่ 4 และการออกแบบในบทที่ 3 ในบทนี้เป็นการสรุปผลการทดลองของการยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด โดยแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

1. สรุปผลการวิจัย
2. ปัญหา
3. ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สรุปผลทางการผันขดลวดสนามแม่เหล็ก

ในการออกแบบการทดลองของการยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด การผันขดลวดสนามแม่เหล็กตามการออกแบบจริงใช้ขดลวดเบอร์ 26 Sq.mm. แต่เนื่องจากผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้พันและทดสอบเกิดความร้อนมากดังนั้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงได้ออกแบบเป็นขดลวดเบอร์ 30 Sq.mm. ทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นและค่าความต้านทานลดลงจึงลดการเกิดความร้อนของขดลวดสนามแม่เหล็ก และเมื่อทดสอบโดยปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำให้แผ่นแนวระนาบลอยตัวอยู่ในช่วง 17-24 โวลต์ โดยลอยตัวสูง 3.7 เซนติเมตร

5.1.2 สรุปผลการทดสอบขดลวดสนามแม่เหล็กและเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก

การทดสอบการวิจัยเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าขดลวดแต่ละขดเพื่อให้แผ่นแนวระนาบลอยตัวเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากันแต่ระยะความสูงไม่เท่ากันเนื่องจากปัญหาทางวัสดุแกนเหล็ก ปัญหาจากการผันขดลวดสนามแม่เหล็ก และค่าเซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็กวัดค่าสนามแม่เหล็กไม่เท่ากันเมื่อทำการวัดมีการแกว่ง ทำให้มีปัญหาต่อการวัด

5.1.3 ทดสอบวงจรควบคุม

เมื่อประกอบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการควบคุมการลอยตัวของแผ่นแนวระนาบ ค่า Duty Cycle มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 7 เปอร์เซ็นต์จนถึง 60 เปอร์เซ็นต์ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ในช่วง 19.55-24 โวลต์ โดยลอยตัวสูง 3.7 เซนติเมตร

5.1.3 ทดสอบจูนค่า PID

การจูนค่า PID ตามทฤษฎีของ Ziegler Nichols ในการออกแบบ PID โดยชิ้นงานได้ติดตั้ง Conver-N ซึ่งเป็นฟังก์ชันเสริมเพื่อป้อนสัญญาณกลับมาที่คอมพิวเตอรฺ์ทำให้สามารถพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของ Scope ในโปรแกรม Matlab/Simulink ทำให้หาค่าช่วงเวลาที่เกิดการแกว่งของแผ่นแนวระนาบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น

5.1.5 ทดสอบการทำงานเริ่มต้น

การทดสอบการลอยตัวด้วยพีไอดีโดยเริ่มต้นการทำงาน ถ้าตั้งระยะ ที่ 3.7 เซนติเมตร ทำให้ชิ้นงานลอยตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วมาก ไม่เกิดการแกว่งของชิ้นงาน เมื่อตั้งระยะ 3.5 เซนติเมตร แผ่นแนวระนาบ จะลอยตัวช้ากว่า 3.7 เซนติเมตร เมื่อตั้งระยะความสูง 3.3 เซนติเมตร ทำให้แผ่นแนวระนาบเกิดการแกว่งและเข้าสู่สภาวะสมดุลช้ามาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งระยะความสูงไว้ที่ 3.5 เซนติเมตรเพื่อพิจารณาพฤติกรรมการตอบสนองของวิทยานิพนธ์

5.1.6 ทดสอบผลตอบสนองขณะมีวัตถุวางกลางแผ่นแนวระนาบ

เมื่อวางน้ำหนักกลางแผ่นแนวระนาบ ขณะ 36 กรัม สังเกตผลการทดสอบจาก Scope จะมีผลการตอบสนองที่เร็วกว่า เมื่อวางน้ำหนัก 54 กรัม เมื่อวางน้ำหนัก 72 กรัมกลางแผ่นแนวระนาบทำให้ระบบมีผลตอบสนองอยู่ช่วงหนึ่ง และระบบก็สูญเสียเสถียรภาพ

5.1.7 ทดสอบผลตอบสนองขณะมีวัตถุวาง 4 จุด โดยวางทีละจุด

การทดสอบการรับน้ำหนักของแต่ละจุด ทั้ง 4 จุดจะมีลักษณะตัวอย่างเช่น เมื่อวางน้ำหนักในจุดที่ 1 จุดที่หนึ่งจะรับน้ำหนักทำให้แผ่นแนวระนาบมีระยะลอยตัวลดลง จุดที่ 3 จะมีระยะลอยตัวมากขึ้นเมื่อทำการทดสอบ น้ำหนักไม่เกิน 36 กรัม จุดที่ 1 และ 4 รับน้ำหนักที่ 36 กรัมไม่ไหว ส่วนจุดที่ 2 และ 3 สามารถรับน้ำหนัก 36 กรัมได้ ถ้าเป็นน้ำหนัก 18 กรัม ทุกจุดสามารถรับน้ำหนักได้และมีผลตอบสนองที่ชัดเจน

5.1.8 ทดสอบผลตอบสนองขณะวางวัตถุบนแผ่นแนวระนาบบนแบบทันทีทันใด

เมื่อทำการสุ่มผลการทดลองโดยวางน้ำหนักทันทีทันใด ไม่เกิน 72 กรัมเมื่อวางน้ำหนักทันทีทันใดขนาด 36 กรัม แผ่นแนวระนาบมีปฏิกิริยาตอบสนองที่สมบูรณ์ที่สุด เมื่อวางน้ำหนัก 54 และ 72 กรัม แผ่นแนวระนาบมีปฏิกิริยาตอบสนองแต่แผ่นแนวระนาบเอียงและหยุดนิ่ง

5.2 ปัญหา

5.2.1 การออกแบบชุด Zero-Span แรงดันเข้าอุปกรณ์ Power Op-amp แรงดันไม่ถึงเนื่องจากค่าแถบสีก่าความผิดพลาดทำให้ ช่วงระยะในการควบคุมเล็กมาก

5.2.2 ปัญหาจากตัว Optocoupler มีผลต่อค่า Duty Cycle เริ่มต้นทำงานที่ 4 เปอร์เซ็นต์ ถึงค่า 60 เปอร์เซ็นต์

5.2.3 แผ่นแนวระนาบหนักเกินไป โดยมีน้ำหนักถึง 170 กรัม โดยออกแบบทั้งหมด 200 กรัม

5.2.4 เซนเซอร์วัดค่าสนามแม่เหล็ก วัดค่าแรงดันแกว่งไม่นิ่งทำให้วัดค่าได้ยาก

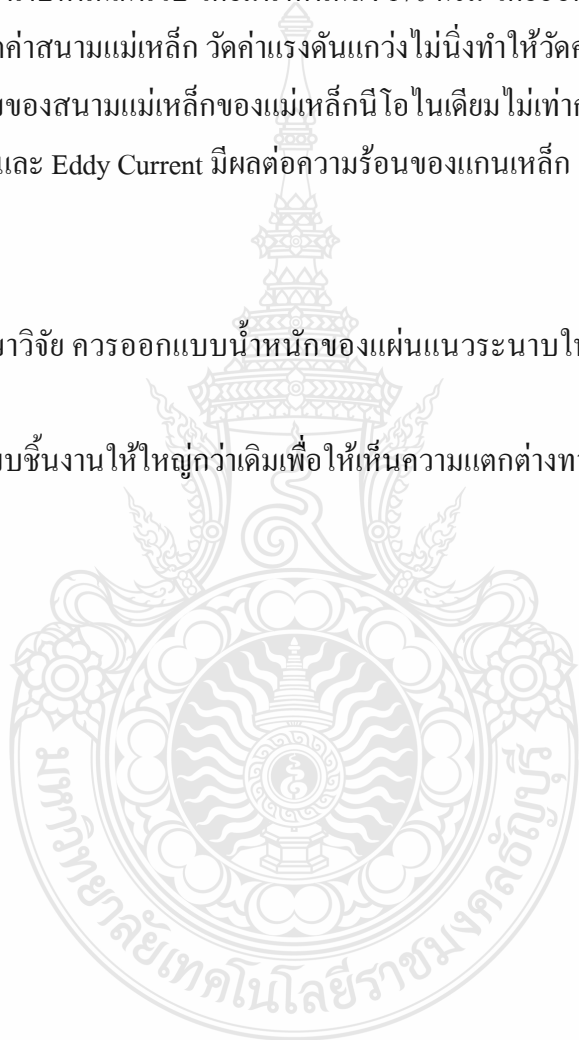
5.2.5 ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กนีโอในเดิมไม่เท่ากัน

5.2.6 Hysteresis และ Eddy Current มีผลต่อความร้อนของแกนเหล็ก

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการศึกษาวิจัย ควรออกแบบน้ำหนักของแผ่นแนวระนาบให้เบาลง หรือใช้วัสดุอื่นที่มีน้ำหนักเบา

5.3.2 ควรออกแบบชิ้นงานให้ใหญ่กว่าเดิมเพื่อให้เห็นความแตกต่างทางด้านน้ำหนัก



บรรณานุกรม

- [1] Faa-Jang and Syuan-Yi Chen , “Intelligent Integral Backstepping Sliding Mode Control Using Recurrent Neural Network for Magnetic Levitation System (IIBSMC)”, IEEE, 2010
- [2] Mrunal Deshpande and Mathur Badrilal, “Real Time Implementation of a Sliding Mode Regulator for Current-Controlled Magnetic Levitation System”, IEEE, June 2005
- [3] Charles Fallaha ,Hadi Kanaan and Maarorf Sadd, “Sensorless Control of Magnetic Levitation System Using Sliding Mode Control”, ICCAIE 2010, Department of EEE, December 2010
- [4] Faa-Jang and Syuan-Yi Chen, “Robust Dynamic Sliding Mode Control Using Adaptive RENN for Magnetic Levitation System (RDSCMC)”, IEEE , June 2009
- [5] P.Suster and A.jadlovska, “Modeling and Control Design of Levitation System” Technical University of Kosice/Department of Cybernetics and Artificial Intelligence, Kosice, Slovakia
- [6] สัจญญา แวนนิล,การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,2550
- [7] วิชา อุปภัย และพิพัฒน์ ปราโมทย์,ระบบควบคุมตำแหน่งของแผ่นระนาบตามแนวระนาบ, มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม,The 8th KU- KP Conference,2554
- [8] ดุสิต สุรย์ราช หม้อแปลงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัทศูนย์ส่งเสริมวิชาการ, 2546.
- [9] ดร.จักรพงษ์ จารุมิษฐ์ การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 1.นนทบุรี: บริษัทเอสพีเอสพรีนติ้ง จำกัด, 2554
- [10] ขวลิต ทองศรี. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.magnetdd.com> (วันที่ค้นข้อมูล : 16 กันยายน 2553).
- [11] สุมาลี อุณหวนิชย์. ระบบควบคุม (Control Systems). กรุงเทพมหานคร : บริษัท ว.เพ็ชร รสกุล จำกัด, 2545

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [12] วิบูรณ์ แสงวิระพันธ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [13] รังสรรค์ ศรีสาคร.สาขาวิชาฟิสิกส์.สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
<https://web.ku.ac.th>



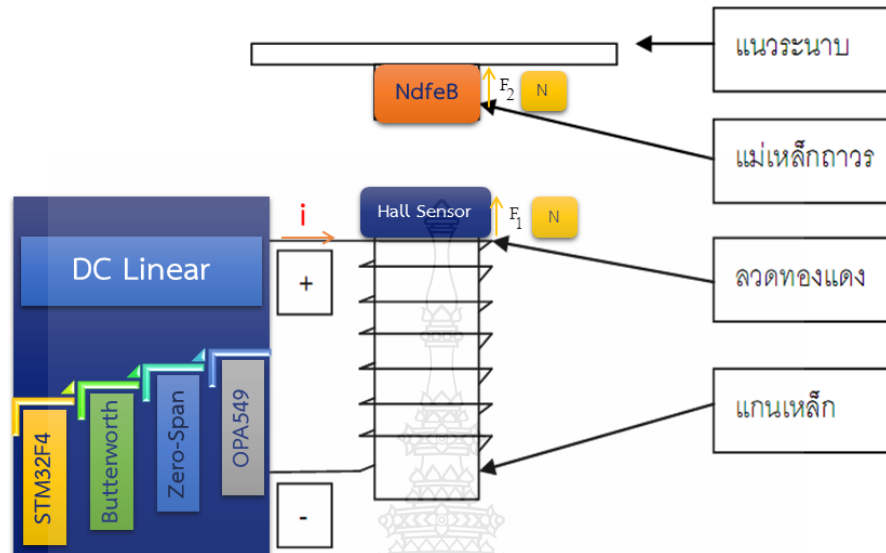
ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
แรงที่เกิดขึ้นของสมการคณิตศาสตร์



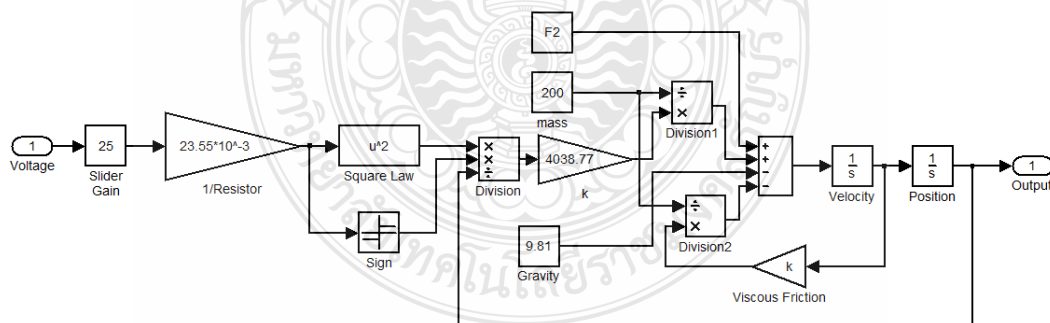
แรงที่เกิดขึ้นของชุดยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็ก



สมการคณิตศาสตร์จากสมการที่ 2.8

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{kv^2}{mR^2} + \frac{F_2}{m} - 9.81 - \frac{c}{m} \frac{dx}{dt}$$

ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink อินพุตคือแรงดันที่จ่ายให้ขดลวด และเอาท์พุตคือระยะการลอยตัว



กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในชุดยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กเพื่อหาค่าแรงดังต่อไปนี้

1. แรงที่เกิดขึ้นของขดลวดสนามแม่เหล็ก
2. แรงที่เกิดขึ้นของแม่เหล็กนีโอในเดียว
3. ค่า viscous error

4. ระยะเวลาสูง

ค่าพารามิเตอร์ของสมการคณิตศาสตร์

ตัวแปร/พารามิเตอร์	ค่าคงที่	หน่วย
1. แรงดัน(v)	0-25	Voltage
2. ค่าความต้านทาน(R)	42.468	Ohm
3. ค่าแรงโน้มถ่วงโลก(g)	9.81	m/s ²
4. น้ำหนัก(m)	0-200	g
5. ค่าคงที่แกนเหล็ก(k)	4038.77	(wb-T)/(m-A)
6. ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดสนามแม่เหล็ก	0.94	T
7. ค่าความซึมซาบสัมพัทธ์	4500	
8. ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กนิกเกิลในเดียม (ศิโรจน์ ศิริลักษณ์,Engng.J.CMU.[2013] 20(2))	1.1	T
9. ความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กนิกเกิลในเดียม (ศิโรจน์ ศิริลักษณ์,Engng.J.CMU.[2013] 20(2))	750	A-T/m

1.แรงที่เกิดขึ้นของขดลวดสนามแม่เหล็ก

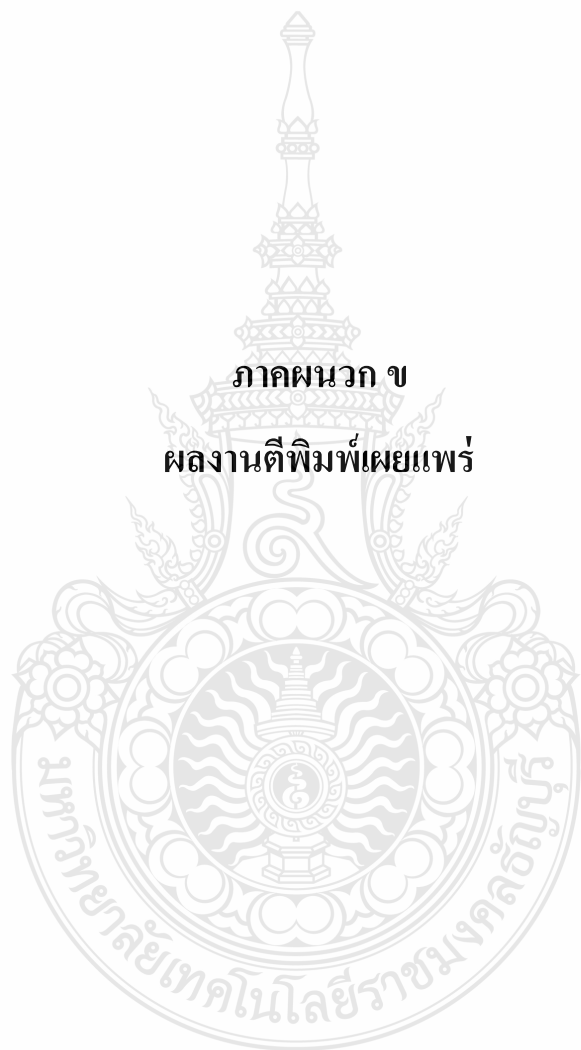
$$F_1 = \frac{B^2 A}{2\mu} = \frac{0.94^2 (2.54 \times 10^{-2})^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 4500} = 0.0504 \text{ N-m}$$

2. แรงที่เกิดขึ้นของขดลวดนิกเกิลในเดียม

$$F_2 = \frac{B^2 A}{2\mu} = \frac{BHA}{2} = \frac{1.1 \times 750 \times (1 \times 10^{-2})^2}{2} = 0.0525 \text{ N-m}$$

3. ค่า viscross error เป็นค่าที่ได้จากการประมาณค่าเพื่อให้ระบบเป็น convergent ถ้าไม่มีค่า viscross error ระบบจะเป็น divergent ดังนั้นทางผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ได้กำหนดค่าเมื่อแรงดัน(Input) และความสูง(Output) โดยการเปรียบเทียบตามตารางที่ 3.3 ดังนั้นได้ค่า c ที่ได้จาก ค่า viscross error เท่ากับ 0.05

4. ค่าความสูงได้จาก โปรแกรม Matlab/Simulink ซึ่งต้องทำใน Mathematical Model เท่านั้น โดยความเร็วต้นมีค่าเท่ากับ dx/dt และ อัตราเร่ง d²x/dt² (x คือระยะเวลาสูงของชิ้นงาน)



ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ข.1 การยกตัวเนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด ด้วยวิธีอินเตอร์แอคทีฟ อินพุต-เอาต์พุต



วันพฤหัสบดีที่ 19 พฤศจิกายน 2558

เวลา	พิธีเปิดการประชุมวิชาการ							
09:00 - 09:20	พิธีเปิดการประชุมวิชาการ							
09:20 - 10:40	เสวนา "วิศวกรรมระบบรางไฟฟ้ากับการพัฒนาเศรษฐกิจไทย"							
10:40 - 10:55	รับประทานอาหารว่าง							
10:55 - 12:15	AEC Synergy							
12:15 - 13:00	รับประทานอาหารกลางวัน							
	ห้อง 1	ห้อง 2	ห้อง 3	ห้อง 4	ห้อง 5	ห้อง 6	ห้อง 7	ห้อง 8
13:00 - 13:20	PW 11	PW 38	PE 11	GN 04	CTI 01	EL 01	CMI 01	GN 32
13:20 - 13:40	PW 12	PW 39	PE 12	GN 05	CT 01	EL 12	CM 11	GN 33
13:40 - 14:00	PW 13	PW 40	PE 13	GN 06	CT 02	EL 13	CM 12	GN 34
14:00 - 14:20	PW 14	PW 41	PE 14	GN 07	CT 03	DS 01	CM 13	GN 35
14:20 - 14:40	PW 15	PW 42	PE 15	GN 08	CT 04	DS 02	CM 14	GN 36
14:40 - 14:50	รับประทานอาหารว่าง							
14:50 - 15:10	PW 16	PW 43	PE 16	GN 09	CT 05	DSI 01	CM 15	ประชุม คณะกรรมการ จัดการประชุม EECON-38 ครั้งที่ 5/2558
15:10 - 15:30	PW 17	PW 44	PE 17	GN 10	CT 06	DS 03	CM 16	
15:30 - 15:50	PW 18	PW 45	PE 18	GN 11	CT 07	DS 04	CM 17	
15:50 - 16:10	PW 19	PW 46	PE 19	GN 12	CT 08	DS 05	CM 18	
16:10 - 16:30	PW 20	PW 47	PE 20	GN 13	CT 09	DS 06	CM 19	
18:00 - 24:00	งานเลี้ยงรับรอง (Banquet)							



- PE20 ศึกษาการควบคุมระบบจ่ายไฟแบบไฮบริดของเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่และซูเปอร์คาปาซิเตอร์

Session GN

52

- GN04 การติดตามกำลังสูงสุดสำหรับระบบแปลงผันพลังงานลมขนาดเล็กแบบอิสระ
- GN05 Parameter Estimation of Stochastic Volatility Models using Particle Method and EM Algorithm
- GN06 เครื่องจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสตรงสำหรับการสร้างพลาสมา
- GN07 เรือสำรวจควบคุมด้วยสมาร์ตโฟนเพื่อหาดำเนินงไฟรั่ว
- GN08 การพัฒนากระบวนการหลอมพลาสติกกรีโนเกิดด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน
- GN09 Study on Promoting the Development of Net-zero Energy Buildings in Thailand
- GN10 การควบคุมวงจรมอเตอร์ PWM เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับรีเลย์ด้วย TMS320F28335
- GN11 รถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สำหรับกวนแข่งขัน Shell Eco-marathon 2014-15
- GN12 Design and Analysis of Gigahertz Transverse Electromagnetic Cell for Electromagnetic Compatibility Test in National Institute of Metrology (Thailand)
- GN13 การพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยวิธีการเซนเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

Session CT

56

- CTI01 การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองตัวแปรสถานะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยการค้นหาแบบนกอพยพ
- CT01 การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยการค้นหาแบบคาบเชิงปรับตัว
- CT02 การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีคาบเชิงปรับตัวหลายฟังก์ชันวิฤตประสงค์
- CT03 การกำจัดการรบกวนและปรับปรุงที่ตัวประกอบกำลังแบบปรับตัวสำหรับวงจรรอกกำลังแยกที่ไฟด้วยโครงข่ายประสาท
- CT04 Inter-digital Capacitive Sensor Based Concentration Measurement of Sodium Hydroxide Solution
- CT05 การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสสำหรับปั๊มรุ่น ACH-375S
- CT06 แบบจำลองคณิตศาสตร์และการควบคุมแรงของกระบอสูบไฮดรอลิกด้วยตัวควบคุมฟัซซี่
- CT07 การยกตัวแปรขนาดด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด ด้วยวิธีอินเตอร์แอคทีฟ อินพุต-เอาต์พุต
- CT08 การพัฒนาตามแบบจำลองของชุดขับเคลื่อนสำหรับเครื่องช่วยฝึกเดิน

การยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด ด้วยวิธีอินเตอร์แอคทีฟ อินพุต-เอาท์พุต

Four Point Magnetic Levitation for Stabilization Plate By Interactive Input-Output Model

ชวสิศ ทองศรี¹ และ วันชัย ทรัพย์สิงห์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 0-2549-3400 E-mail : w_subringha@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ ระบบควบคุมการยกตัวด้วยสนามแม่เหล็กให้ระบบเกิดการสมดุลของแรงยกตัวโดยทำการออกแบบระบบควบคุมการลอยตัวเพื่อปรับระดับแผ่นระนาบให้สมดุลจำนวน 4 จุด โดยใช้ตัวควบคุมชนิด พีไอดีควบคุมการลอยตัวของแต่ละแกน จากนั้นจะใช้วิธีดิสคิปลิ่งคอนโทรลเพื่อเชื่อมต่อให้แผ่นแนวระนาบลอยตัวเท่ากัน ซึ่งแต่ละแกนจะสร้างขั้วแม่เหล็ก และขั้วลลอยจะเป็นแม่เหล็กถาวร ขั้วแม่เหล็กที่สร้างขึ้นกับแม่เหล็กถาวรจะเป็นขั้วเดียวกัน ทำให้เกิดการผลักกัน แล้วสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ให้วัตถุลอยตัวอย่างสมดุล

ผลการทดสอบของการลอยตัวขณะยังไม่มีวัตถุวางบนแผ่นแนวระนาบได้ค่าแรงดันและความสูงแปรผันตรงกัน โดยแผ่นแนวระนาบลอยสูงสุด 3.7 เซนติเมตร 23.12 โวลต์ และแผ่นแนวระนาบลอยต่ำสุด 2.7 เซนติเมตร 15.6 โวลต์ ขณะที่แผ่นแนวระนาบรับน้ำหนักได้มากที่สุด 150 กรัม 23.12 โวลต์ 1.7 แอมแปร์ ลอยตัวสูง 2.8 เซนติเมตร และสามารถรักษาระดับให้เกิดการสมดุลได้

คำสำคัญ: การควบคุมการลอยตัวของสนามแม่เหล็ก, การควบคุมแบบพีไอดี, ดิสคิปลิ่งคอนโทรล

Abstract

This article is to present an analysis study of the 4 point magnetic levitation. This leads in to the power balancing such 4 points of the magnetic fields in order to lift a stabilization plate. These 4 point of magnetic fields are controlled decoupling through the traditional PID controllers. The hardware model is composed of 4 magnetic coils which produce such magnetic FIO Boards and RapidSTM 32 . This is the stabilization plate is attached with 4 pole permanence magnet. This yields to the levitation if stabilization plate. The results show that the plate is stabilization adequately for using with same application.

Keywords: Magnetic Levitation, PID , decoupling.

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของยานพาหนะถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องไม่ว่าจะเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์หรือไฟฟ้า จนกระทั่งได้มีการนำเทคโนโลยีซึ่งเป็นระบบการยกตัวและขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยระบบการยกตัวให้ขบวนการลอยไม่สัมผัสกับรางด้วยพลังงานแม่เหล็กทำให้รถไฟที่ขบวนนี้ไม่มีล้อส่งผลให้ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างล้อและรางลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ มีแรงในการขับเคลื่อนสูง

การควบคุมระบบการยกตัวได้มีศึกษาอย่างแพร่หลาย ทำให้ชิ้นงานทำงานลอยได้รวดเร็ว ซึ่งวิธีการควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพจึงได้มีผู้คิดค้นทฤษฎีระบบควบคุม ได้มีการนำวิธีการควบคุมระบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ตัวควบคุมแบบอนุกรมและตัวควบคุมแบบดิจิตอล วิธีการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์แบบจำลองที่ใช้เพื่อสร้างแรงแม่เหล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้นในระบบการควบคุมจะต้องประมาณการระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น ในวิธีการควบคุมระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กที่ใช้แรงจากแม่เหล็กไฟฟ้ารักษาให้วัตถุลอยอยู่กลางอากาศนั้นได้นำมาศึกษากันอย่างแพร่หลาย โดยวิธีการควบคุมแบบต่างๆ

บทความนี้มาเสนอการออกแบบระบบควบคุมการลอยตัวเพื่อปรับระดับแผ่นระนาบให้สมดุลจำนวน 4 จุด โดยใช้ตัวควบคุมชนิด พีไอดีควบคุมการลอยตัวของแต่ละแกน ซึ่งแต่ละแกนจะสร้างขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะใช้วิธี ดิสคิปลิ่งคอนโทรล เพื่อให้แผ่นแนวระนาบลอยตัวเท่ากัน และขั้วลลอยจะเป็นแม่เหล็กถาวร ขั้วแม่เหล็กที่สร้างขึ้นกับแม่เหล็กถาวรขั้วเดียวกัน ทำให้เกิดการผลักกัน แล้วสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ให้วัตถุลอยตัวอย่างสมดุล

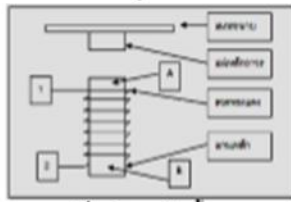
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมการลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 1 เป็นลอยตัวนิ่งของชิ้นงานควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การลอยตัวโดยสนามแม่เหล็กแกนเหล็กทั้ง 4 รักษาสมดุลระหว่างแผ่นในแนวระนาบซึ่งลอยตัวด้วยแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 1 การควบคุมการลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก

ส่วนประกอบของชิ้นงานของการลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กแกนเดียวแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างชิ้นงาน

หลักการทำงานเบื้องต้นเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดทองแดงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็กทำให้เกิดขั้วแม่เหล็ก ตามกฎมือขวาของอันซ์ คริสเตียน เฮอร์สเทล เช่นจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่หมายเลข 1 A จะเป็นขั้วเหนือและ B จะเป็นขั้วใต้ ถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่หมายเลข 2 B จะเป็นขั้วเหนือและ A จะเป็นขั้วใต้ ส่วนแม่เหล็กถาวรที่อยู่ด้านบนนั้นจะเป็นขั้วตรงกับ A ทำให้ขั้วเหมือนกันจะทำให้ผลักกันในขณะเดียวกันแท่นแวนรอนนั้นก็จะมีลอยขึ้น

2.1 สมการแรงลอยตัว

เมื่อนำขดลวดทองแดงมาพันรอบแกนเหล็กสามเหลี่ยมแล้วจ่ายกระแสไฟฟ้า(๑) เข้าไปในขดลวดจะเกิดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก(B) ขึ้นในแกนเหล็กทำให้เกิดขั้วเหนือและขั้วใต้ขึ้น ความเข้มของแม่เหล็กขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่จ่ายเข้าไปในขดลวด ส่วนแท่นแวนรอนขึ้นบนนั้นจะเป็นแม่เหล็กถาวร จากวัตถุดิบจะลอยขึ้น สมการแรงลอยตัวในแนวตั้ง(F) ดังในสมการ(1)

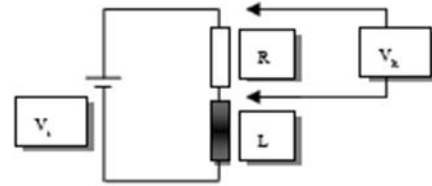
$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 N^2 I^2}{l} \quad (1)$$

ทดสอบจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าไปที่ขดลวดแต่ละแกน เพื่อหาความสัมพันธ์ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กโดยให้ค่าความสูงคงที่

ตารางที่ 1 ผลการทดลองจริง

T1110 mm	Coil 1		Coil 2		Coil 3		Coil 4	
	V1	I1	V2	I2	V3	I3	V4	I4
0.9					19.12	0.777		
0.8			29.12	0.754	23.00	0.759	23.02	0.759
0.7	26.1	0.794	22.28	0.716	21.01	0.754	22.59	0.760
0.6	21.72	0.7	21.71	0.692	19.19	0.694	21.63	0.712
0.5	21.9	0.692	20.88	0.66	19	0.642	19.02	0.672
0.4	20.4	0.658	19.6	0.638	18.22	0.622	19.21	0.64
0.3	19.27	0.627	18.8	0.61	17	0.579	18.99	0.594
0.2	18.2	0.592	17.78	0.579	16.47	0.541	17.4	0.579
0.1	17.29	0.562	16.9	0.558	15.86	0.505	16.7	0.522
0	16.5	0.529	16.4	0.519	15.8	0.482	15.99	0.488
0.9	15.66	0.491	15.94	0.487	15.41	0.456	15.2	0.419
0.8	15	0.459	15.21	0.458	14.79	0.444	14.99	0.471
0.7	14.60	0.436	15	0.431	14.28	0.41	14.67	0.406
0.6			14.6	0.416				
0.5			14.67	0.401				

2.2 ค่าพารามิเตอร์ฟังก์ชันของวงจร



$$V_{(t)} = Ri_{(t)} + L \frac{di_{(t)}}{dt}, \quad i_{(t)} = \frac{dq}{dt}$$

$$V_{(t)} = R \frac{dq}{dt} + L \frac{d^2q}{dt^2}$$

$$\text{โดยที่ } x_1 = q \text{ และ } x_2 = \frac{dq}{dt}$$

$$x_2 = \frac{V_{(t)} - R}{L} x_1$$

สมการ state Variable

สมการอินทิเกรต

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{V_{(t)}}{L}$$

สมการเอาท์พุท

$$y = V_x = Ri = R \frac{dq}{dt} = R x_2$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

จากสมการข้างต้นเป็นสมการสเตต จะหาค่าพารามิเตอร์ฟังก์ชันด้วยคำสั่ง

$$[NUM,DEN] = ss2tf(A,B,C,D)$$

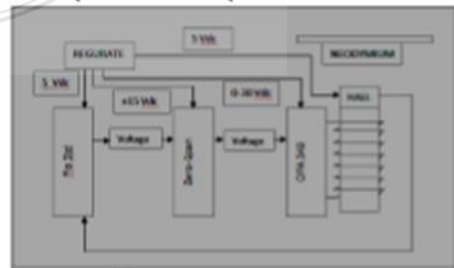
โดยค่า $R = 50.81 \Omega, L = 556 \text{mH}$ และ $V = 25 \text{V}$

จะได้พารามิเตอร์ฟังก์ชัน

$$T.F. = \frac{50.81}{s^2 + 91.35s} \quad (2)$$

2.3 สมการพารามิเตอร์ฟังก์ชันทั้ง 4 จุด

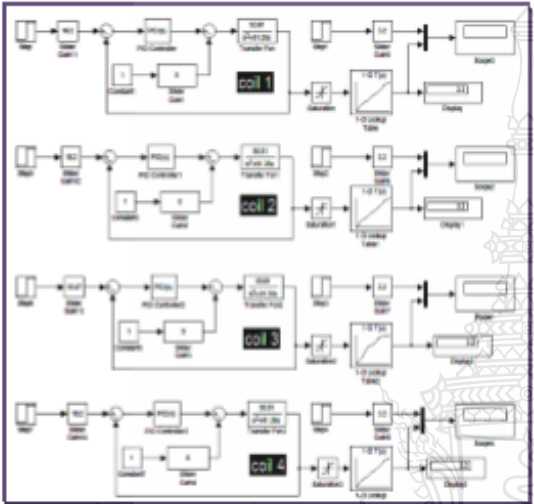
การควบคุมแบบ ทีโอดีแต่ละจุด



รูปที่ 3 การควบคุมแบบทีโอดีแต่ละจุด

เมื่อจ่ายแรงดันเข้าชุดควบคุมแบบพีไอดี อัตราขยาย(Zero-span) เป็นกราฟที่เส้นตรง โดยแสดงการขยายแรงดันและอัตราขยายออฟแอมป์(OPA 549) เป็นแรงดันคงที่เพื่อจ่ายให้กับแกนเหล็กโดยมีอุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็กเพื่อวัดค่าความผิดพลาดของระยะการลอยตัวซึ่งจะทำในลักษณะนี้ทั้ง 4 แกน

จำลองใน โปรแกรม MAdab โดยการใส่ค่าทรานเซอร์ที่ทั้ง 4 ชิ้นของวงจร และทดสอบระยะการลอยของแกนเหล็กโดยมีสัญญาณรบกวน(error) เมื่อมีน้ำหนักมาวาง ของทั้ง 4 แกน



รูปที่ 4 แสดงการจำลองเมื่อมีสัญญาณรบกวนในระบบ

2.4 การควบคุมแรงยก 4 จุด ด้วยวิธีสี่ขั้วปลีงคอนโทรล

ในการควบคุมโดยให้ทุกจุดทำงานร่วมกัน จะต้องสร้างวิธี

ควบคุมแบบสี่ขั้วปลีงคอนโทรลซึ่งเป็นการควบคุมโดยมีตัวแปร

ระยะความสูงอินพุต(Y) และแรงดันที่จ่ายเอาต์พุต(U) ดังนี้

$$Y_1(s) = G_{11}(s)U_1(s) + G_{12}(s)U_2(s) + G_{13}(s)U_3(s) + G_{14}(s)U_4(s)$$

$$Y_2(s) = G_{21}(s)U_1(s) + G_{22}(s)U_2(s) + G_{23}(s)U_3(s) + G_{24}(s)U_4(s)$$

$$Y_3(s) = G_{31}(s)U_1(s) + G_{32}(s)U_2(s) + G_{33}(s)U_3(s) + G_{34}(s)U_4(s)$$

$$Y_4(s) = G_{41}(s)U_1(s) + G_{42}(s)U_2(s) + G_{43}(s)U_3(s) + G_{44}(s)U_4(s)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาต์พุต ของทรานเซอร์

ทั้งสี่ชิ้น เช่น G_{11} โดยหมายเลข 1 แสดงความสัมพันธ์เอาต์พุต 1 และ

หมายเลข 2 แสดงความสัมพันธ์อินพุต ซึ่งสมการที่ได้แต่ละตัวจะ

เป็นทรานเซอร์ทั้งสี่ชิ้น ของแต่ละจุด แต่ในกรณีของบทความนี้ค่า K

และ L ของทรานเซอร์ทั้งสี่ชิ้นอนุกรมกัน ซึ่งเมื่อนำมาทดสอบจะได้

ทรานเซอร์ทั้งสี่ชิ้นตัวเดียวกัน ดังนั้น G_{11} ถึง G_{44} จะเป็นทรานเซอร์

ทั้งสี่ชิ้นเดียวกัน ส่วนที่แตกต่างกันคือ ชุดคอยแกนเหล็กเมื่อวัดจริงค่า

ความต้านทานจะใกล้เคียงกันแตกต่างกันเล็กน้อย และตัววัดค่าความ

หนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไม่เท่ากันด้วย ดังตารางที่ 1 การแทนค่า G_{11}

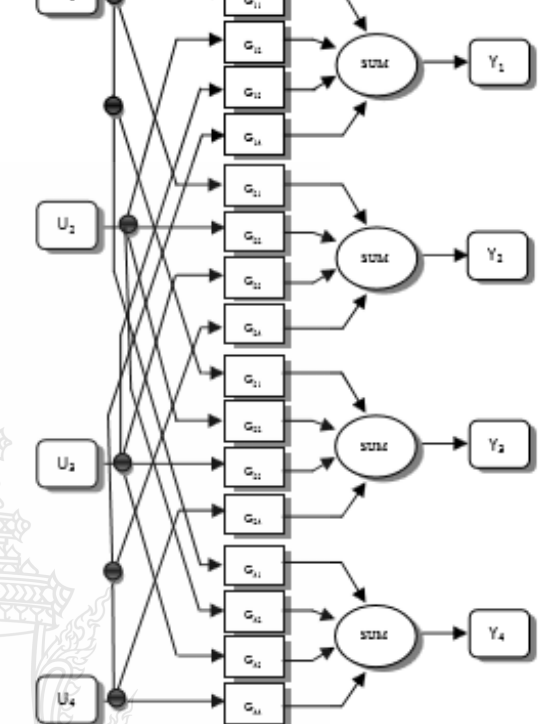
จะเป็นค่าทรานเซอร์ทั้งสี่ชิ้นของแกนเหล็ก 1 การแทนค่า G_{22} จะเป็น

ค่าทรานเซอร์ทั้งสี่ชิ้นของแกนเหล็ก 2 การแทนค่า G_{33} จะเป็นค่า

ทรานเซอร์ทั้งสี่ชิ้นของแกนเหล็ก 3 การแทนค่า G_{44} จะเป็นค่า

ทรานเซอร์ทั้งสี่ชิ้นของแกนเหล็ก 4 และถ้าเป็นการหาค่า G_{22} โดยมี

อินพุตเท่ากับ 0 ดังนั้นเมื่อเข้าสมการจะได้ 0



รูปที่ 5 แสดงการควบคุมสี่ขั้วปลีงคอนโทรล

โดยใช้ทรานเซอร์ทั้งสี่ชิ้นของ G_{ij} ในการคำนวณหา

ค่าพารามิเตอร์ของทรานเซอร์ทั้งสี่ชิ้นเมตริก

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix}$$

$$G_{11} = G_{22} = G_{33} = G_{44} = \frac{50.81}{s^2 + 91.35s}$$

หลักการออกแบบแบบสี่ขั้วปลีงคอนโทรลเพื่อให้ทั้ง 4 จุดมี

ความสัมพันธ์กัน และใช้ค่า PID ปรับค่าที่เหมาะสม

2.5 เงื่อนไขคำสั่ง

เงื่อนไขคำสั่งเป็นการควบคุมกัน 2 จุดโดยเปรียบเทียบกัน

ระหว่างแกนเหล็กซึ่งตรงข้ามกันเพื่อให้ลอยในระนาบที่เท่ากันทั้ง 4 จุด

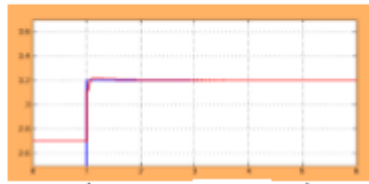
โดยเปรียบเทียบที่ละคู่ $A_{11}-A_{22}$, $A_{22}-A_{44}$, $A_{11}-A_{22}$ และ $A_{22}-A_{33}$

2.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

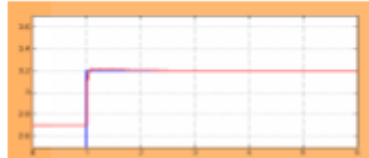
ผลการทดลองจำลองใน โปรแกรม MAdab ขณะ ไม่มี

น้ำหนัก ขณะเริ่มต้นตำแหน่งจะลอยตัวสูง 3.2 เซนติเมตร

สังเกตว่าค่าที่ 3 กราฟจะผิดปกติเนื่องจากการผิดพลาดของจำนวนรอบการพันขดลวดต่างกัน



รูปที่ 7 การจำลอง MATLAB จุดที่ 1



รูปที่ 8 การจำลอง MATLAB จุดที่ 2

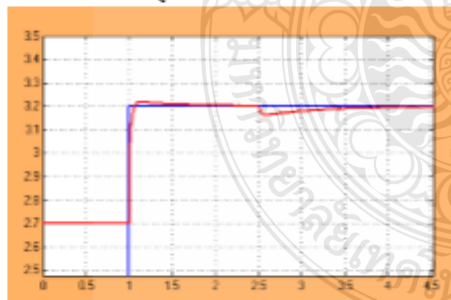


รูปที่ 9 การจำลอง MATLAB จุดที่ 3



รูปที่ 10 การจำลอง MATLAB จุดที่ 4

เมื่อมีน้ำหนักมาวางลงบนแผ่นแนวระนาบ จะทำให้แรงคืนที่จ่ายให้ขดลวดแต่ละจุดจะต้องเพิ่มแรงคืนขึ้นเพื่อให้ได้ในระยที่ตั้งไว้ ผลการทดลองเป็นการทดสอบเมื่อเปลี่ยนค่าระยในโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเปลี่ยนระยของน้ำหนัก

3. สรุป

จากผลการทดสอบของการลอยตัวของงานขณะยังมีวัตถุวางบนแผ่นแนวระนาบได้ค่าแรงคืนและความสูงแปรผันตรงกัน โดยแผ่นแนวระนาบลอยสูงสุด 3.7 เซนติเมตร 23.12 โวลต์ และแผ่นแนวระนาบลอยต่ำสุด 2.7 เซนติเมตร 15.6 โวลต์ ขณะที่แผ่นแนวระนาบรับน้ำหนักได้มากที่สุด 150 กรัม 23.12 โวลต์ 1.7 แอมป์ ลอยตัว

สูง 2.8 เซนติเมตร เมื่อวางวัตถุลงบนแผ่นแนวระนาบที่มีน้ำหนักไม่เกิน 150 กรัม สามารถรักษาระดับให้เกิดการสมดุลได้



รูปที่ 6 การทดสอบของการลอยตัว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Faa-Jang and Syuan-Yi Chen , "Intelligent Integral Backstepping Sliding Mode Control Using Recurrent Neural Network for Magnetic Levitation System (IBSMC)", IEEE, 2010
- [2] Mrunal Deshpande and Mathur Badrilal, "Real Time Implementation of a Sliding Mode Regulator for Current-Controlled Magnetic Levitation System", IEEE, June 2005
- [3] Charles Fallaha ,Hadi Kanaan and Maarorf Sadd, "Sensorless Control of Magnetic Levitation System Using Sliding Mode Control", ICCAIE 2010, Department of EEE, December 2010
- [4] Faa-Jang and Syuan-Yi Chen, "Robust Dynamic Sliding Mode Control Using Adaptive RENN for Magnetic Levitation System (RDSMC)", IEEE , June 2009
- [5] P.Suster and A.jadlovzka, "Modeling and Control Design of Levitation System" Technical University of Kosice/Department of Cybernetics and Artificial Intelligence, Kosice, Slovakia



ชวลิต ทองตรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท (วศ.ม.) วิศวกรรมไฟฟ้า ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สนใจทำงานวิจัยด้านระบบควบคุม อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้ระบบสมองกลฝังตัว



วันชัย ทรัพย์สิงห์ สำเร็จการศึกษาคอ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ Ph.D. (Electrical Engineering), UNN, Newcastle, England, ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ข.2 การยกตัวเนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด

การประชุมวิชาการ
เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11
11th Conference On Energy Network of Thailand (E-NETT)
วันที่ 17-19 มิถุนายน 2558
ณ โรงแรมบางเลน เออริโก จังหวัดนครปฐม

จัดการประชุมโดย
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ร่วมกับ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

เวลา	17 มิถุนายน 2558			18 มิถุนายน 2558			19 มิถุนายน 2558	
	สัปดาห์ 1	สัปดาห์ 2	สัปดาห์ 3	สัปดาห์ 1	สัปดาห์ 2	สัปดาห์ 3	สัปดาห์ 1	สัปดาห์ 2
07:00 - 08:00	ลงทะเบียน							
08:00 - 09:30	พิธีเปิดงาน							
09:30 - 10:00	"ทิศทางพลังงานทดแทนและพลังงานสะอาดสู่ประเทศไทย 2030"							
10:00 - 10:30	"แนวโน้มพลังงานทดแทนและพลังงานสะอาดสู่ประเทศไทย 2030"							
10:30 - 11:00	"พลังงานทดแทนและพลังงานสะอาดสู่ประเทศไทย 2030"							
11:00 - 12:00	เสวนา "พลังงานทดแทนและพลังงานสะอาดสู่ประเทศไทย 2030"							
12:00 - 13:00	รับประทานอาหารกลางวัน							
13:15 - 13:30	RE	AE	BE	RE	AE	RE	RE	AE
13:30 - 14:00	EE	EE	EP	RE	AE	RE	RE	AE
14:00 - 14:15	รับประทานอาหารกลางวัน							
14:15 - 15:00	RE	AE	EE	RE	AE	RE	RE	AE
15:00 - 15:30	RE	AE	EE	RE	AE	RE	RE	AE
15:30 - 16:00	RE	AE	EP	RE	AE	RE	RE	AE
16:30	พิธีปิดงาน							

ห้องสนสุข 2		วันที่ 17 มิถุนายน 2558 เวลา 13:15 - 15:00 น.
สาขาทอความวิจัย		พลังงานประยุกต์
ประธานการนำเสนอทอความ		ผศ.ดร.แก้วกันยา สุดประเสริฐ
13:15	AE-2-01	การศึกษาและประยุกต์ใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบสมุนไพร สกุลตลา วรรณปะเช และกฤษฎากร บุตดาจันทร์
13:30	AE-2-02	การปรับระบบการทำความเย็นแบบดูดกลืน DAR ให้สามารถใช้ความร้อนเกรดต่ำ พงษ์สิทธิ์ ศรีศิริรินทร์
13:45	AE-2-03	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติทางแสงของหลอดแอลอีดีชนิดให้ความสว่างสูง ภัทริยา คำรงค์ศักดิ์, วิภาวีรัตน์ ทองสุชา และวิศรุต บุญยิ่ง
14:00	AE-2-04	วงจรทอระดับแรงดันชนิดควอดเรตต์ค้อตราชยายแรงดันสูง เลิศพันธ์ เพียรสร้างสรร และสิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์
14:15	AE-2-05	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ความร้อนร่วมของไมโครเวฟกับสมร้อน เพื่อเพิ่มค่าได้บีของน้ำมัน ปาล์มดิบสำหรับโรงหีบน้ำมันปาล์มขนาดเล็ก รยากร นกแก้ว, ไพโรจน์ ภูตอง และวิทยา ปันสุวรรณ
14:30	AE-2-06	การยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด นายชวลิต ทองศรี และ วันชัย ทรัพย์สิงห์
14:45	AE-2-07	การประเมินศักยภาพการผลิตไอน้ำ ด้วยความร้อนที่เหลือจากการกำจัดของเสียกระบวนการผลิต โรงงานปิโตรเคมี กฤษดา โอมเฉลา และสมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์



บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

การยกตัวแนวระนาบด้วยสนามแม่เหล็กแบบ 4 จุด

Four Point Magnetic Levitation for Stabilization Plate

ชวสิทธิ์ ทองศรี¹ และ วันชัย ทรัพย์สิงห์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 0-2549-3400 E-mail: bibon_chawalet@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ ระบบควบคุมการยกตัวด้วยสนามแม่เหล็กให้ระบบเกิดการสมดุลของแรงยกตัว โดยทำการออกแบบระบบควบคุมการลอยตัวเพื่อปรับระดับแผ่นระนาบให้สมดุลจำนวน 4 จุด โดยใช้ตัวควบคุมชนิด พีไอดีควบคุมการลอยตัวของแต่ละแกน ซึ่งแต่ละแกนจะสร้างขั้วแม่เหล็ก และขุดล้อยจะเป็นแม่เหล็กถาวร ขั้วแม่เหล็กที่สร้างขึ้น กับแม่เหล็กถาวรจะเป็นขั้วเดียวกัน ทำให้เกิดการผลักกัน แล้วสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ให้วัตถุลอยตัวอย่างสมดุล

จากผลการทดสอบของการลอยตัวของงานขณะยังไม่มีการวัดลู่วางบนแผ่นแนวระนาบได้ค่าแรงดันและความสูงแปรผันตรงกัน โดยแผ่นแนวระนาบลอยสูงสุด 3.9 เซนติเมตร 23.12 โวลต์ และแผ่นแนวระนาบลอยต่ำสุด 2.7 เซนติเมตร 15.6 แอมแปร์ ขณะที่แผ่นแนวระนาบรับน้ำหนักได้มากที่สุด 150 กรัม 23.12 โวลต์ 1.7 แอมแปร์ ลอยตัวสูง 2.8 เซนติเมตร เมื่อวางวัตถุลงบนแผ่นแนวระนาบที่มีน้ำหนักไม่เกิน 150 กรัม สามารถรักษาระดับให้เกิดการสมดุลได้

คำสำคัญ: การควบคุมการลอยตัวของสนามแม่เหล็ก, การควบคุมแบบพีไอดี

Abstract

This astride is to present an analysis study of the 4 point magnetic levitation. This loads in to the power balancing such 4 point of the magnetic fields in order to lift a stabilization plate. These 4 point of magnetic fields are controlled individually through the traditional PID controllers. The hardware model is composed of 4 magnetic coils which produce such magnetic Fio. This the stabilization plate is attached wich 4 pole permanence magnet as show in figure 7. This yields to the levitation if stabilization plate. The results show that the plate is stabilization adequately for using with same application

Keywords: Magnetic Levitation, PID

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของยานพาหนะถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องไม่ว่าจะเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์หรือไฟฟ้าจนกระทั่งได้มีการนำเสนอกเทคโนโลยีซึ่งเป็นระบบการยกตัวและขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยระบบการยกตัวให้ขบวนรถลอยไม่สัมผัสกับรางด้วยพลังงานแม่เหล็กทำให้อายุการใช้งานไม่มีสิ่งสกปรกที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างล้อและรางลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ มีแรงในการขับเคลื่อนสูงรถไฟที่ระบบขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กนี้เรียกว่า การควบคุมระบบการยกตัวได้มีศึกษาอย่างแพร่หลาย ทำให้ชิ้นงานทำงานลอยได้รวดเร็ว ซึ่งวิธีการควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพจึงได้มีการนำวิธีการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ตัวควบคุมแบบอนุโลกและตัวควบคุมแบบดิจิทัล วิธีการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์แบบจำลองที่ใช้เพื่อสร้างแม่เหล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้นในระบบการควบคุมจะต้องประมาณการระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นก่อนในวิธีการควบคุมระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กที่ใช้แรงจากแม่เหล็กไฟฟ้ารักษาให้วัตถุลอยอยู่กลางอากาศนั้นได้นำมาศึกษากันอย่างแพร่หลายโดยวิธีการควบคุมแบบต่างๆ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมการลอยตัวเพื่อปรับระดับแผ่นระนาบให้สมดุลจำนวน 4 จุด โดยใช้ตัวควบคุมชนิด พีไอดีควบคุมการลอยตัวของแต่ละแกน ซึ่งแต่ละแกนจะสร้างขั้วแม่เหล็ก และขุดล้อยจะเป็นแม่เหล็กถาวร ขั้วแม่เหล็กที่สร้างขึ้น กับแม่เหล็กถาวรจะเป็นขั้วเดียวกัน ทำให้เกิดการผลักกัน แล้วสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ให้วัตถุลอยตัวอย่างสมดุล

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมการลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 1 เป็นค่าคงที่ของการลอยตัวของชิ้นงานควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การลอยตัวโดยสนามแม่เหล็กแกนเหล็กทั้ง 4 รักษาสมดุลระหว่างแผ่นในแนวระนาบซึ่งลอยตัวด้วยแรงแม่เหล็ก



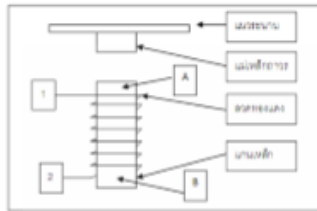
รูปที่ 1 การควบคุมการลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก

บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

ส่วนประกอบของชิ้นงานของการลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก
แกนเดียวแสดงในรูปที่ 2

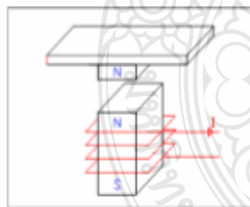


รูปที่ 2 โครงสร้างชิ้นงาน

หลักการทำงานเบื้องต้นเมื่อจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดของแดงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็กทำให้เกิดขั้วแม่เหล็ก ตามกฎมือขวาของอันซ์ คริสเตียน เออร์สเทด เช่นจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่หมายเลข 1 A จะเป็นขั้วเหนือและ B จะเป็นขั้วใต้ ถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่หมายเลข 2 B จะเป็นขั้วเหนือและ A จะเป็นขั้วใต้ ส่วนแม่เหล็กถาวรที่อยู่ด้านบนนั้นจะเป็นขั้วตรงกับ A ทำให้ขั้วเหมือนกันจะทำให้ผลักกันในขณะที่ขั้วตรงกันขั้วจะล่อขึ้น

2.1 สมการจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อนำขดลวดของแดงมาพันรอบแกนเหล็กแล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นในแกนเหล็กทำให้เกิดขั้วเหนือและขั้วใต้ขึ้น โดยใช้กฎของ อันซ์ คริสเตียน เออร์สเทด ความเข้มของแม่เหล็กขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่จ่ายเข้าไปในขดลวด ส่วนตำแหน่งระนาบขึ้นบนนั้นจะเป็นแม่เหล็กถาวร จากวิถูลอบจะล่อขึ้น

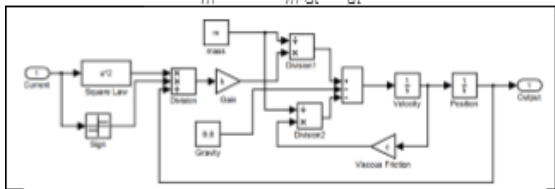


รูปที่ 3 สมการการลอยตัว

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu} = \frac{\mu_0 N^2 i^2}{i}$$

สมการจำลองทางคณิตศาสตร์ (Plant)

$$\frac{K^2}{m} - 9.81 - \frac{c}{m} \frac{dx}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$



รูปที่ 4 สมการจำลองทางคณิตศาสตร์

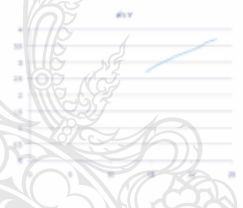
2.2 ทราเนอฟอร์ม์ฟังก์ชัน

โดยการทดลองแกนเหล็กที่มีขดลวดพันอยู่ที่ละแกน โดยจ่ายค่าแรงดัน เพื่อหาค่าของเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก โดยให้ค่าความสูงคงที่ ตารางที่ 1 ผลการทดลองจริง

T (cm)	Coil 1		Coil 2		Coil 3		Coil 4	
	แรงดัน	SI	แรงดัน	SI	แรงดัน	SI	แรงดัน	SI
3.9			25.12	2.736	22.12	2.777		
3.8			25.12	2.736	22.99	2.753	23.12	2.766
3.7	25.1	2.734	22.29	2.716	21.81	2.724	22.56	2.766
3.6	21.75	2.7	21.71	2.692	19.19	2.663	21.18	2.712
3.5	21.3	2.682	20.39	2.66	19	2.642	18.12	2.672
3.4	20.4	2.658	18.8	2.636	18.22	2.622	18.21	2.64
3.3	19.37	2.627	18.6	2.61	17	2.573	18.89	2.594
3.2	18.3	2.592	17.76	2.575	16.47	2.541	17.8	2.573
3.1	17.39	2.562	16.9	2.559	15.96	2.569	16.7	2.522
3	16.5	2.529	16.4	2.513	15.8	2.482	15.89	2.498
2.9	15.83	2.491	15.96	2.487	15.41	2.459	15.2	2.413
2.8	15	2.453	15.23	2.438	14.79	2.384	14.83	2.371
2.7	14.49	2.436	15	2.411	14.29	2.33	14.67	2.396
2.6			14.8	2.376				
2.5			14.67	2.341				

จากนั้นก็นำค่าไปพล็อตใน Matlab โดยใช้คำสั่ง Ident จะได้สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและแรงดันไฟฟ้า

กราฟแกนเหล็ก 1 สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันของแกนเหล็กตัวที่ 1



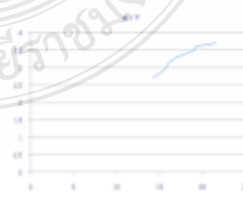
$$T.F_{coil1} = \frac{3.4103}{(1 + 0.00445275s) + 0.0043991s}$$

กราฟแกนเหล็ก 2 สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันของแกนเหล็กตัวที่ 2



$$T.F_{coil2} = \frac{3.9358}{(1 + 0.0068697s)}$$

กราฟแกนเหล็ก 3 สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันของแกนเหล็กตัวที่ 3



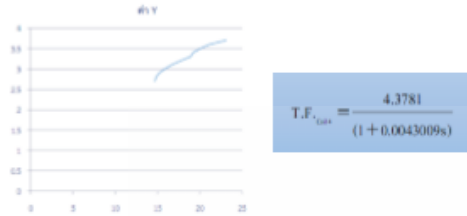
$$T.F_{coil3} = \frac{4.9691}{(1 + 0.0010577s)}$$

บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

กราฟแกนเหล็ก 4 สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันของแกนเหล็กตัวที่ 4

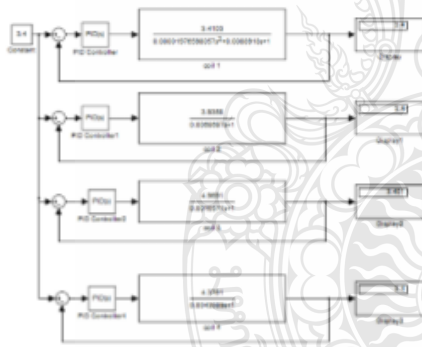


2.3 การควบคุมแบบ ฟีโอดีแต่ละแกน



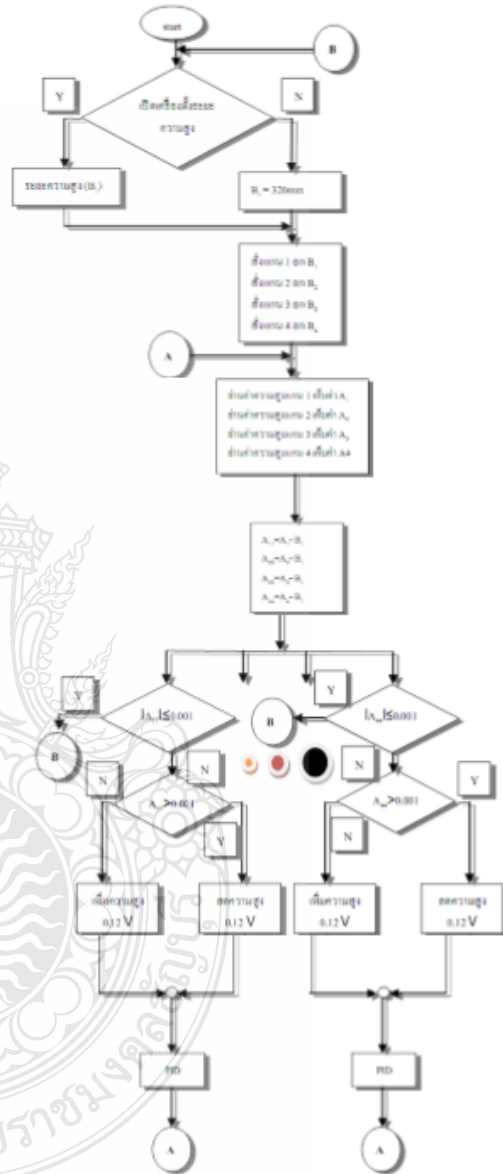
รูปที่ 5 การควบคุมแบบ ฟีโอดีแต่ละแกน

เมื่อจ่ายแรงดันเข้าชุดควบคุมแบบ ฟีโอดี เกจจ้ออีตราชาย (Zero-span) เป็นกราฟเส้นตรงโดยแสดงการขยายแรงดันและอีตราชายออฟแอมป์ (OPA 549) เป็นแรงดันค่าเกจจ้อคังที่ให้อจ่ายให้กับแกนเหล็ก โดยมีอุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็กเพื่อวัดค่าความผิดพลาดของระยะการลอยตัวซึ่งจะทำงานลักษณะนี้ทั้ง 4 แกน



รูปที่ 6 แสดงการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของแต่ละแกน

2.3 การควบคุมแรงยก 4 จุดแบบแยกอิสระ



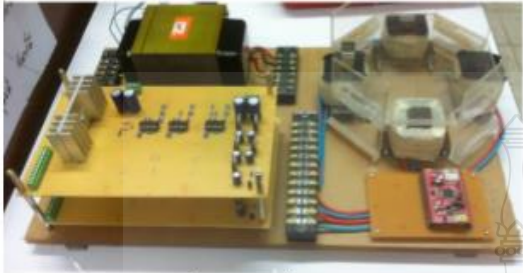
รูปที่ 7 แผนภาพลำดับการควบคุมแบบแยกอิสระ

บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

2.4 แบบชิ้นงานจริง



รูปที่ 8 แสดงรูปชิ้นงานจริง

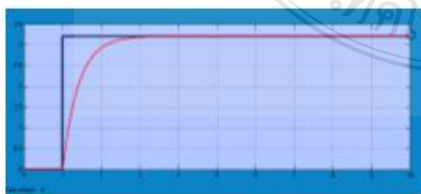
3. สรุป



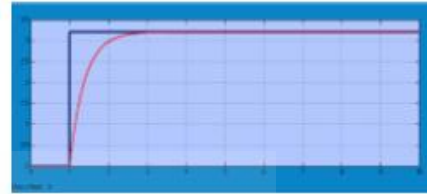
รูปที่ 9 แสดงการทดสอบของการลอยตัว

จากผลการทดสอบของการลอยตัวของงานขณะยังไม่มีการวางบนแผ่นแนวระนาบได้ค่าแรงคืนและความสูงแปรผันตรงกัน โดยแผ่นแนวระนาบลอยสูงสุด 3.9 เซนติเมตร 23.12 โวลต์ และแผ่นแนวระนาบลอยต่ำสุด 2.7 เซนติเมตร 15.6 แอมป์ ขณะที่แผ่นแนวระนาบรับน้ำหนักได้มากที่สุด 150 กรัม 23.12 โวลต์ 1.7 แอมป์ ลอยตัวสูง 2.8 เซนติเมตร เมื่อวางวัตถุลงบนแผ่นแนวระนาบที่มีน้ำหนักไม่เกิน 150 กรัม สามารถรักษาระดับให้เกิดการสมดุลได้

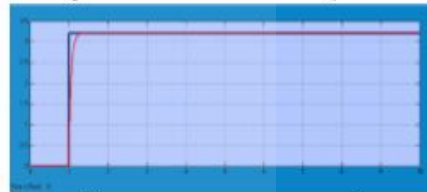
ผลการทดลองขณะไม่มีน้ำหนัก เริ่มต้นแผ่นแนวระนาบจะเซตตัวและลอยตัวสูง 3.2 เซนติเมตรของแต่ละจุด(กำหนดค่า) โดยเปรียบเทียบค่าอินพุตและค่าเอาท์พุต



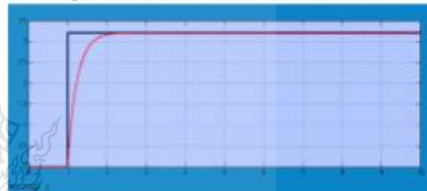
รูปที่ 10 แสดงการจำลอง Math Lab จุดที่ 1



รูปที่ 11 แสดงการจำลอง Math Lab จุดที่ 2



รูปที่ 12 แสดงการจำลอง Math Lab จุดที่ 3



รูปที่ 13 แสดงการจำลอง Math Lab จุดที่ 4

เมื่อนำน้ำหนักมาวางบนแผ่นเพลท จะทำให้แรงคืนที่จ่ายให้ขดลวดแต่ละจุดจะต้องเพิ่มแรงคืนขึ้นเพื่อให้ได้โมเมนต์ที่ดึงไว้ ผลการทดลองเป็นการทดสอบเมื่อเปลี่ยนค่าระยะใน Math Lab



รูปที่ 14 การเปลี่ยนระยะของน้ำหนัก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Faa-Jang and Syuan-Yi Chen , "Intelligent Integral Backstepping Sliding Mode Control Using Recurrent Neural Network for Magnetic Levitation System (IIBSMC)", IEEE, 2010
- [2] Mrunal Deshpande and Mathur Badrital, "Real Time Implementation of a Sliding Mode Regulator for Current-Controlled Magnetic Levitation System", IEEE, June 2005
- [3] Charles Fallaha ,Hadi Kanaan and Maarorf Sadd, "Sensorless Control of Magnetic Levitation System Using Sliding Mode Control", ICCAIE 2010, Department of EEE, December 2010

บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

- [4] Faa-Jang and Syuan-Yi Chen, "Robust Dynamic Sliding Mode Control Using Adaptive RENN for Magnetic Levitation System (RDSDMC)", IEEE, June 2009
- [5] P.Suster and A.jadlovská, "Modeling and Control Design of Magnetic Levitation System" Technical University of Kosice/Department of Cybernetics and Artificial Intelligence, Kosice, Slovakia



ชวลิต ทองศรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท

(วศ.ม.) วิศวกรรมไฟฟ้า ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สนใจทำงานวิจัยด้านระบบควบคุม อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้ระบบสมองกลฝังตัว



วันชัย ทรัพย์สิงห์ สำเร็จการศึกษา ค.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ Ph.D.

(Electrical Engineering), UNN, Newcastle, England, ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายชวลิต ทองศรี
วัน เดือน ปีเกิด	22 มกราคม 2527
ที่อยู่	141 ม.2 ต.หนองไผ่ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ 67000
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2550
ประวัติการทำงาน	ครูอัตราจ้าง วิทยาลัยเทคนิคเพชรบูรณ์ ตั้งแต่ปี 2552 - ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	081-0448755
อีเมล	bibon_chawalet@hotmail.com

