

การควบคุมแบบซิมิลาร์ที่ฟองเบร้งที่มีตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กอยู่ภายในภายใต้แรงกระทำสองทิศทาง

นายณกรณ์ แก้วปิ่นทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SEMI-ACTIVE CONTROL OF A MAGNETORHEOLOGICAL-DAMPER-EMBEDDED BEARING UNDER
BIDIRECTIONAL LOADINGS

Mr.Nakorn Kaeopinthong

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมแบบเคมีแอกทีฟของแบร็งที่มีตัวหน่วงของเหลว
แม่เหล็กอยู่ในภายใต้แรงกระทำสองทิศทาง

โดย

นายณกรณ์ แก้วปิ่นทอง

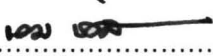
สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัมย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัมย์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม)

ณกรณ์ แก้วปิ่นทอง : การควบคุมแบบเซมิแอกทีฟของแบริ่งที่มีตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กอยู่ภายใน ภายใต้แรงกระทำสองทิศทาง. (SEMI-ACTIVE CONTROL OF A MAGNETORHEOLOGICAL-DAMPER-EMBEDDED BEARING UNDER BIDIRECTIONAL LOADINGS):

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.อาณัติ เรืองรัมย์, 106 หน้า.

การใช้งานตัวหน่วงของเหลวกับสะพานเพื่อลดผลตอบสนองแผ่นดินไหวในปัจจุบันเป็นแบบกระบอก ลูกสูบสร้างแรงหน่วงได้ในทิศทางเดียว ติดตั้งในบริเวณหัวเสาของสะพานได้ยากอีกทั้งทิศทางของแรงแผ่นดินไหวที่เข้ามากระทำมีทิศทางไม่แน่นอน ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานระหว่างเกิดแผ่นดินไหว ในการวิจัยนี้ทำการพัฒนาและศึกษาคุณสมบัติของแบบแบริ่งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กแบบ เซมิแอกทีฟ ที่สร้างแรงหน่วงได้สองทิศทางในแนวราบเพื่อลดผลตอบสนองแผ่นดินไหวของสะพาน ติดตั้งไว้ที่จุดเชื่อมต่อกัน ระหว่างคานและเสาเพื่อสลายพลังงานที่เข้ามากระทำกับโครงสร้าง

แบริ่งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ได้พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก บรรจุของเหลวแม่เหล็ก และขดลวดทองแดงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไว้ภายใน สร้างแรงหน่วงสูงสุดได้ 60 นิวตัน พิกัดกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ที่แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ การทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ของแบริ่งทดสอบโดยให้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กมีการเคลื่อนที่แบบวัฏจักรด้วยความถี่ 0.5 ถึง 1.5 รอบต่อวินาที ระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตรในแต่ละทิศทาง ขณะที่ควบคุมแรงหน่วงโดยการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าเริ่มจาก 0 แอมแปร์ จนถึง 0.8 แอมแปร์ เมื่อวิเคราะห์แบบถดถอยจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วง ความเร็วและปริมาณกระแสไฟฟ้าโดยที่ทิศทางเคลื่อนที่จะไม่มีผลต่อแรงหน่วงที่เกิดขึ้น

การควบคุมแบบเซมิแอกทีฟด้วยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ ของแบริ่งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก ทำการทดลองโดยการนำแบบจำลองของแบริ่งที่ได้มาควบคุมแรงหน่วงให้ เป็นไปตามรูปแบบการควบคุม ทดสอบโดยให้แบริ่งเคลื่อนที่เป็นวัฏจักรด้วยความถี่ 0.5 ถึง 1.0 รอบต่อวินาที ระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตร การทดสอบพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถใช้ควบคุมแรงหน่วงในรูปแบบสองทิศทางได้โดยแรงหน่วงมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 6-11%

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต : *ณกรณ์ แก้วปิ่นทอง*
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : *Arut*
 ปีการศึกษา.....2551.....

4970293021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS: MR DAMPER / MR FLUID / BEARING

NAKORN KAEOPINTHONG : SEMI-ACTIVE CONTROL OF A MAGNETO RHEOLOGICAL-DAMPER-EMBEDDED BEARINGS UNDER BIDIRECTIONAL LOADINGS. ADVISOR : ASST.PROF.ANAT RUANGRASSAMEE,Ph.D., 106 pp.

Fluid dampers used in mitigation of seismic response of bridges in recent years are of the conventional piston type with unidirectional damping forces. When installed at the column pier to mitigate bidirectional response, the installation can be a problem because of limited space around pier tops. In this study, a magnetorheological-damper-embedded bearing are developed to response in two horizontal directions. Dynamic properties of the bearing are investigated.

The developed MR-damper-embedded bearing composes of a cylinder containing the MR fluid and enamelled copper coils. The bearing is operated with a current of 1 ampere and a voltage of 10 volt. The dynamic test is performed using sinusoidal excitations with frequencies ranging from 0.5 to 1.5 Hz. with 15 mm maximum displacement in each direction. The increase of the damping force with the current and velocity is observed and the mathematical model of the damper is proposed.

The effectiveness of MR bearing under the viscous-plus-variable-friction algorithm is investigated and the results show that the actual damping force is close to the commanded force. A discrepancy is observed to be about 6-11% in the damping force.

Department.....Civil Engineering.....Student's Signature : *Nakorn Kaopithong*
Field of StudyCivil Engineering.....Advisor's Signature : *Anat*
Academic Year.....2008.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ได้ โดยความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและวางแนวทางการดำเนินงานวิจัยอันเป็นประโยชน์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.อาณัติ เรืองวัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้การตรวจสอบและคำแนะนำแก้ไขรูปเล่มจนสำเร็จลุล่วงไปได้ ตลอดจนท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ร่วมให้คำแนะนำเป็นอย่างดี ซึ่งข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมโยธา และเจ้าหน้าที่ทุก ๆ ท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในเรื่องต่าง ๆ อีกทั้งน้อง ๆ ห้องศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหวและแรงสั่นสะเทือน ที่ได้ช่วยเหลือ ให้กำลังใจและให้คำปรึกษาในทุก ๆ เรื่อง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	5
2.2 ตัวหน่วงของเหลวแบบเซมิแอกทีฟ.....	33
2.3 พฤติกรรมของเหลวแม่เหล็ก.....	34
2.4 แหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์วิตช์มอดูเลชัน.....	36
2.5 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	37
บทที่ 3 การออกแบบแบร็งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก.....	42
3.1 ข้อกำหนดการออกแบบ.....	42
3.2 การออกแบบรูปร่าง.....	43
3.3 มิติและวัสดุทำตัวแบร็ง.....	44
3.4 ของเหลวแม่เหล็ก (magnetorheological fluid).....	49
3.5 การออกแบบขดลวดทองแดง.....	49
3.6 การประกอบแบร็งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก.....	50
3.7 การบรรจุของเหลวในแบร็ง.....	53
3.8 ผลการออกแบบแบร็งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก.....	56
บทที่ 4 การทดสอบสมบัติทางกลของแบร็งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก.....	57
4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ.....	58

4.2 การทดสอบแบร็งที่บรรจุของเหลวแม่เหล็กภายใน.....	63
4.3 ผลการทดสอบ	67
บทที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบร็งตัวหนองของเหลวแม่เหล็ก.....	86
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสูงสุดและแรงหนอง	86
5.2 การทดสอบควบคุมแรงหนองด้วยรูปแบบการควบคุมแรงหนองแบบหนึ่ง ผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้.....	89
5.3 ผลการทดลอง.....	100
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	101
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	101
6.2 ข้อเสนอแนะ	102
รายการอ้างอิง.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	106

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ใช้ในการออกแบบ (จาก Yang และคณะ, 2002)	14
ตารางที่ 2.2 เปอร์เซ็นต์ควบคุมสูงสุดของการตอบสนองที่ต่าง ๆ กัน และแรงควบคุมสูงสุด	23
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับการออกแบบจำนวนและขนาดของขดลวดทองแดง	50
ตารางที่ 4.1 กรณีที่ทดสอบให้มีการเคลื่อนที่แบบวัฏจักรโดยปรับทิศทาง ความถี่ และกระแสไฟฟ้า	65
ตารางที่ 4.2 ค่าที่กำหนดในเครื่องคอมพิวเตอร์ (ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน X)	66
ตารางที่ 4.3 ค่าที่กำหนดในเครื่องคอมพิวเตอร์ (ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y)	66
ตารางที่ 4.4 ค่าที่กำหนดในคอมพิวเตอร์ (ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวทำมุม 45 องศา กับแกน X)	66
ตารางที่ 4.5 ค่าที่กำหนดในคอมพิวเตอร์ (ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวทำมุม 135 องศา กับแกน X)	67

สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	การใช้งานตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กแบบกระบอกลูกสูบและเบริงตัวหน่วง ของเหลวแม่เหล็ก.....	3
รูปที่ 2.1	ตัวหน่วงที่ปรับขนาดช่องเปิดของวาล์ว (จาก Kawashima และ Unjoh, 1994).....	5
รูปที่ 2.2	รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงที่ใช้กับตัวหน่วงของเหลวและแรงหน่วงที่วัดได้ จากการ ควบคุม (จาก Kawashima และ Unjoh, 1994).....	6
รูปที่ 2.3	รูปแบบสะพานและแบบจำลองที่ใช้ (ก) จุดติดตั้งตัวหน่วงและ isolator (ข) แบบจำลองแบบมวลรวม (ค) ระบบที่มีระดับชั้นความเร็วเท่ากับสี่ (จาก Yang และคณะ, 1995).....	7
รูปที่ 2.4	แบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแบบเซมิแอกทีฟ	8
รูปที่ 2.5	แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ชั้นล่างของแบบจำลอง อาคาร 3 ชั้น (จาก Dyke และคณะ, 1996).....	8
รูปที่ 2.6	ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กต้นแบบ (จาก Spencer และคณะ, 1997)	9
รูปที่ 2.7	แบบจำลองตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเสนอโดย Spencer (จาก Spencer และคณะ, 1997).....	9
รูปที่ 2.8	แบบจำลองอาคาร 6 ชั้นที่มีตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กติดตั้งอยู่ที่สองชั้นล่าง (จาก Jansen และ คณะ, 2000).....	10
รูปที่ 2.9	ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กขนาด 20 ตัน (จาก Yang และคณะ, 2001).....	11
รูปที่ 2.10	แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้แรงหน่วงเป็นตัวแปรควบคุม ป้อนกลับ(จาก Yang และคณะ, 2001)	11
รูปที่ 2.11	วงจรไฟฟ้าของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก (จาก Yang และคณะ, 2001)	12
รูปที่ 2.12	แผนภาพบล็อกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ก.) แผนภาพเค้าร่างของ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบพัลส์วิตช์มอดูเลชันที่มีวงจรรขยาย ช่วยควบคุม (servo amplifier) ข.) แผนภาพบล็อกแสดงฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า (จาก Yang และคณะ, 2001).....	12
รูปที่ 2.13	รูปแบบการควบคุมที่ใช้ในการทดลอง (จาก Ruangrassamee และ Kawashima, 2001)	13

รูปที่ 2.14 แบบจำลองสะพานที่ทดสอบบนเครื่องจำลองแผ่นดินไหว (จาก Ruangrassamee และ Kawashima, 2001)	13
รูปที่ 2.15 แสดงคุณสมบัติของแบบจำลองพลาสติกของบึงแฮม (จาก Yang และคณะ, 2002)	14
รูปที่ 2.16 รูปแบบสะพานในการศึกษา ก) รูปด้านตามแนวความยาวสะพาน ข) รูปตัดขวางของสะพาน ค) เสาและฐานราก (จาก Ruangrassamee และ Kawashima, 2003)	15
รูปที่ 2.17 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (จาก Ruangrassamee และ Kawashima, 2003)..	15
รูปที่ 2.18 อุปกรณ์ในการทดลองเพื่อยกลูกทรงกลมเหล็ก (จาก Hurley และคณะ, 2004)	16
รูปที่ 2.19 แผนภาพบล็อกแสดงฟังก์ชันถ่ายโอน ของแหล่งกำเนิดกระแสและระบบควบคุม ป้อนกลับ (จาก Hurley และคณะ, 2004)	16
รูปที่ 2.20 แบบจำลองสำหรับรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสม แรงเสียดทานที่ปรับค่าได้(จาก Ruangrassamee และคณะ, 2005).....	17
รูปที่ 2.21 ฮีสเทอรีซิสของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแรงเสียดทาน ที่ปรับค่าได้ (จาก Ruangrassamee และคณะ, 2005)	18
รูปที่ 2.22 มิติและขนาดของปลอกพลาสติกที่พันด้วยลวดทองแดง (จาก Wu และคณะ,2008)..	18
รูปที่ 2.23 ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเมื่อติดตั้งปลอกพลาสติกที่พันลวดทองแดงไว้ภายนอก....	19
รูปที่ 2.24 เส้นแรงแม่เหล็กและกระบอกสูบที่ผิวด้านในบากเป็นร่อง (จาก Wu และคณะ, 2008)	19
รูปที่ 2.25 แรงหน่วงสูงสุดกรณีไม่มีรอยบากและกระตุ้นด้วยความถี่ต่าง ๆ กัน (จาก Wu และคณะ, 2008)	20
รูปที่ 2.26 แรงหน่วงสูงสุดกรณีที่มีรอยบากและกระตุ้นด้วยความถี่ต่าง ๆ กัน	20
รูปที่ 2.27 (ก) การเลื่อนในแนวนอน (ข) กราฟฮีสเทอรีซิสจากการเลื่อนในแนวนอน (ค) การเลื่อนในแนวตั้ง (จาก Das และคณะ, 2008).....	21
รูปที่ 2.28 (ก) กราฟเส้นแกนหลัก (ข) กราฟฮีสเทอรีซิสในอุดมคติ (ค) แบบจำลองอาคารที่ใช้ทดสอบ (จาก Das และคณะ, 2008)	21
รูปที่ 2.29 กราฟฮีสเทอรีซิสของแรงหน่วงและความเร็ว (จาก Das และคณะ, 2008)	22
รูปที่ 2.30 ระยะเวลาเคลื่อนที่กับเวลาที่ขึ้น 3 (จาก Das และคณะ, 2008).....	22

รูปที่ 2.31	เปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลอง (จาก Zapateiro และคณะ, 2008).....	23
รูปที่ 2.32	ผลการทดสอบกับแบบจำลองอาคาร 3 ชั้น ด้วยตัวควบคุมแบบก้าวถอยหลัง ที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กไว้ที่ชั้น 1 (จาก Zapateiro และคณะ, 2008)	24
รูปที่ 2.33	ระยะการเคลื่อนที่และความเร็วสัมบูรณ์สูงสุดของแบบจำลองอาคารแยกฐาน 10 ชั้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Taft (จาก Zapateiro และคณะ, 2008)	24
รูปที่ 2.34	แผนภาพบล็อกแสดงวิธีการควบคุม (จาก Karamodin และคณะ, 2008).....	25
รูปที่ 2.35	เปรียบเทียบระหว่างแรงหน่วงที่วัดได้กับค่าแรงหน่วงที่ต้องการจาก ตัวควบคุม LQG.....	25
รูปที่ 2.36	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์และความเร่งที่ชั้น 3 เปรียบเทียบระหว่างมีและไม่มี การควบคุม แรงหน่วง (จาก Karamodin และคณะ, 2008)	26
รูปที่ 2.37	โครงสร้างรับแรงเฉือน 2 ชั้นที่ใช้ในการทดสอบ (จาก Lee และคณะ, 2008).....	27
รูปที่ 2.38	แรงหน่วงและระยะการเคลื่อนที่ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก	27
รูปที่ 2.39	แบบจำลองตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก (จาก Lee และคณะ, 2008)	28
รูปที่ 2.40	คุณสมบัติของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่แปรผันตามกระแสไฟฟ้า.....	28
รูปที่ 2.41	แรงหน่วงกับระยะการเคลื่อนที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลองและ การคำนวณ (จาก Lee และคณะ, 2008)	28
รูปที่ 2.42	แรงหน่วงกับความเร็ว เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลองและการคำนวณ.....	29
รูปที่ 2.43	เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ และการทดลอง (ก) แรงหน่วงควบคุม	30
รูปที่ 2.44	วงรอบฮีสเทอรีซิสของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก ชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 2 ตามลำดับ	30
รูปที่ 2.45	ระบบมวลรวมที่มี 2 องศาอิสระ (จาก Chen และ Lee, 2008).....	31
รูปที่ 2.46	คลื่นแผ่นดินไหว Chi Chi ความเข้ม 30% (จาก Chen และ Lee, 2008)	31
รูปที่ 2.47	เปรียบเทียบระหว่างระบบแรงหน่วงควบคุมและกระแสไฟฟ้า เมื่อเกิด เวลาประวิง 100 มิลลิวินาที กรณีที่มีและไม่มี การชดเชยผลที่เกิดจากเวลาประวิง (จาก Chen และ Lee, 2008)	32
รูปที่ 2.48	เปรียบเทียบระหว่างระยะการเคลื่อนที่เมื่อระบบมีเวลาประวิง 100 มิลลิวินาที	33
รูปที่ 2.49	ตัวหน่วงของเหลวแบบเคมีแอคทีฟ (จาก Spencer และ Soong, 1999)	33
รูปที่ 2.50	การจัดเรียงตัวของอนุภาคเหล็กภายใต้สนามแม่เหล็ก.....	34

รูปที่ 2.51	โหมดการทำงานของของเหลวแม่เหล็ก (จาก JOLLY และคณะ, 1999)	35
รูปที่ 2.52	รูปแบบคลื่นที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน.....	36
รูปที่ 2.53	แบบจำลองวงจรสำหรับแหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน.....	37
รูปที่ 3.1	รูปตัดแสดงเส้นแรงแม่เหล็กสำหรับแบริ่งที่บรรจุของเหลวแม่เหล็ก	43
รูปที่ 3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน ในขณะไม่มี สนามแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (จาก Lord Corporation)	44
รูปที่ 3.3	ความเค้นที่จุดครากกับความเข้มข้นสนามแม่เหล็กของของเหลวแม่เหล็ก.....	46
รูปที่ 3.4	รูปด้านบนแสดงมิติของแบริ่งตัวหุ้มของเหลวแม่เหล็ก (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)	47
รูปที่ 3.5	รูปตัดด้านข้างของตัวหุ้มของเหลวแม่เหล็ก (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	48
รูปที่ 3.6	แบริ่งตัวหุ้มของเหลวแม่เหล็กก่อนทำการติดตั้งขดลวดทองแดง.....	48
รูปที่ 3.7	เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้แยกเป็นกรณีต่าง ๆ ที่เปลี่ยนค่าตัวแปรในการออกแบบ .	50
รูปที่ 3.8	ขดลวดทองแดงก่อนประกอบเข้าแบริ่ง	51
รูปที่ 3.9	แบริ่งของเหลวแม่เหล็กเมื่อประกอบขดลวดทองแดงและเชื่อมสายไฟ.....	52
รูปที่ 3.10	แบริ่งของเหลวแม่เหล็กเมื่อประกอบขดลวดทองแดงและหยอดกาว อีพอกซีปิดห้องบรรจุขดลวดทองแดง.....	52
รูปที่ 3.11	แบริ่งของเหลวแม่เหล็กเมื่อบรรจุของเหลวแม่เหล็กในห้องบรรจุของเหลวแล้ว.....	53
รูปที่ 3.12	ของเหลวแม่เหล็กที่บรรจุอยู่ในห้องบรรจุ รั่วออกมาภายนอกขณะทำการทดสอบ.....	53
รูปที่ 3.13	แสดงของเหลวแม่เหล็กที่รั่วออกจากห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็ก ภายหลังทำการทดสอบ	54
รูปที่ 3.14	โฟมที่ตัดเป็นรูปห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็ก.....	55
รูปที่ 3.15	ของเหลวแม่เหล็กที่อยู่ในช่องว่างของโฟมภายในห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็ก.....	55
รูปที่ 3.16	ของเหลวแม่เหล็กที่รั่วออกมาจากแบริ่งที่มีโฟมในห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็ก	56
รูปที่ 4.1	การติดตั้งเครื่องมือทำการทดสอบ.....	58
รูปที่ 4.2	เครื่องจำลองแผ่นดินไหว.....	59
รูปที่ 4.3	เครื่องวัดแรง JR3	60
รูปที่ 4.4	เครื่องปรับสภาพสัญญาณจากเครื่องวัดแรง JR3	61
รูปที่ 4.5	เครื่องวัดระยะติดตั้งบนเครื่องจำลองแผ่นดินไหว.....	61
รูปที่ 4.6	เครื่องควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า	62

รูปที่ 4.7 เครื่องจำลองแผ่นดินไหว.....	62
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออก	64
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเวลาเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	69
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเวลาเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	70
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเวลาเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนว ทำมุม 45 องศากับแกน X	71
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเวลาเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนว ทำมุม 135 องศากับแกน X	72
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วเมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	73
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วเมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	74
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วเมื่อเคลื่อนที่ในแนว ทำมุม 45 องศากับแกน X	75
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วเมื่อเคลื่อนที่ในแนว ทำมุม 135 องศากับแกน X	76
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	77
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	78
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเมื่อเคลื่อนที่ในแนวทำมุม 45 องศากับแกน X	79
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเมื่อเคลื่อนที่ในแนวทำมุม 135 องศากับแกน X	80
รูปที่ 4.21 การเคลื่อนที่แกน X และแกน Y ในแนวทำมุม 45 องศากับแกน X	81
รูปที่ 4.22 การเคลื่อนที่แกน X และแกน Y ในแนวทำมุม 135 องศากับแกน X	82
รูปที่ 4.23 การเคลื่อนที่แกน X และแกน Y เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลม.....	83
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลม.....	84
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลม.....	85
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสูงสุดและแรงหน่วงเมื่อแยกตามปริมาณกระแสไฟฟ้า	87
รูปที่ 5.2 แรงเฉือนที่จุดครากกับกระแสไฟฟ้า.....	87
รูปที่ 5.3 แสดงสัมประสิทธิ์ความหน่วงกับกระแสไฟฟ้า.....	88

รูปที่ 5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสูงสุดและแรงหน่วงเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปพีชคณิตกำลังสอง	89
รูปที่ 5.5	ฮีสเทอรีซิสของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงชนิดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้	90
รูปที่ 5.6	แผนภาพบล็อกแสดงการทดสอบเบริงตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กด้วยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้แรงกระทำสองทิศทาง.....	91
รูปที่ 5.7	แรงหน่วงกับระยะเวลาการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้.....	92
รูปที่ 5.8	แรงหน่วงกับระยะเวลาการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน 45 องศาแกน X โดยใช้ ...	93
รูปที่ 5.9	แรงหน่วงกับระยะเวลาการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้.....	94
รูปที่ 5.10	แรงหน่วงกับระยะเวลาการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน 135 องศาแกน X โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้.....	95
รูปที่ 5.11	เปรียบเทียบระหว่างค่าควบคุมกับค่าที่วัดได้ เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X ด้วยความถี่ 1 รอบต่อวินาที ระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตร โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ โดยใช้ FL=50 N., Cd=0.50, 1.0 N.s./mm. ตามลำดับ.....	96
รูปที่ 5.12	เปรียบเทียบระหว่างค่าควบคุมกับค่าที่วัดได้ เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน ทำมุม 45 องศาแกน X ด้วยความถี่ 1 รอบต่อวินาที ระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตรในแต่และแกน โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ โดยใช้ FL=50 N.,Cd=0.50 และ 1.0 N.s./mm. ตามลำดับ	97
รูปที่ 5.13	เปรียบเทียบระหว่างค่าควบคุมกับค่าที่วัดได้ เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ด้วยความถี่ 1 รอบต่อวินาที ระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตร โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้โดยใช้ FL=50 N., Cd=0.50 และ 1.0 N.s./mm. ตามลำดับ.....	98

รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบระหว่างค่าควบคุมกับค่าที่วัดได้เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน
135 องศา กับแกน X ด้วยความเร็ว 1 รอบต่อวินาที ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด
15 มิลลิเมตรในแต่ละแกน โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนึ่ง
ผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ โดยใช้ $FL=50$ N., $Cd=0.50$ และ 1.0 N.s./mm.
ตามลำดับ 99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

เนื่องจากแผ่นดินไหวอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สินและสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ และมีผลกระทบต่อผู้คนจำนวนมาก ที่ผ่านมาจากภาคเหนือและตะวันตกของประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตของแผ่นดินไหวที่มีขนาดเล็กจนถึงขนาดปานกลาง จะได้รับผลกระทบหากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น ด้วยเหตุนี้ ได้มีการพิจารณานำระบบควบคุมโครงสร้างเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายเนื่องจากแผ่นดินไหวมาใช้ในการควบคุมโครงสร้างอาคารและโครงสร้างต่าง ๆ เพื่อลดผลตอบสนองของภายใต้แรงกระทำที่จะเกิดขึ้น

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์ระบบควบคุมโครงสร้างได้รับความสนใจและมีการพัฒนาเพื่อลดผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวซึ่งระบบควบคุมโครงสร้างสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือ

1) ระบบควบคุมแบบพาสซีฟ (passive control system) เป็นระบบควบคุมที่ติดตั้งกับโครงสร้างหลักเพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง โดยการสลายพลังงานที่เกิดขึ้น ระบบนี้เป็นระบบที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้งานมีค่าพารามิเตอร์คงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ดังนั้นระบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงสุดหากสภาพการทำงานเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ในตอนแรก

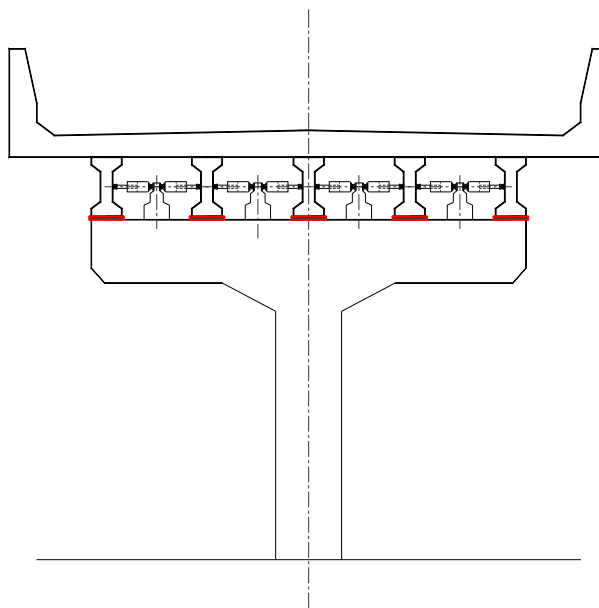
2) ระบบควบคุมแบบแอคทีฟ (active control system) เป็นระบบที่มีการให้แรงกระทำหรือพลังงานภายนอกเข้ามากระทำต่อโครงสร้าง โดยมีขนาดและทิศทางเหมาะสมกับขนาดและทิศทางของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้ขนาดของแรงสั่นสะเทือนลดลงมากแต่ในขณะเดียวกันระบบนี้ก็ใช้พลังงานป้อนให้กับระบบมากด้วยเช่นกัน ระบบควบคุมรูปแบบนี้อาจทำได้ยากหากโครงสร้างมีขนาดใหญ่หรือมีแรงสั่นสะเทือนในระดับที่รุนแรง อีกทั้งอาจมีปัญหาระงับเสถียรภาพของโครงสร้างหากระบบควบคุมทำงานผิดพลาด

3) ระบบควบคุมแบบกึ่งแอคทีฟ (semi-active control system) เป็นระบบที่นำส่วนที่ดีของระบบควบคุมแบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟมารวมกัน เป็นระบบที่สามารถปรับปรุง

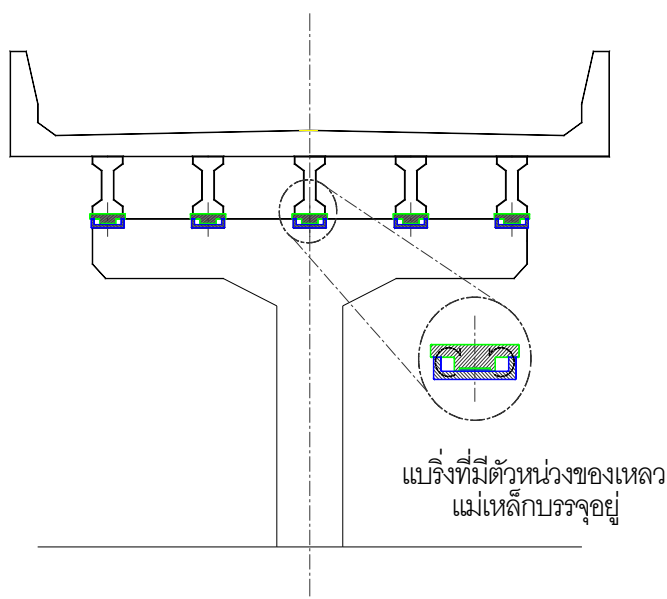
ค่าพารามิเตอร์ของระบบได้โดยอาศัยพลังงานเพียงเล็กน้อย อีกทั้งเป็นระบบที่มีเสถียรภาพสูงในช่วงใช้งาน

เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามระบบพบว่าระบบควบคุมแบบเซมิแอกทีฟเป็นระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพและไม่ทำให้โครงสร้างเสียเสถียรภาพเนื่องจากการควบคุม และในปัจจุบันนี้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก (magnetorheological damper) เป็นอุปกรณ์ควบคุมแบบเซมิแอกทีฟชนิดหนึ่งที่ได้รับความสะดวกเนื่องจากมีความน่าเชื่อถือ สามารถสร้างแรงหน่วงได้เร็ว ใช้พลังงานน้อยเมื่อเทียบกับระบบอื่น ๆ และเมื่อระบบควบคุมไม่ทำงานหรือไฟฟ้าขัดข้อง ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเองจะทำงานเป็นตัวหน่วงแบบพาสซีฟได้ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของระบบ

ในการลดผลตอบสนองแผ่นดินไหวสำหรับโครงสร้างสะพานจะกระทำที่จุดเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างเสาและโครงสร้างคาน โดยการให้แรงหน่วงเพื่อต้านแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่จากแผ่นดินไหวในจุดดังกล่าว เนื่องจากเป็นจุดที่จะมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแนวราบมากที่สุดในช่วงเวลานั้น วิธีการใช้งานในปัจจุบันจะติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กแบบกระบอกลูกสูบที่ให้แรงต้านในทิศทางการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบเท่านั้น ดังนั้นการใช้งานจึงต้องใช้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก 2 ชุดเพื่อให้ได้แรงต้านการเคลื่อนที่ใน 2 ทิศทางแต่ในทางปฏิบัติทำได้ยาก จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงได้มีแนวคิดที่จะใช้คุณสมบัติของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กให้ใช้งานได้ในแนวระนาบเพื่อลดผลตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของสะพาน โดยรวมตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเข้าไว้ในแบร์ริง (แสดงในรูปที่ 1.1) เพื่อประหยัดพื้นที่ใช้งาน แต่ยังคงให้แรงหน่วงและสามารถควบคุมปริมาณแรงได้เพื่อลดผลตอบสนองแผ่นดินไหวสองทิศทาง



(ก) ภาพตัดขวางของสะพานแสดงตัวหนังสือของเหลวมแม่เหล็กแบบกระบอกลูกสูบ



(ข) ภาพตัดขวางของสะพาน แสดงแปรงตัวหนังสือของเหลวมแม่เหล็ก

รูปที่ 1.1 การใช้งานตัวหนังสือของเหลวมแม่เหล็กแบบกระบอกลูกสูบและแปรงตัวหนังสือของเหลวมแม่เหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์คือ

1. เพื่อพัฒนาแบร็งตัวหนองของเหลวแม่เหล็กที่สามารถสร้างแรงหนองได้สองทิศทาง
2. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบร็งตัวหนองของเหลวแม่เหล็กเพื่อวิเคราะห์ผล
3. ควบคุมแรงหนองแบบเซมิแอกทีฟด้วยรูปแบบการควบคุมแรงหนองแบบหนึ่งดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

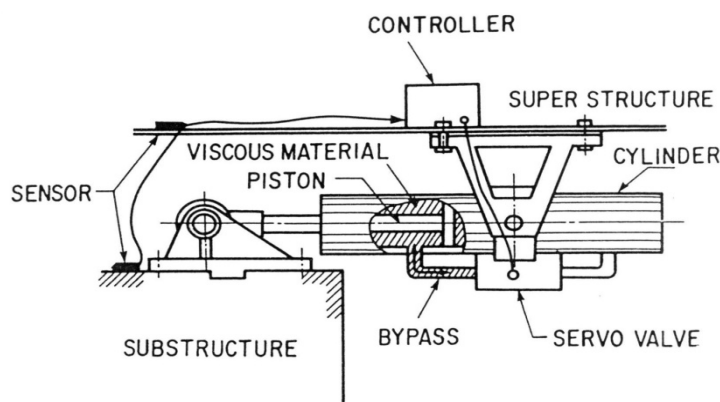
งานวิจัยนี้มีขอบเขตที่ครอบคลุมเฉพาะแบบจำลองของแบร็งตัวหนองของเหลวแม่เหล็ก โดยพิจารณาเฉพาะระยะการเคลื่อนที่ 15 มิลลิเมตรในแต่ละทิศทางและแรงในแนวราบ และไม่คิดผลของแรงเสียดทานของแบร็ง

บทที่ 2

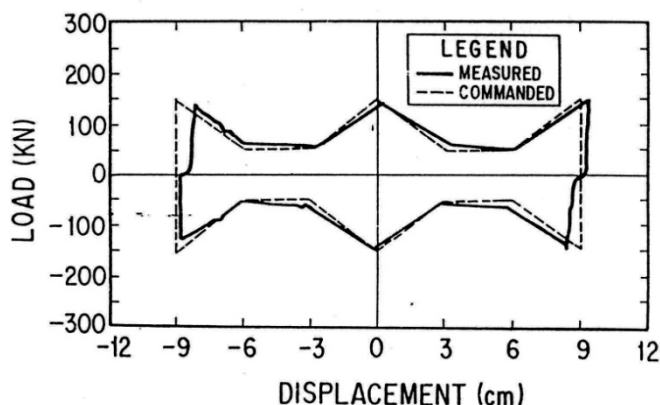
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

Kawashima และ Unjoh (1994) ได้วิเคราะห์และทดสอบแบบจำลองสะพานและศึกษาตัวหน่วงขนาด 200 กิโลนิวตัน มีระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 13 เซนติเมตร (รูปที่ 2.1) ที่สามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงเพื่อลดผลตอบแทนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวโดยทำหน้าที่สลายพลังงานที่กระทำต่อโครงสร้าง เป็นตัวหน่วงหยุดการเคลื่อนที่ (damper stopper) เมื่อมีการเคลื่อนที่เล็กน้อย หรือเป็นตัวรับแรงกระแทกเมื่อมีการเคลื่อนที่มากกว่าที่กำหนด การทำงานของระบบจะใช้เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นและคำนวณหาระดับแรงหน่วงที่เหมาะสมโดยปรับขนาดช่องเปิดเพื่อให้ได้แรงที่สอดคล้องกันในแต่ละช่วงเวลา จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองที่สอดคล้องกับตัวหน่วงที่ศึกษา แสดงให้เห็นว่าสามารถลดระยะการเคลื่อนที่สูงสุดได้ 26% และลดความเร่งที่เกิดขึ้นบนพื้นสะพานลงได้ 44% เทียบกับสะพานที่ไม่มีการควบคุม และทำการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับแบบจำลองสะพานหนัก 390 กิโลนิวตันด้วยเครื่องจำลองแผ่นดินไหว เมื่อพิจารณารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงกับระยะการเคลื่อนที่ (รูปที่ 2.2) เปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดกับค่าที่วัดได้ ค่าที่คลาดเคลื่อนเกิดจากตัวหน่วงของเหลวที่ทำงานในลักษณะที่ใช้กลไกในการเปิดและปิดวาล์วจะมีความล่าช้าเนื่องจากข้อจำกัดของกลไก



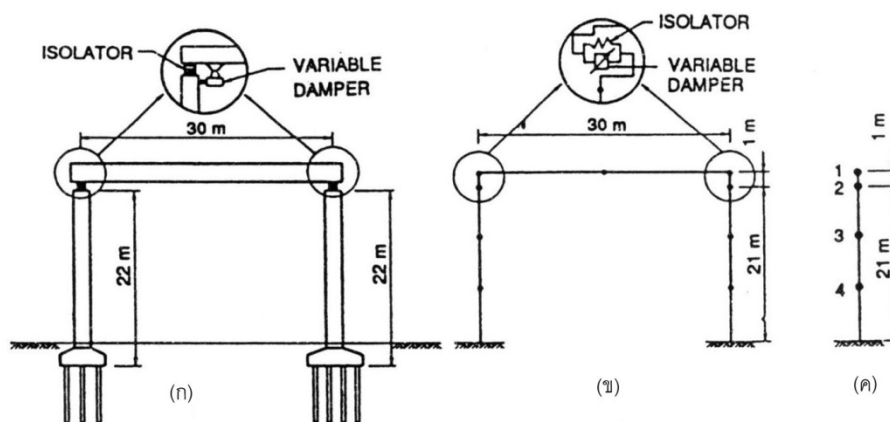
รูปที่ 2.1 ตัวหน่วงที่ปรับขนาดช่องเปิดของวาล์ว (จาก Kawashima และ Unjoh, 1994)



รูปที่ 2.2 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงที่ใช้กับตัวหน่วงของเหลวและแรงหน่วงที่วัดได้
จากการควบคุม (จาก Kawashima และ Unjoh, 1994)

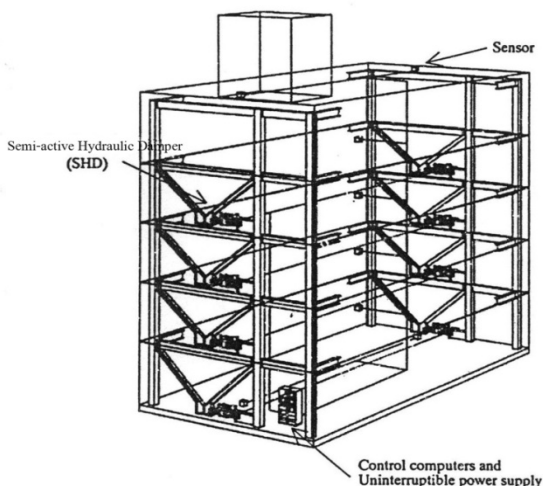
Yang และคณะ (1995) ได้ศึกษาและทดสอบแบบจำลองของระบบไฮบริทเพื่อต้านแรงสั่นสะเทือนที่กระทำกับโครงสร้างสะพาน ในการทดลองได้ทดสอบใน 2 รูปแบบ แบบแรกเป็นแบบแบริงยางร่วมกับตัวหน่วงที่ปรับค่าได้หรือเครื่องให้แรง (rubber bearing and variable damper or actuator) แบบที่สองเป็นแบริงที่ขยับตัวได้ (sliding bearing) ร่วมกับเครื่องให้แรง ในการควบคุมใช้ระบบควบคุมทนทาน (robust control) ร่วมกับทฤษฎีระบบโครงสร้างแปรผัน (variable structure system, VSS) หรือระบบควบคุมเลื่อนตัว (sliding mode control, SMC) โดยใช้ค่าป้อนกลับค่าผลตอบสนองจากเครื่องวัดที่พื้นสะพาน ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง (รูปที่ 2.3) แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถใช้ลดผลตอบสนองแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทนทานต่อความคลาดเคลื่อนของตัวแปรที่ใช้ควบคุม และจากการทดลองจริงสรุปได้ดังนี้

1. ระบบแบริงแยกฐานชนิดเลื่อนได้แบบแพสซีฟ (passive sliding-bearing isolator) จะมีประสิทธิภาพในการลดผลตอบสนองของสะพานเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่มีอัตราเร่งที่พื้นดินมากกว่า 0.2g แต่ค่าการเคลื่อนที่ของโครงสร้างอาจมีค่าสูงเกินค่าที่กำหนดได้
2. ระบบแยกฐานที่เลื่อนได้ (sliding isolation) เมื่อติดตั้งร่วมกับตัวให้แรง (actuator) จะมีประสิทธิภาพในการลดผลตอบสนองของสะพานและลดระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ได้ดีมาก
3. ระบบแบริงยางและตัวหน่วงที่ปรับค่าได้หรือระบบที่ใช้เครื่องให้แรง (actuator) จะมีประสิทธิภาพมากในการลดผลตอบสนองแผ่นดินไหวที่มีต่อสะพาน



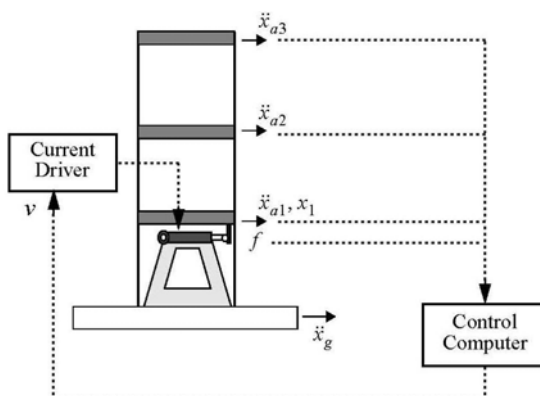
รูปที่ 2.3 รูปแบบสะพานและแบบจำลองที่ใช้ (ก) จุดติดตั้งตัวหน่วงและ isolator (ข) แบบจำลองแบบมวลรวม (ค) ระบบที่มีระดับชั้นความเร็วเท่ากับสี่ (จาก Yang และคณะ, 1995)

Kurata และคณะ (1996) ได้ศึกษาใช้ตัวหน่วงของเหลวแบบเซมิแอกทีฟเพื่อควบคุมผลตอบสนองแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างอาคารจริงซึ่งเป็นโครงสร้างเหล็กขนาด 5 ชั้น เนื่องจากตัวหน่วงของเหลวแบบเซมิแอกทีฟที่ใช้สามารถให้แรงหน่วงขนาด 1000 กิโลนิวตัน ขณะที่ใช้พลังงานน้อยในการควบคุมและมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงสามารถติดตั้งตัวหน่วงของเหลวภายในอาคารได้และในการใช้งานนี้ได้ติดตั้งตัวหน่วงจำนวน 8 ตัวกับโครงสร้าง (รูปที่ 2.4) ร่วมกับการใช้ตัวควบคุมแบบ LQR (linear quadratic regulator) เพื่อควบคุมแรงโดยมีค่าความเร็วจากทุก ๆ ชั้นเป็นสัญญาณป้อนกลับสำหรับระบบควบคุม ระบบทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ติดตั้งที่ชั้น 1 ผลการทดสอบตัวหน่วงแสดงถึงประสิทธิภาพในการควบคุมแรงให้เป็นไปตามสัญญาณควบคุม ส่วนประสิทธิภาพของระบบควบคุมถูกทดสอบด้วยการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง พบว่าอาคารสามารถทนต่อแรงแผ่นดินไหวขั้นรุนแรงได้



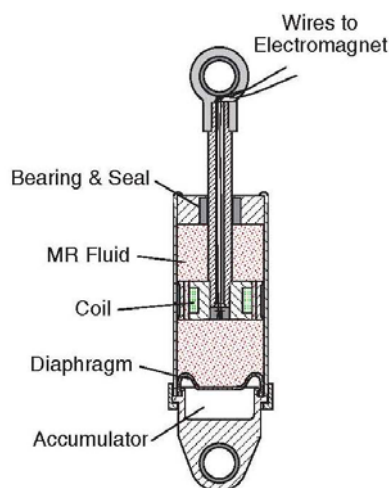
รูปที่ 2.4 แบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแบบเซมิแอกทีฟ
(จาก Kurata และคณะ, 1996)

Dyke และคณะ (1996) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมแบบเซมิแอกทีฟ ด้วยตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเพื่อลดผลตอบสนองของภายใต้แรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างในงานวิศวกรรมโยธา โดยใช้ทฤษฎีควบคุมแบบคลิปปอพติมอล (clipped-optimal control) โดยใช้สัญญาณความเร่งป้อนกลับสำหรับการควบคุมแรงหน่วงของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้ในการควบคุมแบบจำลองอาคาร 3 ชั้นที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ชั้นล่างดังแสดงในรูปที่ 2.5 ผลที่ได้แสดงว่าในการใช้งานระบบควบคุมแบบคลิปปอพติมอลสามารถลดค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบแอกทีฟ ขณะที่ใช้พลังงานในการควบคุมน้อยกว่า

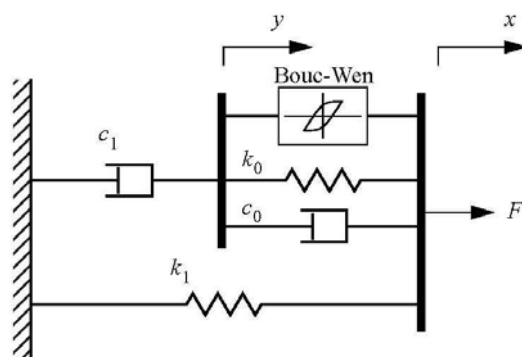


รูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ชั้นล่างของแบบจำลองอาคาร 3 ชั้น
(จาก Dyke และคณะ, 1996)

Spencer และคณะ (1997) ได้เสนอแบบจำลองตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่แสดงใน รูปที่ 2.6 โดยใช้แบบจำลอง Bouc-Wen (รูปที่ 2.7) แบบจำลองนี้สามารถใช้อธิบายพฤติกรรม ฮีสเทรีติกของระบบ (hysteretic behavior) ได้ดี แล้วเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์กับผลที่ได้ จากการทดลองของตัวหน่วงของเหลวต้นแบบ แบบจำลองที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของตัวหน่วง ของเหลวที่มีเส้นแรงแสนามแม่เหล็กไม่สม่ำเสมอได้ (fluctuating magnetic fields) โดยปรับตัวแปร ในแบบจำลองให้อยู่ในเทอมของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดกระแสที่ถูกควบคุมด้วย แรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถให้ค่าที่ถูกต้องและใช้ได้ในช่วงการ ทำงานที่กว้าง จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับออกแบบงานควบคุมและวิเคราะห์ผล

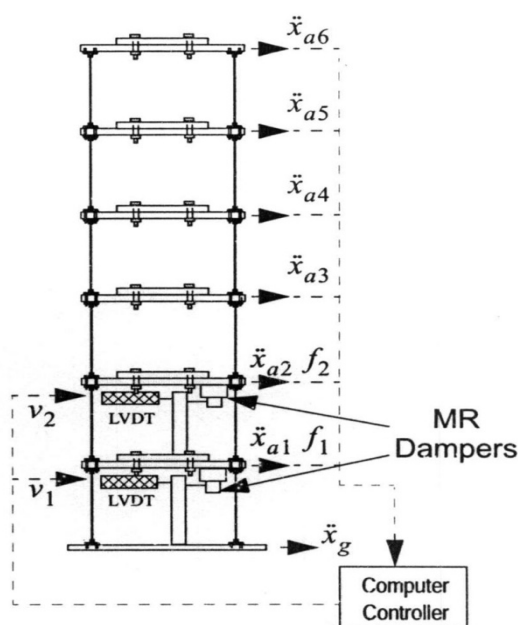


รูปที่ 2.6 ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กต้นแบบ (จาก Spencer และคณะ, 1997)



รูปที่ 2.7 แบบจำลองตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเสนอโดย Spencer
(จาก Spencer และคณะ, 1997)

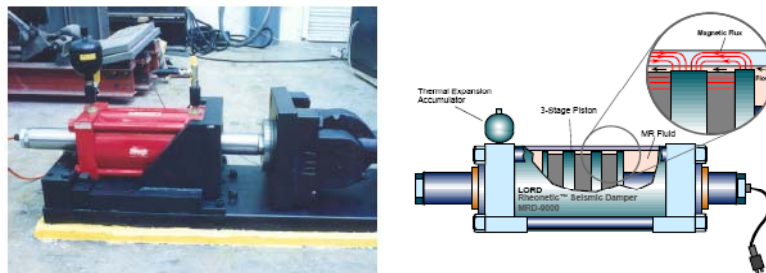
Jansen และ คณะ (2000) ได้ศึกษาแบบจำลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ เช่น ตัวควบคุมเลียปูนอฟ (Lyanpunov controller) ตัวควบคุมแบบแบ่ง (decentralized bang-bang controller) รูปแบบควบคุมแรงฟืดแบบมอดูเลทโฮโมจีเนียส (modulate homogeneous friction algorithm) และตัวควบคุมแบบคลิปปออปติมอล (clipped optimal) และนำมาควบคุมตัวห้วงของเหลวแม่เหล็ก ทำการทดลองด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมสำหรับแบบจำลองอาคาร 6 ชั้นที่มีตัวห้วงของเหลวแม่เหล็กติดตั้งอยู่ที่สองชั้นล่าง (รูปที่ 2.8) โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro แล้วพิจารณาการเคลื่อนตัว และความเร่งที่ลดลงเนื่องจากผลของระบบควบคุม



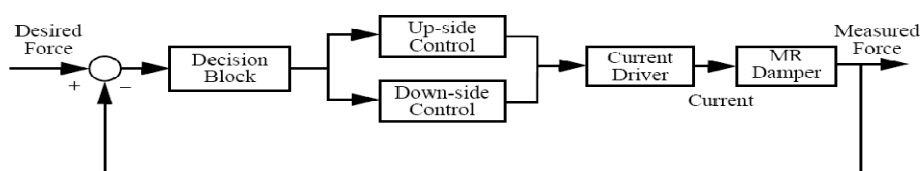
รูปที่ 2.8 แบบจำลองอาคาร 6 ชั้นที่มีตัวห้วงของเหลวแม่เหล็กติดตั้งอยู่ที่สองชั้นล่าง
(จาก Jansen และ คณะ, 2000)

Yang และคณะ (2000) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของตัวห้วงของของเหลวแม่เหล็กขนาด 20 ตัน แสดงในรูปที่ 2.9 ผลการทดลองที่ได้แสดงถึงความสามารถสร้างแรงหน่วงปริมาณสูง ๆ ของของเหลวแม่เหล็กในขณะที่ใช้พลังงานในการควบคุมต่ำ ในการทดสอบได้ใช้การสังเกตและสอบทานผลการทดลองกับรูปแบบการควบคุมต่าง ๆ เพื่อให้ได้ค่าตอบสนองทางพลศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด ในการทดลอง ตัวห้วงของเหลว

แม่เหล็กถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมป้อนกลับโดยใช้แรงหน่วงเป็นตัวแปรควบคุมป้อนกลับที่มีการทำงานตามแผนภาพบล็อกแสดงดังรูปที่ 2.10

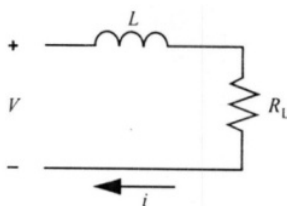


รูปที่ 2.9 ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กขนาด 20 ตัน (จาก Yang และคณะ, 2001)

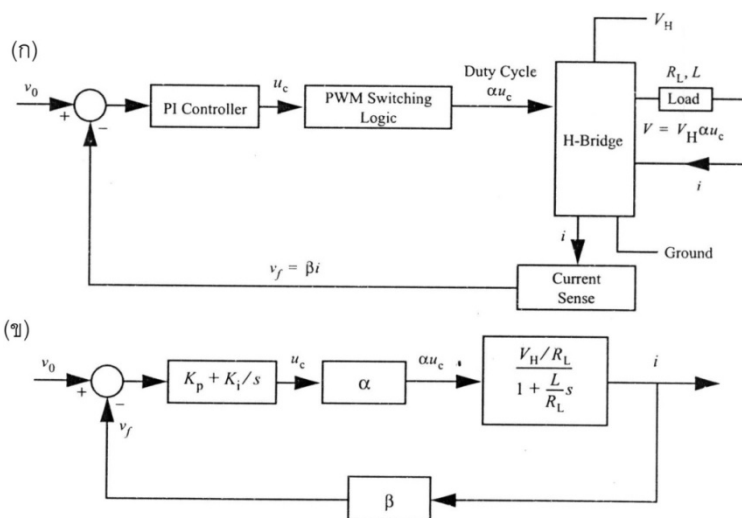


รูปที่ 2.10 แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้แรงหน่วงเป็นตัวแปรควบคุมป้อนกลับ (จาก Yang และคณะ, 2001)

Yang และคณะ (2001) ได้เสนอแบบจำลองทางพลศาสตร์สำหรับตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเพื่อแทนที่แบบจำลองแบบสถิตย์ที่ใช้ทั่วไปก่อนหน้านี้ เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้อยู่ไม่สอดคล้องกับการทำงานจริงของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเมื่อต้องรับแรงพลศาสตร์แบบจำลองที่เสนอประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกเป็นแบบจำลองทางพลศาสตร์ทางไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (power supply) แสดงในรูปที่ 2.12 และวงจรไฟฟ้าในตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก (รูปที่ 2.11) ที่ปกติแล้วเป็นตัวหนึ่งที่ทำให้เกิดเวลาประวิง (time delay) ในการตอบสนองของระบบ ส่วนที่สองคือแบบจำลองทางพลศาสตร์ทางกลของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กในกรณีนี้ใช้แบบจำลอง Bouc-Wen จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองพลศาสตร์ที่เสนอสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของระบบได้ดี



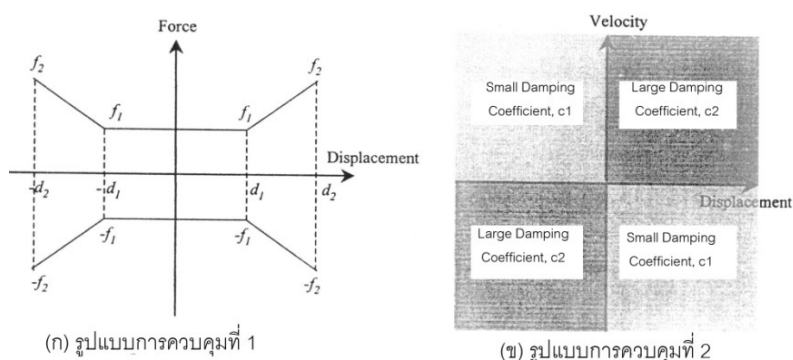
รูปที่ 2.11 วงจรไฟฟ้าของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก (จาก Yang และคณะ, 2001)



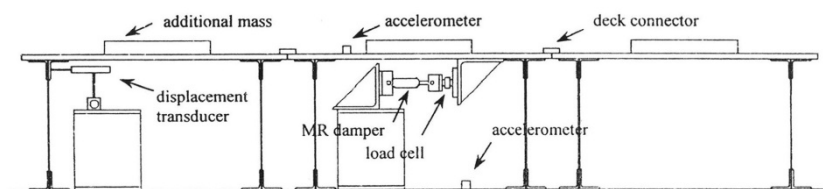
รูปที่ 2.12 แผนภาพบล็อกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ก.) แผนภาพเค้าร่างของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบพัลส์วิตช์มอดูเลชันที่มีวงจรถ่ายช่วยควบคุม (servo amplifier) ข.) แผนภาพบล็อกแสดงฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า (จาก Yang และคณะ, 2001)

Ruangrassamee และ Kawashima (2001) ได้ศึกษาการใช้งานตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก ในการควบคุมแบบเซมิแอกทีฟเพื่อลดผลตอบสนองของสะพาน ทำการทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ใช้ด้วยการให้เคลื่อนที่เป็นวัฏจักรแล้วปรับเปลี่ยนความถี่ ขนาดของการเคลื่อนที่ และปริมาณของกระแสที่ป้อนให้กับตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กด้วยการจำลองให้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กประกอบด้วยชิ้นส่วนแรงเสียดทานและชิ้นส่วนแรงหนืดต่อขนานกัน ในการทดสอบใช้รูปแบบในการควบคุม 2 รูปแบบ (แสดงในรูปที่ 2.13) เพื่อควบคุมแรงหน่วงสำหรับแต่ละระยะการเคลื่อนที่และความเร็วของระบบ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงหน่วงที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กและ

สามารถให้ค่าแรงหน่วงได้ตามที่ต้องการ แต่ในการใช้งานจริงจะมีความไม่คงที่ของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความล่าช้าในการสร้างแรงหน่วง นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบแบบจำลองสะพานที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก (รูปที่ 2.14) ด้วยเครื่องจำลองแผ่นดินไหว (shaking table) ผลปรากฏว่ารูปแบบการควบคุมแบบแรกมีผลในการลดระยะการเคลื่อนที่ดีกว่ารูปแบบการควบคุมแบบที่สอง ในขณะที่ใช้แรงหน่วงเพื่อควบคุมใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยแบบจำลองซึ่งให้ค่าผลลัพธ์สอดคล้องกันอยู่ในเกณฑ์ที่ดี



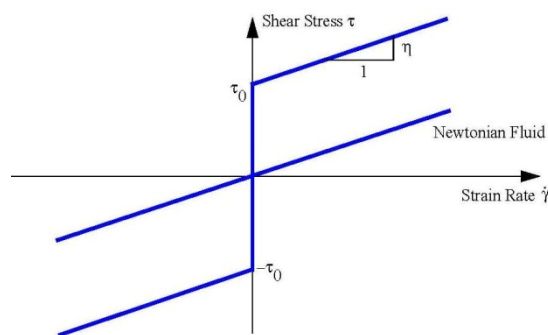
รูปที่ 2.13 รูปแบบการควบคุมที่ใช้ในการทดลอง (จาก Ruangrassamee และ Kawashima, 2001)



รูปที่ 2.14 แบบจำลองสะพานที่ทดสอบบนเครื่องจำลองแผ่นดินไหว (จาก Ruangrassamee และ Kawashima, 2001)

Yang และคณะ (2002) ได้ศึกษาและออกแบบตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กขนาด 20 ตันที่มีคุณสมบัติแสดงในตารางที่ 1 การทดลองใช้แบบจำลองสถิตของของเหลวแม่เหล็ก เปรียบเทียบกัน 2 รูปแบบคือ แบบจำลองแบบ axisymmetric และแบบจำลองแบบ parallel-plate ทั้งนี้แบบจำลองทั้งสองมีพื้นฐานอยู่บนแบบจำลองฮีสเทอรีซิสของ bouc-wen ส่วนของเหลวแม่เหล็กที่ใช้จะใช้คุณสมบัติตามแบบจำลองพลาสติกของบิงแฮม (รูปที่ 2.15) จากผลการทดลองแบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบ อีกทั้งในการทดลองนี้ได้

ทดสอบเวลาในการตอบสนอง (dynamic response time) ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก ผลปรากฏว่า ถ้าต่อขดลวดทองแดงขนาดกันจะทำให้เวลาในการตอบสนองเร็วกว่าการต่อขดลวดทองแดงอนุกรมกัน



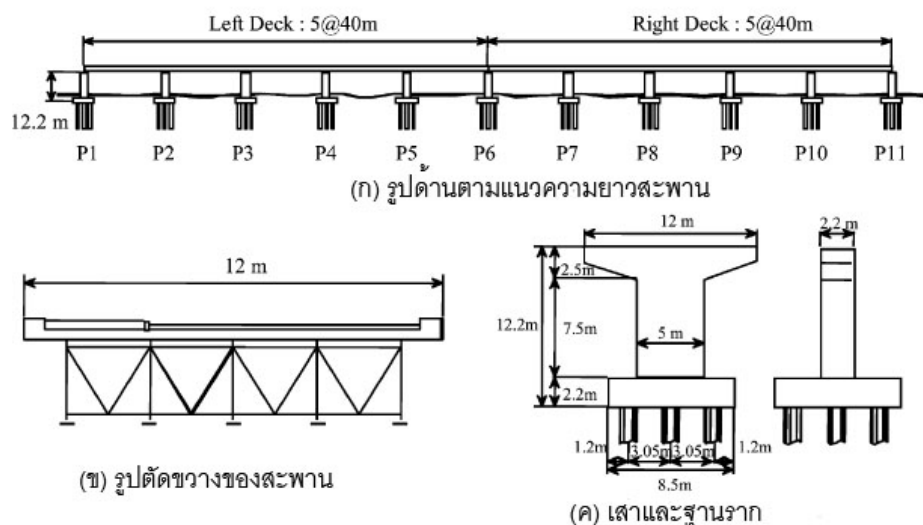
รูปที่ 2.15 แสดงคุณสมบัติของแบบจำลองพลาสติกของบิงแฮม (จาก Yang และคณะ, 2002)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ใช้ในการออกแบบ (จาก Yang และคณะ, 2002)

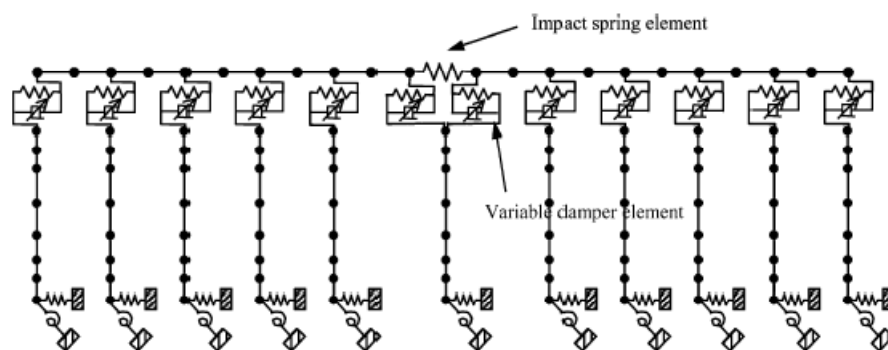
Stroke	±8 cm
F_{\max} / F_{\min}	10.1 @ 10 cm/s
Cylinder Bore (ID)	20.32 cm
Max. Input Power	< 50 watts
Max. Force (nominal)	200,000 N
Effective Axial Pole Length	8.4 cm
Coils	3×1050 turns
Fluid $\eta / \tau_{0(\text{field})}^2$	2×10^{-10} s/Pa
Apparent Fluid η	1.3 Pa-s
Fluid $\tau_{0(\text{field})}$ max	62 kPa
Gap	2 mm
Active Fluid Volume	~90 cm ³
Wire	16 gauge
Inductance (L)	~6.6 henries
Coil Resistance (R)	3×7.3 ohms

Ruangrassamee และ Kawashima (2003) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ตัวหน่วงแบบเซมิแคดทีฟในการลดผลตอบสนองจากแผ่นดินไหวรวมถึงผลการกระแทกกันของคานของสะพานช่วงยาว 5 เมตร 8 ช่วงรวมความยาวทั้งสิ้น 400 เมตรแสดงในรูปที่ 2.16 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงใน รูปที่ 2.17 การทดสอบได้ติดตั้งตัวหน่วงไว้ระหว่างคานและตอม่อ

ในการทดสอบได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวหน่วงแบบปรับค่าได้ โดยปรับเปลี่ยนแรงหน่วงเป็นแบบสองขั้น (two-step viscous damping) เมื่อคานเคลื่อนจากตำแหน่งเดิมระบบจะเพิ่มสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้สูงขึ้นเพื่อสลายพลังงานและลดระยะเวลาการเคลื่อนที่ ผลการทดสอบพบว่าสามารถลดผลของการกระแทกกันระหว่างคานสะพานที่เป็นผลให้เกิดความเร่งที่มีค่าสูงขึ้นฉับพลัน ตามแนวความยาวสะพาน อีกทั้งช่วยลดการหมุนที่เกิดขึ้นในฐานของตอม่อได้ดี



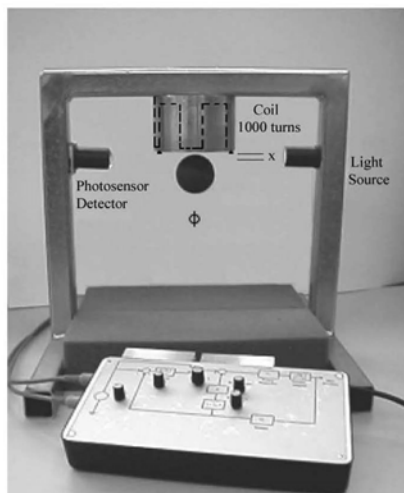
รูปที่ 2.16 รูปแบบสะพานในการศึกษา ก) รูปด้านตามแนวความยาวสะพาน ข) รูปตัดขวางของสะพาน ค) เสาและฐานราก (จาก Ruangrassamee และ Kawashima, 2003)



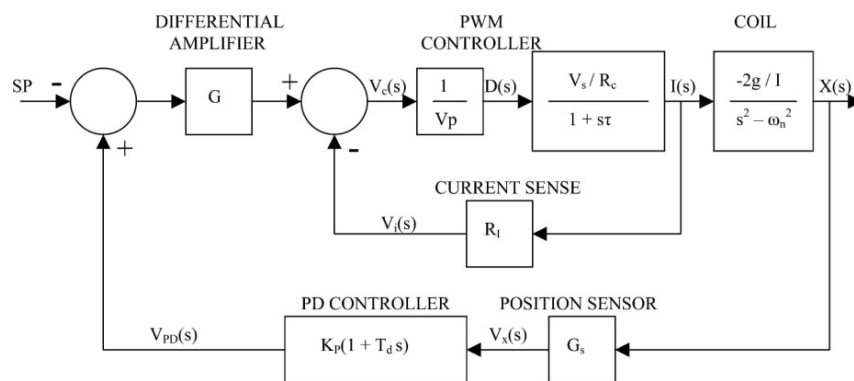
รูปที่ 2.17 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (จาก Ruangrassamee และ Kawashima, 2003)

Hurley และคณะ (2004) ได้ศึกษาการใช้แรงแม่เหล็กเพื่อยกน้ำหนักทรงกลมโลหะหนัก 0.8 กิโลกรัมให้ลอยสูง 6 ซม. โดยสนามแม่เหล็กที่ใช้ได้พลังงานจากแหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (pulse width modulation, PWM) สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดเพื่อใช้สร้าง

สนามแม่เหล็กที่ใช้อยู่กลุ่กทรงกลมโลหะนั้น ในการออกแบบพิจารณาวงจรมแม่เหล็ก ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ (dynamic response) และการออกแบบตัวควบคุมสำหรับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์วิตช์มอดูเลชัน ในกรณีนี้ได้ใช้ตัวควบคุมพีดี (proportional-differentiation controller) เป็นตัวชดเชย (compensator) ในระบบควบคุม



รูปที่ 2.18 อุปกรณ์ในการทดลองเพื่อยกกลุ่กทรงกลมแม่เหล็ก (จาก Hurley และคณะ, 2004)

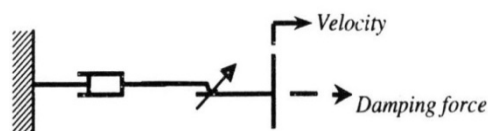


รูปที่ 2.19 แผนภาพบล็อกแสดงฟังก์ชันถ่ายโอน ของแหล่งกำเนิดกระแสและระบบควบคุมป้อนกลับ (จาก Hurley และคณะ, 2004)

Takesue และคณะ (2004) ได้นำตัวหวนของเหลวแม่เหล็กมาใช้เป็นชิ้นส่วนกลไกเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของระบบเครื่องจักรกล ในการทดลองได้ทดสอบคุณสมบัติทางสถิติศาสตร์ซึ่งได้ผลเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ แต่ในส่วนของผลตอบสนองในช่วงทรานเซียน (transient response) ที่ไม่ได้พิจารณาในขั้นตอนการออกแบบนั้นกลับให้ผลตอบสนองที่ไม่เร็วพอ ดังนั้นจึง

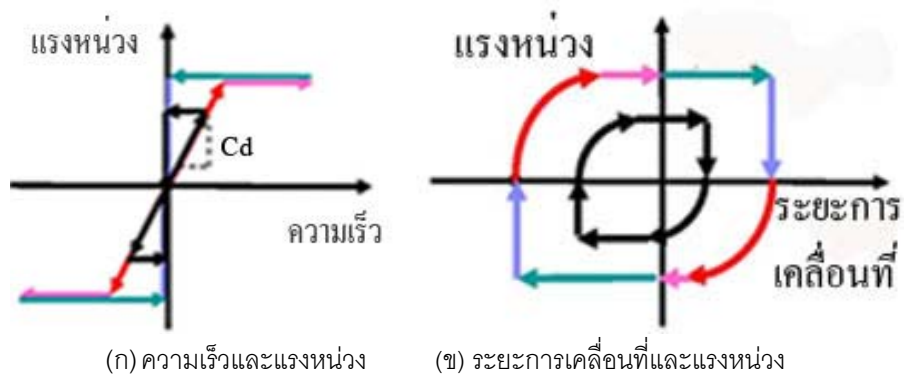
ได้ศึกษาผลตอบสนองทางพลศาสตร์ (dynamic response) ของตัวให้แรงของเหลวแม่เหล็ก รวมถึงการวิเคราะห์ผลของแม่เหล็กในช่วงทรานเซียนและผลของกระแสหมุนวน (eddy current) ในวงจรมแม่เหล็ก ในการปรับปรุงผลตอบสนอง ได้ทำการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้และปรับเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ทำให้ผลของกระแสหมุนวนลดลงและทำให้ผลตอบสนองในช่วงทรานเซียนเร็วขึ้นอย่างชัดเจน

Ruangrassamee และคณะ (2005) ได้เสนอการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ (viscous-plus-variable-friction damping force, VVF) ที่ได้นำข้อดีของตัวหน่วงแบบหนืดมาใช้ร่วมกับแบบแรงเสียดทาน โดยแบบจำลองของการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้นี้ได้นำขึ้นส่วนทั้งสองแบบมาต่อกันแบบอนุกรม (รูปที่ 2.20) เมื่อเพิ่มความเร็วจากหยุดนิ่งตัวหน่วงแบบหนืดจะให้แรงต้านซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าแรงหนืดสูงสุดจะกลายเป็นแรงฝืดที่มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ที่เหลืออยู่ (แสดงใน รูปที่ 2.21) แบบจำลองนี้จะมีค่าตัวแปรอยู่ 2 ตัวคือ สัมประสิทธิ์ความหน่วงของชั้นส่วนความหนืด (C_d) และค่าแรงฝืดสูงสุดของชั้นส่วนแรงเสียดทาน (FL) ในการศึกษาประสิทธิภาพของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่มีตัวควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ ให้ผลตอบสนองที่ดีเมื่อแบบจำลองมีการเคลื่อนที่ในช่วงความถี่ 1 รอบต่อวินาที และเมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบดังกล่าวเพื่อใช้ในการควบคุมผลตอบสนองของอาคารแยกฐาน (base-isolated building) โดยติดตั้งตัวหน่วงในแนวตามยาวและตามขวางของอาคารตรงบริเวณแบร์ริงที่แยกฐาน (isolation bearing) จากการวิเคราะห์พบว่าช่วยลดระยะการเคลื่อนที่ของฐานได้ประมาณ 20-50% ในขณะที่มีความเร่งที่พื้นสะพานสูงขึ้นประมาณ 20%



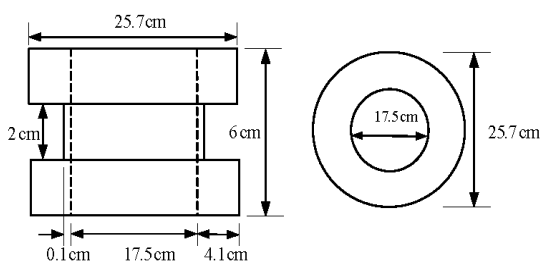
รูปที่ 2.20 แบบจำลองสำหรับรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้

(จาก Ruangrassamee และคณะ, 2005)

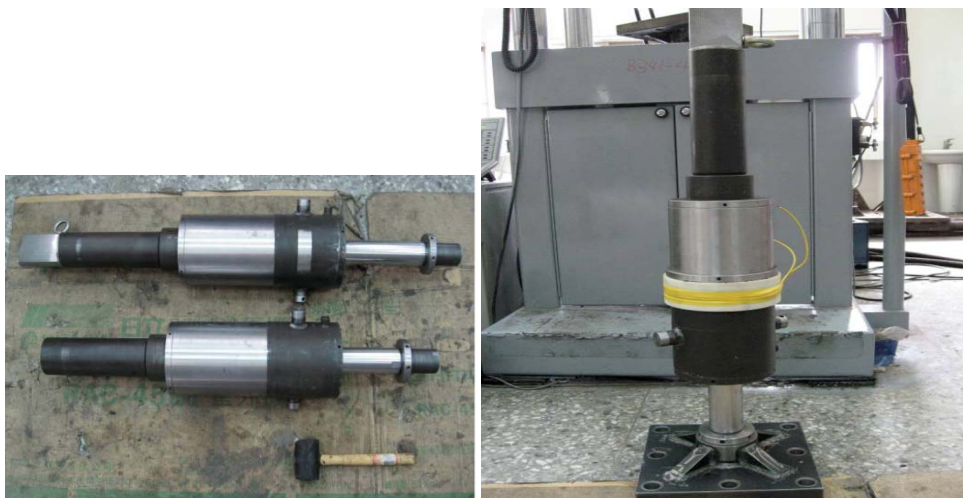


รูปที่ 2.21 ฮิสเทอรีซิสของรูปแบบการควบคุมแรงทวนแบบหนึ่งผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ (จาก Ruangrassamee และคณะ, 2005)

Wu และคณะ (2008) ได้ศึกษาประสิทธิภาพและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กขนาด 200 kN. ที่ได้พัฒนาขึ้นโดยบรรจุเหลวแม่เหล็กระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ สนามแม่เหล็กเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดทองแดงที่พันรอบปลอกพลาสติก (แสดงใน รูปที่ 2.22) สวมไว้ด้านนอกกระบอกสูบทำให้สามารถปรับเพิ่มจำนวนรอบของลวดทองแดงที่พันอยู่ กระบอกสูบที่ผิวด้านในปรับให้ต่างกันได้โดยทำเป็นผิวเรียบและบากเป็นร่อง(แสดงใน รูปที่ 2.24) สมบัติทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงทดสอบโดยให้มีการเคลื่อนที่แบบวัฏจักรด้วยความถี่ 0.1, 0.2, และ 0.3 รอบต่อวินาที ด้วยระยะการเคลื่อนที่ 1, 3 และ 5 มิลลิเมตรในขณะที่ให้แรงดันไฟฟ้า 0, 30 และ 47 โวลต์ตามลำดับ

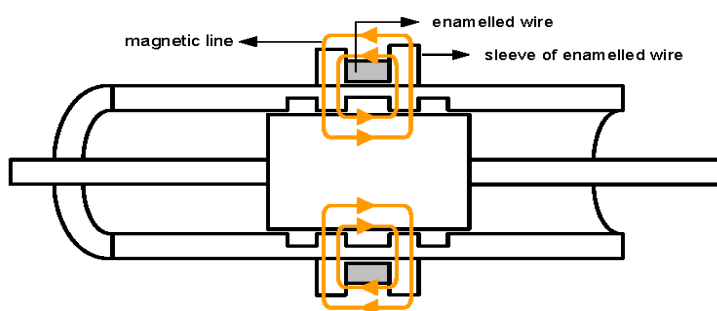


รูปที่ 2.22 ขนาดของปลอกพลาสติกที่พันด้วยลวดทองแดง (จาก Wu และคณะ, 2008)



รูปที่ 2.23 ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเมื่อติดตั้งปลอกพลาสติกที่พันลวดทองแดงไว้ภายนอก

(จาก Wu และคณะ, 2008)

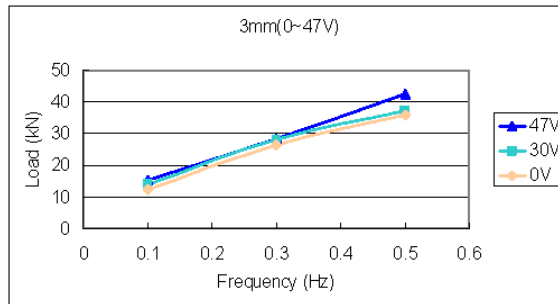


รูปที่ 2.24 เส้นแรงแม่เหล็กและกระบอกสูบที่ผิวด้านในบากเป็นร่อง (จาก Wu และคณะ, 2008)

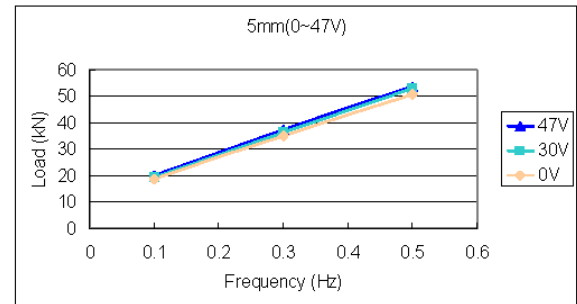
ในกรณีที่ไม่มีรอยบากในกระบอกสูบจะได้แรงหน่วงสูงสุดแสดงในรูปที่ 2.25 ส่วนที่กระบอกสูบลมมีรอยบากแรงหน่วงสูงสุดแสดงในรูปที่ 2.26 สำหรับการเคลื่อนที่ 3 และ 5 มิลลิเมตรตามลำดับ จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 2.25 และรูปที่ 2.26 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ได้แรงหน่วงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในกรณีที่กระบอกสูบลมมีรอยบาก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กถูกส่งผ่านจากกระบอกสูบไปยังลูกสูบผ่านทางรอยบากทำให้บริเวณดังกล่าวมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูง

จากผลการทดสอบแสดงถึงประสิทธิภาพในการควบคุมแรงหน่วงด้วยแรงดันไฟฟ้าของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มรอยบากภายในกระบอกสูบที่ทำให้รูปแบบของเส้นแรงแม่เหล็กมีความหนาแน่นและรวมตัวอยู่ในบริเวณดังกล่าวและส่งผลต่อของเหลวแม่เหล็กได้ดีกว่าแบบที่ไม่มีรอยบาก ส่วนพิกัดแรงหน่วงของตัวหน่วงนอกจากจะขึ้นกับการออกแบบของผู้ผลิตแล้วยังขึ้นกับความเร็วที่เคลื่อนที่อีกด้วย และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลอง

เชิงคณิตศาสตร์จะเห็นว่าพฤติกรรมของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กสามารถใช้แบบจำลองของ Spencer เพื่อทำนายพฤติกรรมของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กในรูปแบบนี้ได้



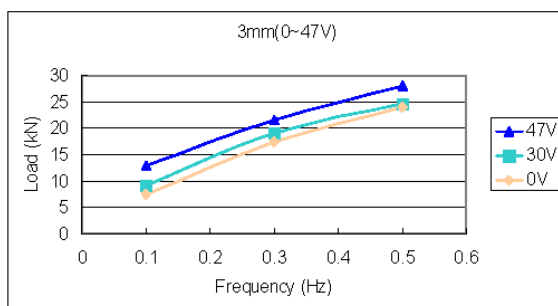
(ก) ระยะการเคลื่อนที่ 3 ม.ม.



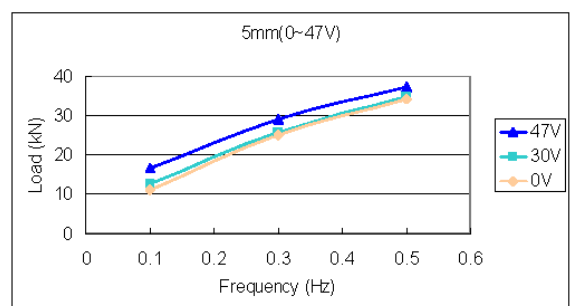
(ข) ระยะการเคลื่อนที่ 5 ม.ม.

รูปที่ 2.25 แรงหน่วงสูงสุดกรณีไม่มีรอยบากและกระตุ้นด้วยความถี่ต่าง ๆ กัน

(จาก Wu และคณะ, 2008)



(ก) ระยะการเคลื่อนที่ 3 ม.ม.

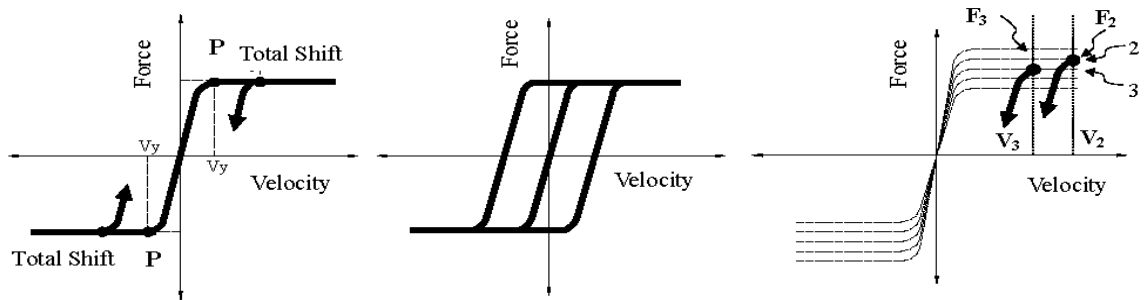


(ข) ระยะการเคลื่อนที่ 5 ม.ม.

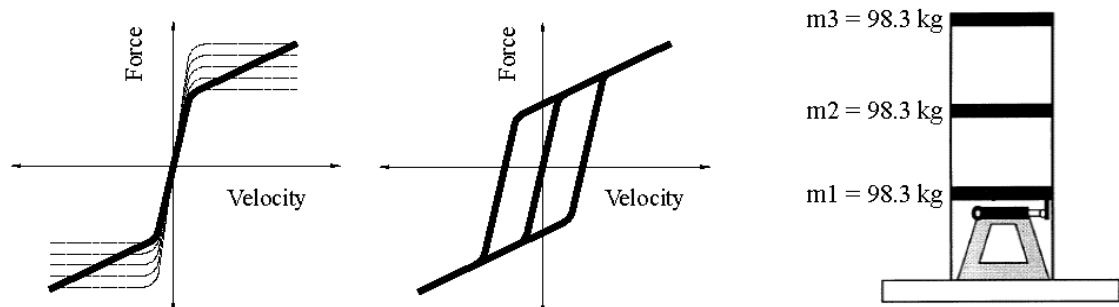
รูปที่ 2.26 แรงหน่วงสูงสุดกรณีที่มีรอยบากและกระตุ้นด้วยความถี่ต่าง ๆ กัน

(จาก Wu และคณะ, 2008)

Das และคณะ (2008) ได้ใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบฟuzzyลอจิกสำหรับตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยใช้แรงหน่วงและความเร็วเป็นตัวแปรเข้าและออกตามลำดับ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก ทดสอบโดยให้เคลื่อนที่แบบวงจกร ข้อมูลที่ได้นำมาสร้างฟuzzyเซตที่มีฟังก์ชันสมาชิก (membership function) ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงหน่วง จากเซตเหล่านี้สามารถสร้างความสัมพันธ์แบบฮิสเตอร์ีซิส ที่เป็นรูปแบบตามคุณสมบัติของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กแบบยืดหยุ่นพลาสติก (elasto-plastic) โดยการเลื่อน (shift) ในแกนตั้งและแกนนอน (แสดงในรูปที่ 2.27) รวมถึงประมาณค่าถ่วงน้ำหนัก (interpolate) เพื่อให้ได้รูปแบบแรงหน่วงแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 (ก) การเคลื่อนที่ในแวนอน (ข) กราฟฮีสเทอรีซิสจากการเคลื่อนที่ในแวนอน (ค) การเคลื่อนที่ในแวนอนตั้ง (จาก Das และคณะ, 2008)



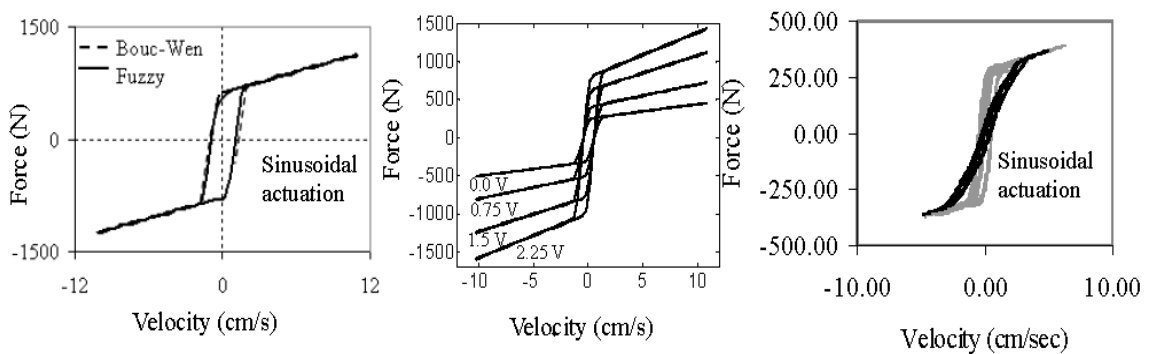
รูปที่ 2.28 (ก) กราฟเส้นแกนหลัก (ข) กราฟฮีสเทอรีซิสในอุดมคติ (ค) แบบจำลองอาคารที่ใช้ทดสอบ (จาก Das และคณะ, 2008)

ด้วยวิธีการควบคุมแรงหน่วงแบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองจากการวิเคราะห์เช่นแบบจำลองของ Bouc-Wen ที่สร้างความสัมพันธ์ย้อนกลับเพื่อควบคุมแรงหน่วงให้ได้แรงหน่วงตามรูปแบบควบคุมที่ต้องการ แต่จะใช้การควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ฟuzzy logic เป็นตัวควบคุม

การจำลองผลด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของอาคาร 3 ชั้น ด้วยโปรแกรม MATLAB Fuzzy Logic และ SIMULINK Toolboxes ผลที่ได้แสดงถึงการควบคุมแรงหน่วงตามรูปแบบที่เสนอมีการลดผลตอบสนองได้ใกล้เคียงกับการควบคุมแบบคลิปปอติมอล (clipped optimal control) โดยการใช้ค่าความเร็วสัมพัทธ์ในแต่ละชั้นและค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวแปรนำเข้า ระบบฟuzzy logic จะสร้างแรงหน่วงที่สอดคล้องกับรูปแบบควบคุมที่กำหนดด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการที่ใช้แบบจำลองของ Bouc-Wen กับการใช้ฟuzzy logic ด้วยแรงดันควบคุม 1.5 โวลต์เพื่อควบคุมแรงหน่วงด้วยการกระตุ้นด้วยการเคลื่อนที่แบบวงจรรูปแสดงในรูปที่ 2.29 (ก)

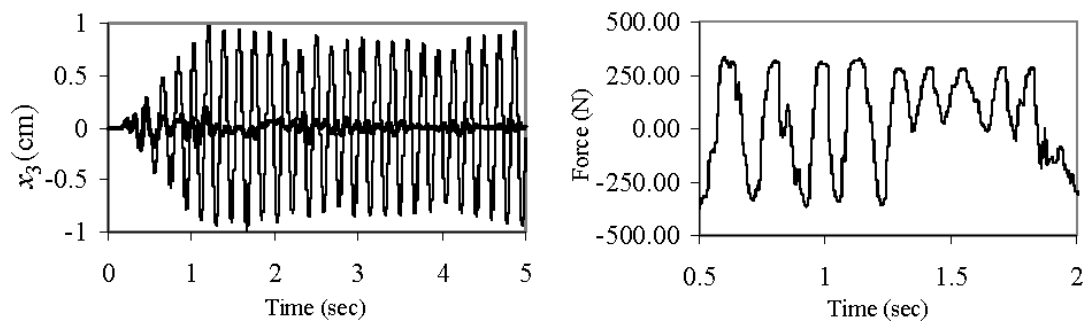
เมื่อทดลองควบคุมแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ชั้นล่างกระตุ้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหว El Centro แบบย่อส่วนรูปแบบเดียวกับที่ Dyke และคณะ (1996) ทำการ

ทดสอบด้วยการควบคุมแบบคลิปปอพติมอล จะได้ผลการเคลื่อนที่สูงสุดที่ชั้น 3 แสดงใน รูปที่ 2.30(ก) แสดงให้เห็นว่าการใช้ฟัซซีลอจิกสามารถลดผลตอบสนองการเคลื่อนที่ที่ชั้น 3 ได้ 78.85% ในขณะที่หากใช้การควบคุมแบบคลิปปอพติมอลจะลดผลตอบสนองได้ 77.96% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงแรงหน่วงที่ใช้ควบคุม แสดงในรูปที่ 2.30(ข) จะเห็นว่าค่าแรงหน่วงสูงสุดที่ใช้มีค่า 391.13 นิวตัน ในขณะที่ใช้การควบคุมคลิปปอพติมอล จะใช้แรงหน่วงสูงสุด 941 นิวตัน (จาก Dyke และคณะ, 1996)



(ก) Bouc-Wen และฟัซซีลอจิก (ข) เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้า (ค) ตัวหน่วงที่นุ่มนวลกว่า

รูปที่ 2.29 กราฟฮิสเตอร์ซิสของแรงหน่วงและความเร็ว (จาก Das และคณะ, 2008)



(ก) ผลตอบสนองเมื่อมีและไม่มีกรควบคุม (ข) แรงที่ควบคุมกับเวลา

รูปที่ 2.30 ระยะเวลาเคลื่อนที่กับเวลาที่ชั้น 3 (จาก Das และคณะ, 2008)

เมื่อพิจารณาดำแหน่งที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก จากการทดสอบปรากฏว่าตำแหน่งที่ดีที่สุดคือที่ชั้น 1 ในขณะที่แรงหน่วงที่สูงที่สุดที่ต้องการเมื่อทดลองติดตั้งในแต่ละชั้นจะมีค่าแรงหน่วงที่ต้องการใกล้เคียงกัน และเมื่อทดสอบปรับเปลี่ยนความเร็วที่จุดครากของของตัวหน่วงเพื่อให้ตัวหน่วงมีความนุ่มนวลมากขึ้น ทำทดสอบโดยแบ่งเป็น 2 กรณีโดยให้พิกัดแรงหน่วงของตัวหน่วงคงที่แล้วปรับค่าความเร็วที่จุดครากของตัวหน่วงให้ลดลง ตัวหน่วงที่ปรับค่าความเร็วที่จุดครากต่ำกว่าจะให้ค่าแรงหน่วงน้อยกว่าที่ความเร็ว

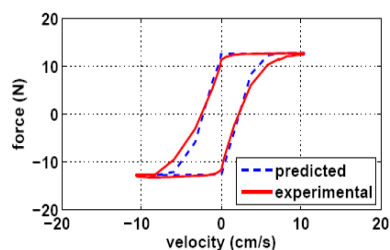
เดียวกัน ทำให้รูปแบบการควบคุมมีรูปร่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงและความเร็วเปลี่ยนไป โดยมีค่าความชันระหว่างแรงหน่วงที่จุดครากระหว่างเคลื่อนที่ขยับกลับมีค่าลดลง ผลที่ได้แสดงใน ตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าตัวหน่วงที่มีพิกัดเดียวกัน แต่ถ้ากำหนดให้แรงหน่วงกระทำต่อโครงสร้างแบบนุ่มนวลกว่า จะให้ผลโดยรวมไม่ต่างกับการตั้งค่าให้ตัวหน่วงออกแรงกระทำแบบรุนแรงในช่วงเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่แต่จะทำให้ค่าแรงหน่วงสูงสุดที่ต้องการมีค่าน้อยกว่า

ตารางที่ 2.2 เปอร์เซ็นต์ควบคุมสูงสุดของการตอบสนองที่ต่าง ๆ กัน และแรงควบคุมสูงสุด

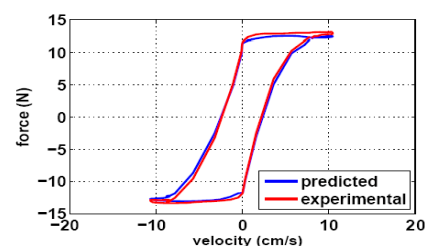
(จาก Das และคณะ, 2008)

Damper Position	Responses Measured at	Damper (Figure 5b)				Softer Damper (Figure 5c)			
		Percentage Control (%)			Maximum Control Force (N)	Percentage Control (%)			Maximum Control Force (N)
		x^+	x_d^{++}	$\ddot{x}_a^\#$		x	x_d	\ddot{x}_a	
First Storey	First Storey	81.76	81.76	61.39	391.13	80.82	80.82	57.39	366.63
	Second Storey	78.77	69.32	68.22		79.61	70.02	74.91	
	Third Storey	78.85	66.85	68.24		77.78	65.56	64.87	

Zapateiro และคณะ (2008) ได้ศึกษาตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก และออกแบบตัวควบคุมแบบ ก้าวถอยหลัง (backstepping controller) สำหรับควบคุมพฤติกรรมทางพลศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear dynamics) ที่ผลตอบสนองของแรงหน่วงและความเร็วเป็นแบบฮิสเทอรีซิส สำหรับใช้กับอาคารแบบแยกฐาน (base-isolated building) ส่วนประกอบที่จุดแยกฐานจะประกอบด้วยตัวหน่วงแบบพลาสติกที่สร้างแรงฝืดและตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก ในการจำลองพฤติกรรมด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ใช้แบบจำลองของ Bouc-Wen เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.31



(ก) จากแบบจำลองของ Bouc-Wen

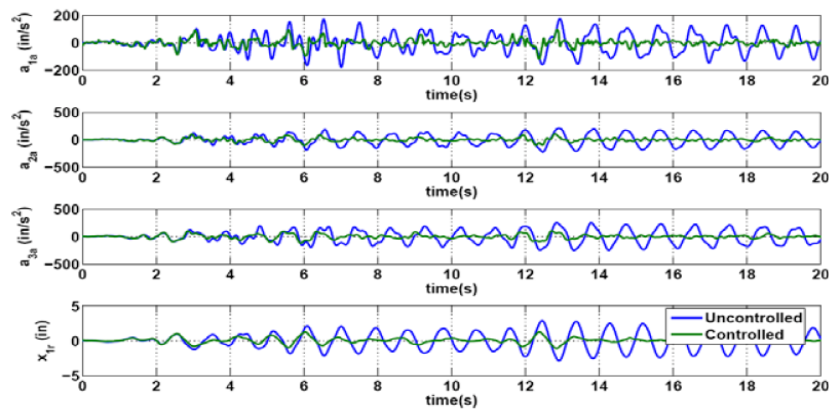


(ข) จากแบบจำลองที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 2.31 เปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

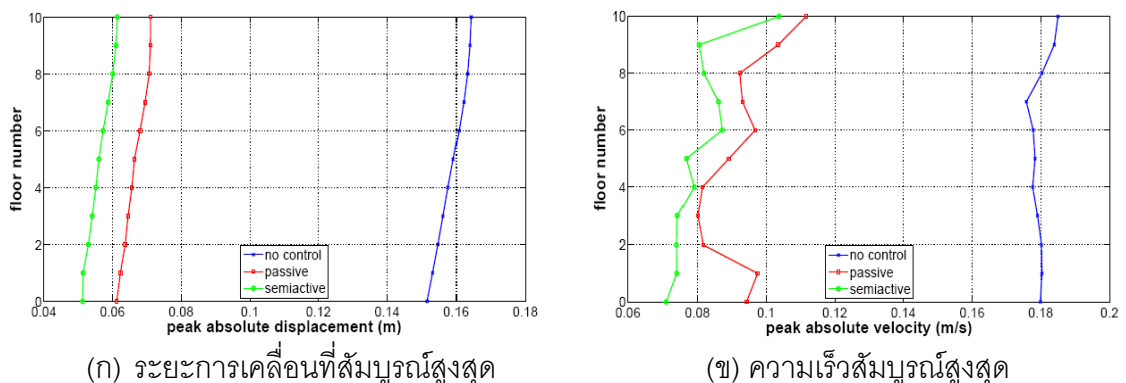
(จาก Zapateiro และคณะ, 2008)

การทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบก้าวถอยหลัง ทดสอบด้วยวิธี real-time hybrid โดยใช้แบบจำลองอาคาร 3 ชั้นติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ชั้น 1 โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ผลที่ได้แสดงใน รูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 ผลการทดสอบกับแบบจำลองอาคาร 3 ชั้น ด้วยตัวควบคุมแบบก้าวถอยหลังที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กไว้ที่ชั้น 1 (จาก Zapateiro และคณะ, 2008)

จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กและตัวควบคุมแบบก้าวถอยหลังที่ได้ทำการทดสอบแล้ว เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลกับแบบจำลองอาคารแยกฐาน 10 ชั้นโดยใช้ตัวควบคุมแบบก้าวถอยหลัง ด้วยการกระตุ้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหว Taft เพื่อเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบเซมิแอกทีฟ แบบพาสซีฟ และไม่มีการควบคุม ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.33



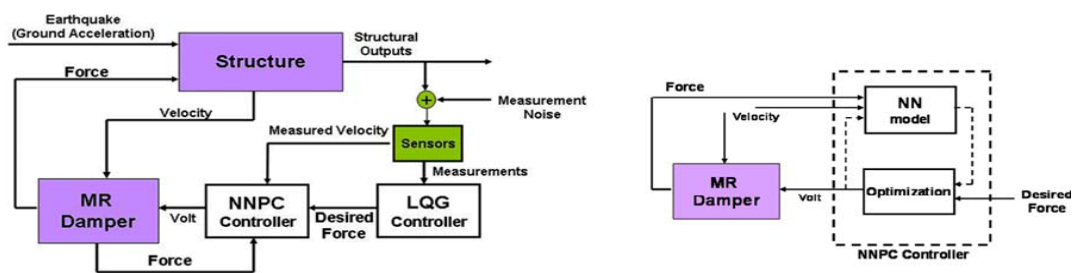
(ก) ระยะการเคลื่อนที่สัมบูรณ์สูงสุด

(ข) ความเร็วสัมบูรณ์สูงสุด

รูปที่ 2.33 ระยะการเคลื่อนที่และความเร็วสัมบูรณ์สูงสุดของแบบจำลองอาคารแยกฐาน 10 ชั้น ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Taft (จาก Zapateiro และคณะ, 2008)

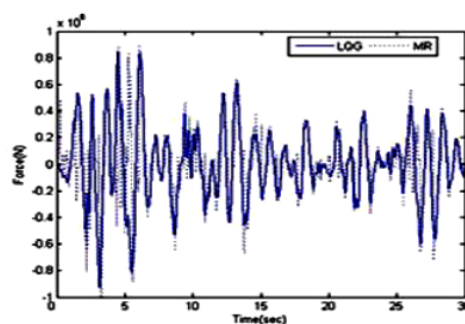
จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า สามารถใช้ตัวควบคุมแบบก้ำวถอยหลังสำหรับการควบคุมพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กได้ และสามารถลดผลตอบสนองการเคลื่อนที่และความเร็วของโครงสร้างแบบจำลองอาคารแยกฐาน 10 ชั้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี

Karamodin และคณะ (2008) ได้ศึกษาการควบคุมโครงสร้างแบบเซมิแอกทีฟด้วยการใช้วิธีประมาณค่าโดยประสาท (nero-predictive) สำหรับจำลองสมบัติทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก การใช้โครงข่ายประสาทเทียมใช้เพื่อระบุลักษณะเฉพาะของระบบ ในขณะที่ใช้การควบคุมแบบประมาณค่า (predictive control) เพื่อสั่งงานตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า โดยค่าแรงหน่วงที่ต้องการได้จากตัวควบคุม LQG (linear quadratic gaussian) แสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แผนภาพบล็อกแสดงวิธีการควบคุม (จาก Karamodin และคณะ, 2008)

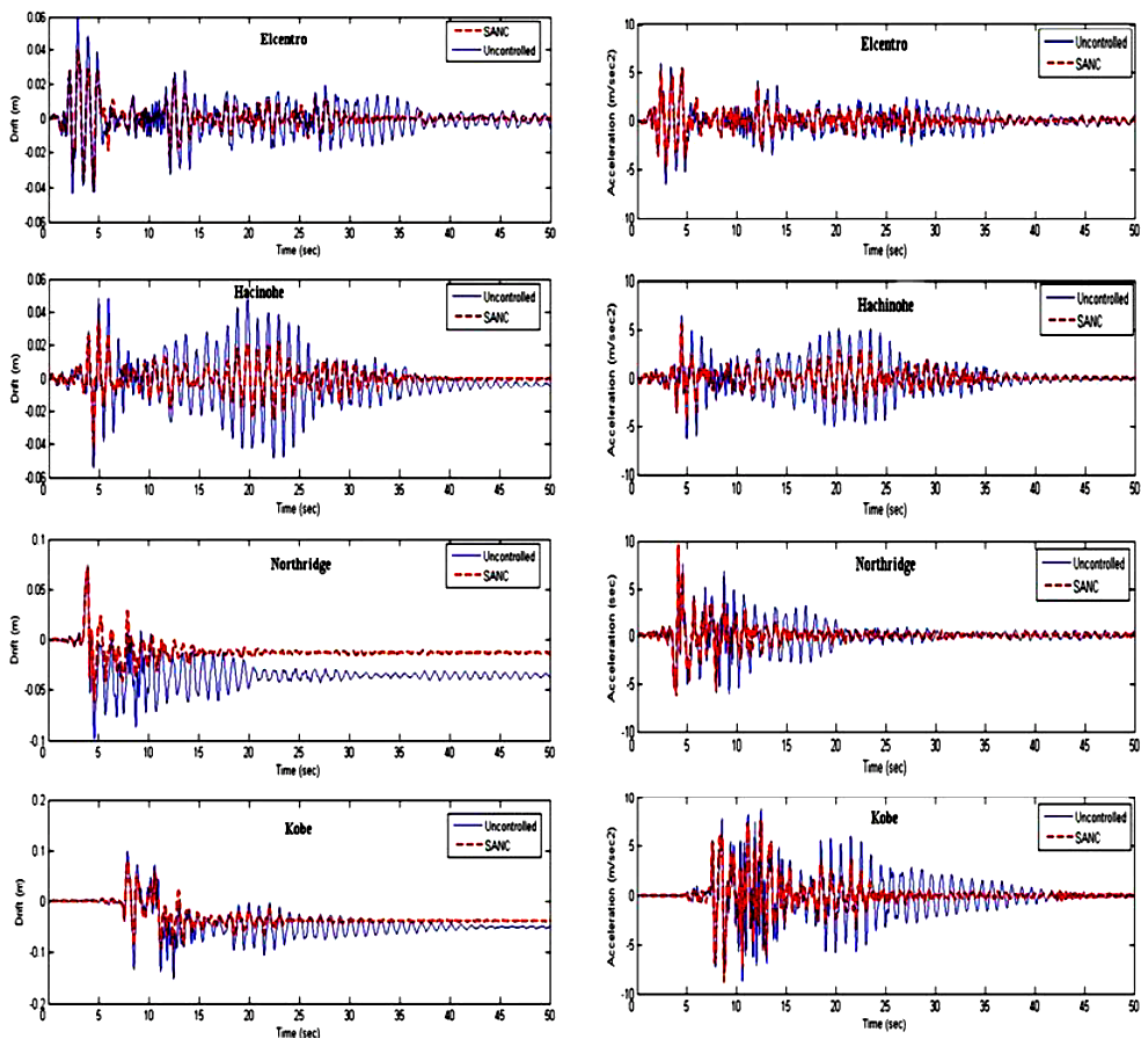
การประเมินประสิทธิภาพของการควบคุมแรงหน่วงเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ต้องการจากตัวควบคุม LQG กับค่าแรงหน่วงที่วัดได้ แสดงในรูปที่ 2.35 จะเห็นว่าแรงที่ได้จากตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กจะมีค่าใกล้เคียงกับแรงที่ได้จากตัวควบคุม LQG



รูปที่ 2.35 เปรียบเทียบระหว่างแรงหน่วงที่วัดได้กับค่าแรงหน่วงที่ต้องการจากตัวควบคุม LQG

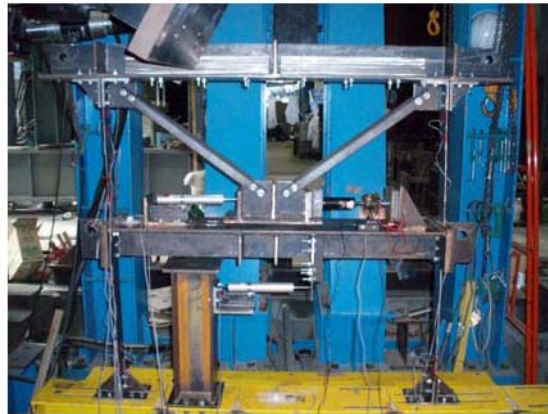
(จาก Karamodin และคณะ, 2008)

การประเมินประสิทธิภาพโดยรวมของการควบคุมโครงสร้างด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบประมาณค่าด้วยตัวควบคุม LQG เมื่อทำการทดสอบด้วยอาคารมาตรฐาน 3 ชั้น ติดตั้งเครื่องให้แรงขนาด 1,000 กิโลนิวตัน 3 ชุด และเครื่องวัดความเร่งทุกชั้นเพื่อเป็นสัญญาณป้อนกลับ ทดสอบด้วยคลื่นแผ่นดินไหว El Centro 1940, Hachinohe 1968, Northridge 1994 และ Kobe 1995 ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 2.36 จะเห็นว่าแบบจำลองของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับตัวควบคุม LQG สามารถนำมาใช้ในงานควบคุมได้และให้ผลตอบสนองที่ดี

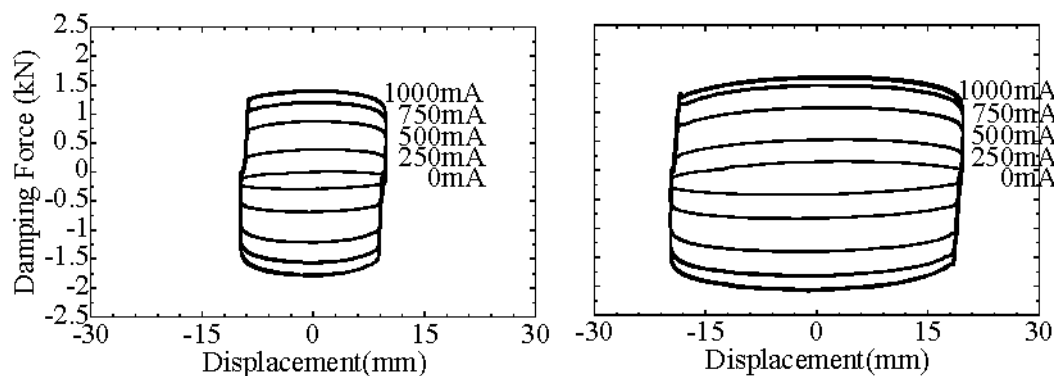


รูปที่ 2.36 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์และความเร่งที่ชั้น 3 เปรียบเทียบระหว่างมีและไม่มี การควบคุมแรงหน่วง (จาก Karamodin และคณะ, 2008)

Lee และคณะ (2008) ได้ทดสอบและวิเคราะห์ผลความไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองสะพานแบบแยกส่วน (isolated bridge) ที่รองรับด้วยการใช้โครงสร้างรับแรงเฉือนที่ทำจากแผ่นเหล็กเพื่อจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของสะพานแยกส่วนที่มีการควบคุมแบบเซมิแอกทีฟด้วยการติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กขนาด 2000 นิวตันที่ชั้น 2 (แสดงใน รูปที่ 2.37) การทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กทำโดยการกระตุ้นด้วยความถี่ 0.5, 1 และ 2 รอบต่อวินาที โดยการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าเริ่มจาก 0 จนถึง 1000 มิลลิแอมป์



รูปที่ 2.37 โครงสร้างรับแรงเฉือน 2 ชั้นที่ใช้ในการทดสอบ (จาก Lee และคณะ, 2008)

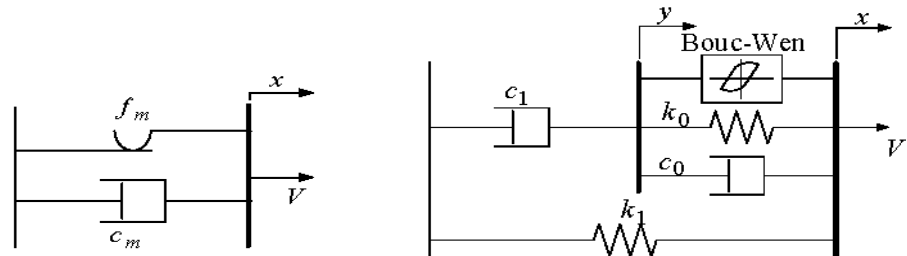


รูปที่ 2.38 แรงหน่วงและระยะการเคลื่อนที่ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก

(จาก Lee และคณะ, 2008)

แบบจำลองตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบจะมี 2 รูปแบบคือ แบบจำลองที่เสนอโดย Ruangrassamee และ Kawashima (2001) ประกอบด้วยแรงหน่วงจากความฝืดและแรง

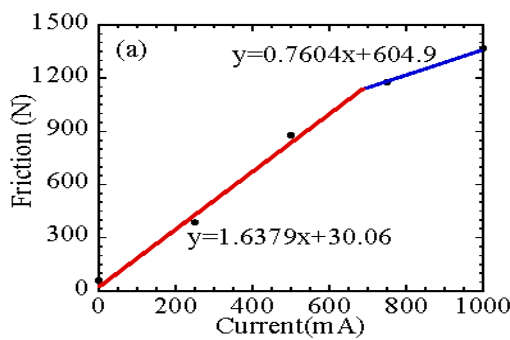
หนึ่งวงจากความหนืด แสดงในรูปที่ 2.39(ก) และแบบจำลองที่เสนอโดย Dyke และคณะ (1996) ที่ปรับปรุงมาจากแบบจำลองของ Bouc-Wen แสดงในรูปที่ 2.39(ข)



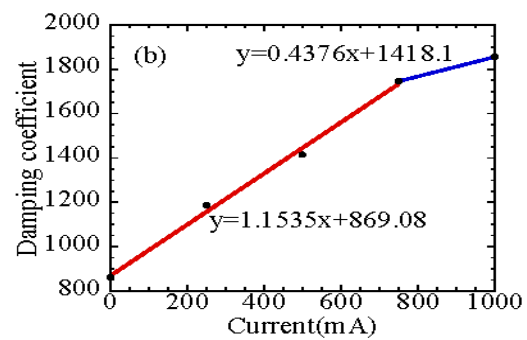
(ก) เสนอโดย Ruangrassamee และ Kawashima

(ข) เสนอโดย Dyke และคณะ

รูปที่ 2.39 แบบจำลองตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก (จาก Lee และคณะ, 2008)



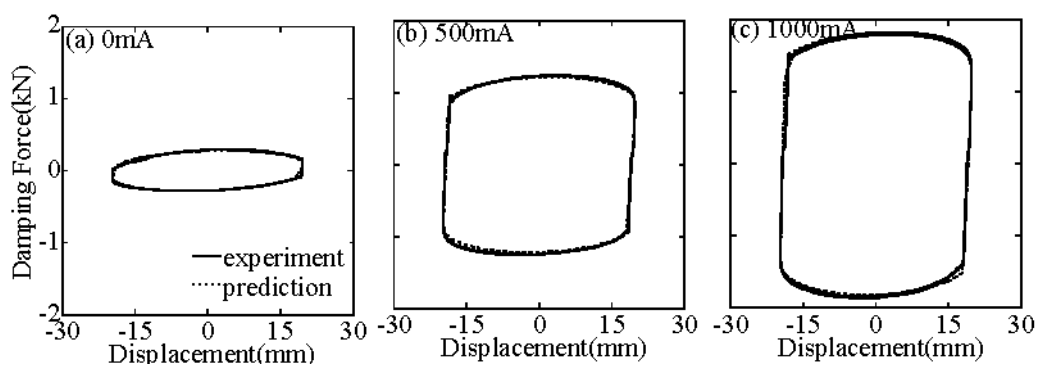
(ก) แรงหน่วงจากความฝืดและกระแสไฟฟ้า



(ข) สัมประสิทธิ์แรงหน่วงและกระแสไฟฟ้า

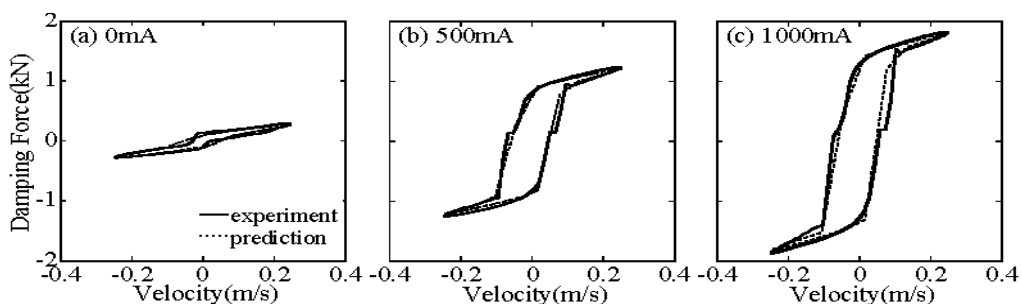
รูปที่ 2.40 คุณสมบัติของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่แปรผันตามกระแสไฟฟ้า

(จาก Lee และคณะ, 2008)



รูปที่ 2.41 แรงหน่วงกับระยะเวลาการเคลื่อนที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลองและ

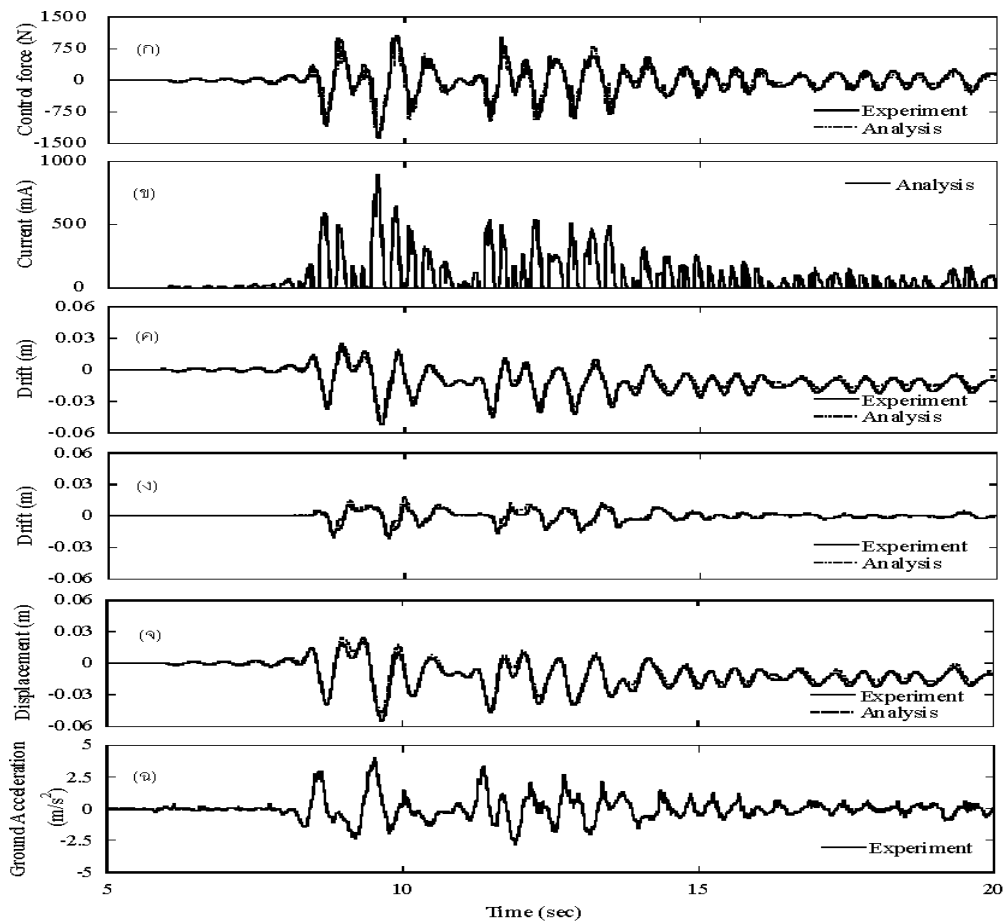
การคำนวณ (จาก Lee และคณะ, 2008)



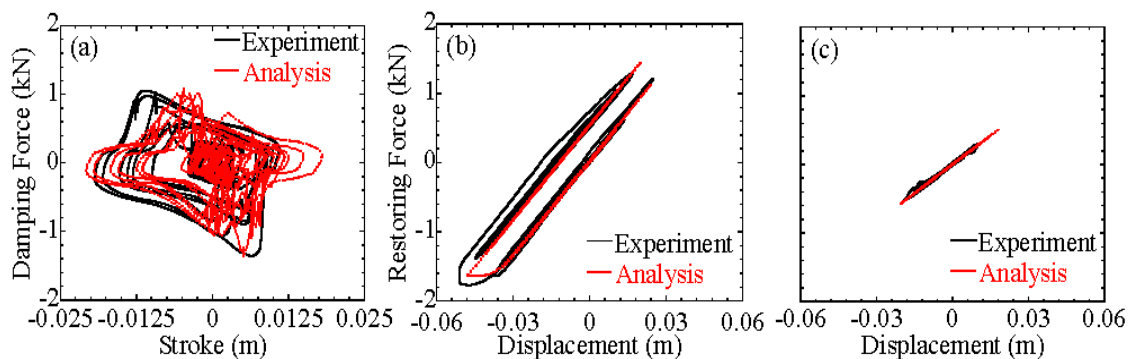
รูปที่ 2.42 แรงหน่วงกับความเร็ว เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลองและการคำนวณ

(จาก Lee และคณะ, 2008)

การใช้งานรูปแบบการควบคุมแบบ sliding mode สำหรับตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก พัฒนาโดย Yang และคณะ (1994, 1995) เมื่อนำแบบจำลองโครงสร้างที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กมาทดสอบบนแท่นจำลองแผ่นดินไหว เมื่อนำมาทดสอบกับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe, JR Takatori ค.ศ. 1995 Chi-Chi ค.ศ. 1999 ความเข้ม 50%, 30% และ 30% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการทดสอบด้วยคลื่น JMA Kobe ที่ปรับแก้ค่าความล่าช้าเนื่องจากตัวควบคุมประมาณ 30 วินาทีในระหว่างกระบวนการวิเคราะห์แล้ว ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.43 และ รูปที่ 2.44 แสดงให้เห็นว่าเมื่อพิจารณา แรงหน่วงและระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น และระยะการเคลื่อนที่ที่ชั้น 2 และกราฟฮิสเทอรีซิส แสดงถึงความสอดคล้องกันของผลที่ได้จากแบบจำลองและผลจากการทดลอง



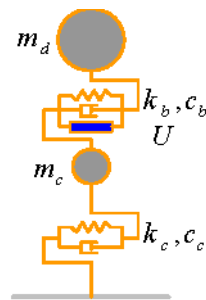
รูปที่ 2.43 เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ และการทดลอง (ก) แรงหน่วงควบคุม
 (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ชั้น 1 (ง) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ชั้น 2
 (จ) ระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ชั้น 2 (ฉ) คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe ความเข้ม 50%
 (จาก Lee และคณะ, 2008)



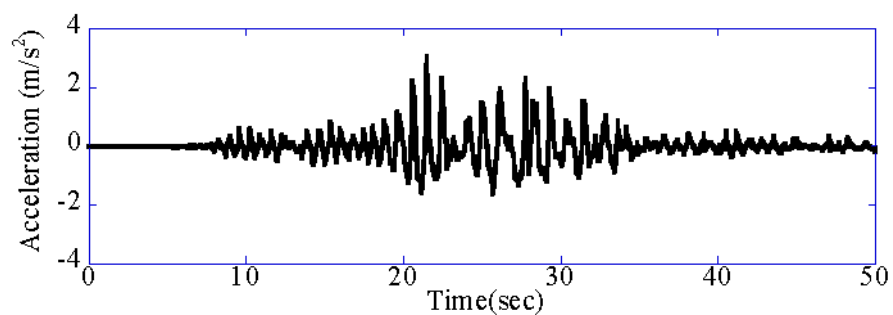
รูปที่ 2.44 วงรอบฮิสเทอรีซิสของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก ชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 2 ตามลำดับ

(จาก Lee และคณะ, 2008)

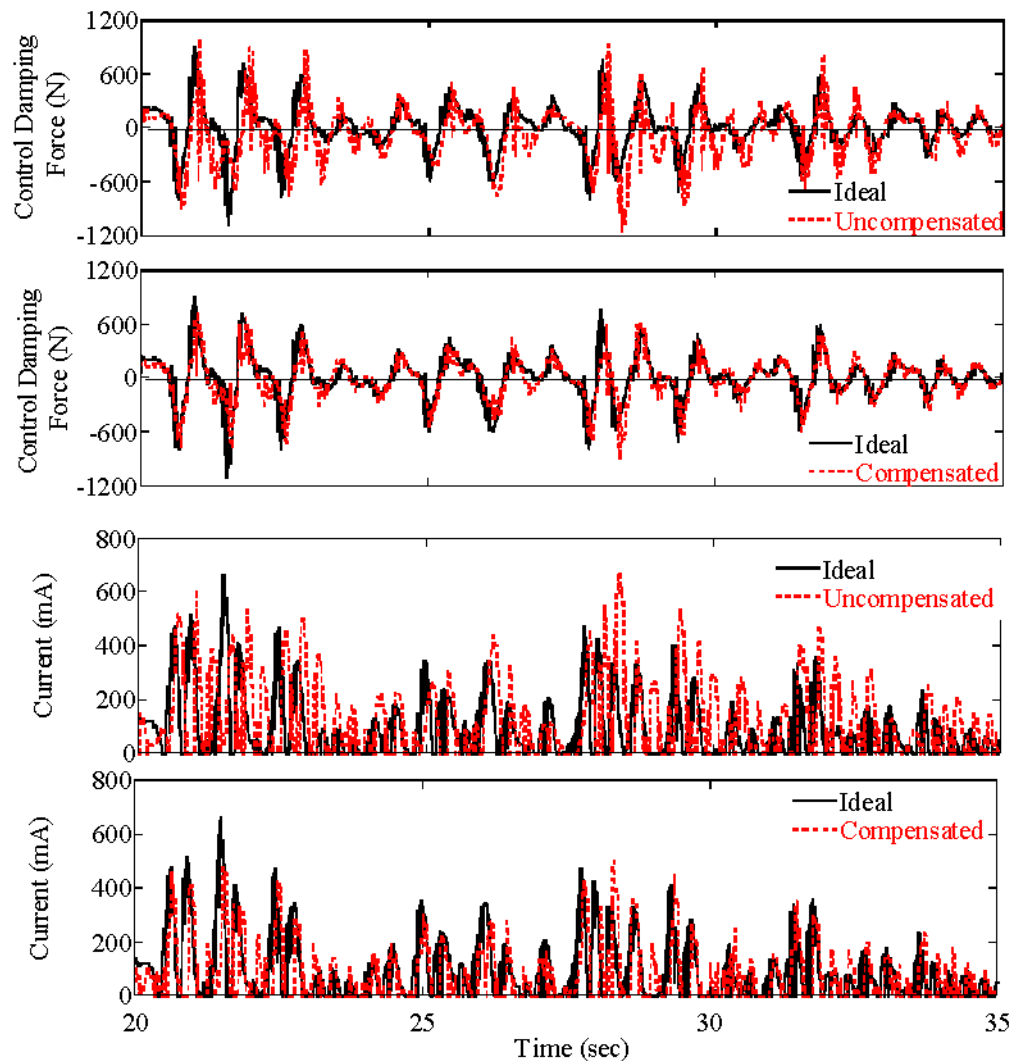
Chen และ Lee (2008) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลของเวลาประวิง (time delay) ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีการชดเชยผลจากเวลาประวิงที่ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงสำหรับระบบควบคุมแบบเซมิแอกทีฟที่ใช้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กบนแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบแยกส่วน (isolated bridge) ที่เป็นระบบมวลรวมมี 2 องศาความอิสระแสดงในรูปที่ 2.45 การควบคุมแรงหน่วงใช้ตัวควบคุมแบบ sliding mode และจำลองผลด้วยคลื่นแผ่นดินไหว Chi-Chi ที่ความเข้ม 30% แสดงในรูปที่ 2.46



รูปที่ 2.45 ระบบมวลรวมที่มี 2 องศาความอิสระ (จาก Chen และ Lee, 2008)

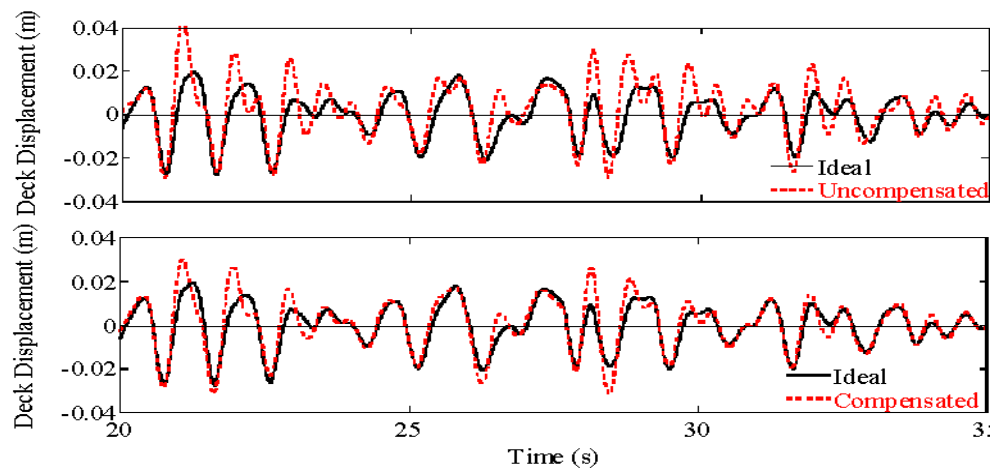


รูปที่ 2.46 คลื่นแผ่นดินไหว Chi Chi ความเข้ม 30% (จาก Chen และ Lee, 2008)



รูปที่ 2.47 เปรียบเทียบระหว่างระบบแรงหน่วงควบคุมและกระแสไฟฟ้า เมื่อเกิดเวลาประวิง 100 มิลลิวินาที กรณีที่มีและไม่มี การชดเชยผลที่เกิดจากเวลาประวิง (จาก Chen และ Lee, 2008)

จากการวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีและไม่มี การชดเชยผลของเวลาประวิง แสดงในรูปที่ 2.47 และรูปที่ 2.48 จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบมีการชดเชยผลที่เกิดจากเวลาประวิงด้วย Newmark's Integration จะทำให้แรงหน่วงควบคุมและกระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับค่าอุดมคติมากกว่าค่าที่ได้จากระบบที่ไม่มี การชดเชย และเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่เมื่อมีการชดเชยผลเนื่องจากเวลาประวิงแล้ว ประสิทธิภาพของระบบจะดีกว่าระบบที่ไม่มี การชดเชย

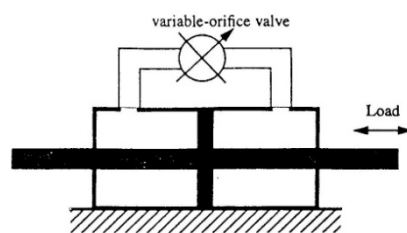


รูปที่ 2.48 เปรียบเทียบระหว่างระยะการเคลื่อนที่เมื่อระบบมีเวลาประวิง 100 มิลลิวินาที กรณีมีและไม่มี การชดเชยผลที่เกิดจากเวลาประวิง (จาก Chen และ Lee, 2008)

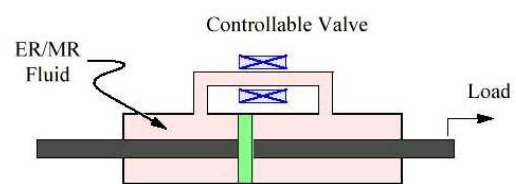
2.2 ตัวหน่วงของเหลวแบบเซมิแอคทีฟ

ตัวหน่วงของเหลวแบบเซมิแอคทีฟ (semi-active damper) มีพฤติกรรมของแรงหน่วงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามผลตอบสนองของโครงสร้าง การพัฒนาตัวหน่วงของเหลวแบบเซมิแอคทีฟเริ่มต้นประมาณต้นทศวรรษที่ 1990 (จาก Spencer และ Sain, 1997) โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบดังนี้

1. ตัวหน่วงของเหลวที่ปรับขนาดช่องเปิดของวาล์ว (variable-orifice damper)
2. ตัวหน่วงของเหลวที่ปรับค่าได้ (controllable-fluid damper)



(ก) ตัวหน่วงที่ปรับขนาดช่องเปิดของวาล์ว

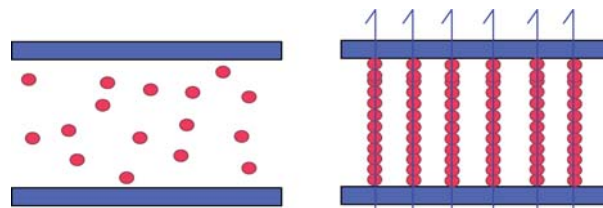


(ข) ตัวหน่วงของเหลวปรับค่าได้

รูปที่ 2.49 ตัวหน่วงของเหลวแบบเซมิแอคทีฟ (จาก Spencer และ Soong, 1999)

การใช้งานตัวหน่วงของเหลวที่มีการปรับขนาดช่องเปิดของวาล์ว (จาก Kawashima และ Unjoh, 1994) เนื่องจากข้อจำกัดของกลไกทำให้มีความเร็วในการตอบสนองช้า เมื่อเปรียบเทียบ

กับการใช้งานของเหลวแม่เหล็ก ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงได้นำของเหลวแม่เหล็กมาใช้งานเป็นตัวหน่วงของเหลวแบบเฮมิแอคทีฟเพื่อควบคุมผลของแรงสั่นสะเทือน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงใช้พลังงานในการควบคุมต่ำและมีเสถียรภาพ และสามารถควบคุมแรงหน่วงได้ง่าย (controllable fluid dampers) โดยการให้สนามแม่เหล็กวิ่งผ่านของเหลวแม่เหล็ก ภายในของเหลวแม่เหล็กประกอบด้วยอนุภาคผงเหล็กมีระดับขนาดไมครอนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำมัน เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวแม่เหล็ก จะทำให้อนุภาคดังกล่าวเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะที่เป็นห่วงโซ่ที่เชื่อมต่อกันดังรูป 2.2 เป็นผลให้ของเหลวนี้มีความเป็นวัสดุกึ่งของแข็ง (semi-solid) และมีความหนืดเพิ่มขึ้นในเวลาอันรวดเร็ว อีกทั้งของเหลวที่อนุภาคผงเหล็กแขวนลอยอยู่นั้นมีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันที่ใช้ในระบบไฮดรอลิก ทำให้มีความทนทานและสามารถใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี



(ก) ภายใต้อาณัติ

(ข) ภายใต้อนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.50 การจัดเรียงตัวของอนุภาคเหล็กภายใต้อนามแม่เหล็ก

2.3 พฤติกรรมของเหลวแม่เหล็ก

พฤติกรรมของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่สามารถควบคุมความหนืดได้นี้ สามารถจำลองได้โดยแบบจำลองพลาสติกของบิงแฮม (Bingham plasticity model) ที่เปลี่ยนกำลังที่จุดคลากได้ดังสมการที่ 1

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma} ; \tau > \tau_y \quad (2.1)$$

เมื่อ τ คือความเค้นของของเหลวภายใต้อนามแม่เหล็ก (Pa.)

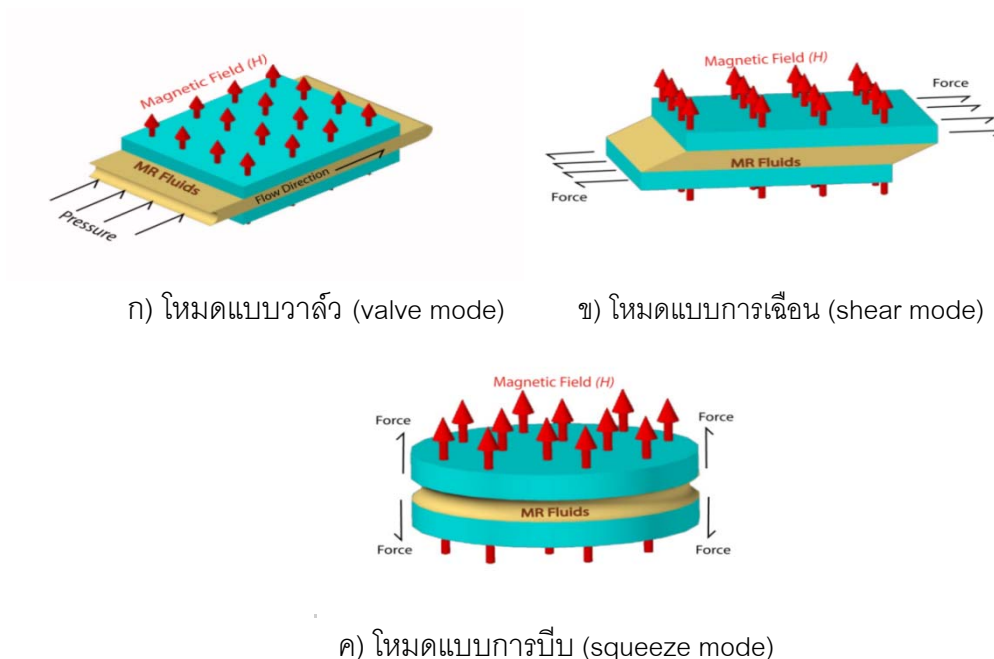
τ_y คือความเค้นที่จุดครากขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็ก (Pa.)

H คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m.)

$\dot{\gamma}$ คืออัตราความเครียดเฉือนของของเหลว (1/s.)

η คือความหนืดพลาสติก (ความหนืดที่ $H=0$) (Pa.s.)

อุปกรณ์ที่ใช้ของเหลวแม่เหล็กสามารถแบ่งแยกโหมดการทำงานได้เป็น 3 ประเภทคือ โหมดแบบวาล์ว (valve mode) โหมดแบบการเฉือน (direct shear mode) และโหมดแบบการบีบ (squeeze mode) ดังแสดงในรูปที่ 2.51



รูปที่ 2.51 โหมดการทำงานของของเหลวแม่เหล็ก (จาก JOLLY และคณะ, 1999)

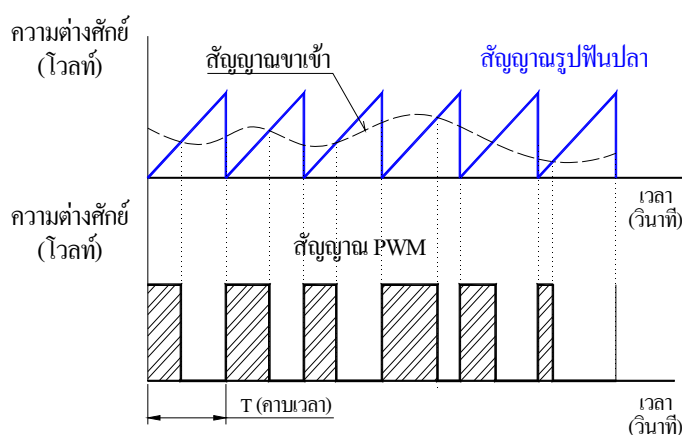
แรงที่ได้จากโหมดการเฉือน เป็นผลรวมเนื่องจากความหนืดและความเค้นที่จุดครากที่ขึ้นกับความเข้มข้นแม่เหล็ก แสดงในสมการที่ 2.2

$$F = (F_{\eta} + F_{\tau}) = \frac{\eta SA}{g} + \tau_y A \tag{2.2}$$

- เมื่อ η คือความหนืดของของเหลวเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก (Pa.s)
- S คือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างแผ่นตัวนำ (m/s)
- A คือพื้นที่การเฉือนของแผ่นตัวนำ (m²)
- g คือระยะระหว่างแผ่นตัวนำ (m)
- τ_y คือความเค้นที่จุดครากของของเหลวแม่เหล็ก

2.4 แหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์วิตช์มอดูเลชัน

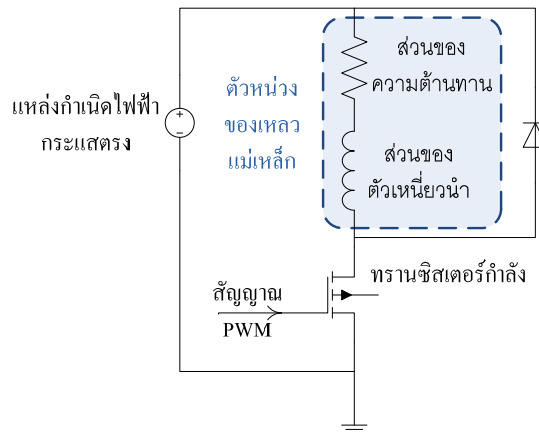
แหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์วิตช์มอดูเลชัน เป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบโดยใช้วงจรสวิตช์ซึ่ง (switching-circuit) ที่ควบคุมจังหวะการเปิดปิดวงจรถือเพื่อกำหนดปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าตามความถี่ของสัญญาณแบบฟันปลา (saw tooth) มอดูเลท (modulate) กับสัญญาณขาเข้าที่เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าแสดงถึงค่าที่ต้องการ (set point) ในการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าใช้วงจรถือเปรียบเทียบแรงดัน (comparator) เพื่อปิดวงจรถือให้กระแสไหลออกเป็นจังหวะตามสัญญาณออกของพัลส์วิตช์มอดูเลชัน สัญญาณออกที่ได้จะเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีช่วงเวลาที่ปิดวงจรถือและเปิดวงจรถือในช่วงคาบเวลา (period, T) หนึ่งรอบต่าง ๆ กันดังรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.52 รูปแบบคลื่นที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์วิตช์มอดูเลชัน

อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่ปิดวงจรถือต่อช่วงเวลาที่เปิดวงจรถือในหนึ่งรอบจะเรียกว่า ดิวตี้ไซเคิล (duty cycle, D) การทำงานของวงจรถือเป็นลักษณะนี้สามารถใช้กำหนดปริมาณกระแสเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าจากแรงดันสัญญาณขาเข้าที่ป้อนให้กับระบบได้ สัญญาณขาออกรูปสี่เหลี่ยมดังกล่าวจะใช้เป็นสัญญาณที่กระตุ้นการทำงานของทรานซิสเตอร์กำลัง (power transistor) ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ปิดวงจรถือให้กระแสไหลครบวงจรถือตามจังหวะสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชัน

จากการทำงานของวงจร แบบจำลองของวงจร (circuit model) สำหรับอุปกรณ์กำเนิดกระแสแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน ที่ป้อนกระแสให้ตัวหม้อของเหลวแม่เหล็กสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.53



รูปที่ 2.53 แบบจำลองวงจรสำหรับแหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน

2.5 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

2.5.1 กฎของบิโอต์-ซาวาต (Biot-Savart Law)

เมื่อมีกระแสไหลในวงรอบปิด ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ คือผลรวมทางเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กย่อยที่เกิดจากส่วนของกระแสที่ผ่านความยาวใด ๆ ซึ่งบิโอต์-ซาวาตได้นิยามไว้ว่า “ ที่จุด P ใด ๆ ขนาดของความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากส่วนย่อยของกระแส ($I d\vec{L}$) มีค่าแปรผันกับผลคูณของกระแสกับขนาดของความยาวช่วงสั้นมาก ($d\vec{L}$) กับค่าไซน์ (sine) ของมุมระหว่าง $I d\vec{L}$ กับเส้นตรงที่ลากจาก $I d\vec{L}$ ไปยังจุด P และแปรผันเป็นส่วนกลับกับกำลังสองของระยะระหว่าง $I d\vec{L}$ กับจุด P ทิศทางของความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ในแนวเส้นปกติของระนาบที่ประกอบด้วย $I d\vec{L}$ กับเส้นตรงที่ลากจาก $I d\vec{L}$ ไปยังจุด P และมีทิศทางเป็นไปตามกฎมือขวา โดยหมุนจาก $I d\vec{L}$ ไปทางมุมที่เล็กกว่าไปยังเส้นตรงที่ลากไปที่จุด P' สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการทางเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$d\vec{H} = \frac{Id\vec{L} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} = \frac{Id\vec{L} \times \vec{R}}{4\pi R^3} \quad (2.4)$$

โดย \vec{H} คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity) มีหน่วยเป็น แอมแปร์/เมตร

$d\vec{L}$ คือความยาวของเส้นทางเดินกระแสในวงสั้น ๆ

\hat{a}_R คือเวกเตอร์หน่วย (unit vector) มีทิศตั้งฉากจาก $d\vec{L}$ ไปสู่จุด P ใด ๆ

จากสมการที่ 2.4 สามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กสุทธิที่จุดใด ๆ ได้จากการอินทิเกรตรอบวงรอบปิดดังแสดงในสมการ 2.5 ดังนี้

$$\vec{H} = \oint \frac{Id\vec{L} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} \quad (2.5)$$

การหาความเข้มสนามแม่เหล็กสำหรับกระแสที่ไหลผ่านปริมาตรใด ๆ สามารถแทนปริมาณกระแสด้วยความหนาแน่นกระแสโดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.6 จะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีกระแสไหลผ่านปริมาตรใด ๆ แสดงในสมการที่ 2.7

$$Id\vec{L} = \vec{K}ds = \vec{j}dv \quad (2.6)$$

โดย \vec{K} คือความหนาแน่นกระแสเชิงผิว (surface current density) (แอมแปร์/เมตร)

\vec{j} คือความหนาแน่นกระแส (current density) (แอมแปร์/ตารางเมตร)

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int_{vol} \frac{\vec{j} \times \hat{a}_R}{R^2} dv \quad (2.7)$$

และการหาความเข้มสนามแม่เหล็กสำหรับกระแสที่ไหลผ่านพื้นผิวใด ๆ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.6 ได้ดังนี้

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{\vec{K} \times \hat{a}_R}{R^2} ds \quad (2.8)$$

2.5.2 กฎวงจรรวมของแอมแปร์ (Ampere's Circuital Law)

ในสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะที่เป็นรูปสมมาตรเราสามารถนำกฎวงจรรวมของแอมแปร์ได้ง่ายกว่าการใช้กฎของ บิโอต์-ซาวาท โดยกฎวงจรรวมของแอมแปร์กล่าวว่า “อินทิกรัลเชิงเส้นของ \vec{H} รอบเส้นวงรอบปิดใด ๆ จะมีค่าเท่ากับกระแสสุทธิที่ถูกล้อมรอบโดยเส้นวงรอบปิดนั้น”

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = I \quad (2.9)$$

เมื่อใช้ตัวดำเนินการ เฮอร์ล สำหรับกฎวงจรรวมของแอมแปร์ จะได้กฎวงจรรวมของแอมแปร์แบบจุด (point form of Ampere's circuital law) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.10)$$

2.5.3 ทฤษฎีของสโตค (Stokes' Theorem)

เมื่อพิจารณาพื้นผิว S ใด ๆ ที่มีส่วนย่อย ΔS ร่วมกับกฎวงจรรวมของแอมแปร์ และนิยามของตัวดำเนินการเฮอร์ลจะให้ความสัมพันธ์เมื่อ \hat{a}_n คือเวกเตอร์หน่วย (unit vector) มีทิศตั้งฉากกับพื้นผิว ΔS ใด ๆ ดังนี้

$$\frac{\oint \vec{H} \cdot d\vec{L}_{\Delta S}}{\Delta S} \triangleq (\nabla \times \vec{H}) \cdot \hat{a}_n \quad (2.11)$$

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux density) ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสามารถนิยามในปริภูมิว่าง (free space) ได้โดยสมการ

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.14)$$

โดย μ_0 คือสภาพซึมผ่านได้ของแม่เหล็กในปริภูมิว่าง (permeability of free space) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

\vec{B} คือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเกาส์ หรือ เวเบอร์/ตร.ม.

\vec{H} คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity) มีหน่วยเป็นแอมแปร์/เมตร

เส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux) คือเส้นแรงของแม่เหล็กที่ผ่านพื้นผิวใด ๆ นิยามได้โดยสมการ 2.15

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.15)$$

โดย Φ คือเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวบเบอร์ (weber)

\vec{B} คือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเกาส์ หรือ เวเบอร์/ตร.ม.

2.5.4 สารแม่เหล็กและสภาพความเป็นแม่เหล็ก

สภาพความเป็นแม่เหล็กในวัสดุสามารถจำแนกได้เป็น 6 ประเภท คือ

1. สารไดอะแมกเนติก (diamagnetic) เป็นสารที่สนามแม่เหล็กภายในอะตอมมีค่าสนามแม่เหล็กลัพธ์เป็นศูนย์ เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กภายในมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสนามภายนอก ตัวอย่างเช่น ทองแดง ทองคำ กราไฟต์ กำมะถัน เป็นต้น
2. สารพาราแมกเนติก (paramagnetic) เป็นสารที่มีแรงโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละอะตอมไม่เป็นศูนย์และทิศทางการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของแต่ละอะตอมไม่เป็นระเบียบ แต่แรงโมเมนต์แม่เหล็กเมื่อรวมกันแล้วมีค่าเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ จึงไม่แสดงคุณสมบัติแม่เหล็กเมื่อไม่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก แต่เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้สนามแม่เหล็กภายในมีค่าสูงกว่าสนามแม่เหล็กภายนอก ตัวอย่างเช่น โบแตสซียม ออกซิเจน และทังสแตน เป็นต้น
3. สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) เป็นสารที่มีค่าโมเมนต์แม่เหล็กภายในอะตอมสูง และเรียงตัวจับกลุ่มเป็นโดเมน (domain) ที่มีทิศทางเฉพาะกลุ่ม แต่เมื่อรวมกันหลายโดเมนโมเมนต์แม่เหล็กจะหักล้างกัน เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอกโดเมนที่มีทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กจะมีแผ่ขยายออกไปโดยรอบ ทำให้สนามแม่เหล็กภายในมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมาก แต่เมื่อเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกโดเมนที่ปรับทิศทางมาเป็นทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กก็ยังไม่ปรับทิศเป็นแบบเดิม ทำให้มีสนามแม่เหล็กคงค้าง (residual field) ทำให้เกิดวงรอบฮีสเทอรีซิส (hysteresis) ตัวอย่างเช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอล โลหะผสมอัลนิโค

4. สารแอนไทด์เฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic) ได้แก่สารที่โมเมนต์ของอะตอมที่ติดกันเรียงตัวด้านการขนานกันของโมเมนต์ในอะตอมและมีโมเมนต์สุทธิเป็นศูนย์ สารประเภทนี้เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติแม่เหล็กน้อย
5. สารเฟอร์ริแมกเนติก (ferrimagnetic) แสดงสมบัติด้านการเรียงตัวขนานกันของโมเมนต์ในอะตอมแต่โมเมนต์มีค่าไม่เท่ากัน จึงตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกไม่ดีกว่ากับสารเฟอร์โรแมกเนติก ตัวอย่างเช่น สารเฟอร์ไรต์
6. สารซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic) ได้แก่สารที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติกฝังอยู่ในสารที่ไม่เป็นเฟอร์โรแมกเนติก อนุภาคของสารเฟอร์โรแมกเนติกจะทำให้สารซูเปอร์พาราแมกเนติกมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กถาวรที่เปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นแม่เหล็กได้จากสนามแม่เหล็กภายนอก ตัวอย่างเช่นสารที่ใช้ทำแถบบันทึกเสียง (magnetic tape) หรือแผ่นบันทึกข้อมูล (diskette)

บทที่ 3

การออกแบบแบริ่งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก

แบริ่งเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีจุดประสงค์หลักเพื่อการถ่ายน้ำหนักในแนวแกนและลดแรงสั่นสะเทือนจากชิ้นส่วนโครงสร้างหนึ่งไปสู่โครงสร้างถัดไป ในบริเวณจุดเชื่อมต่อกันของโครงสร้างหากเป็นโครงสร้างสะพานจะเชื่อมต่อกันระหว่างคานและเสา หากเป็นโครงสร้างอาคารจะใช้เพื่อแยกโครงสร้างออกจากฐาน (base isolation) แบริ่งทั่วไปจะมีหลายขนาดและรูปแบบ เช่นแบบยึดติด (fixed type) และ/หรือ แบบที่ขยับตัวได้ (sliding type) และทำมาจากวัสดุต่าง ๆ กัน ทำให้มีความหลากหลายในคุณสมบัติทางกล เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมตามการใช้งานที่ต่างกัน เช่น แบริ่งที่ทำจากโลหะ แบริ่งที่ทำจากวัสดุยืดหยุ่นที่เสริมแรงด้วยแผ่นโลหะ (reinforced elastomeric bearing) และพอทแบริ่ง (pot bearing) ที่ทำจากโลหะที่มีวัสดุยืดหยุ่นบรรจุภายใน เป็นต้น

ในปัจจุบันแบริ่งที่มีใช้อยู่ส่วนใหญ่เป็นแบบแพสซีฟ ซึ่งสลายพลังงานในรูปแบบแรงพลศาสตร์ที่เข้ามากระทำต่อโครงสร้างในแนวราบโดยการเปลี่ยนรูปร่างทางกล แต่ในงานวิจัยนี้จะออกแบบและพัฒนาแบริ่งที่มีคุณสมบัติเป็นแบบแอกทีฟ สามารถควบคุมแรงหน่วงได้โดยการใช้รูปแบบการควบคุม (control algorithm) ต่าง ๆ ที่รับข้อมูลเข้าและส่งงานออกด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมแรง โดยบรรจุของเหลวแม่เหล็กและขดลวดทองแดงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไว้ภายในห้องว่างภายในตัวแบริ่ง แรงหน่วงที่ได้เกิดจากความเค้นเฉือนที่จุดครากของของเหลวแม่เหล็กภายใต้ความเข้มที่ต่างกันของสนามแม่เหล็ก

3.1 ข้อกำหนดการออกแบบ

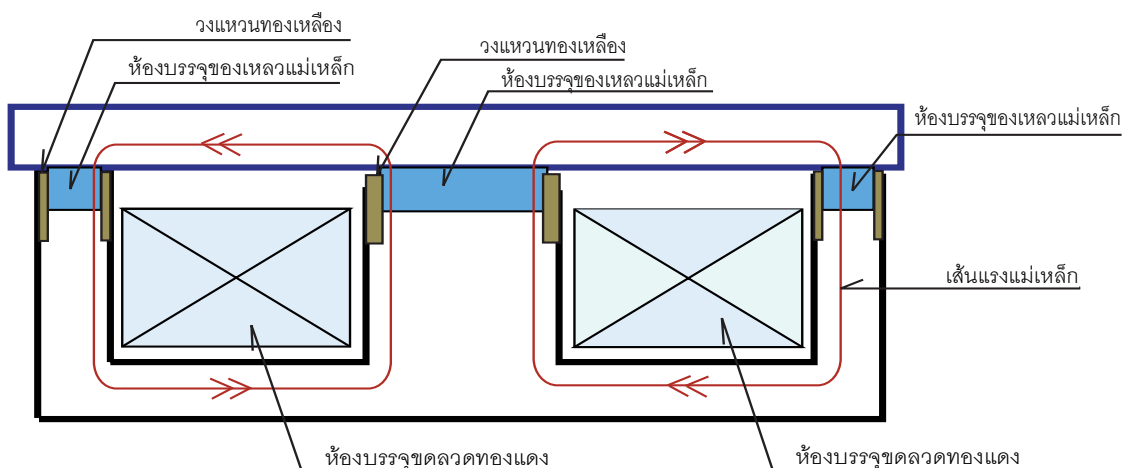
การออกแบบแบริ่งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเพื่อรับแรงสองทิศทางในแนวราบและสามารถควบคุมแรงหน่วงให้เป็นไปตามรูปแบบการควบคุมที่กำหนดต้องพิจารณาอุปกรณ์ที่นำมาใช้ด้วยกัน เช่นเครื่องวัดแรงที่สามารถวัดแรงได้ในแนวระนาบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดแรง JR3 ที่มีพิสัย 25 ปอนด์สำหรับแต่ละแกนในแนวราบ 50 ปอนด์สำหรับแกนตั้ง ส่วนเครื่องควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าด้วยแรงดันมีพิสัยกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์

ดังนั้นการออกแบบจึงกำหนดค่าไว้ดังนี้

1. แรงแหน่งที่ต้องการมีค่าโดยประมาณ 50 นิวตัน
2. พิกัดกระแสใช้งานไม่เกิน 1 แอมแปร์

3.2 การออกแบบรูปร่าง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและออกแบบแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเซมิแอกทีฟ ควบคุมแรงแหน่งด้วยปริมาณกระแสไฟฟ้า และต้องการแรงแหน่งทุกทิศทางในแนวราบ ดังนั้นแนวคิดหลักที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวทำให้รูปร่างของแม่เหล็กมีรูปร่างเป็นรูปทรงกระบอก วางตัวในแนวระนาบและมีห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็กอยู่ด้านบนเพื่อให้สัมผัสกับชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวและปิดอยู่ด้านบน แรงแหน่งที่เกิดขึ้นได้จากแรงหนีระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุที่ปิดด้านบนและผิวของเหลวแม่เหล็กที่บรรจุอยู่ภายในห้องบรรจุทำงานในรูปแบบแรงเฉือน การสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมความเหนียวของของเหลวแม่เหล็กจะใช้ขดลวดทองแดงพันรอบแกนกลางของแม่เหล็กโดยให้อยู่ภายในรูปทรงกระบอกโลหะเพื่อให้สร้างเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งจากแกนกลางของแม่เหล็กผ่านห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็กและแผ่นโลหะปิดห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กจะวิ่งในแผ่นโลหะไปสู่ขอบนอกทรงกระบอกของแม่เหล็ก สุดท้ายเส้นแรงแม่เหล็กจะวนเข้าสู่แกนกลางโดยผ่านโลหะด้านนอกของทรงกระบอก ในลักษณะวนรอบหน้าตัดของขดลวดจนครบวงรอบ แสดงในรูปที่ 3.1



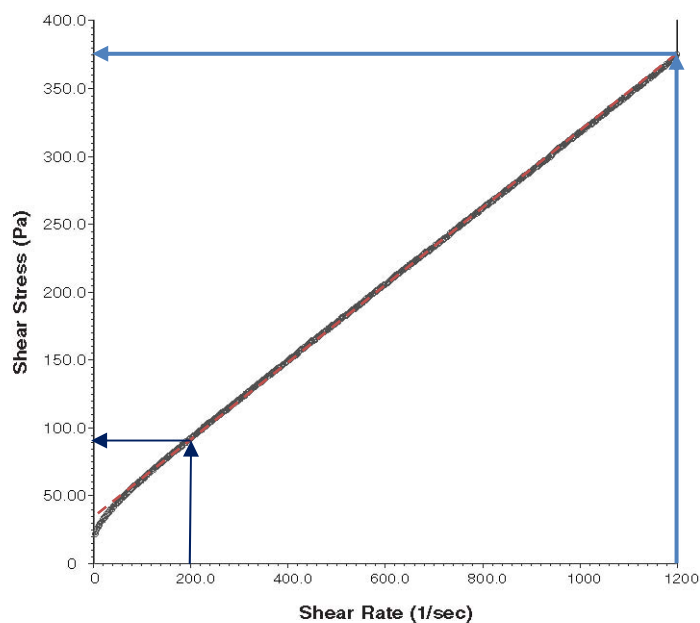
รูปที่ 3.1 รูปตัดแสดงเส้นแรงแม่เหล็กสำหรับแม่เหล็กสำหรับแม่เหล็กที่บรรจุของเหลวแม่เหล็ก

3.3 ขนาดและวัสดุทำตัวแบริง

เพื่อให้ของเหลวแม่เหล็กเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของผงเหล็ก วัสดุที่ใช้ทำตัวแบริงจึงต้องให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านไปทีของเหลวแม่เหล็กวนกลับครบรอบในระยะเวลาทางสั้นที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้วัสดุประเภทที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกทำตัวแบริง ในงานวิจัยนี้ใช้เหล็ก ST33 (เหล็กโครงสร้างสำหรับใช้งานเครื่องจักรกลทั่วไป) ตามมาตรฐาน DIN17100-66 ส่วนในบริเวณที่ต้องการบังคับให้เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านของเหลวแม่เหล็กโดยไม่ผ่านโลหะที่เป็นผนังห้องสำหรับบรรจุของเหลวจึงใช้ทองเหลืองเป็นวัสดุรูปวงแหวนทำขอบผนังห้องบรรจุของเหลว เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย ไม่แข็งจนเกินไป และขึ้นรูปได้สะดวก

เมื่อทำงานในโหมดแรงเฉือน การคำนวณหาขนาดของแบริงต้องพิจารณาถึงพฤติกรรมของของเหลวแม่เหล็กที่สามารถควบคุมความหนืดได้นี้ สามารถจำลองได้โดยแบบจำลองพลาสติกของบิงแฮม (Bingham plasticity model) ที่เปลี่ยนกำลังที่จุดคลากได้แสดงในสมการที่ 2.1

Shear Stress as a function of Shear Rate with no Magnetic Field applied at 40°C (104°F)



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน ในขณะไม่มีสนามแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (จาก Lord Corporation)

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราความเค้นเฉือนของของเหลวแม่เหล็กที่นำมาใช้ (รูปที่ 3.2) ความหนืดพลาสติกของของเหลวแม่เหล็กที่ใช้จะคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3.2)

$$\eta = \frac{\Delta\tau}{\Delta\dot{\gamma}} = \frac{(374-90)}{(1200-200)} = 0.284 \text{ Pa.s.} \quad (3.2)$$

- เมื่อ η คือค่าความหนืดพลาสติกของของเหลว (Pa.s.)
 $\Delta\tau$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเฉือน (Pa.)
 $\Delta\dot{\gamma}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือน (s^{-1})

เบื้องต้นกำหนดความถี่ใช้งาน 1 รอบต่อวินาที และกำหนดให้มีระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตร การเคลื่อนที่แบบวัฏจักรทำให้มีความเร็วสูงสุด 94.2 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราความเครียดเฉือนที่ 1 รอบต่อวินาทีคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (3.3)

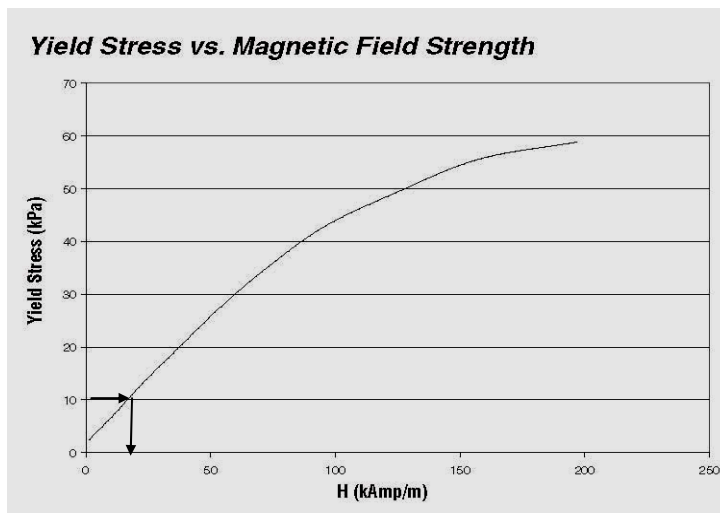
$$\dot{\gamma}_{1Hz} = \frac{du}{dy} = \frac{94.25}{5} = 18.85 \text{ s}^{-1} \quad (3.3)$$

- เมื่อ du คือความเร็วที่ผิวสัมผัส (mm./s.)
 dy คือความหนาของผิวของเหลว (mm.)

ดังนั้นแรงหน่วงที่ได้จากแรงเฉือนที่เกิดจากแรงหนืดของของเหลวและการเคลื่อนที่ด้วยความถี่ 1 รอบต่อวินาทีที่ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตร จะมีค่า 5.353 ปาสคาล แสดงในสมการที่ (3.4)

$$\tau = \eta\dot{\gamma} = 0.284 \times 18.85 = 5.353 \text{ Pa.} \quad (3.4)$$

จะเห็นได้ว่าความเค้นเฉือนขณะเคลื่อนที่ด้วยความถี่ 1 รอบต่อวินาที ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กจะมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นที่จุดครากของของเหลวแม่เหล็กในขณะที่มีสนามแม่เหล็กกระทำ (รูปที่ 3.3) ดังนั้นจะไม่นำมาคำนวณออกแบบ แต่คิดเฉพาะความเค้นเฉือนที่จุดครากในขณะที่มีสนามแม่เหล็กกระทำเท่านั้น ดังนั้นสมการที่ (2.1) จะเหลือเพียงพจน์ของแรงเฉือนเนื่องจากแรงเค้นที่จุดครากภายใต้สนามแม่เหล็กเท่านั้น



รูปที่ 3.3 ความเค้นที่จุดครากกับความเข้มสนามแม่เหล็กของของเหลวแม่เหล็ก

(จาก Lord Corporation)

พื้นที่แรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับของเหลวแม่เหล็กเกิดขึ้นบริเวณฝาปิดด้านบนห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็ก ประกอบไปด้วยพื้นที่สองส่วน (แสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5) ส่วนแรกเป็นพื้นที่ บริเวณศูนย์กลาง ห้องบรรจุมีพื้นที่เป็นวงกลม พื้นที่ 10.18 ตารางเซนติเมตร อีกส่วนบริเวณวงแหวนรอบนอกมีพื้นที่ 37.70 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้ง่ายสำหรับการคำนวณออกแบบเบื้องต้น สมมติให้เส้นแรงแม่เหล็กกระจายเฉลี่ยสม่ำเสมอผ่านพื้นที่สองบริเวณดังกล่าว ซึ่งมีพื้นที่รวม 47.9 ตารางเซนติเมตร

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{50}{47.878 \times 10^{-4}} = 10.44 \text{ kPa.} \quad (3.5)$$

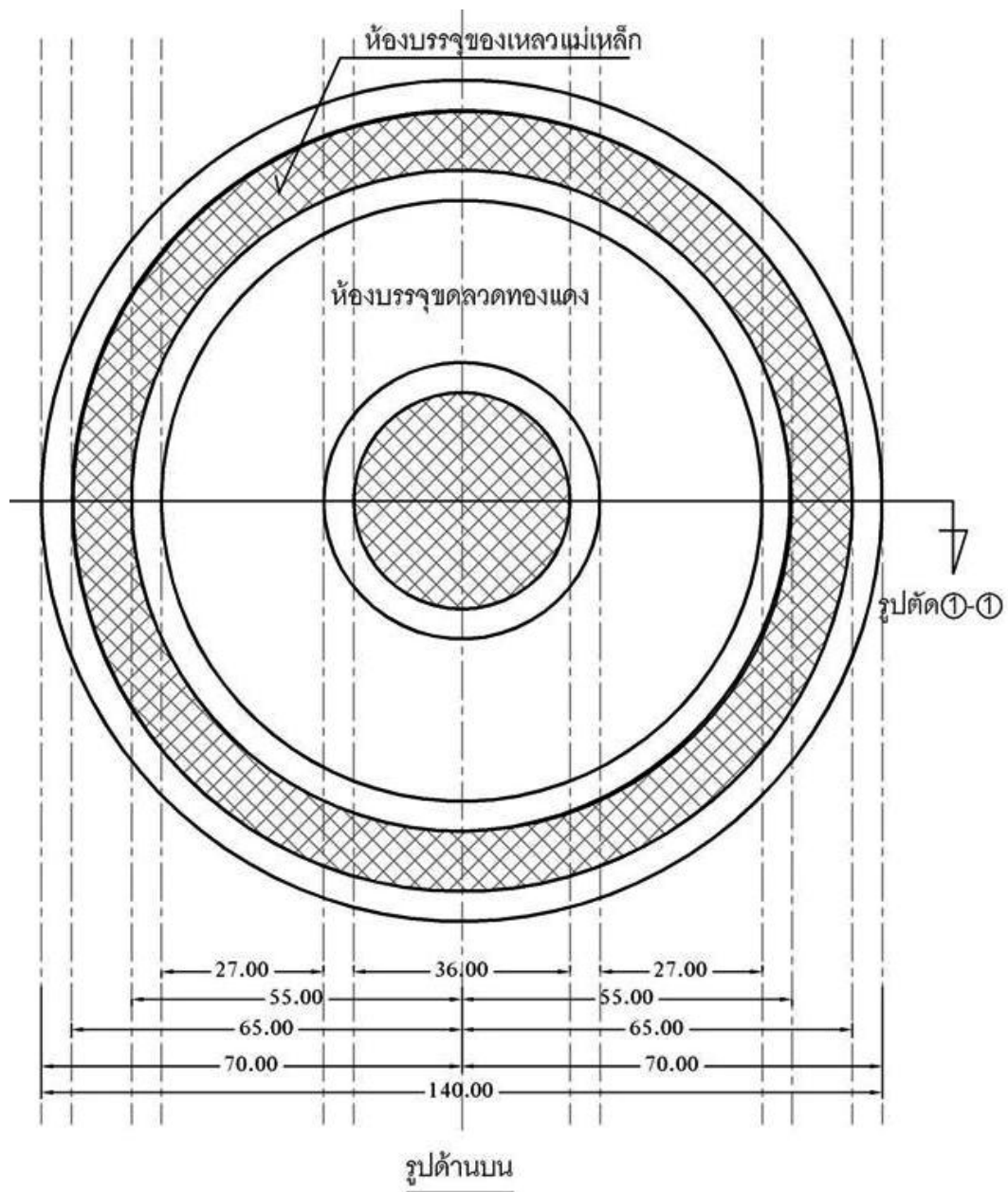
จากสมการที่ (3.5) ความเค้นเฉือนที่ต้องการ มีค่าประมาณ 10.44 กิโลปาสคาล ดังนั้น จากความสัมพันธ์ของความเค้นที่จุดครากและความเข้มสนามแม่เหล็กที่เป็นสมบัติของของเหลวแม่เหล็กชนิดที่นำมาใช้ (รูปที่ 3.3) จะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ต้องการประมาณ 15 กิโลแอมแปร์ต่อเมตร

จากขนาดห้องบรรจุชุดลดทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 1 ตารางนิ้ว เส้นรอบรูปของชุดลดทองแดง มีค่าประมาณ 100 มิลลิเมตร จากกฎวงจรของแอมแปร์ (สมการที่ 2.9) จะได้ค่าตามสมการที่ (3.7) ทำให้พจน์ของ กระแสคูณจำนวนรอบของชุดลดทองแดง (NI) มีค่าประมาณ 1,500 แอมแปร์-รอบ จากค่าที่ได้นี้ เลือกราคากระแสพิกัด 1 แอมแปร์ และจำนวนรอบ 1500 รอบ เป็นค่าใช้งานเบื้องต้น สำหรับเบริงที่มีขนาดตามที่กำหนด

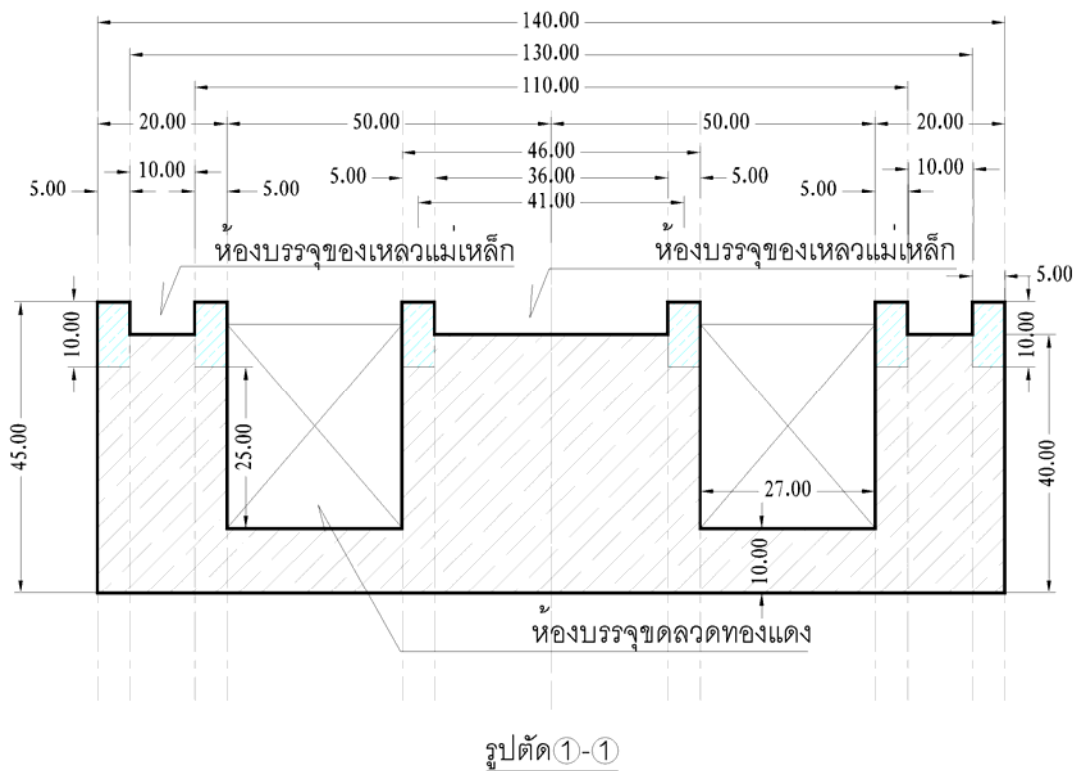
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI \quad (3.6)$$

$$15 \times 10^3 \cdot \frac{100}{1000} = 1500 = NI \quad (3.7)$$

- เมื่อ N คือ จำนวนรอบของลวดทองแดงที่พันรอบแกน (รอบ)
I คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าในลวดทองแดง (แอมแปร์)



รูปที่ 3.4 รูปด้านบนแสดงมิติของแปรงตัวห่วงของเหลวมแม่เหล็ก (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



รูปที่ 3.5 รูปตัดด้านข้างของตัวหม้อของเหลวแม่เหล็ก (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



รูปที่ 3.6 แบ็งจ์ตัวหม้อของเหลวแม่เหล็กก่อนทำการติดตั้งขดลวดทองแดง

3.4 ของเหลวแม่เหล็ก (magnetorheological fluid)

ของเหลวแม่เหล็กที่นำมาบรรจุในแบร์ริงที่ทดสอบได้แก่รุ่น MRF-140CG ที่ผลิตโดย Lord Corporation ของเหลวหล่อลื่นที่ผสมกับผงเหล็กมีส่วนผสมหลักเป็นของเหลวไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon-based) สามารถใช้ในสภาวะเปิดในอากาศและใช้กับวัสดุโลหะ เช่น เหล็ก สเตนเลส อลูมิเนียม และพลาสติกประเภทโพลียูรีเทน (polyurethane) ได้ สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในเวลาที่น้อยกว่า 5 มิลลิวินาที ทำให้สร้างแรงหนืดได้รวดเร็วอันเป็นคุณสมบัติที่ดีสำหรับนำมาสร้างแรงหน่วงของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก

3.5 การออกแบบขดลวดทองแดง

จากค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ต้องการประมาณ 1500 แอมแปร์-รอบ พื้นที่หน้าตัดของห้องบรรจุขดลวดทองแดงประมาณ 1 ตารางนิ้ว ใช้งานที่แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ดังนั้นกำลังของขดลวดสำหรับออกแบบมีค่า 10 วัตต์โดยประมาณ ซึ่งถือเป็นพิกัดปลอดภัยที่ใช้ออกแบบขดลวด ที่ใช้กับสำหรับเครื่องควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า (wonder box) นั่นคือต้องออกแบบให้ความต้านทานรวมของขดลวด มีค่าประมาณ 10 โอห์ม

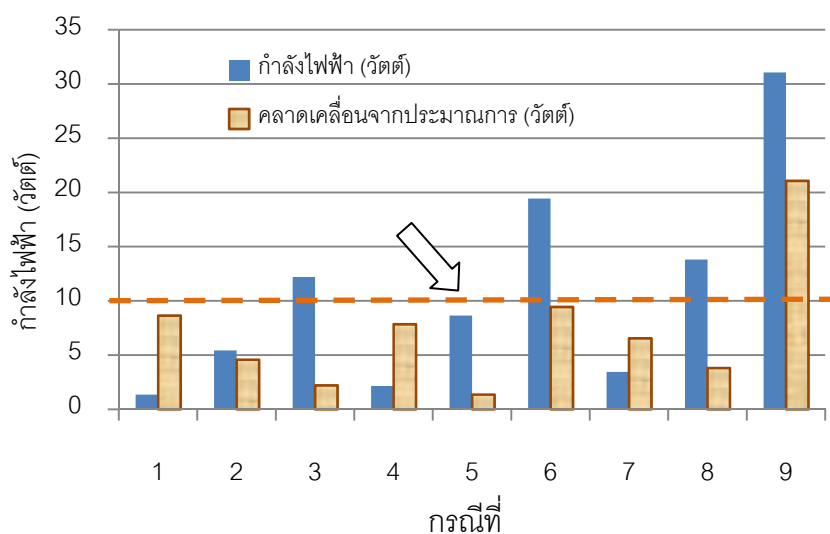
จากแนวคิดที่จะบรรจุขดลวดทองแดงไว้ภายในแบร์ริง ทำให้ต้องจำกัดจำนวนขดลวดและขนาดของลวดทองแดง (ใช้ขนาด 24 AWG ถึง 28 AWG โดยประมาณ) เนื่องจากขนาดของแบร์ริงมีขนาดเล็กทำให้ห้องบรรจุขดลวดทองแดงจะมีขนาดเล็กด้วยเช่นกัน การคำนวณหาจำนวนและขนาดของขดลวด จะขึ้นกับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผ่านของเหลวแม่เหล็กแสดงในหัวข้อ

3.3

เมื่อทดลองคำนวณออกแบบโดยเลือกจำนวนขดลวด จำนวนรอบ และขนาดลวดทองแดงเป็นตัวแปรสำหรับออกแบบแสดงใน ตารางที่ 3.1 และนำเสนอในรูปแบบของกราฟ (แสดงในรูปที่ 3.7) ค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ได้แก่กรณีที่มีค่ากำลังไฟฟ้า 10 วัตต์โดยประมาณได้แก่กรณีที่มี 5 และกรณีที่มี 3 ตามลำดับ แต่ในการทดลองนี้ได้เลือกกรณีที่มี 5 ที่ใช้ขดลวดทองแดงขนาด 26 AWG พันรอบแกน จำนวน 2 ขดที่ต่อขนานกัน มีความต้านทานรวมประมาณ 11.574 โอห์ม ใช้กำลังไฟฟ้า 8.64 วัตต์

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับการออกแบบจำนวนและขนาดของขดลวดทองแดง

กรณี	ขนาด ลวดทองแดง	จำนวนขด (ต่อขนาบกัน)	ความยาว เมื่อพัน รอบแกน (ฟุต)	ความ ต้านทาน (ต่อ 1000 ฟุต)	ความต้านทาน ต่อขด (โอห์ม)	ความต้านทาน รวม (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้า ไหลผ่าน (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ความคลาด เคลื่อน (จาก 10 วัตต์)
1	AWG28	1	1128.61	65.31	73.710	73.710	0.136	1.357	8.643
2		2			36.855	18.427	0.543	5.427	4.573
3		3			24.570	8.190	1.221	12.210	2.210
4		1			46.296	46.296	0.216	2.160	7.840
5	AWG 26	2	1128.61	41.02	23.148	11.574	0.864	8.640	1.360
6		3			15.432	5.144	1.944	19.440	9.440
7	AWG 24	1	1128.61	25.67	28.971	28.971	0.345	3.452	6.548
8		2			14.486	7.243	1.381	13.807	3.807
9		3			9.657	3.219	3.107	31.065	21.065



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้แยกเป็นกรณีต่าง ๆ ที่เปลี่ยนค่าตัวแปรในการออกแบบ

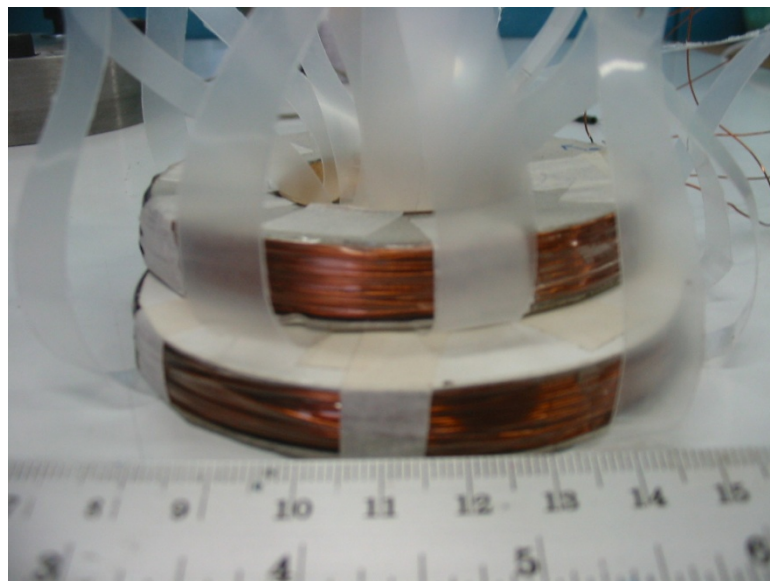
3.6 การประกอบแบริงตัวห่วงของเหลวแม่เหล็ก

เมื่อคำนวณได้จำนวนขดลวด ขนาดลวด ความยาว และ ความต้านทานโดยประมาณแล้ว จึงทำบ็อบบิ้น (โครงสำหรับพันลวดทองแดง) ทำด้วยกระดาษแข็งตัดโดยวัดจากขนาดจริงของห้องบรรจุลวดทองแดงที่ได้ขึ้นรูปไว้แล้ว นำไปพันลวดทองแดงด้วยเครื่องพันลวดทองแดงและนับจำนวนรอบของลวดทองแดงที่พัน

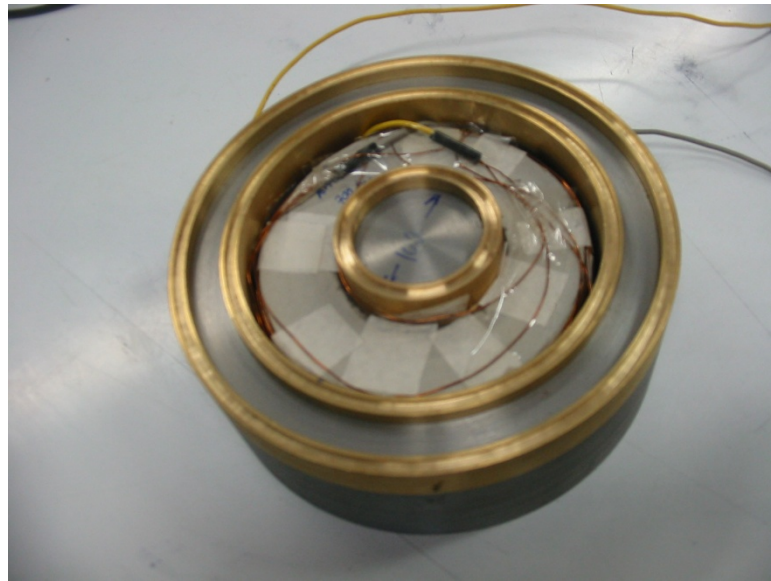
จากการพันลวดทองแดงขนาด 26 AWG สามารถพันลวดทองแดงได้ 700 รอบต่อขดลวด (รูปที่ 3.8) จากที่ได้ประมาณไว้ 750 รอบ ทำให้ค่าความต้านทานรวมที่ได้คำนวณไว้ มีค่าต่างไปออกไป จาก 11.574 โอห์ม เป็น 10.4 โอห์ม (จากที่วัดได้จริง)

เมื่อบรรจุลวดทองแดงในเบร็งแล้ว เพื่อป้องกันของเหลวแม่เหล็กที่จะบรรจุในห้องบรรจุ หกเข้ามาในห้องบรรจุขดลวดทองแดงจึงต้อง กรอกปิดห้องบรรจุลวดทองแดงด้วยอีพอกซีเรซิน (epoxy resin) เนื่องจากเป็นของเหลวที่สามารถแข็งตัวเหมือนพลาสติกเมื่อแห้ง และมีความสามารถในการไหลเข้าไปปิดในช่องว่างได้ดี

หลังจากที่ได้กรอกปิดอีพอกซีเรซินและแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว (รูปที่ 3.10) สูดทำขั้วบรรจุของเหลวแม่เหล็กลงในห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็กในห้องบรรจุบริเวณศูนย์กลาง และห้องบรรจุบริเวณวงแหวนรอบนอก (รูปที่ 3.11)



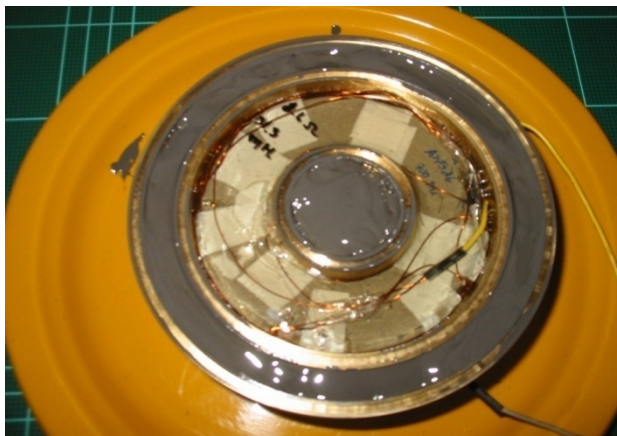
รูปที่ 3.8 ขดลวดทองแดงก่อนประกอบเข้าเบร็ง



รูปที่ 3.9 แบร์ริงของเหลวแม่เหล็กเมื่อประกอบชุดหลอดทองแดงและเชื่อมสายไฟ



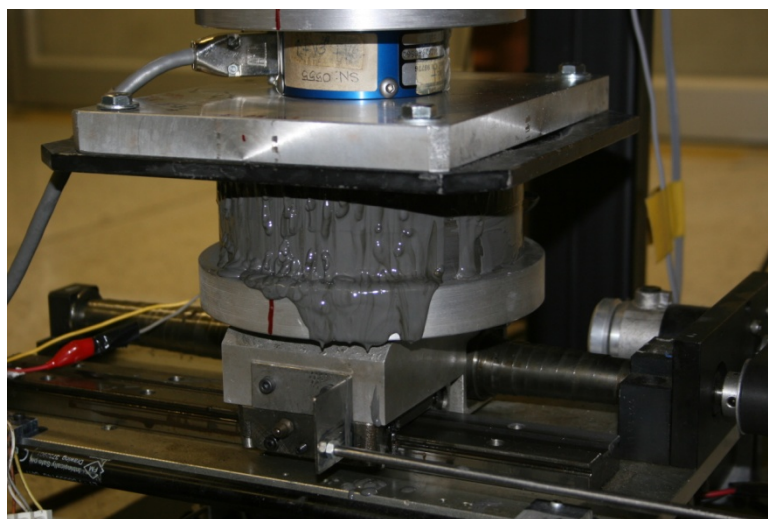
รูปที่ 3.10 แบร์ริงของเหลวแม่เหล็กเมื่อประกอบชุดหลอดทองแดงและหยอดกาวอีพอกซีปิดห้องบรรจุชุดหลอดทองแดง



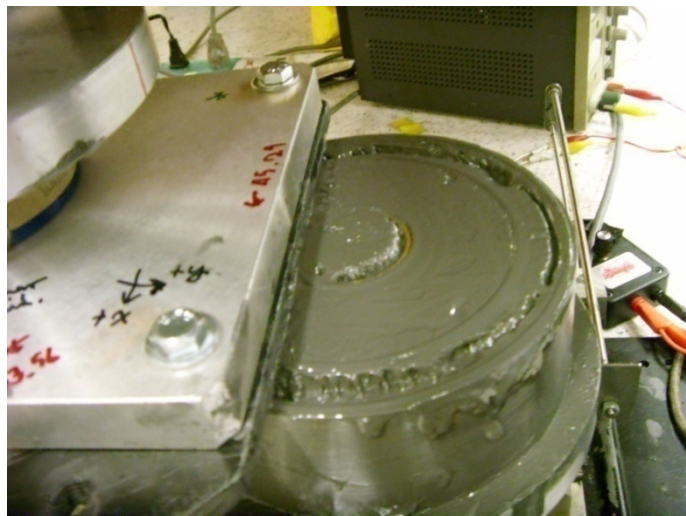
รูปที่ 3.11 แบร์ริงของเหลวแม่เหล็กเมื่อบรรจุของเหลวแม่เหล็กในห้องบรรจุของเหลวแล้ว

3.7 การบรรจุของเหลวในแบร์ริง

หลังจากการทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ของแบร์ริงตัวหมุนของเหลวแม่เหล็กที่ได้ติดตั้งบนแท่นจำลองแผ่นดินไหวขนาดเล็ก พบว่ามีของเหลวแม่เหล็กจำนวนมาก ไหลออกจากห้องบรรจุ ในขณะที่ทำการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.12 และเมื่อเปิดดูภายในห้องบรรจุของเหลว จะเห็นว่ามีของเหลวแม่เหล็กจำนวนมากหายไป (รูปที่ 3.13)



รูปที่ 3.12 ของเหลวแม่เหล็กที่บรรจุอยู่ในห้องบรรจุรั่วออกมาภายนอกขณะทำการทดสอบ



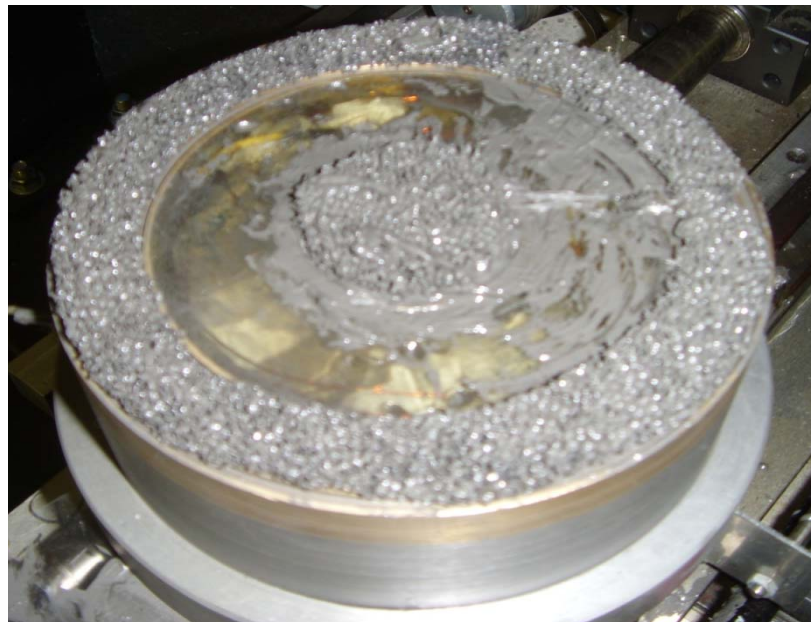
รูปที่ 3.13 แสดงของเหลวแม่เหล็กที่รั่วออกจากห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็กภาย
หลังทำการทดสอบ

เพื่อป้องกันของเหลวแม่เหล็กที่รั่วออกมา ระหว่างทำการทดสอบจึงเลือกใช้โฟมชนิดที่มีความเหนียวและมีปริมาตรช่องว่างภายในสูง ตัดเป็นรูปห้องว่างที่บรรจุของเหลวแม่เหล็ก (รูปที่ 3.14) บรรจุเข้าไปในห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็กเพื่อให้เป็นวัสดุดูดซับของเหลวแม่เหล็กไว้ไม่ให้รั่วขณะทำการทดสอบ หลังจากนั้นจึงบรรจุของเหลวแม่เหล็กใหม่จนเต็ม (รูปที่ 3.15)

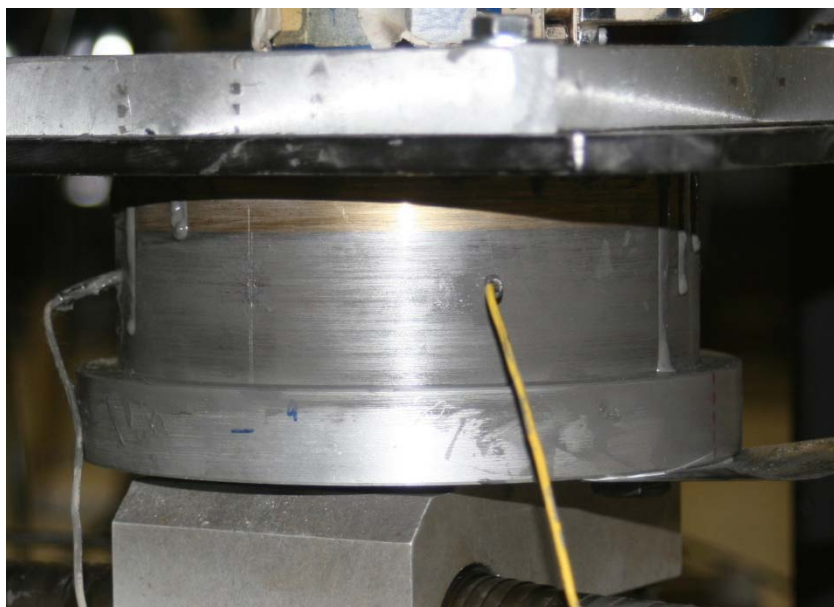
เมื่อทำการทดสอบเสร็จตัวห่วงของเหลวแม่เหล็กที่มีโฟมอยู่ในห้องบรรจุของเหลว พบว่าให้ค่าแรงหน่วงที่สม่ำเสมอขึ้น และภายหลังจากทำการทดสอบด้วยการให้คลื่นที่แบบวัฏจักร จะสังเกตเห็นว่าการรั่วของของเหลวแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวเบริงมีน้อยลงอย่างมาก (รูปที่ 3.16)



รูปที่ 3.14 โฟมที่ตัดเป็นรูปห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็ก



รูปที่ 3.15 ของเหลวแม่เหล็กที่อยู่ในช่องว่างของโฟมภายในห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็ก



รูปที่ 3.16 ของหลวมแม่เหล็กที่รั่วออกมากจากแบร็งที่มีโฟมในห้องบรรจุของหลวมแม่เหล็ก
ภายหลังจากการทดสอบ

3.8 ผลการออกแบบแบร็งตัวห่วงของหลวมแม่เหล็ก

การออกแบบแบร็งตัวห่วงของหลวมแม่เหล็กนี้กระทำเพื่อศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ควบคุมแรงห่วงให้เป็นไปตามรูปแบบการควบคุม ทั้งนี้ต้องพิจารณาทิศทางของแรง รูปร่าง มิติ ขนาดและน้ำหนักของแบร็ง รวมถึง การสร้างสนามแม่เหล็ก ความหนาแน่น และทิศทาง อีกทั้งต้องพิจารณาระบบโดยรวมที่ใช้ทดสอบ เช่น พิกัดกระแสของเครื่องควบคุม ปริมาณกระแสไฟฟ้า เครื่องจำลองแผ่นดินไหวขนาดเล็กที่นำมาใช้ เป็นต้น

การออกแบบประกอบด้วยการออกแบบด้านรูปร่าง ขนาด ตำแหน่งห้องบรรจุของหลวมแม่เหล็ก ห้องบรรจุขดลวดทองแดง จำนวนรอบ จำนวนขดลวด และขนาดของขดลวดทองแดง เพื่อให้ได้แรงห่วงประมาณ 50 นิวตัน พิกัดกระแส 1 แอมแปร์ ผลที่ได้ต้องใช้ลวดทองแดงขนาด 26 AWG พันรอบแกนเหล็ก 2 ขด ขดละ 700 รอบโดยต่อขนานกันและได้ความต้านทานรวมจากการวัดจริง 10.4 โอห์ม ขดลวดทองแดงทั้งสองขดบรรจุในแบร็งที่ทำจากเหล็ก S133 (ขนาดและมิติได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้) มีขอบผนังห้องบรรจุของหลวมแม่เหล็กทำจากทองเหลือง และเพื่อป้องกันการรั่วของของหลวมแม่เหล็กขณะทำการทดสอบ ได้ติดโฟมเหนียวที่ตัดเป็นรูปห้องบรรจุเพื่อให้ของหลวมแม่เหล็กชุ่มอยู่ภายในและไม่รั่วออกมาขณะทำการทดสอบ

บทที่ 4

การทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ของแบริงตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก

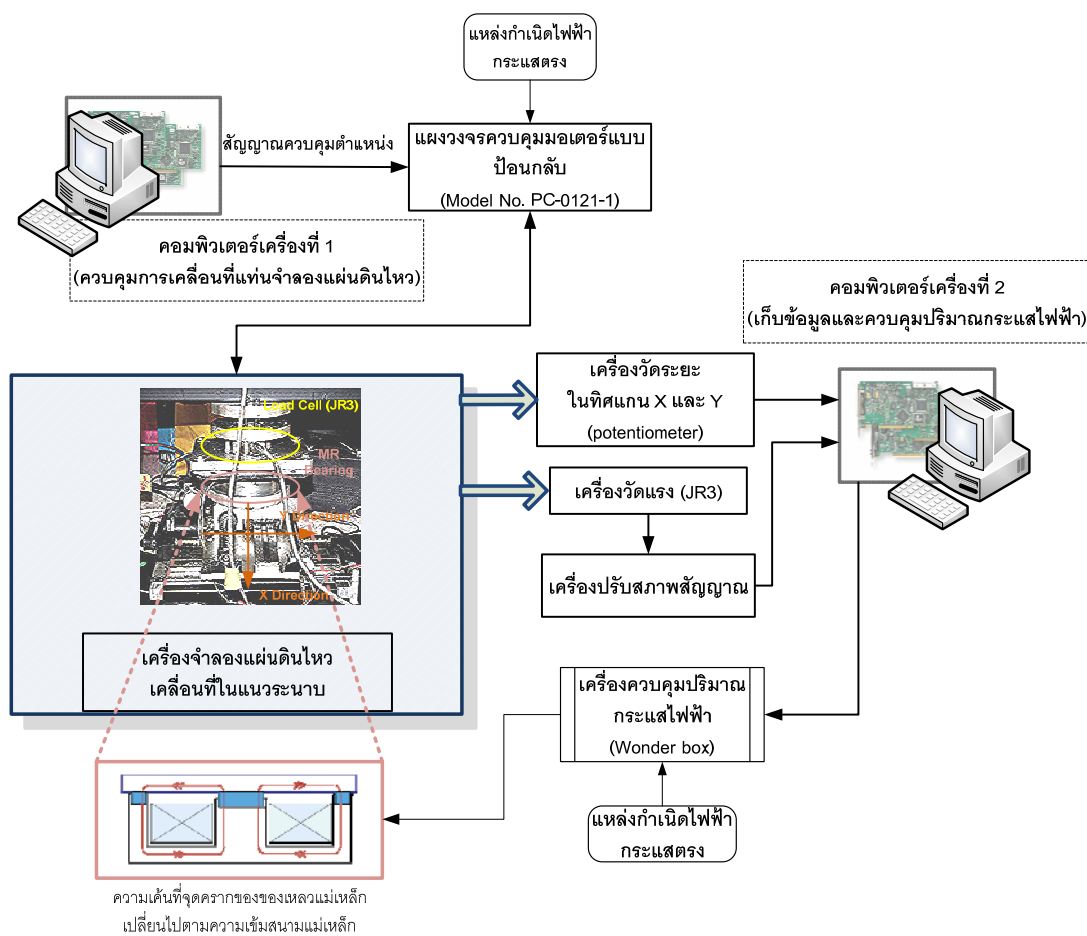
ในการใช้งานตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กสำหรับการควบคุมโครงสร้างแบบเซมิแอกทีฟที่นั่น แรงหน่วงที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงหนืด (viscous force) และแรงเฉือนครากของของเหลวแม่เหล็กที่เกิดจากการควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้า การควบคุมแรงหน่วงให้มีประสิทธิภาพนั้น ต้องสามารถทำได้ง่าย และตอบสนองต่อการควบคุมได้รวดเร็ว ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าหรือพลังงานน้อย การสลายพลังงานที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างจะมีมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับพิกัดของตัวหน่วงและประสิทธิภาพของรูปแบบการควบคุมที่ใช้

การควบคุมแรงหน่วงจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติและตัวแปรต่าง ๆ ในการควบคุมตัวหน่วง (control parameters) ตัวอย่างเช่น แรงดันไฟฟ้า ปริมาณกระแสไฟฟ้า ตำแหน่ง และความเร็วในการเคลื่อนที่เป็นต้น แล้วจึงใช้ตัวแปรเหล่านี้กับรูปแบบการควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงาน สิ่งการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์โดยการรับและป้อนสัญญาณควบคุมให้แก่ระบบควบคุมแรงหน่วงของตัวหน่วง

สำหรับตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ได้ออกแบบใหม่นี้จะต้องทำการทดสอบเพื่อให้ทราบตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมแรงหน่วง การทดสอบทำโดยการกระตุ้นด้วยความเร็วและการเคลื่อนที่ในรูปแบบที่ต่าง ๆ กันเพื่อให้ได้ข้อมูลที่พอเพียงสำหรับสร้างแบบจำลองของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กและในการทดลองนี้ได้เลือกใช้การกระตุ้นโดยการให้มีการเคลื่อนที่เป็นแบบวัฏจักร (sinusoidal) ซึ่งมีข้อดีคือมีการเคลื่อนที่ในรูปแบบที่มีการแปรผัน ความเร็วและความเร่งในหนึ่งรอบการเคลื่อนที่ จึงเหมาะสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงในระหว่างปรับค่าควบคุมเพื่อให้เกิดแรงหน่วงใด ๆ ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความหน่วงกับตัวแปรที่มีผลต่อแรงหน่วงได้

4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

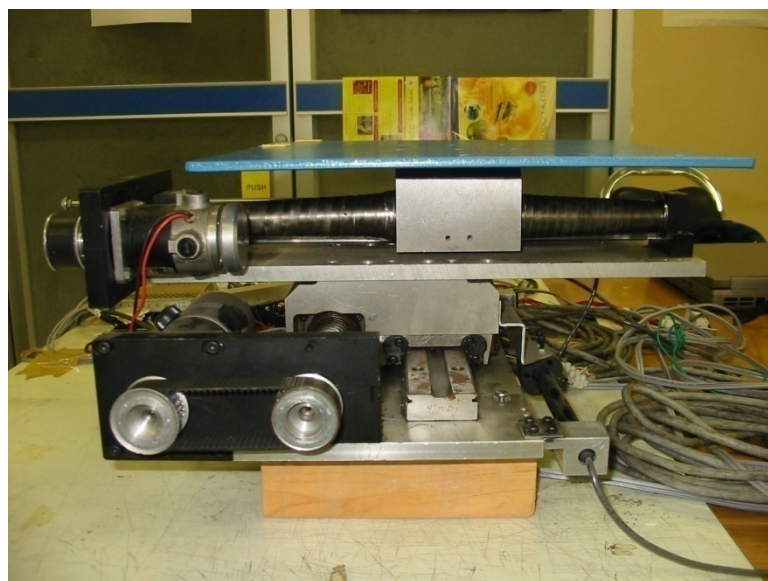
อุปกรณ์ทดสอบประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก แบ่งตามการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ ส่วนแรกเป็นส่วนขับเคลื่อนและควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองแผ่นดินไหว มีเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 1 เป็นอุปกรณ์ควบคุมหลักส่งสัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองแผ่นดินไหวผ่านแผงควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบป้อนกลับที่ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงส่งแรงบิดผ่านแกนขับแบบเกียร์ขับเคลื่อนแทนไปตามรางเลื่อน อีกส่วนหนึ่งคือเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 2 ทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดแรง เครื่องวัดระยะในแนวแกน 2 ชุดและควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก โดยที่แบร์ริงตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กติดตั้งอยู่บนเครื่องจำลองแผ่นดินไหวถูกขับเคลื่อนในแนวระนาบได้อย่างอิสระ ส่วนเครื่องวัดแรงถูกยึดกับแผ่นปรับระดับที่ถูกยึดกับโครงเหล็กที่ติดแน่นกับแท่นทดสอบที่ด้านบน (รูปที่ 4.1)



รูปที่ 4.1 การติดตั้งเครื่องมือทำการทดสอบ

4.1.1 แท่นจำลองแผ่นดินไหว

เป็นแท่นที่มีกลไกการขับเคลื่อนในสองทิศทางอิสระแยกจากกัน เคลื่อนที่ด้วยแรงบิดจากมอเตอร์ไปหมุนเกลียวขับเคลื่อนที่ต้องการขับเคลื่อนยึดติดกับเกลียวขับเคลื่อนด้วยลูกบอลโลหะ และยึดติดกับฐานด้วยรางเลื่อน ทำให้เคลื่อนที่ได้เฉพาะในทิศของแนวรางเลื่อนเท่านั้น และเมื่อนำชุดขับเคลื่อนมาติดตั้งด้านบนอีกชุดหนึ่งจะเคลื่อนที่ได้ในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน แสดงในรูปที่ 4.2 การขับเคลื่อนใช้แรงบิดจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกควบคุมโดยแผงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบป้อนกลับรุ่น PC-0121-1 ผลิตโดยบริษัทโอกาซากิ ซานเกียว (Okazaki Sangyo Co.,Ltd.) ซึ่งสามารถเลือกรูปแบบการควบคุมได้หลายแบบเช่น ควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าในมอเตอร์ ควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ หรือควบคุมตำแหน่งของกลไกที่ถูกขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ เป็นต้น การใช้งานในการทดลองนี้ต้องการใช้เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงเลือกกระยะการเคลื่อนที่เป็นสัญญาณควบคุมป้อนกลับ



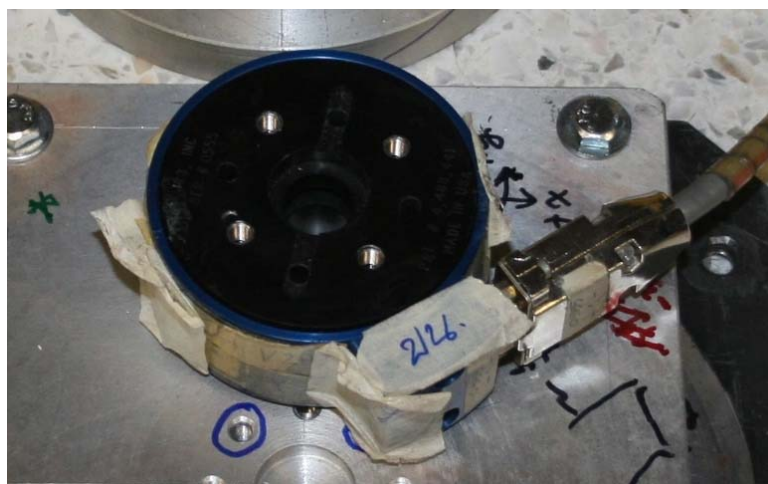
รูปที่ 4.2 เครื่องจำลองแผ่นดินไหว

การสร้างสัญญาณควบคุม นอกจากใช้แผงวงจรเก็บข้อมูลที่ได้อีกแล้ว ยังต้องใช้โปรแกรม LabView ของบริษัทเนชั่นแนลอินสตรูเมนต์จำกัด สำหรับเขียนชุดคำสั่ง เพื่อสร้างรูปแบบของสัญญาณและส่งข้อมูลในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลที่เป็นค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแท่นจำลองแผ่นดินไหว เพื่อส่งไปแผงวงจรเก็บข้อมูล NI-6024E (ที่ส่งสัญญาณออก) แปลง

สัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณแอนาล็อก ส่งสัญญาณควบคุม (ตำแหน่งที่ต้องการทั้งสองแกนของแท่นจำลองแผ่นดินไหว) ไปยังแผงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบป้อนกลับ

4.1.2 เครื่องวัดแรงแบบ 6 องศาความอิสระ

สำหรับแรงที่กระทำในระนาบใด ๆ จะมี โมเมนต์ 3 ทิศทาง แรงเฉือน 2 ทิศทาง และแรงในแนวแกน 1 ทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน เครื่องวัดแรงส่วนใหญ่ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการและในงานวิจัยจะวัดแรงได้เพียงทิศทางเดียว หากต้องการวัดแรงหนึ่งของเบริงที่มีการกระตุ้นให้มีการเคลื่อนที่แบบวัฏจักรในแนวระนาบ อย่างน้อยที่สุดการวัดแรงจำเป็นต้องกระทำในสองทิศทางพร้อมกัน อาจใช้เครื่องวัดแรงสองตัววัดแรงในทิศตั้งฉากกัน หรือใช้เครื่องวัดแรงที่สามารถวัดแรงได้พร้อมกันในหลายทิศทาง สำหรับในการทดลองนี้จะใช้เครื่องวัดแรงที่สามารถวัดแรงในระนาบได้พร้อมกัน ได้แก่เครื่องวัดแรงของ JR3, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกาสามารถวัดแรงได้ 6 องศาความอิสระ (degree of freedom) ทั้งสามแกนในระบบพิกัดฉาก (cartesian coordinate) รุ่น UFS-3012A25-U562 (รูปที่ 4.3) มีพิกัดน้ำหนักในแนวแกน X และแกน Y 25 ปอนด์ มีพิกัดน้ำหนักในแนวแกน Z 50 ปอนด์ และพิกัดโมเมนต์ 75 ปอนด์-นิ้ว ทั้งสามแกน



รูปที่ 4.3 เครื่องวัดแรง JR3



รูปที่ 4.4 เครื่องปรับสภาพสัญญาณจากเครื่องวัดแรง JR3

สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดแรง ต้องผ่านเครื่องปรับสภาพสัญญาณ (รูปที่ 4.4) เพื่อให้มีคุณภาพสัญญาณที่ดีและอยู่ในช่วงแรงดันที่เครื่องเก็บข้อมูลใช้งานได้ (อยู่ในช่วง +/-10 โวลต์)

4.1.3 เครื่องวัดระยะ

เครื่องวัดระยะ (displacement transducer) ที่ใช้ในการทดลองเป็นรุ่น LT-F58000140 ของบริษัท Honeywell ติดตั้งเพื่อวัดการเคลื่อนที่ของแท่นจำลองแผ่นดินไหวที่เคลื่อนตัวเป็นเส้นตรงภายในรางเลื่อน (รูปที่ 4.5) ใช้งานภายใต้แรงดันกระแสตรงไม่เกิน 30 โวลต์



รูปที่ 4.5 เครื่องวัดระยะติดตั้งบนเครื่องจำลองแผ่นดินไหว

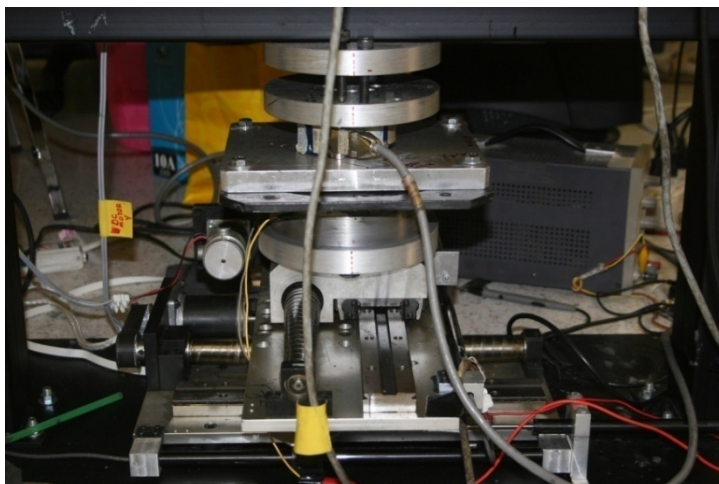
4.1.4 เครื่องควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า

ในการทดลองนี้ใช้เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชันของ Lord Corporation (รูปที่ 4.6) ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงดันไม่เกิน 12 โวลต์ (ในการทดลองนี้ใช้แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์) ขับกระแสไฟฟ้าได้ไม่เกิน 2 แอมแปร์



รูปที่ 4.6 เครื่องควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า

จากอุปกรณ์ข้างต้นเมื่อนำมาติดตั้งกับเครื่องจำลองแผ่นดินไหว (รูปที่ 4.7) จะสามารถจำลองการเคลื่อนที่ในแนวราบโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์และชุดคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ ในขณะที่เดียวกับการวัดแรงหน่วงของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์อีกเครื่องหนึ่ง



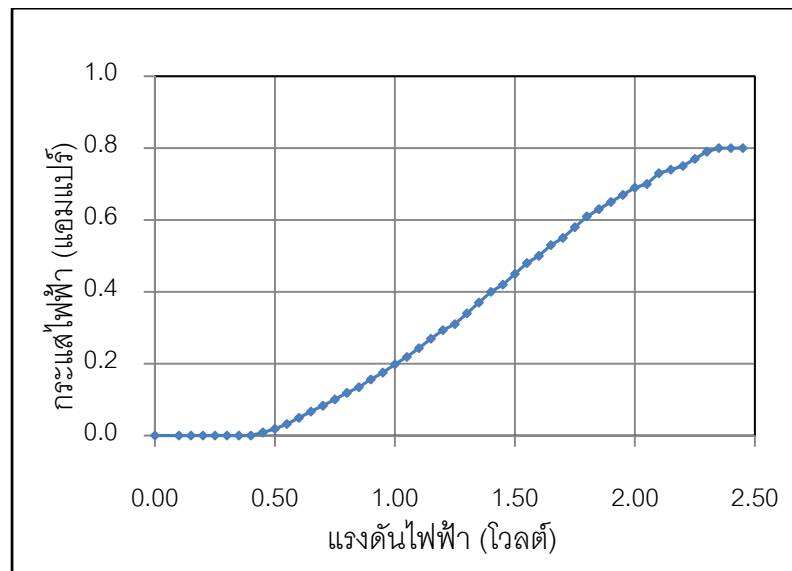
รูปที่ 4.7 เครื่องจำลองแผ่นดินไหว

4.2 การทดสอบแบร็ริงที่บรรจุของเหลวแม่เหล็กภายใน

การทดสอบทำโดยการให้แท่นจำลองแผ่นดินไหวที่ติดตั้งแบร็ริงตัวหนึ่งของเหลวแม่เหล็กให้มีการเคลื่อนที่แบบวัฏจักรในทิศทางต่าง ๆ กัน รวมทั้งสิ้น 5 ทิศทางในแนวระนาบ คือ ทิศทางตามแนวแกน X, ทิศทางตามแนวแกน Y, เคลื่อนที่ทิศทางทำมุม 45 องศากับแกน X, ทิศทางทำมุม 135 องศากับแกน X และให้เคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยให้มีการเคลื่อนที่สูงที่สุด 15 มิลลิเมตรพร้อมกัน ยกเว้นกรณีที่เคลื่อนที่ตามแนวแกน X หรือ Y (แสดงในตารางที่ 4.1)

การเคลื่อนที่ทั้งหลายดังกล่าวจะถูกสั่งงานให้เคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 1 ร่วมกับแผงวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบป้อนกลับ ในขณะที่แท่นจำลองแผ่นดินไหวเคลื่อนที่ตามสัญญาณจากคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 1 คอมพิวเตอร์เครื่องที่ 2 จะทำหน้าที่บันทึกข้อมูลระยะการเคลื่อนที่และแรงหน่วงที่เกิดจากแบร็ริง และทำหน้าที่ควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดทองแดงในแบร็ริงโดยส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไปที่เครื่องควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 4.8



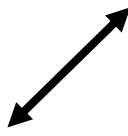

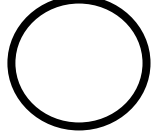
จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าการทดสอบแยกได้เป็น 2 กรณีตามรูปแบบการเคลื่อนที่ คือ กรณีแรกเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกนใดแกนหนึ่งได้แก่ เคลื่อนที่ในแนวแกน X และเคลื่อนที่ในแนวแกน Y กรณีที่สองเคลื่อนที่พร้อมกันทั้งสองแกน ได้แก่ เคลื่อนที่ในแนวทำมุม 45 องศา กับแกน X (เฟสต่างกัน 0 องศา), เคลื่อนที่ในแนวทำมุม 135 องศา กับแกน X (เฟสต่างกัน 180 องศา) และเคลื่อนที่เป็นวงกลม (เฟสต่างกัน 90 องศา) แต่เมื่อทำการทดลองจริง พบว่าต้องมีการปรับแก้ค่าควบคุมที่ส่งจากคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ค่าระยะการเคลื่อนที่และมุมที่ทำระหว่างแกนการเคลื่อนที่มีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ต้องการและมีการคลาดเคลื่อนน้อยเมื่อมีแรงหน่วงมากกระทำ ค่าควบคุมจากการปรับแก้ที่แสดงใน ตารางที่ 4.3 สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และแนวแกน Y ตามลำดับ, ตารางที่ 4.4, ตารางที่ 4.5 สำหรับการเคลื่อนที่พร้อมกันทั้งสองแกน ทำมุม 45 องศา และ 135 องศา กับแกน X ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออก

เมื่อเริ่มทดสอบในแต่ละกรณีของทิศทางการเคลื่อนที่และความถี่ที่ได้กำหนดไว้ เริ่มจากกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดทองแดงเริ่มจาก 0 แอมแปร์ เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 แอมแปร์จนถึง 0.8 แอมแปร์ ขณะกำหนดให้มีการเคลื่อนที่แบบวัฏจักรที่มีค่าความถี่คงที่ บันทึกค่าหน่วยแรงและระยะการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นกับแบริ่งอย่างน้อย 20 รอบด้วยแผงเก็บข้อมูลที่อยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์ เมื่อบันทึกข้อมูลแล้วจึงปรับเปลี่ยนความถี่ หรือรูปแบบทิศทางการเคลื่อนที่จนได้ข้อมูลครบตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 กรณีที่ทดสอบให้มีการเคลื่อนที่แบบวัฏจักรโดยปรับทิศทาง ความถี่ และกระแสไฟฟ้า

มุมระหว่างแนว การเคลื่อนที่กับ แกน X (องศา)	ความถี่ รอบ/วินาที	ระยะการ เคลื่อนที่ (มม.)	ปริมาณกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	แนวการเคลื่อนที่ใน แนวระนาบ
0	0.50	15	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4,0.5 ,0.6, 0.7, 0.8	
	0.75			
	1.00			
	1.25			
	1.50			
90	0.50	15	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4,0.5 ,0.6, 0.7, 0.8	
	0.75			
	1.00			
	1.25			
	1.50			
45	0.500	15	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4,0.5 ,0.6, 0.7, 0.8	
	0.75			
	1.00			
	1.25			
	1.50			
135	0.50	15	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4,0.5 ,0.6, 0.7, 0.8	
	0.75			
	1.00			
	1.25			
	1.50			
เคลื่อนที่เป็น วงกลม	0.50	15	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4,0.5 ,0.6, 0.7, 0.8	
	0.75			
	1.00			
	1.25			
	1.50			

ตารางที่ 4.2 ค่าที่กำหนดในเครื่องคอมพิวเตอร์ (ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน X)

กำหนดความถี่ (รอบ/วินาที)	กำหนดระยะ การเคลื่อนที่สูงสุด (มม.)
0.50	15.8
0.75	15.8
1.00	15.4
1.25	15.0
1.50	15.0

ตารางที่ 4.3 ค่าที่กำหนดในเครื่องคอมพิวเตอร์ (ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y)

กำหนดความถี่ (รอบ/วินาที)	กำหนดระยะ การเคลื่อนที่สูงสุด (มม.)
0.50	16.6
0.75	17.6
1.00	18.2
1.25	19.2
1.50	19.8

ตารางที่ 4.4 ค่าที่กำหนดในคอมพิวเตอร์ (ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวทำมุม 45 องศา กับแกน X)

กำหนดความถี่ (รอบ/วินาที)	กำหนดเฟสต่างกัน (องศา)	กำหนดระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (มม.)	
		เคลื่อนที่ในแนวแกน X	เคลื่อนที่ในแนวแกน Y
0.50	200	15.0	16.6
0.75	210	15.4	18.0
1.00	215	15.4	19.6
1.25	220	15.4	21.6
1.50	215	15.4	23.2

ตารางที่ 4.5 ค่าที่กำหนดในคอมพิวเตอร์(ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวทำมุม 135 องศา กับแกน X)

ความถี่ (รอบ/วินาที)	กำหนดเฟสต่างกัน (องศา)	กำหนดระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (มม.)	
		เคลื่อนที่ในแนวแกน X	เคลื่อนที่ในแนวแกน Y
0.50	20	15.0	16.6
0.75	25	15.0	17.2
1.00	30	15.0	18.0
1.25	35	15.0	19.2
1.50	30	15.0	19.8

4.3 ผลการทดสอบ

รูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.12 แสดงแรงหน่วงกับระยะทางที่เคลื่อนที่ โดยปรับความถี่จาก 0.5 รอบต่อวินาทีจนถึง 1.5 รอบต่อวินาที ในแต่ละครั้งที่ปรับความถี่จะปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแบร์ริง ทำให้เกิดแรงหน่วงที่ต้านกับการเคลื่อนที่ของแบร์ริงที่แปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ จะเห็นได้ว่าเมื่อให้มีการเคลื่อนที่ด้วยความถี่ที่สูงกว่า 1.25 รอบต่อวินาที ขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้ามากกว่า 0.5 แอมแปร์ จะทำให้การเคลื่อนที่ของแท่นจำลองแผ่นดินไหวมีการคลาดเคลื่อนออกจากตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ สังเกตได้จากวงรอบการเคลื่อนที่ที่มีการตีบแคบลงมาเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงความถี่และปริมาณกระแสไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ต่ำกว่า เช่นเดียวกันกับรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงและความเร็วที่แสดงใน รูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.16 จะเห็นว่าความเร็วสูงสุดที่จุดที่เกิดแรงหน่วงสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อมีแรงหน่วงที่เพิ่มสูงขึ้น

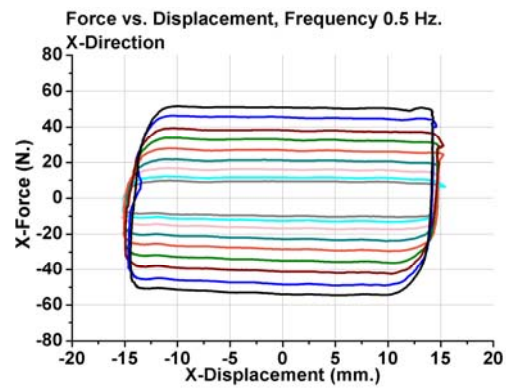
สำหรับการเคลื่อนที่สองแกนพร้อมกัน รูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 จะสังเกตเห็นว่าแรงหน่วงมีการกระเพื่อมตลอดวงรอบการเคลื่อนที่ตลอดทุก ๆ ความถี่แต่จะมากขึ้นเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนการเคลื่อนที่ที่มีค่าคลาดเคลื่อนเมื่อมีความถี่มากกว่า 1 รอบต่อวินาที สังเกตได้จากรูปที่ 4.21 และ รูปที่ 4.22 ทั้งนี้เป็นข้อจำกัดของเครื่องจำลองแผ่นดินไหว

จากรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงและเวลา รูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.24 สังเกตได้ว่าแรงหน่วงสูงสุดในขณะที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในทุกรอบความถี่ของการเคลื่อนที่ เช่นเดียวกับรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็ว (รูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.17) ที่มีลักษณะเป็นฮิสเทอรีซิส ที่มีแรงหน่วงที่ความเร็วสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน และความเร็วสูงสุดจะมีค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ในแกน Y ที่มีค่า

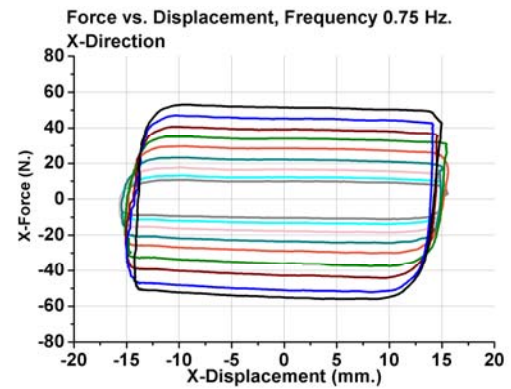
ความเร็วสูงสุดไม่เกิน 150 มิลลิเมตรต่อวินาที (ความเร็ว 1.5 รอบต่อวินาที ที่ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตร) แต่ผลการทดลองของการเคลื่อนที่ในแกน X เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความถี่สูงกว่า 1.25 รอบต่อวินาทีและเริ่มเพิ่มกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างแรงหน่วง ความเร็วสูงสุดที่ได้จะมีค่าลดลง เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่พร้อมกันทั้งสองแกน ซึ่งมีการเคลื่อนที่ในแกน X เป็นส่วนประกอบ จะเห็นว่ามีความหนาทานน้อยต่อแรงหน่วงที่เพิ่มขึ้น ต่างกับการเคลื่อนที่ในแกน Y ซึ่งหนาทานมากกว่า

จากรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเปรียบเทียบกับคำสั่งการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาเวลาประวิง (time delay) ของแรงหน่วงที่เกิดขึ้นโดยคิดสัมพันธ์กับความเร็ว ปรากฏว่าที่ความถี่ 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 และ 1.5 รอบต่อวินาที จะมีเวลาประวิงเกิดขึ้น 0.10, 0.08, 0.06, 0.05 และ 0.01 วินาทีตามลำดับ สำหรับการเคลื่อนที่ในแกน X และเกิดขึ้น 0.10, 0.06, 0.04, 0.03 และ 0.02 วินาทีตามลำดับสำหรับการเคลื่อนที่ในแกน Y และจากกราฟการเคลื่อนที่ที่ให้มีการเคลื่อนที่พร้อมกัน (รูปที่ 4.21 ถึง รูปที่ 4.23) เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความถี่สูงกว่า 1 รอบต่อวินาทีรูปร่างการเคลื่อนที่พองออกและผิดเพี้ยนไปจากผลของความล่าช้าของเฟสการเคลื่อนที่และจะมีผลมากขึ้นเมื่อมีแรงหน่วงมากกระทำ

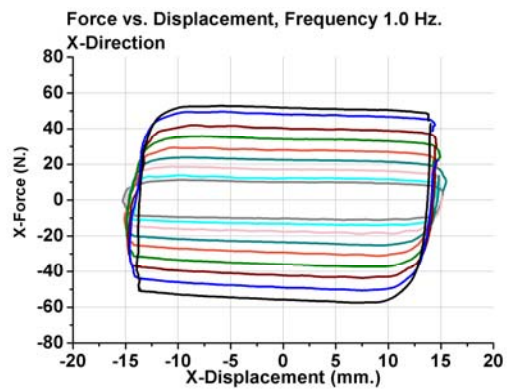
ผลการทดสอบโดยรวมเมื่อให้มีการเคลื่อนที่แบบวงจักร จะมีความคลาดเคลื่อนของระยะการเคลื่อนที่และความเร็ว และยิ่งมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเมื่อมีแรงหน่วงกระทำ ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของแท่นจำลองแผ่นดินไหว เมื่อให้มีการเคลื่อนที่ด้วยความถี่สูงกว่า 1 รอบต่อวินาที



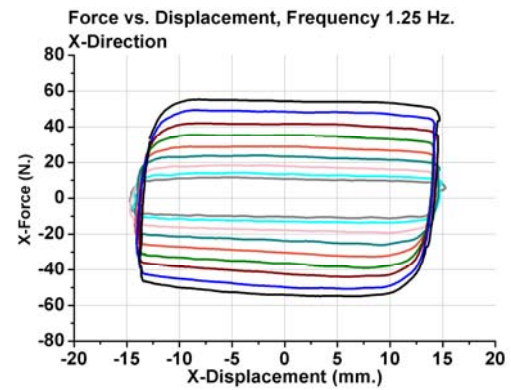
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



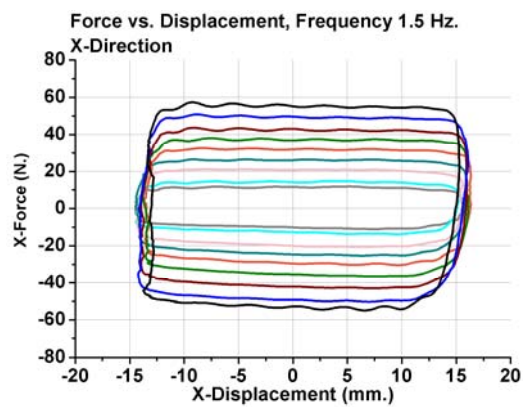
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



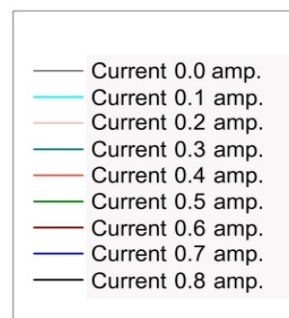
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



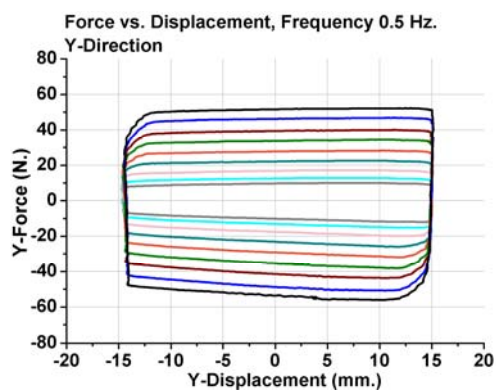
(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



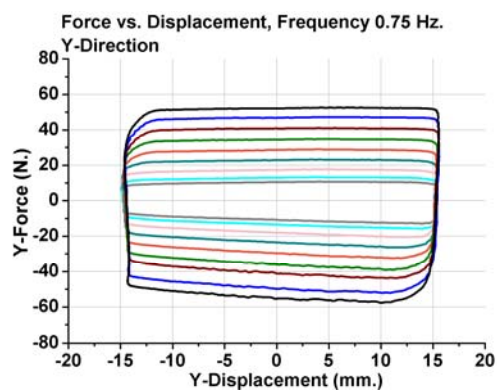
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



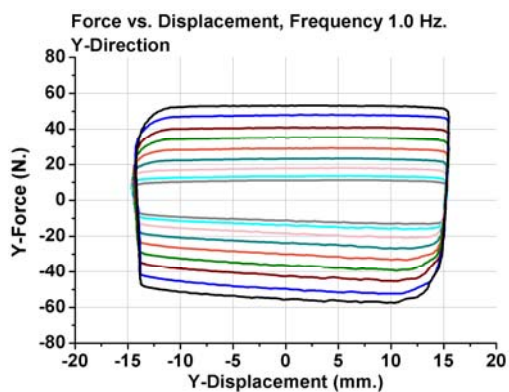
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X



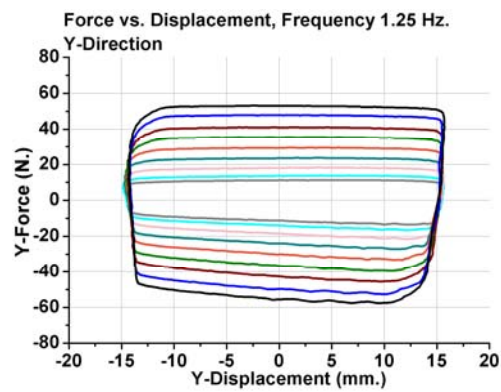
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



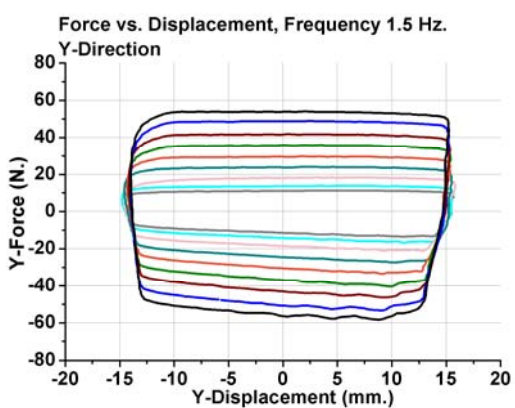
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



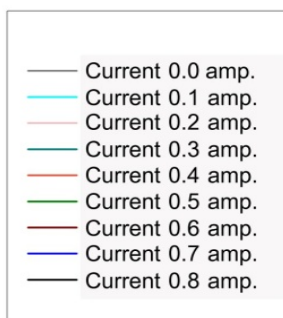
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



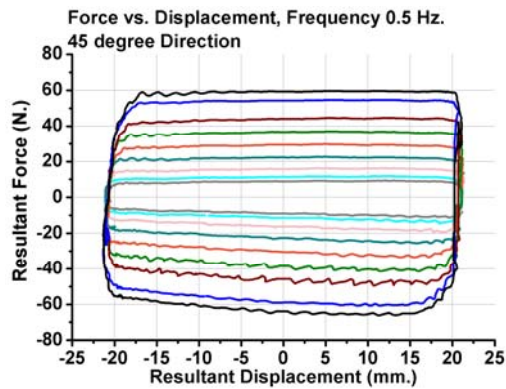
(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



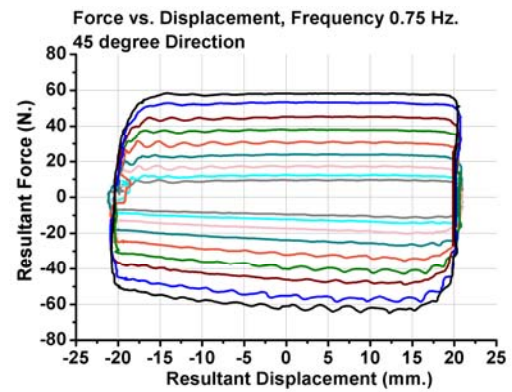
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



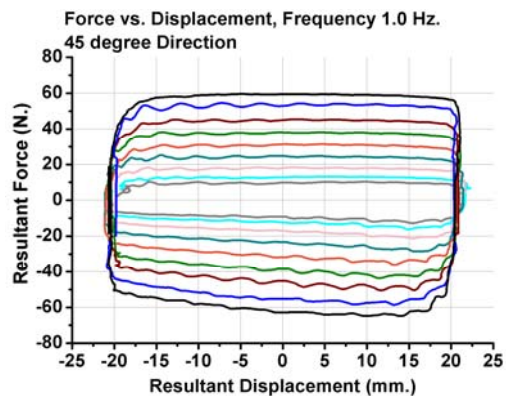
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y



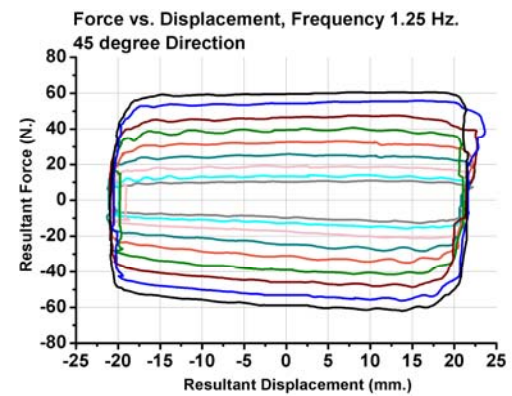
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



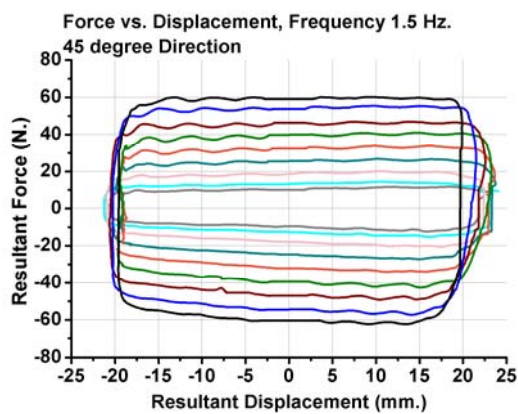
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



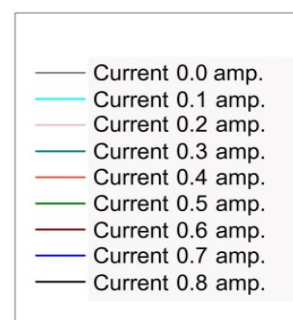
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที

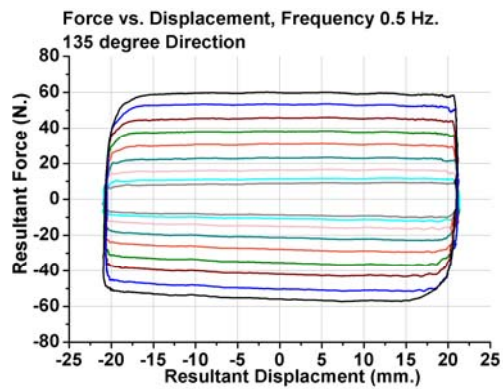


(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที

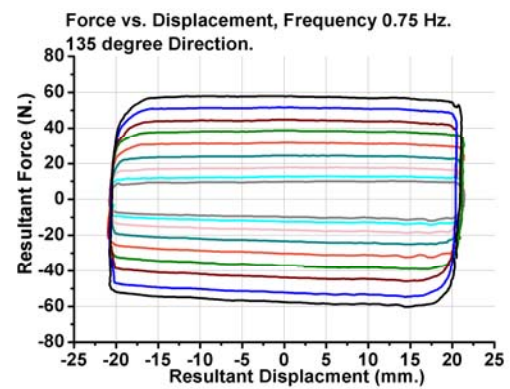


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนว

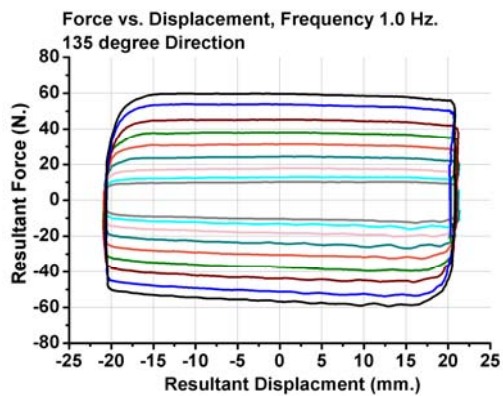
ทำมุม 45 องศา กับแกน X



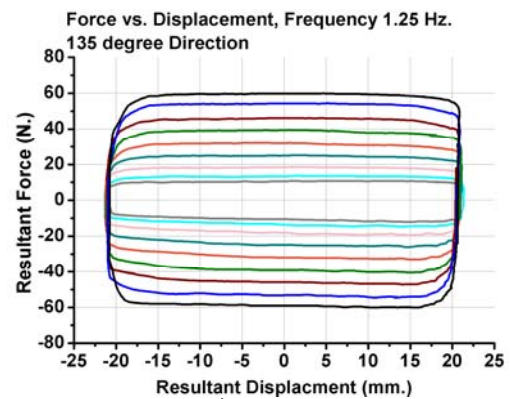
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



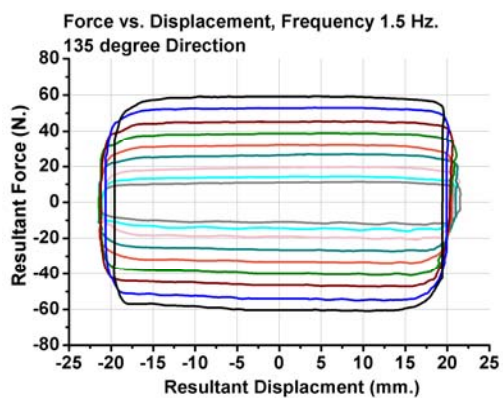
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



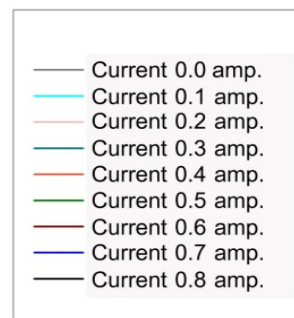
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



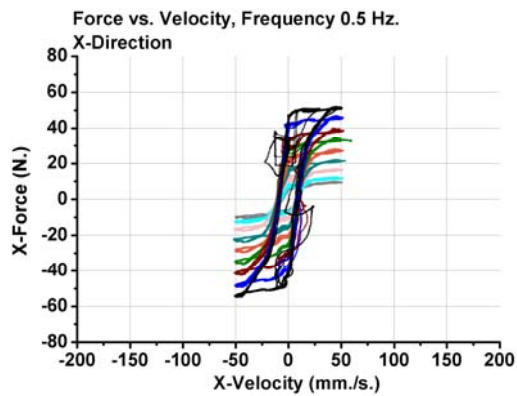
(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



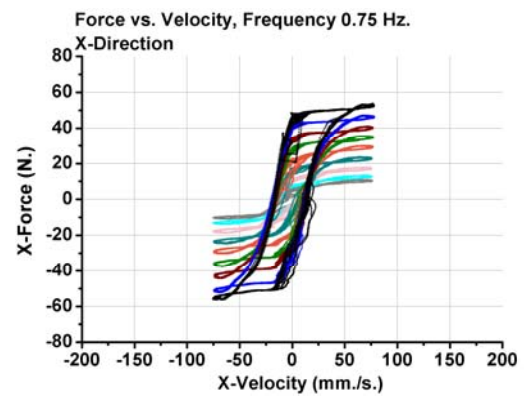
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



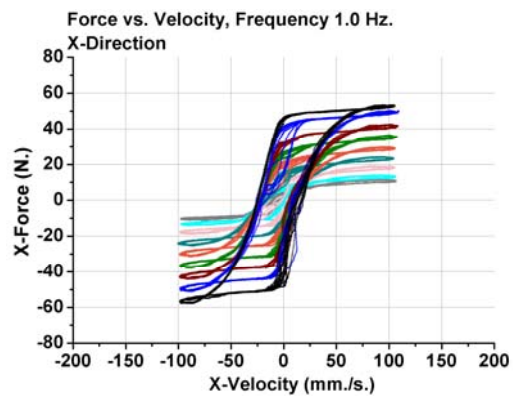
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนว
ทำมุม 135 องศา กับแกน X



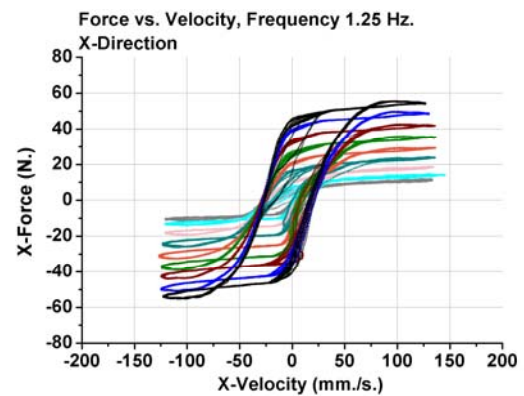
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



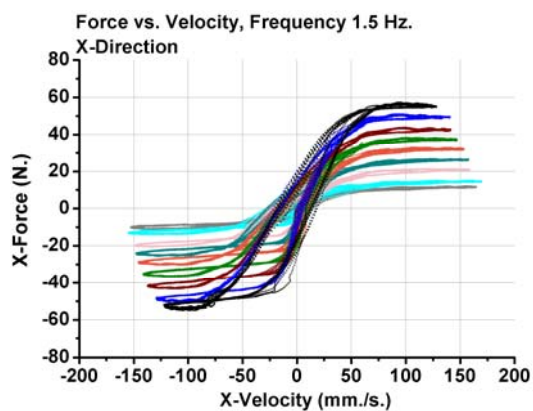
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



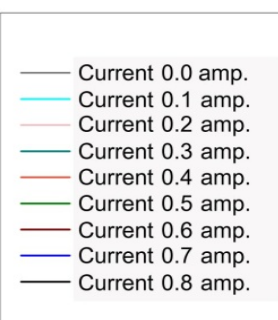
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



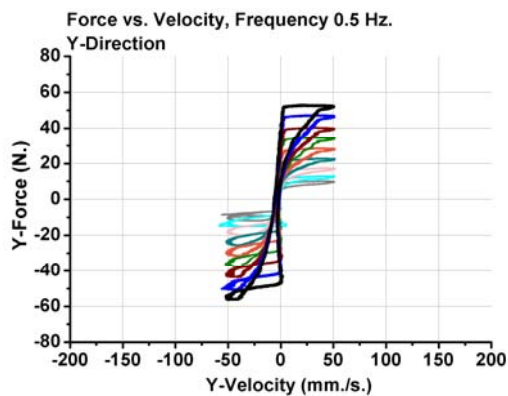
(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



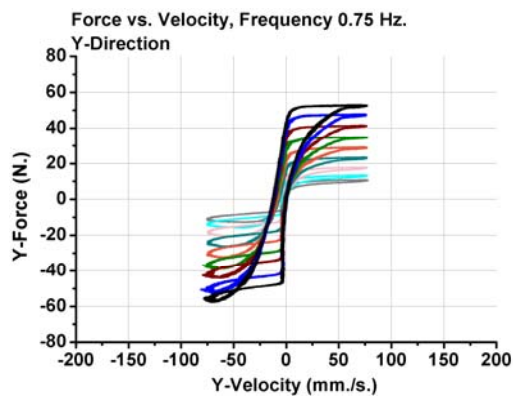
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



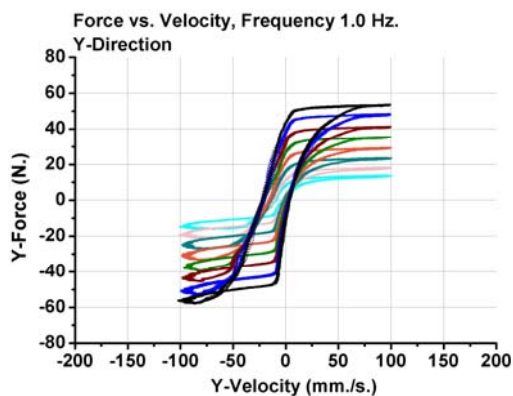
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วเมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X



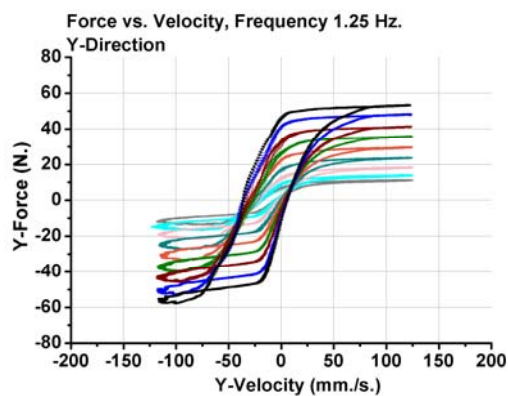
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



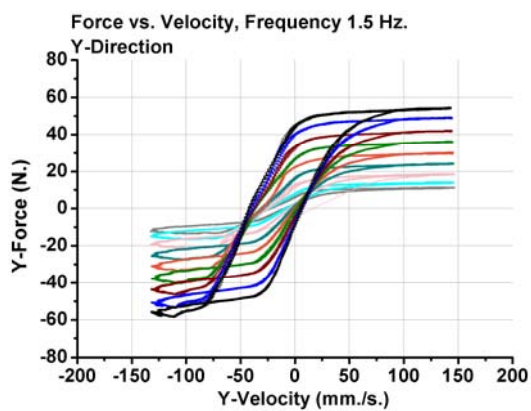
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



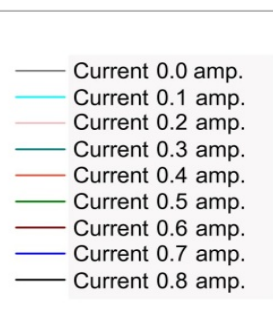
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



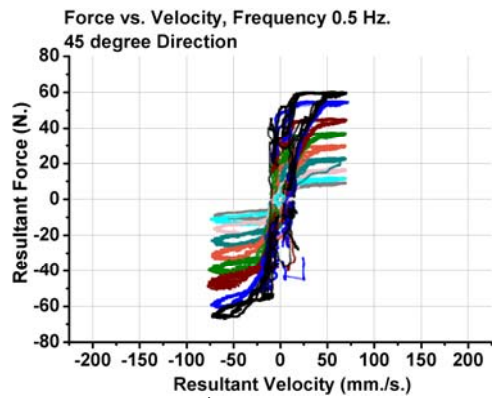
(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



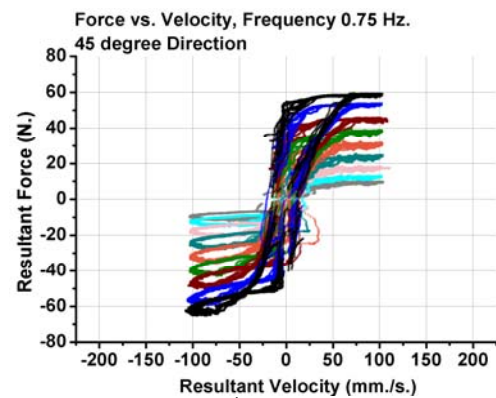
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



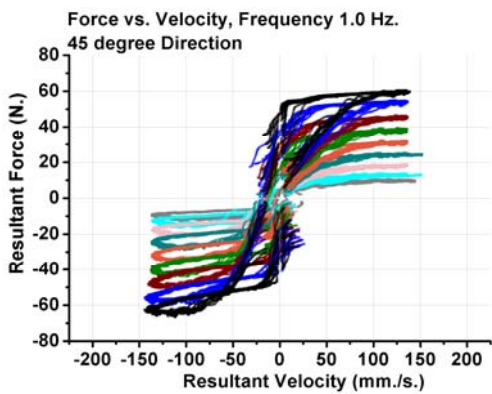
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วเมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y



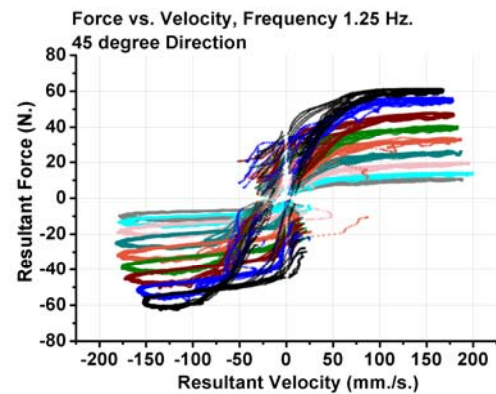
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



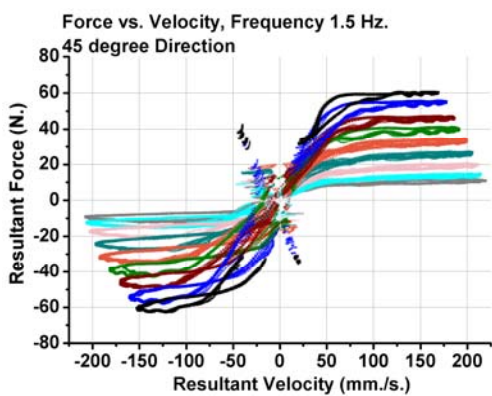
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



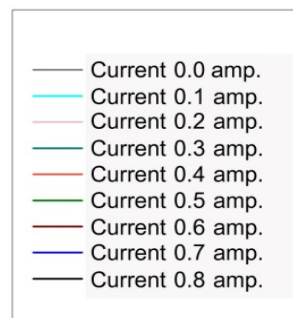
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



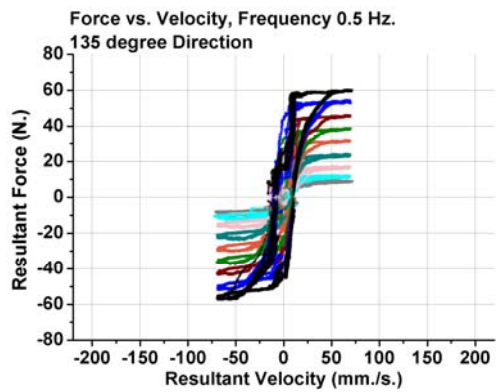
(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



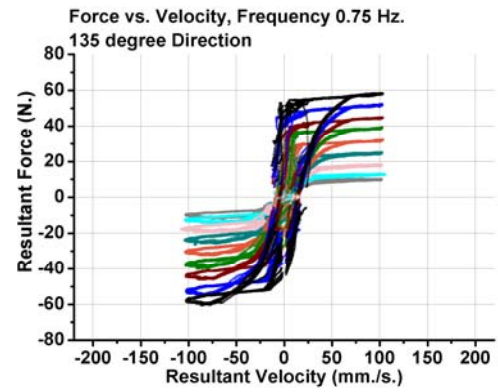
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



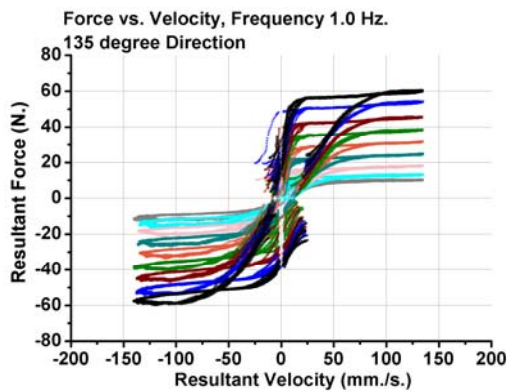
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วเมื่อเคลื่อนที่ในแนว
ทำมุม 45 องศา กับแกน X



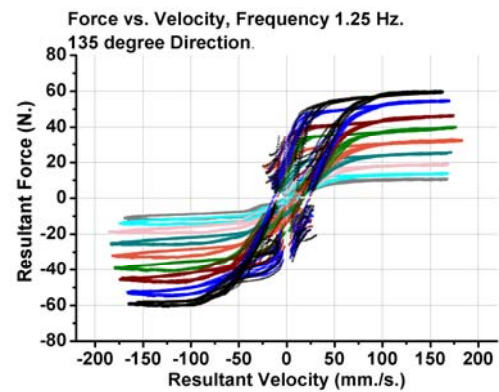
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



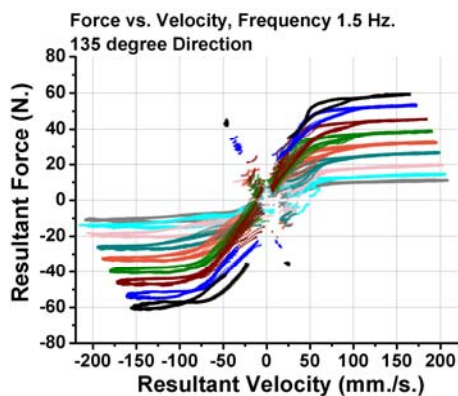
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



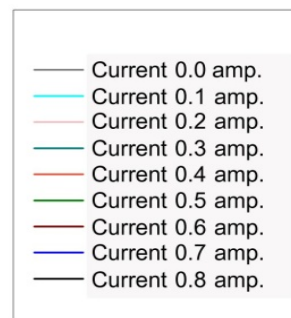
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที

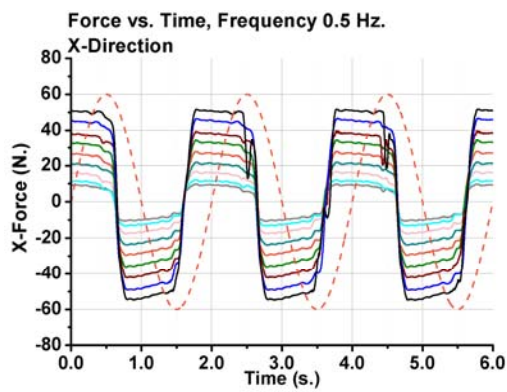


(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที

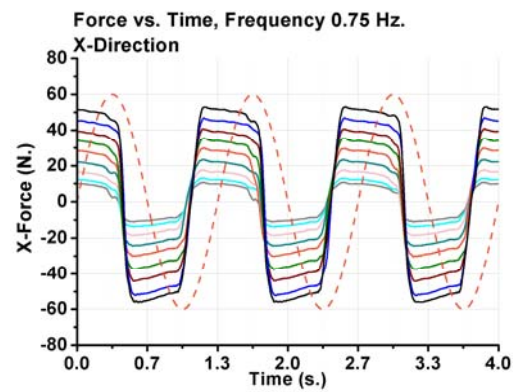


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วเมื่อเคลื่อนที่ในแนว

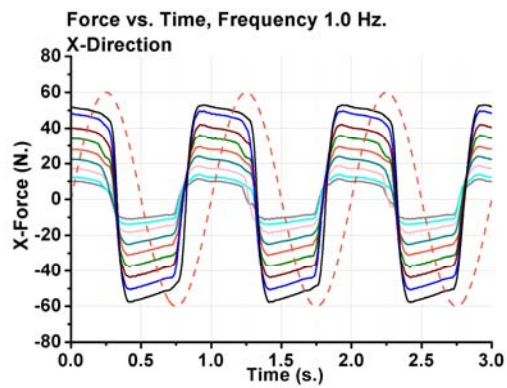
ทำมุม 135 องศา กับแกน X



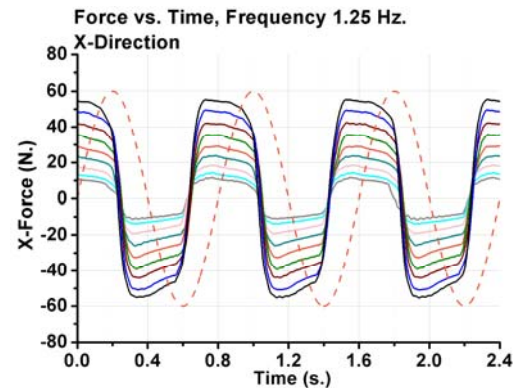
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



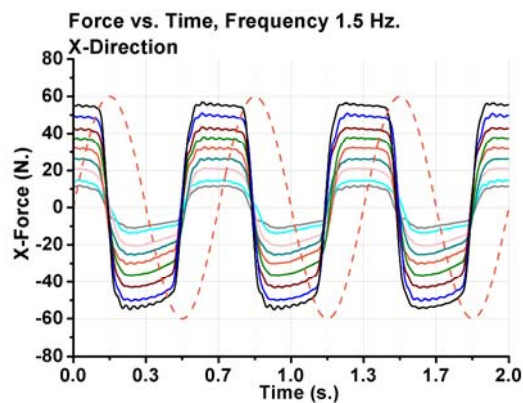
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



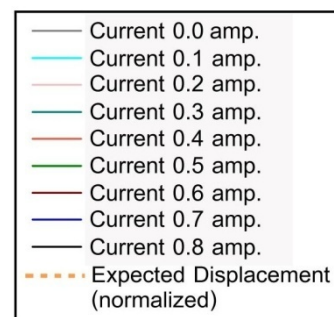
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



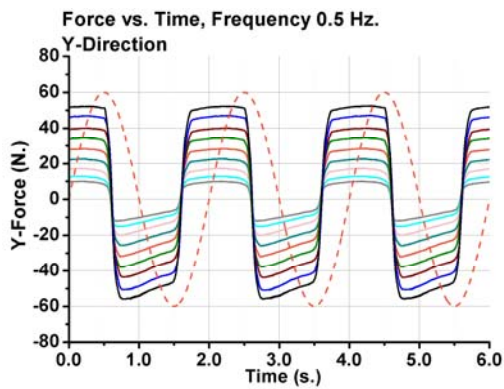
(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



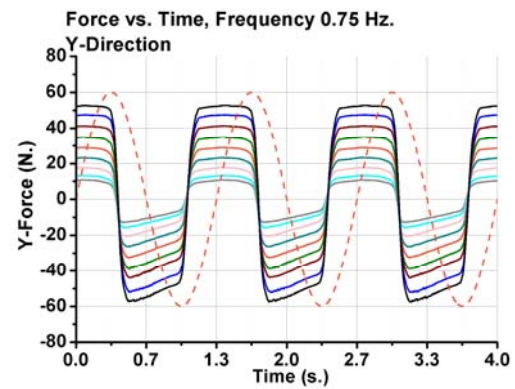
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



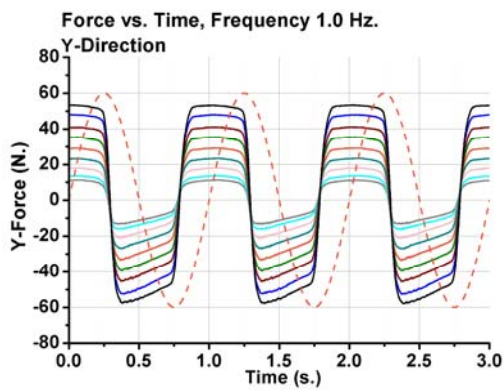
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X



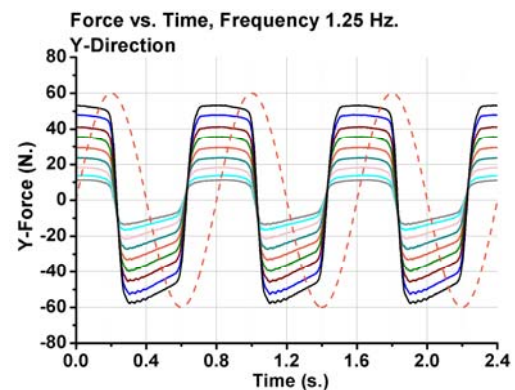
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



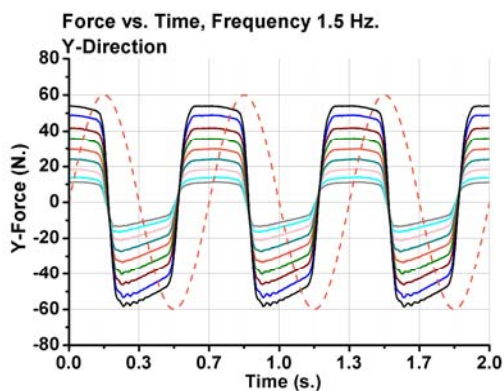
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



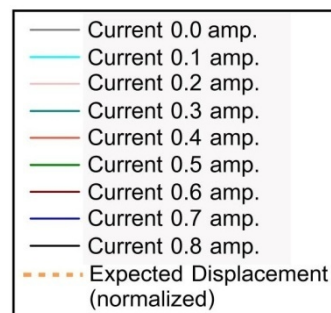
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



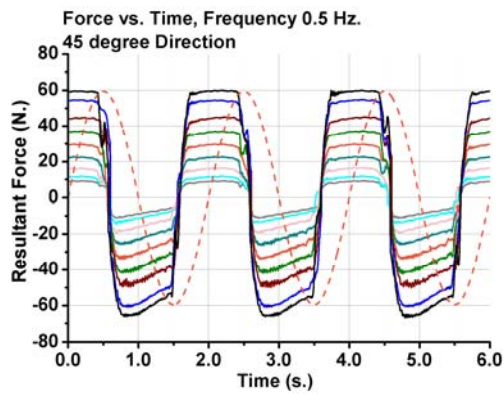
(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



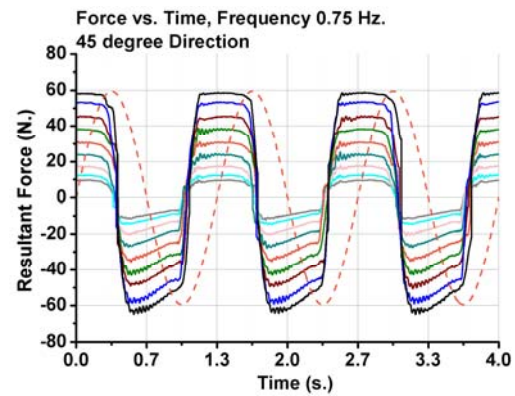
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



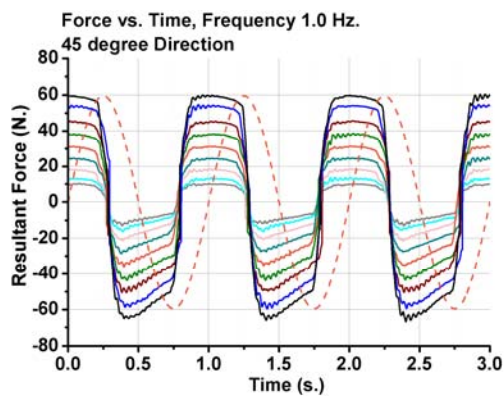
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y



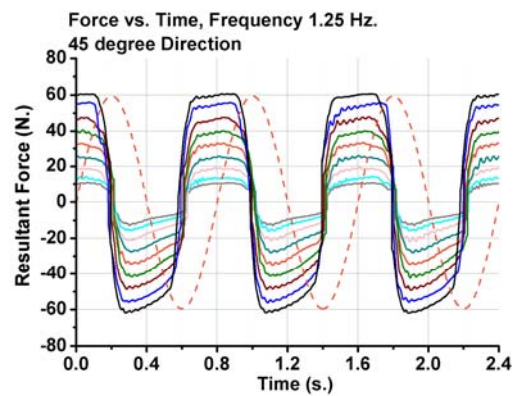
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



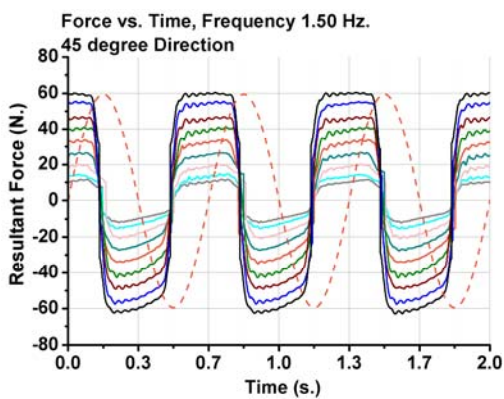
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



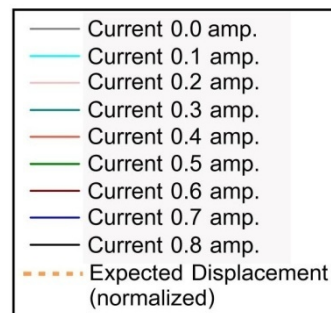
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



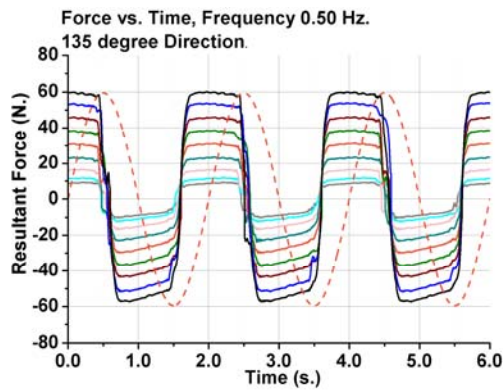
(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



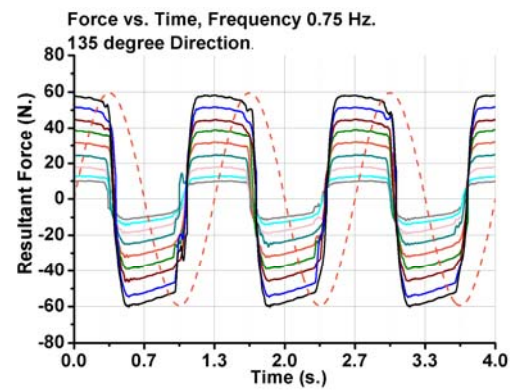
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



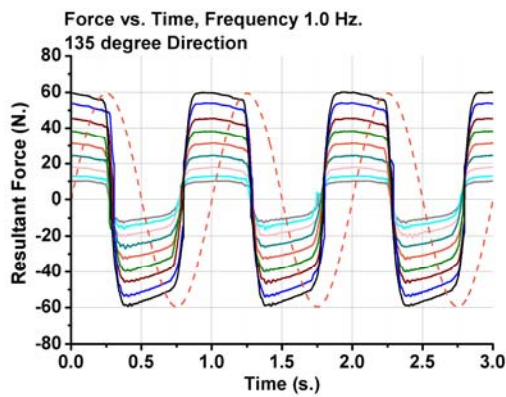
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเมื่อเคลื่อนที่ในแนวทำมุม 45 องศา กับแกน X



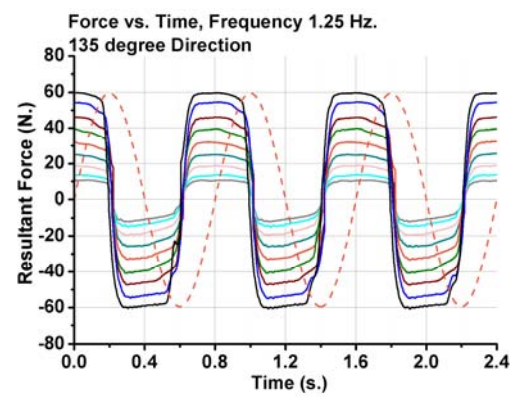
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



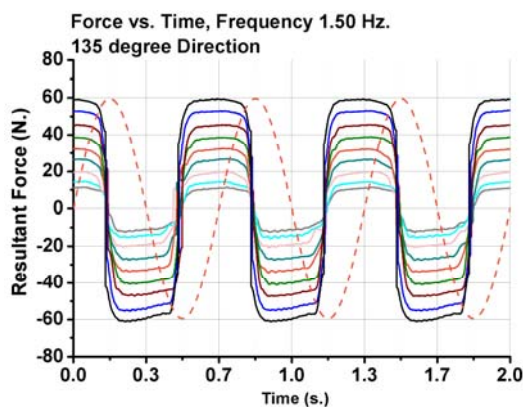
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



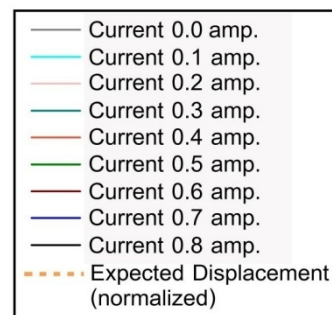
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที

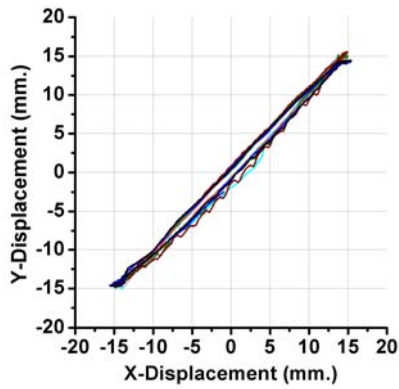


(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



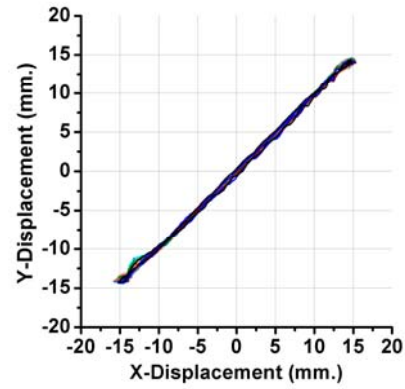
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเมื่อเคลื่อนที่ในแนวทำมุม 135 องศา กับแกน X

X vs. Y Displacement, Frequency 0.5 Hz.
45 degree Direction



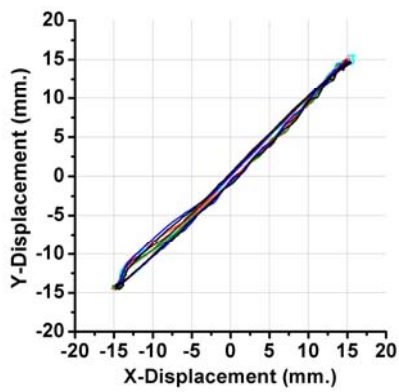
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที

X vs. Y Displacement, Frequency 0.75 Hz.
45 degree Direction



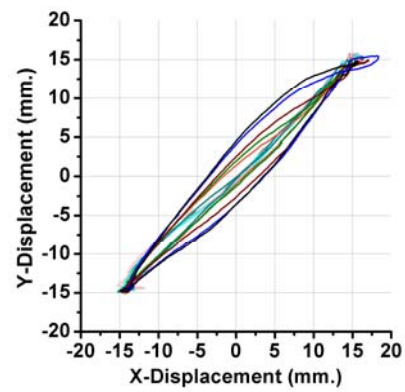
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที

X vs. Y Displacement, Frequency 1 Hz.
45 degree Direction



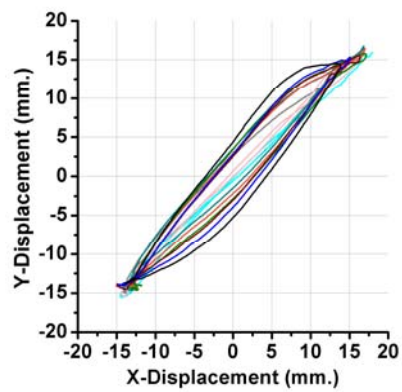
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที

X vs. Y Displacement, Frequency 1.25 Hz.
45 degree Direction

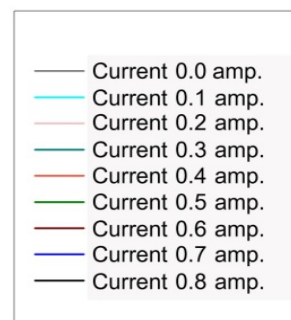


(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที

X vs. Y Displacement, Frequency 1.5 Hz.
45 degree Direction

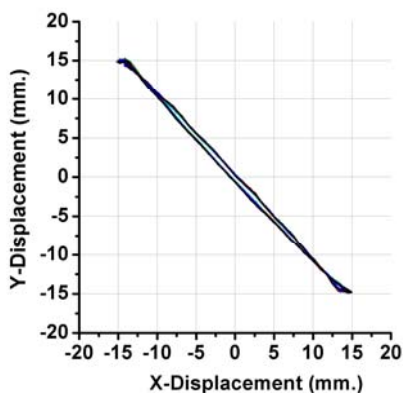


(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



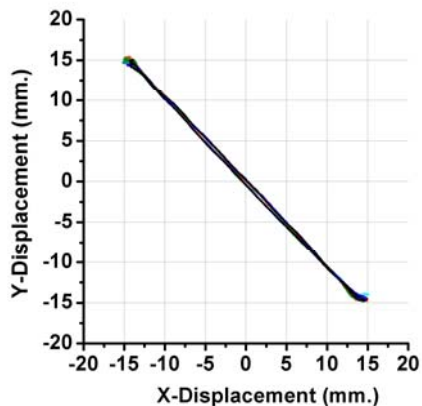
รูปที่ 4.21 การเคลื่อนที่แกน X และแกน Y ในแนวทำมุม 45 องศา กับแกน X

**X vs. Y Displacement, Frequency 0.5 Hz.
135 degree Direction**



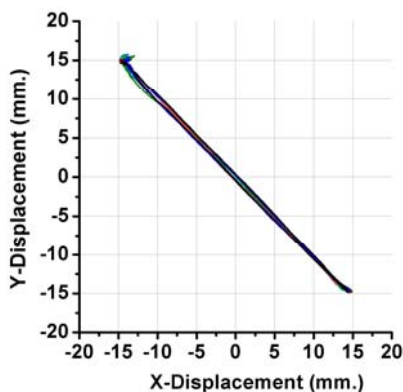
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที

**X vs. Y Displacement, Frequency 0.75 Hz.
135 degree Direction**



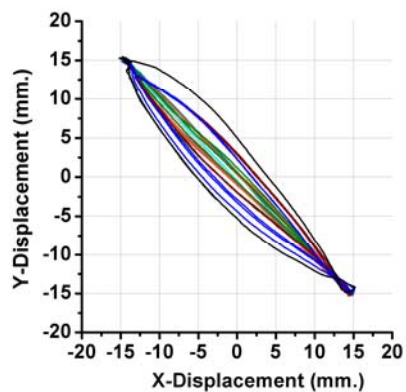
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที

**X vs. Y Displacement, Frequency 1 Hz.
135 degree Direction**



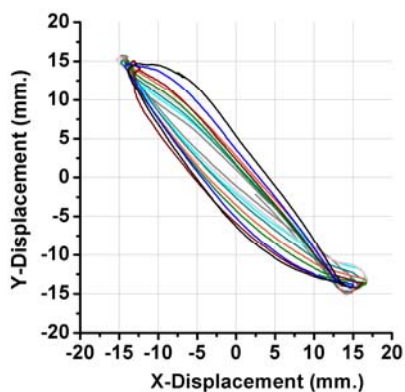
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที

**X vs. Y Displacement, Frequency 1.25 Hz.
135 degree Direction**

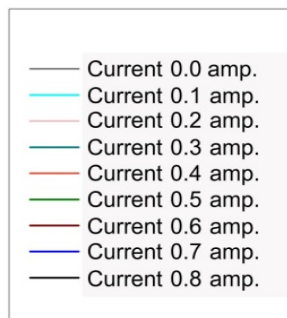


(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที

**X vs. Y Displacement, Frequency 1.5 Hz.
135 degree Direction**

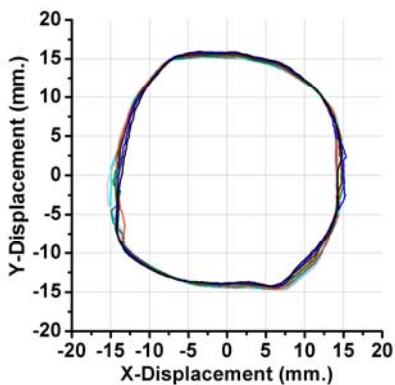


(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



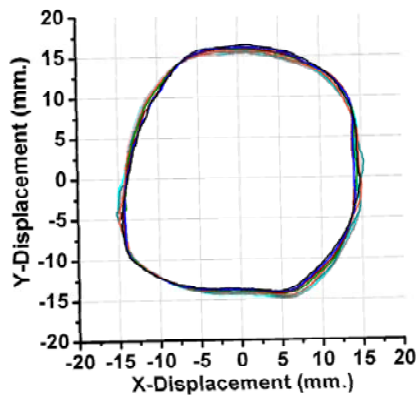
รูปที่ 4.22 การเคลื่อนที่ที่แกน X และแกน Y ในแนวทำมุม 135 องศา กับแกน X

X vs. Y Displacement, Frequency 0.5 Hz. circular motion



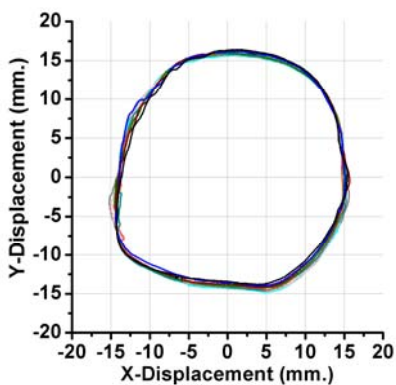
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที

X vs. Y Displacement, Frequency 0.75 Hz. circular motion



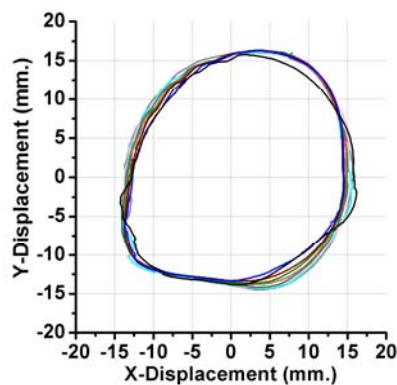
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที

X vs. Y Displacement, Frequency 1.0 Hz. circular motion



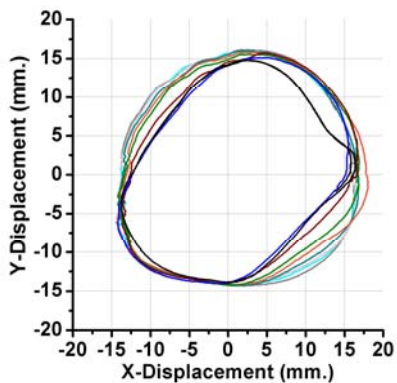
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที

X vs. Y Displacement, Frequency 1.25 Hz. circular motion

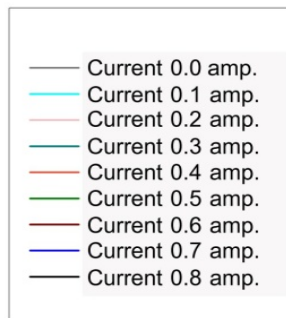


(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที

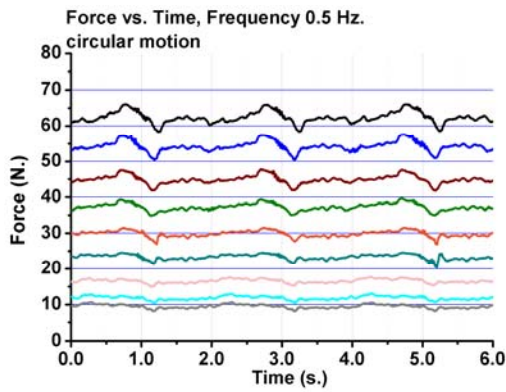
X vs. Y Displacement, Frequency 1.5 Hz. circular motion



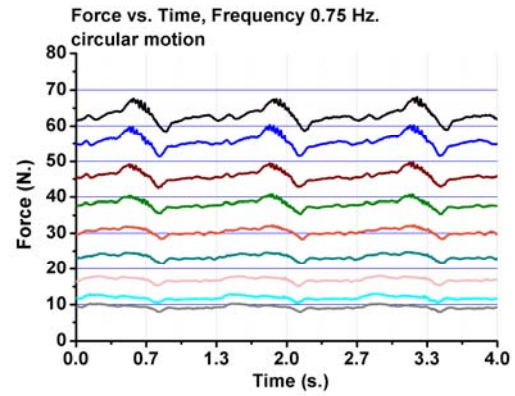
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



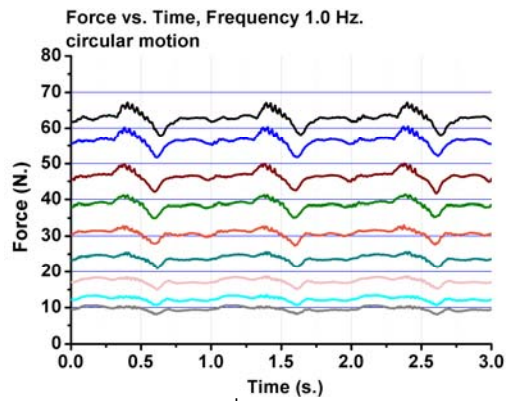
รูปที่ 4.23 การเคลื่อนที่แกน X และแกน Y เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลม



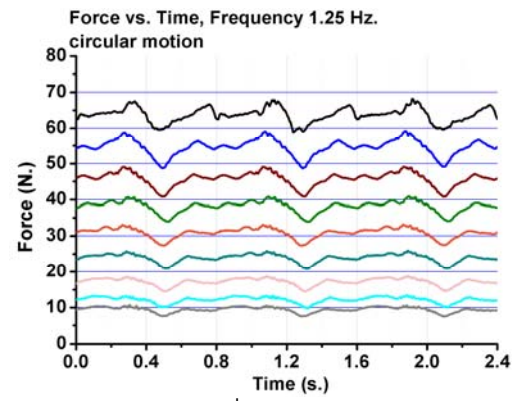
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



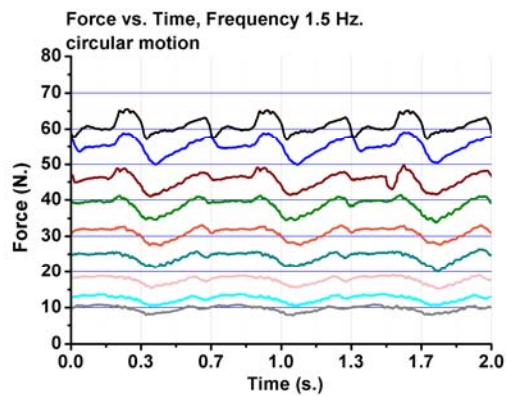
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



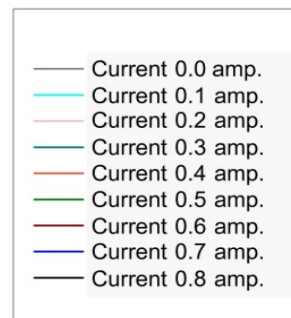
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



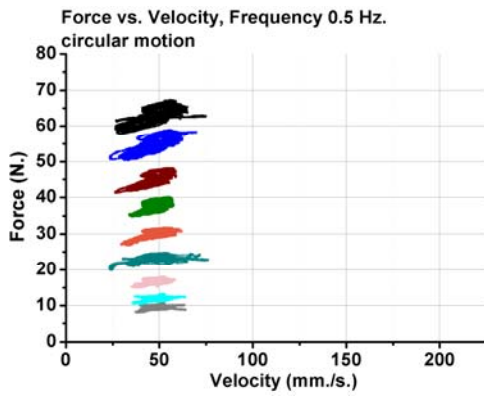
(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



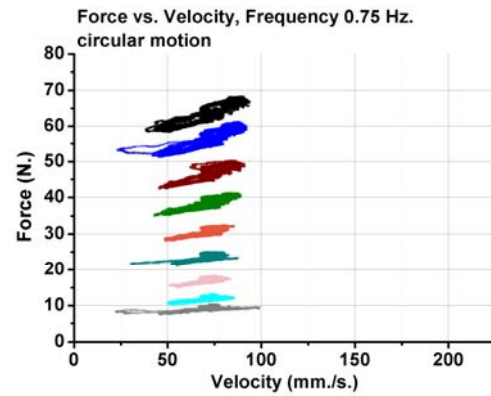
(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



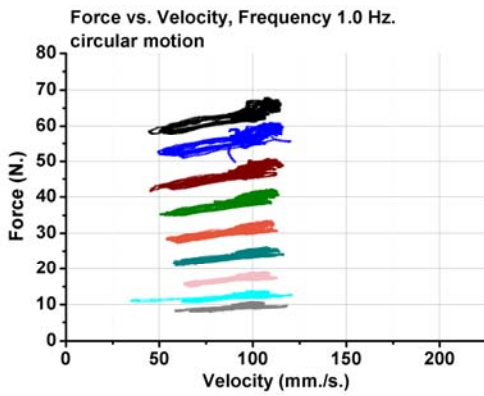
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับเวลาเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลม



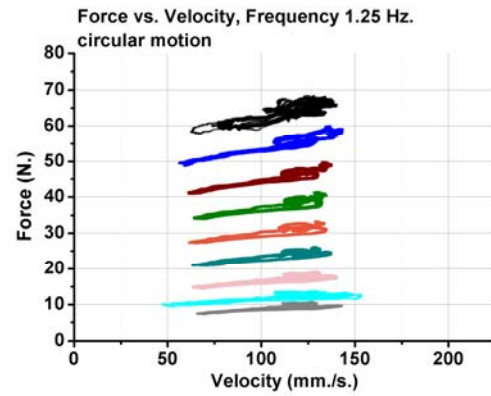
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที



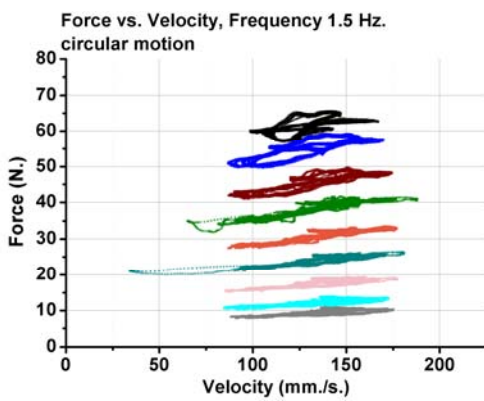
(ข) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที



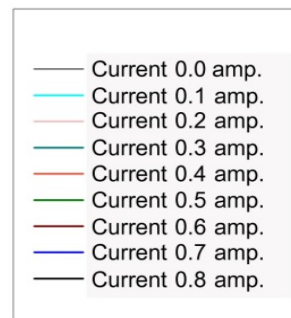
(ค) ความถี่ 1 รอบต่อวินาที



(ง) ความถี่ 1.25 รอบต่อวินาที



(จ) ความถี่ 1.5 รอบต่อวินาที



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงทวนกับความเร็วเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลม

บทที่ 5

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบริ่งตัวหมุนของเหลวแม่เหล็ก

จากแบบจำลองของตัวหมุนของเหลวแม่เหล็กที่ทำงานในโหมดแรงเฉือน แรงหมุนที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงเฉือนที่จุดครากและชิ้นส่วนแรงหมุนที่ต่อขนานกัน สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการได้ดังแสดงในสมการที่ (5.1)

$$F_d = F_t + cv \quad (5.1)$$

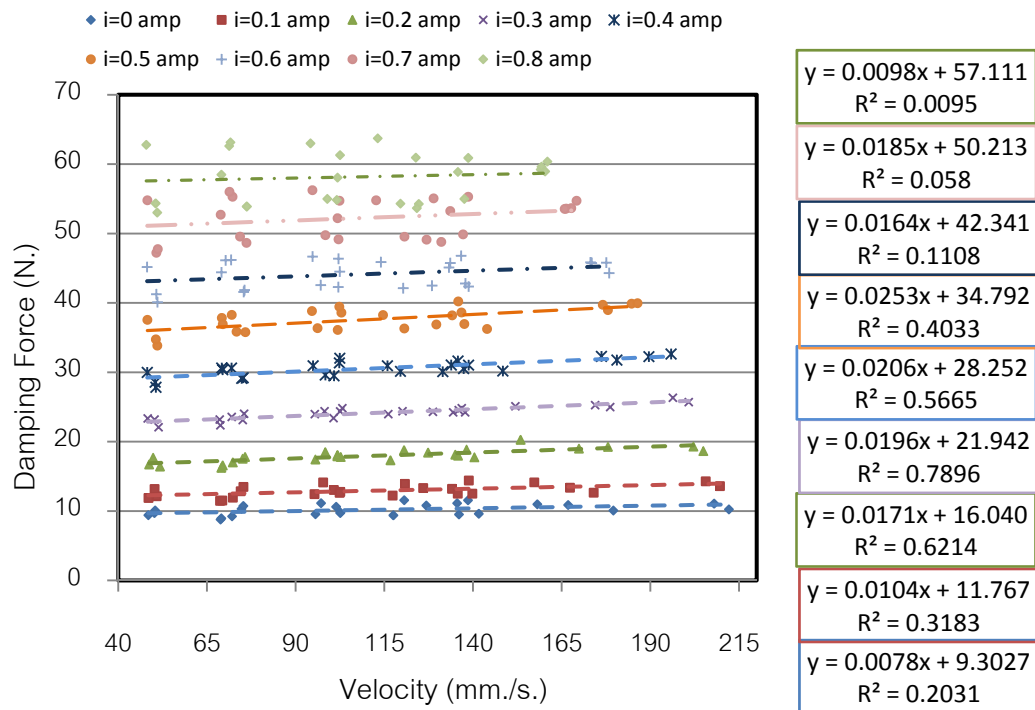
- เมื่อ F_d คือแรงหมุน (N.)
 F_t คือแรงเฉือนคราก (N.)
 C คือสัมประสิทธิ์แรงหมุน (N.-s./mm.)
 v คือความเร็ว (mm./s.)

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสูงสุดและแรงหมุน

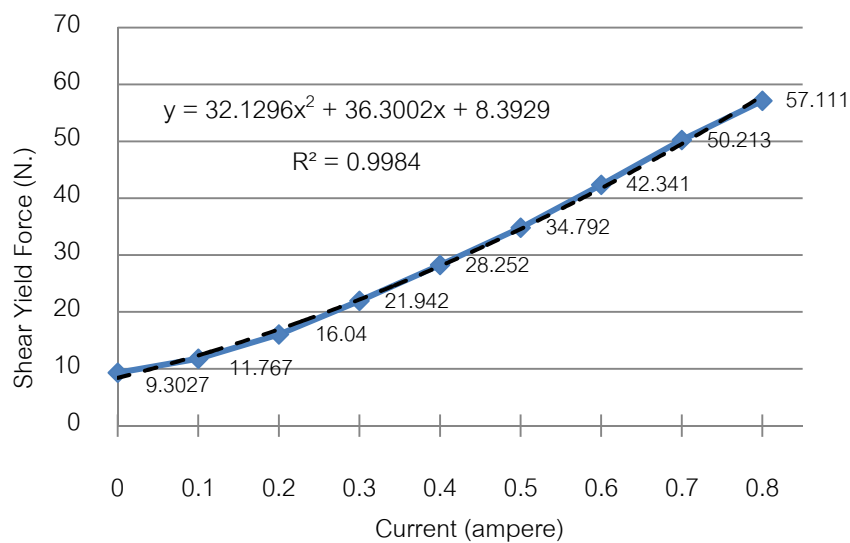
เมื่อนำข้อมูลแรงหมุนที่ความเร็วสูงสุดจากการทดสอบคุณสมบัติของแบริ่งตัวหมุนของเหลวแม่เหล็กมาหาตัวแปรที่มีผลต่อแรงหมุน โดยแยกเป็นกรณีของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ชัดเจน จะเห็นว่าข้อมูลที่ได้มีอยู่ 9 กลุ่มตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อน (แสดงในรูปที่ 5.1) แรงหมุนจะแปรผันตามความเร็วการเคลื่อนที่มีรูปแบบเป็นเชิงเส้น ข้อมูลดังกล่าวเมื่อวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นแยกเป็นแต่ละกรณีของปริมาณกระแสไฟฟ้า จะได้ความสัมพันธ์ของแรงหมุนกับความเร็วที่แยกตามปริมาณกระแสไฟฟ้า จะเห็นว่าความชันของกราฟที่ได้คือสัมประสิทธิ์แรงหมุน และจุดตัดแกน Y คือค่าแรงเสียดทานที่ปริมาณกระแสใด ๆ ตามลำดับ

เมื่อนำแรงเฉือนที่จุดครากและสัมประสิทธิ์แรงหมุน มาหาความสัมพันธ์โดยมีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเป็นตัวแปร แสดงในรูป 5.2 และ 5.3 เมื่อพิจารณาถึงนัยสำคัญแล้วพบว่า พจน์ของแรงเฉือนที่จุดครากมีนัยสำคัญต่อแรงหมุนโดยรวมมากกว่าพจน์ของสัมประสิทธิ์ความหน่วงซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าไม่ชัดเจนดังนั้นจึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์

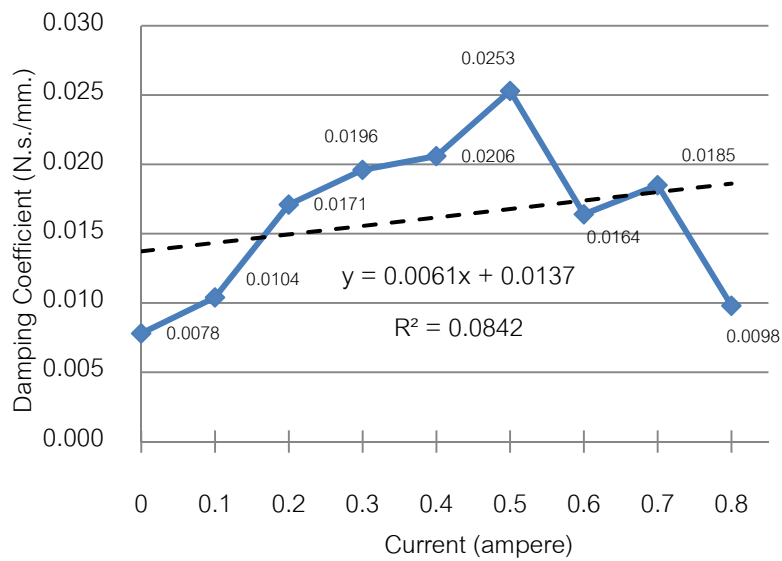
ความหน่วงเฉลี่ย หากวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่จุดครากและกระแสไฟฟ้าแบบถดถอยโดยใช้ความสัมพันธ์รูปแบบพีชคณิตกำลังสองจะให้ค่าแรงหน่วงที่คลาดเคลื่อนน้อยกว่าการใช้สมการเชิงเส้น ซึ่งสมการพีชคณิตกำลังสองดังกล่าวแสดงในสมการที่ 5.2



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสูงสุดและแรงหน่วงเมื่อแยกตามปริมาณกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 5.2 แรงเฉือนที่จุดครากกับกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 5.3 แสดงสัมประสิทธิ์ความหน่วงกับกระแสไฟฟ้า

$$F_t(i) = 32.1296i^2 + 36.3002i + 8.3929 \quad (5.2)$$

$$c(i) = 0.0061 i + 0.0137 \quad (5.3)$$

เมื่อ c คือสัมประสิทธิ์แรงหน่วง

i คือปริมาณกระแสไฟฟ้า

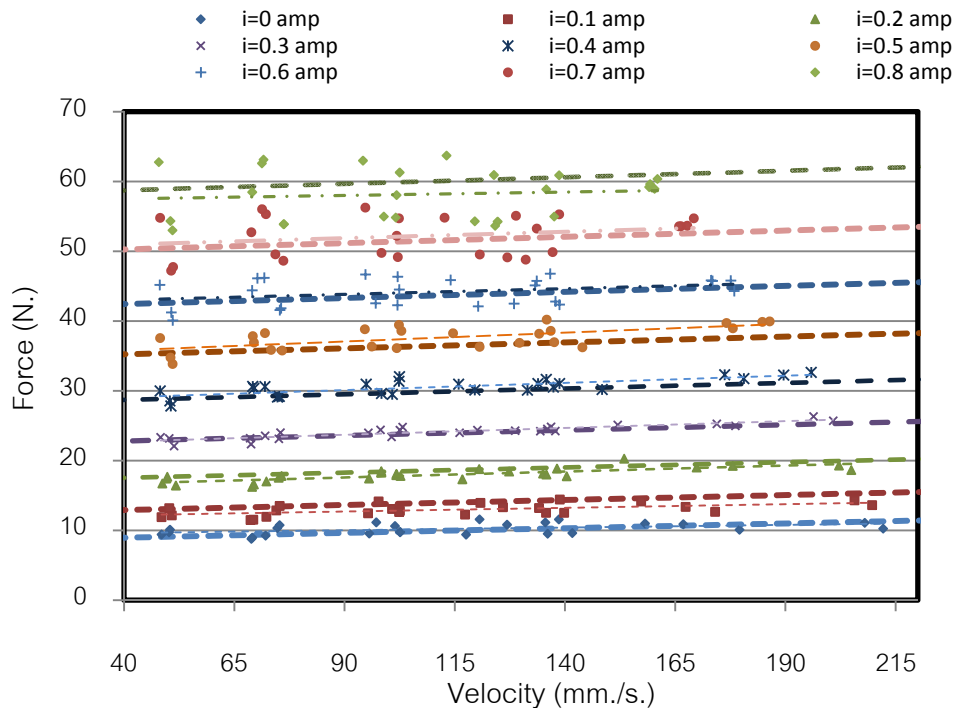
F_t คือแรงเสียดทาน

จากสมการที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 สามารถเขียนในรูปแรงหน่วงในรูปของปริมาณกระแสไฟฟ้าและความเร็ว แสดงในสมการที่ 5.4 และเมื่อแปลงผกผันสมการที่ 5.4 เพื่อให้ได้ค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าในรูปของแรงหน่วงและความเร็วจะได้สมการที่ 5.5

$$F_d = (0.0061 i + 0.0137)v + \{32.1296i^2 + 36.3002i + 8.3929\} \quad (5.4)$$

$$i = \frac{-(0.0061v + 36.3002) + \sqrt{(0.0061v + 36.3002)^2 - 4 \times 32.1296 \times (0.0137v + 8.3929 - F_d)}}{2 \times 32.1296} \quad (5.5)$$

จากสมการที่ 5.4 เมื่อนำมาคำนวณย้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบผลกับข้อมูลการทดลองที่วัดแรงหน่วงจริง แสดงในรูปที่ 5.4 เส้นประในรูปแสดงถึงแรงหน่วงที่ได้จากการคำนวณหาแรงหน่วงย้อนกลับในขณะที่มีความเร็วและปริมาณกระแสไฟฟ้าใด ๆ



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสูงสุดและแรงหน่วงเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปพีชคณิตกำลังสอง

5.2 การทดสอบควบคุมแรงหน่วงด้วยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแรง

เสียดทานที่ปรับค่าได้

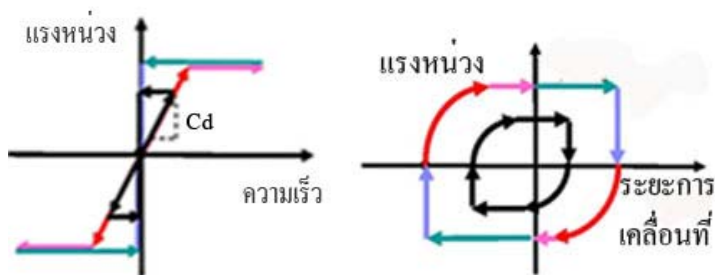
จากงานวิจัยของ Ruangrassamee และคณะ (2005) ได้เสนอการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ (viscous-plus-variable-friction damping force, VVF) รูปแบบการควบคุมนี้จะมีค่าตัวแปรที่ใช้ควบคุม 2 ตัวคือ สัมประสิทธิ์ความหน่วงของชิ้นส่วนความหนืด (C_d) และค่าแรงหน่วงสูงสุด (FL) และแสดงในสมการที่ 5.6 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วและระยะการเคลื่อนที่แสดงในรูปที่ 5.5

เมื่อนำรูปแบบการควบคุมนี้มาทดสอบกับแบริ่งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก โดยใช้รูปแบบการเคลื่อนที่แบบวงจกร ที่มีความถี่ 0.5, 0.75 และ 1 รอบต่อวินาที ตามลำดับ โดยปรับค่า

แรงหน่วงสูงสุด (FL) เป็น 30 และ 50 นิวตัน รัว่กัที่ปรับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง ให้อยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 1.5 นิวตัน-วินาทีต่อมิลลิเมตร จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงและการเคลื่อนที่ แสดงในรูปที่ 5.7 ถึงรูปที่ 5.9 ตามการเคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางที่ทำการทดสอบ

$$F_D(t_i) = \begin{cases} \text{sign}[v(t_i)]F_L; & \text{เมื่อ } |v(t_i)| \geq \frac{F_L}{Cd} \\ Cd v(t_i); & \text{เมื่อ } |v(t_i)| < \frac{F_L}{Cd} \text{ และ } v(t_i)a(t_i) \geq 0 \\ F_D(t_{i-1}); & \text{เมื่อ } |v(t_i)| < \frac{F_L}{Cd} \text{ และ } v(t_i)a(t_i) < 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

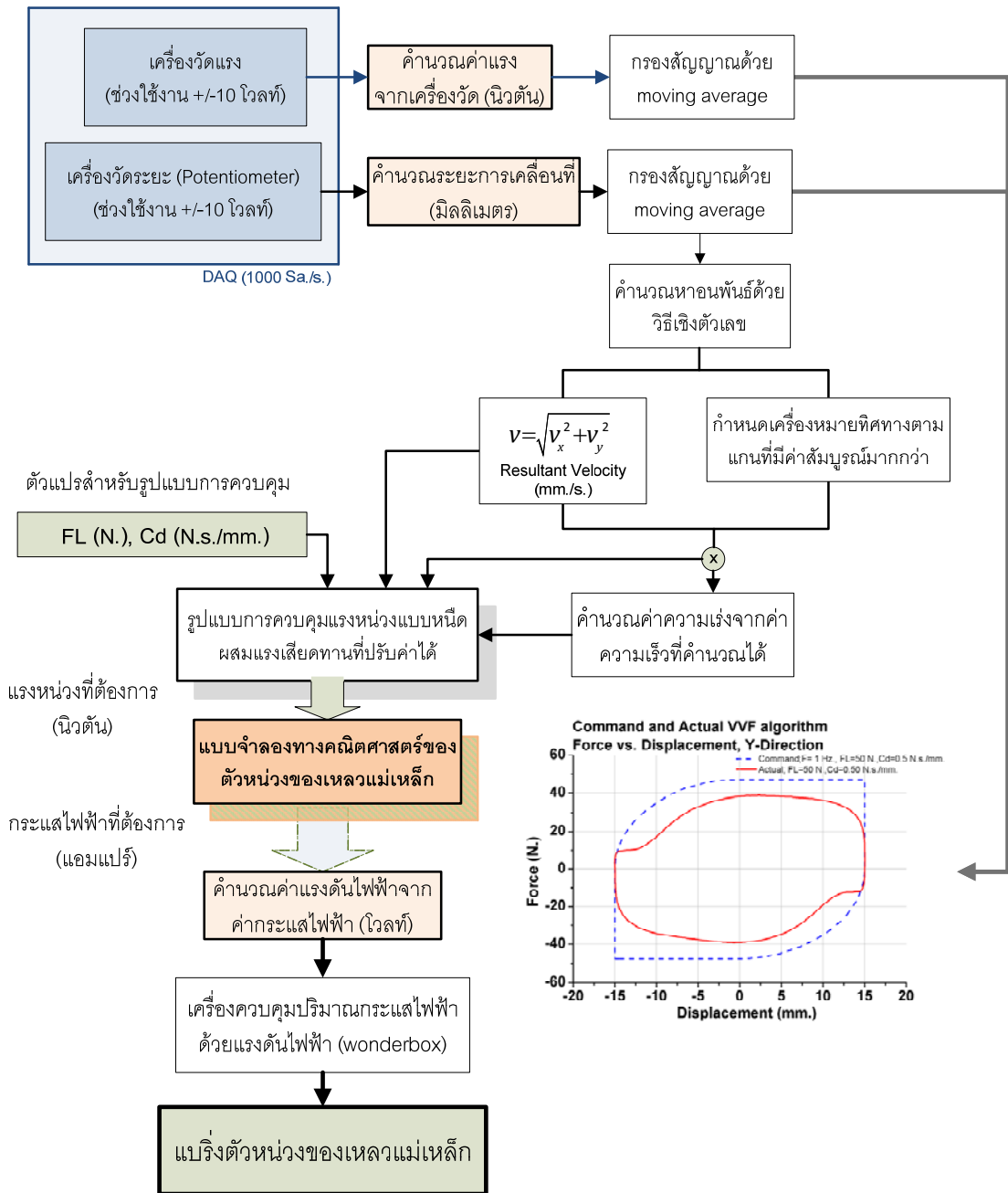
- เมื่อ F_L คือแรงหน่วงสูงสุด
- Cd คือสัมประสิทธิ์แรงหน่วง
- F_D คือแรงหน่วงที่ต้องการ



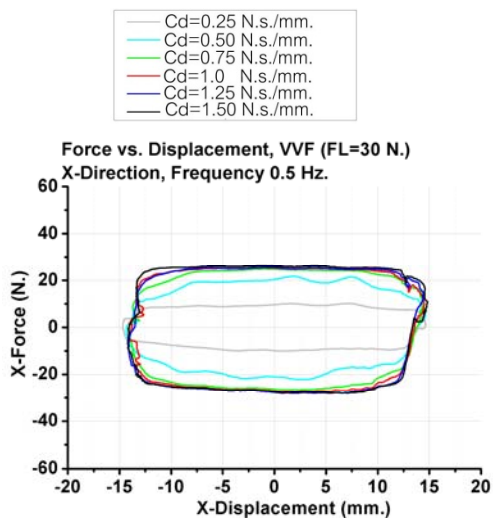
(ก) ความเร็วและแรงหน่วง (ข) รัว่กัการเคลื่อนที่และแรงหน่วง

รูปที่ 5.5 ฮีสเทอรีซิสของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงหนีดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้

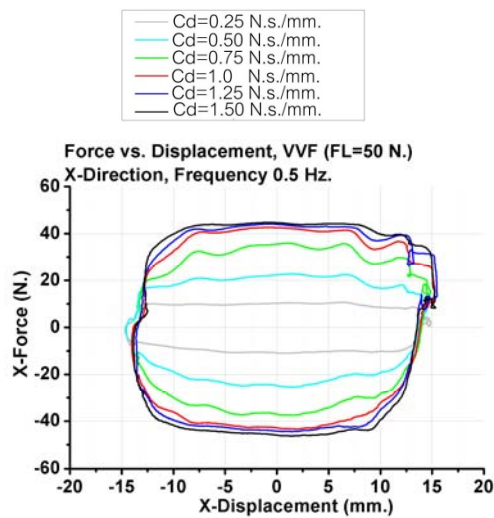
(จาก Ruangrassamee และคณะ, 2005)



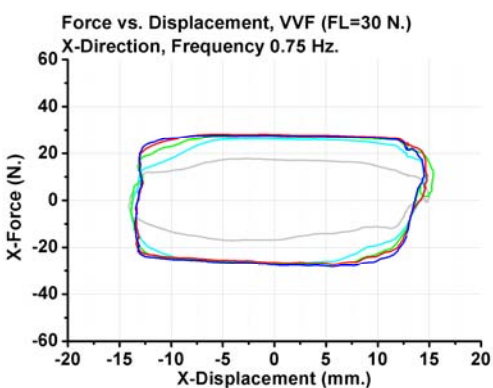
รูปที่ 5.6 แผนภาพบล็อกแสดงการทดสอบแปรงตัวท่วงของเหลวแม่เหล็กด้วยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนึ่งผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้แรงกระทำสองทิศทาง



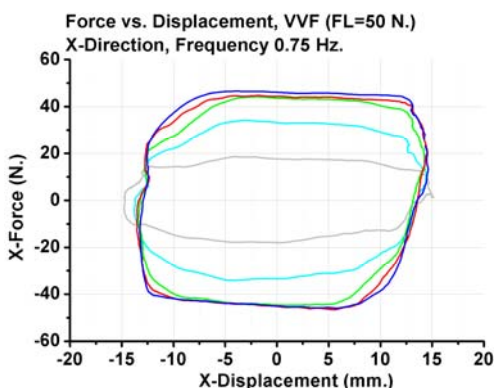
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที, FL=30 N.



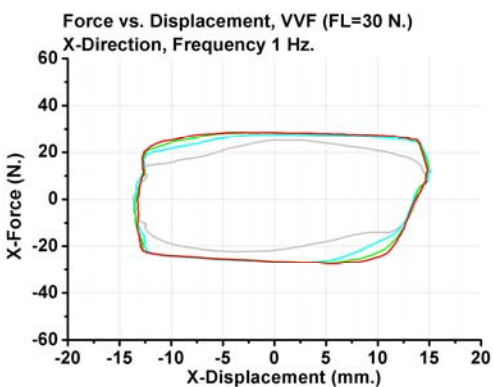
(ข) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที, FL=50 N.



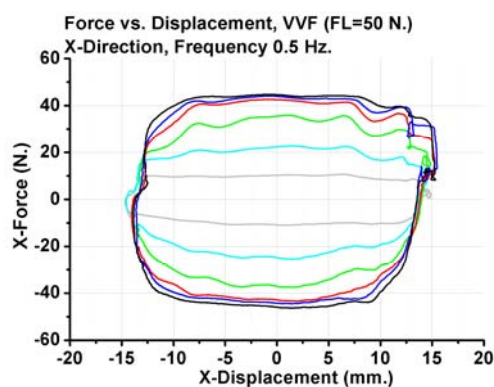
(ค) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที, FL=30 N.



(ง) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที, FL=50 N.



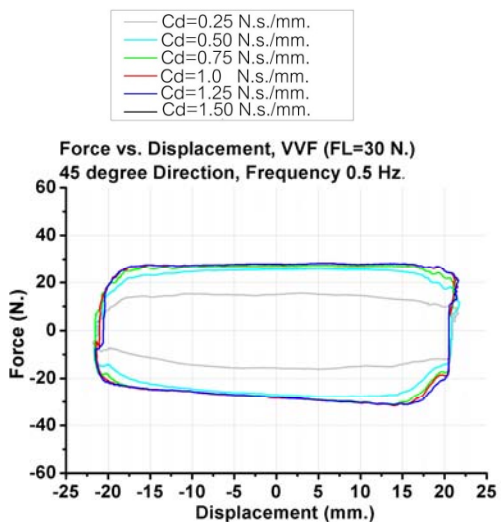
(จ) ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที, FL=30 N.



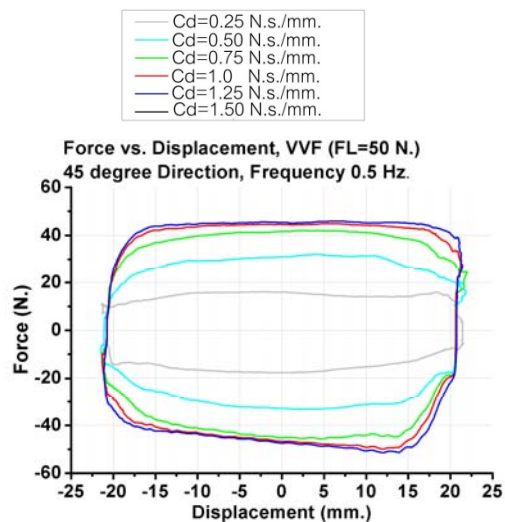
(ฉ) ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที, FL=50 N.

รูปที่ 5.7 แรงหน่วงกับระยะการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยใช้รูปแบบ

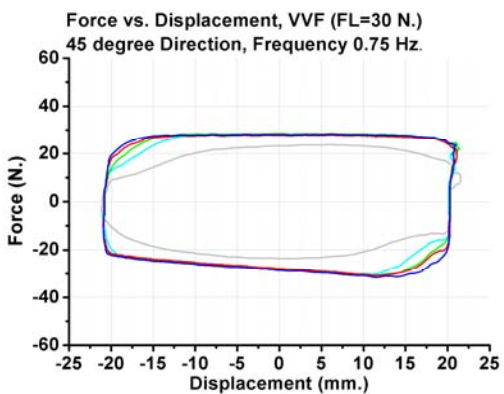
การควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้



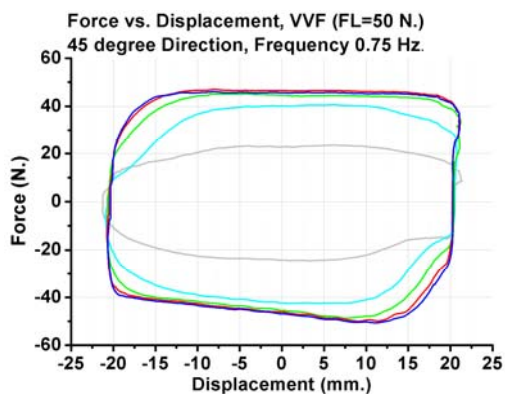
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที, FL=30 N.



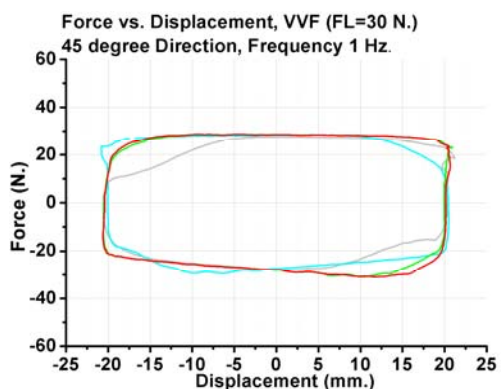
(ข) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที, FL=50 N.



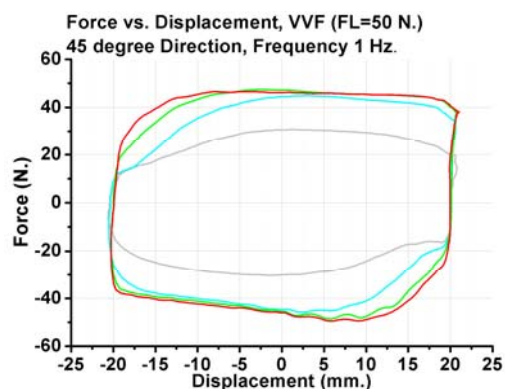
(ค) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที, FL= 30 N.



(ง) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที, FL=50 N.



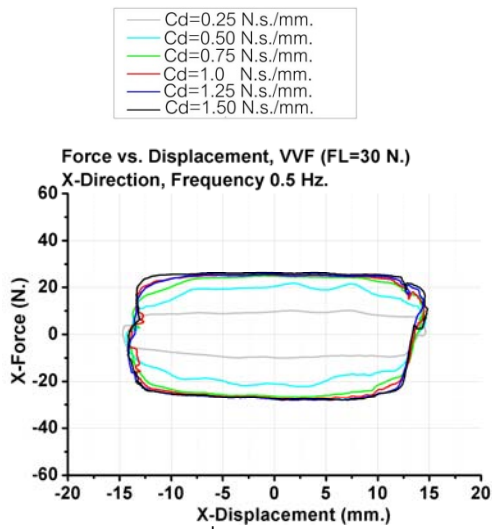
(จ) ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที, FL=30 N.



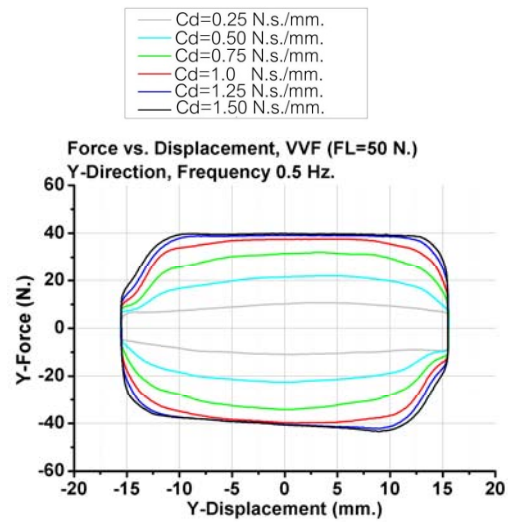
(ฉ) ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที, FL=50 N.

รูปที่ 5.8 แรงหน่วงกับระยะการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน 45 องศา กับแกน X โดยใช้

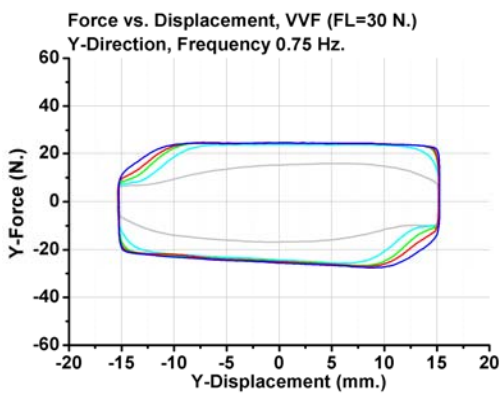
รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งดสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้



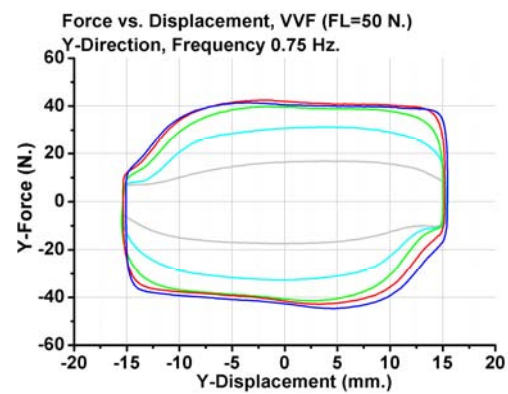
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที, FL= 30 N.



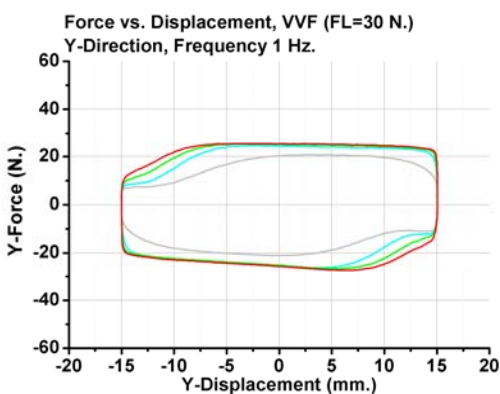
(ข) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที, FL=50 N.



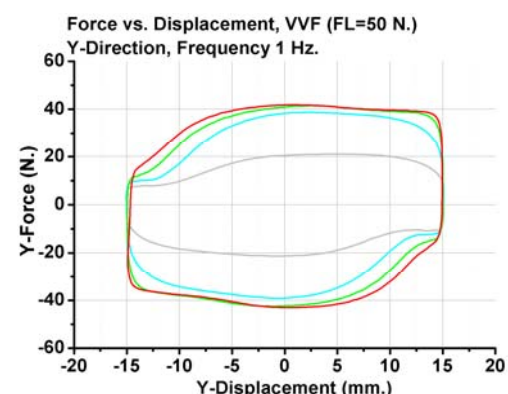
(ค) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที, FL=30 N.



(ง) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที, FL=50 N.



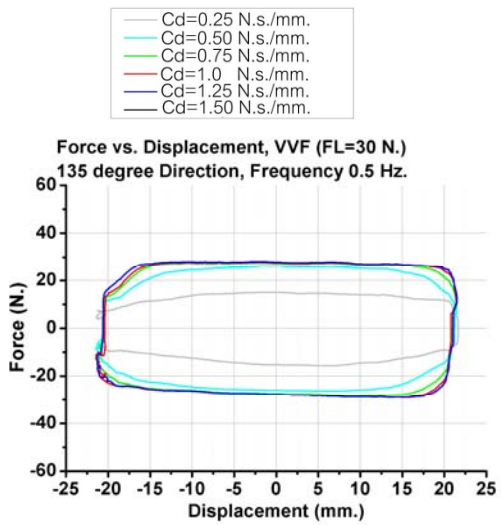
(จ) ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที, FL=30 N.



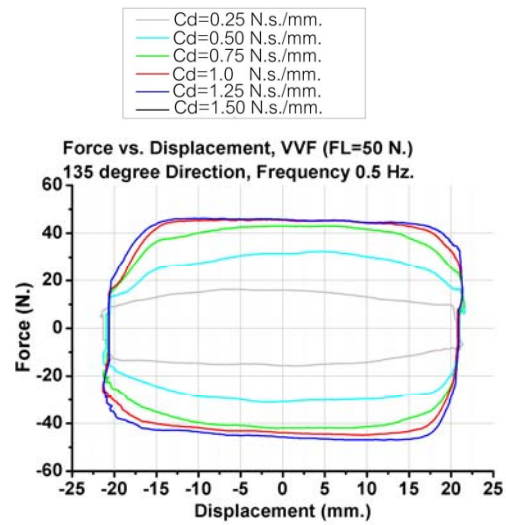
(ฉ) ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที, FL=50 N.

รูปที่ 5.9 แรงหน่วงกับระยะการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรง

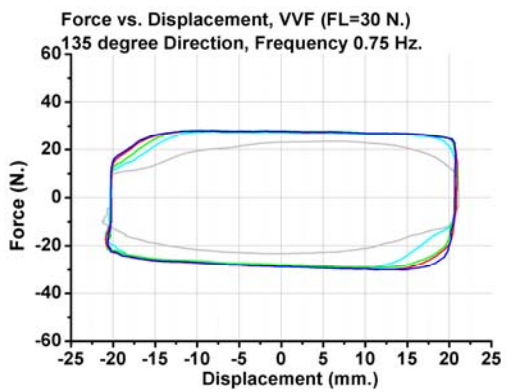
หน่วงแบบหนึ่งผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้



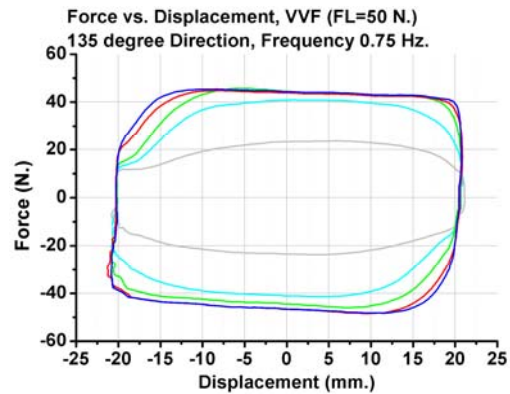
(ก) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที, FL= 30 N.



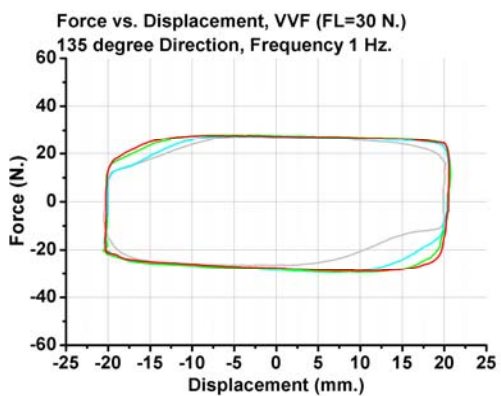
(ข) ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที, FL=50 N.



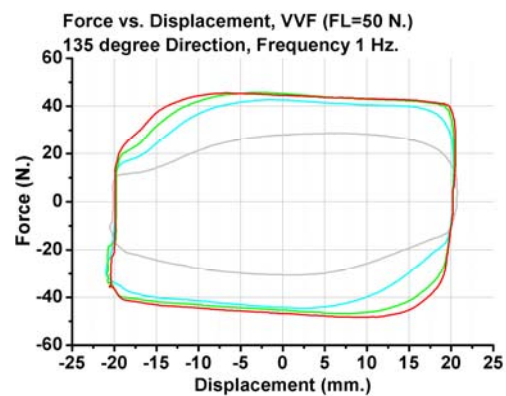
(ค) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที, FL=30 N.



(ง) ความถี่ 0.75 รอบต่อวินาที, FL=50 N.

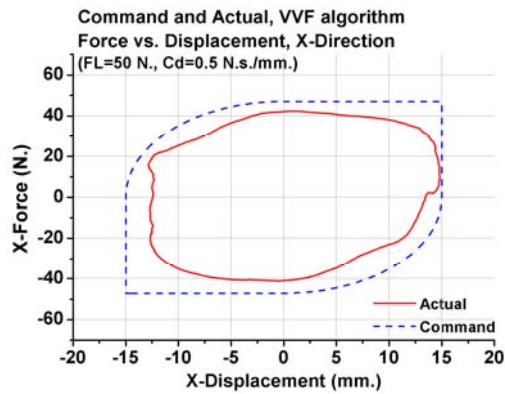


(จ) ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที, FL=30 N.

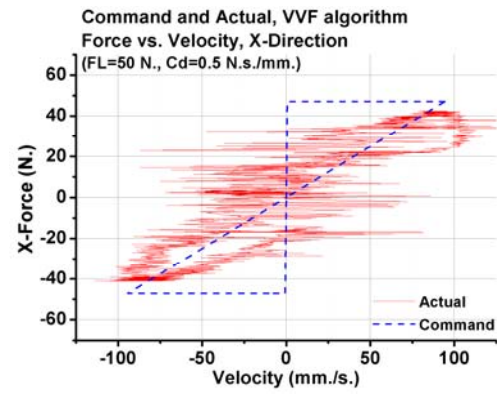


(ฉ) ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที, FL=50 N.

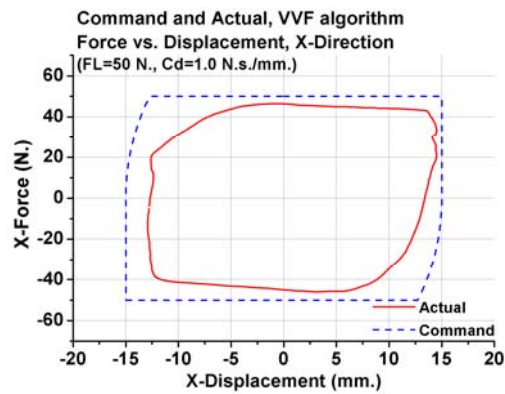
รูปที่ 5.10 แรงหน่วงกับระยะการเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน 135 องศา กับแกน X โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้



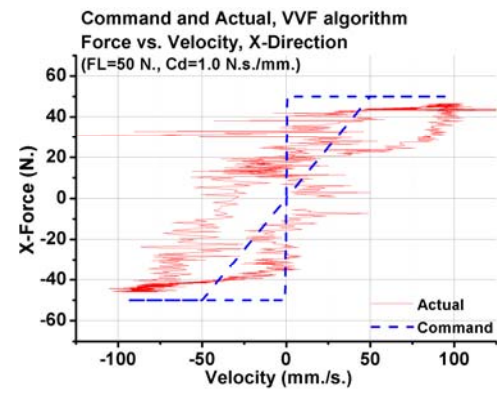
(ก) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่



(ข) แรงหน่วงกับความเร็ว

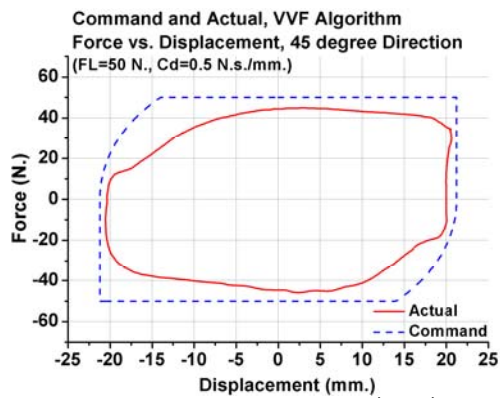


(ค) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่

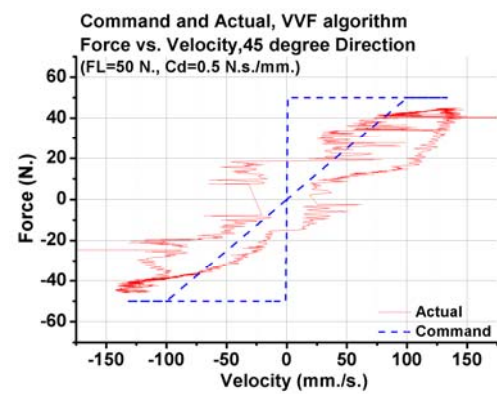


(ง) แรงหน่วงกับความเร็ว

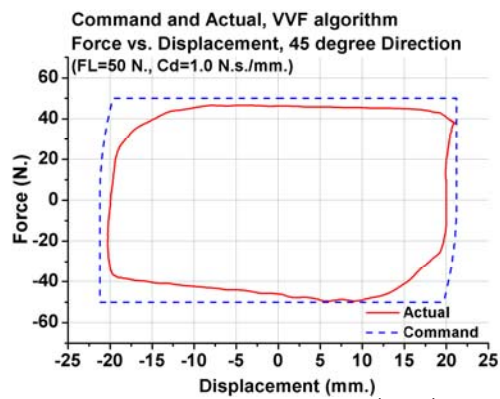
รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบระหว่างค่าควบคุมกับค่าที่วัดได้ เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X ด้วยความเร็ว 1 รอบต่อวินาที ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตร โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแรงเสียดทานที่รับค่าได้ โดยใช้ FL=50 N., Cd=0.50 และ 1.0 N.s./mm.ตามลำดับ



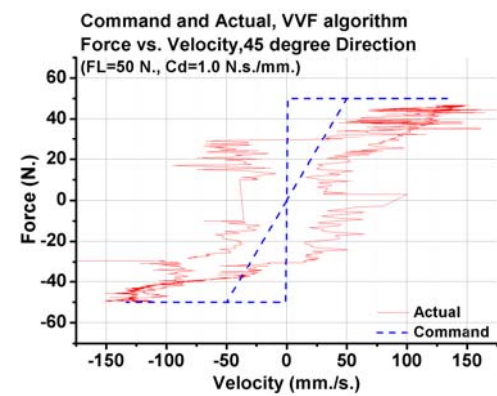
(ก) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่



(ข) แรงหน่วงกับความเร็ว

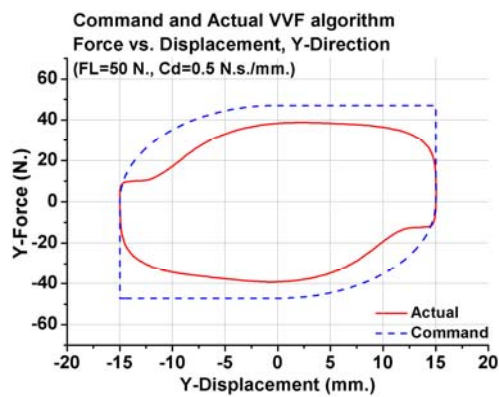


(ค) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่

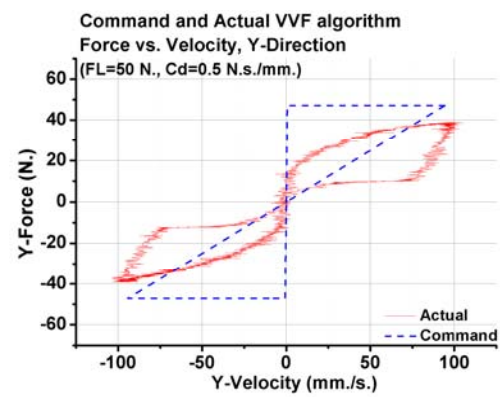


(ง) แรงหน่วงกับความเร็ว

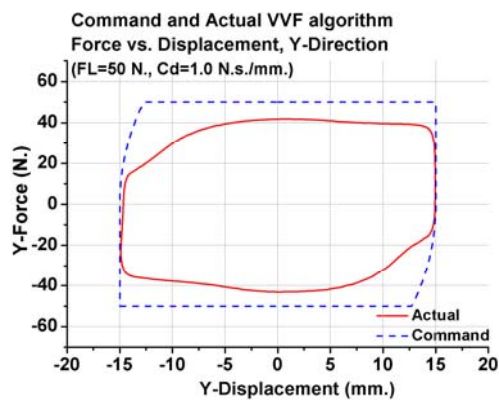
รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบระหว่างค่าควบคุมกับค่าที่วัดได้ เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน ทำมุม 45 องศา กับแกน X ด้วยความเร็ว 1 รอบต่อวินาที ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตรในแต่และแกน โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ โดยใช้ $FL=50\text{ N.}, Cd=0.50$ และ 1.0 N.s./mm. ตามลำดับ



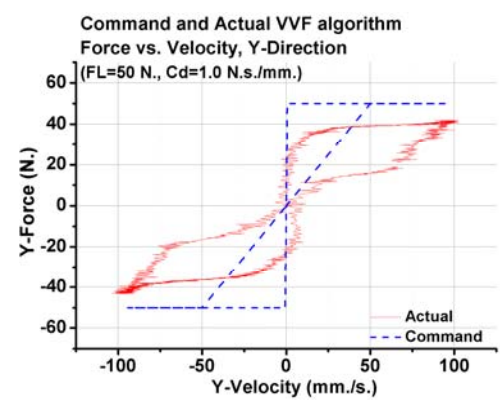
(ก) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่



(ข) แรงหน่วงกับความเร็ว

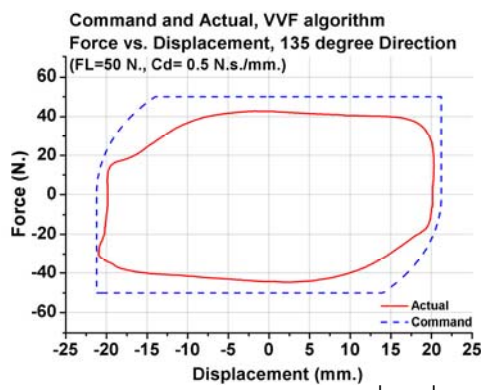


(ค) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่

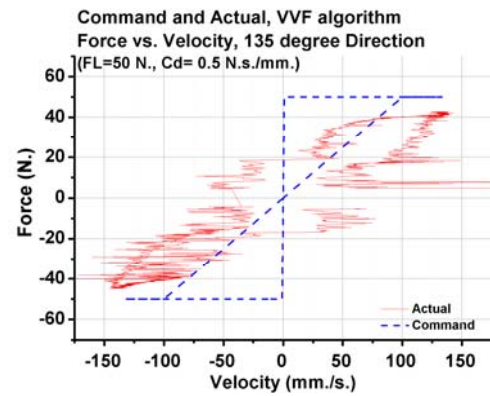


(ง) แรงหน่วงกับความเร็ว

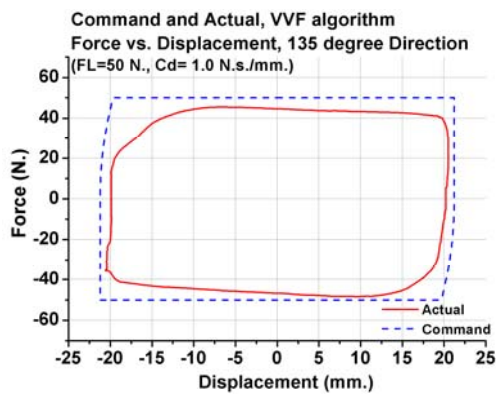
รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบระหว่างค่าควบคุมกับค่าที่วัดได้ เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ด้วยความถี่ 1 รอบต่อวินาที ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตร โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งผสมแรงเสียดทานที่รับค่าได้ โดยใช้ $FL=50$ N., $Cd=0.50$ และ 1.0 N.s./mm. ตามลำดับ



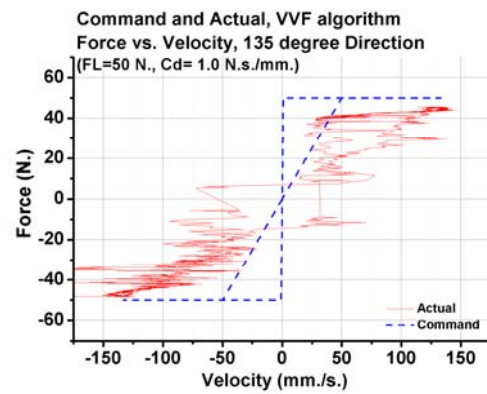
(ก) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่



(ข) แรงหน่วงกับความเร็ว



(ค) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่



(ง) แรงหน่วงกับความเร็ว

รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบระหว่างค่าควบคุมกับค่าที่วัดได้เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน 135 องศา กับแกน X ด้วยความเร็ว 1 รอบต่อวินาที ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 15 มิลลิเมตรในแต่ละแกน โดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งดสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ โดยใช้ $FL=50\text{ N.}$, $Cd=0.50$ และ 1.0 N.s./mm. ตามลำดับ

5.3 ผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อหาแบบจำลองสำหรับแปริ่งตัวหนึ่งของเหลวแม่เหล็กจะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปพีชคณิตกำลังสองให้ผลที่สอดคล้องกับค่าแรงหน่วงที่วัดได้จากการทดลองกระตุ้นแปริ่งของเหลวแม่เหล็กให้มีการเคลื่อนที่แบบวัฏจักร ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองเนื่องจากขีดจำกัดของแทนจำลองแผ่นดินไหว เมื่อทดสอบด้วยค่าแรงหน่วงที่สูงจะทำให้ความเร็วการเคลื่อนที่ของแทนจำลองแผ่นดินไหวมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็นและยังมีผลกระทบมากเมื่อเครื่องจำลองแผ่นดินไหวเคลื่อนที่ด้วยความถี่ที่สูงกว่า 1 รอบต่อวินาที ทำให้ข้อมูลค่าแรงหน่วงกับความเร็วที่ใช้สร้างแบบจำลองมีค่าความเร็วที่น้อยกว่าที่ควรจะเป็น และเมื่อนำแบบจำลองที่ได้นี้มาแปลงผกผัน จะได้ค่าของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าปกติ แต่เนื่องจากผลของสัมประสิทธิ์ความหน่วงต่อแรงหน่วงโดยรวมในแบบจำลองมีค่าน้อย ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจึงมีค่าน้อย และสามารถยอมรับได้

ในการทดสอบควบคุมแรงหน่วงแบบเซมิแอกทีฟ จึงทดสอบภายใต้การเคลื่อนที่ด้วยความถี่ไม่เกิน 1 รอบต่อวินาที ทำการทดลองโดยใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแรงเสียดทานแบบปรับค่าได้ทดสอบกับแปริ่งตัวหนึ่งของเหลวแม่เหล็กที่ได้พัฒนาขึ้น ผลที่ได้แสดงถึงประสิทธิภาพในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปพีชคณิตกำลังสองผกผันในการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงหน่วงในรูปแบบที่ต้องการ และพบว่าแรงหน่วงที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากค่าที่กำหนด 8.22% โดยค่าที่คลาดเคลื่อนเกิดกับการทดสอบที่ระยะเคลื่อนที่สูงสุด 15 และ 21.2 มิลลิเมตร 10.49% และ 5.94% ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาความถี่กับค่าแรงหน่วงที่คลาดเคลื่อน จะได้ 8.51%, 7.74% และ 8.40% เมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ 0.5, 0.75 และ 1 รอบต่อวินาทีตามลำดับ จะเห็นว่าไม่ขึ้นกับความถี่ที่เปลี่ยนไปในช่วงที่ใช้งานนี้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยสามารถสรุปผลที่ได้ ดังต่อไปนี้

1. ในการออกแบบแบเร็งที่มีตัวห้วงของเหลวแม่เหล็กบรรจุภายใน เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามข้อกำหนดต้องพิจารณาทิศของแรง รูปร่าง ขนาดและน้ำหนักของแบเร็ง ชนิดของเหลวแม่เหล็กที่ใช้ พิกัดความสามารถของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้งานร่วมกัน การสร้างสนามแม่เหล็ก ทิศและความเข้มสนามแม่เหล็กที่ต้องการและโหมดการทำงานของของเหลวแม่เหล็กเป็นต้น จากการออกแบบที่ได้พิจารณาเงื่อนไขดังกล่าว แบเร็งที่ได้สามารถสร้างแรงห้วงได้ประมาณ 60 นิวตันในแนวระนาบ โดยมีขนาด พื้นที่หน้าตัดสำหรับบรรจุของเหลวแม่เหล็ก 47.9 ตารางเซนติเมตร และแบเร็งโดยรวมเป็นรูปทรงกระบอกสูง 4.5 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ในห้องบรรจุของเหลวแม่เหล็กบรรจุโฟมที่ชุ่มตัวด้วยของเหลวแม่เหล็ก MRF-140CG โดยบริษัท Lord Corporation สร้างแรงห้วงโดยใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงสุดประมาณ 1120 แอมแปร์-รอบ

2. การทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ของตัวห้วงของเหลวแม่เหล็ก ทดสอบโดยให้แท่นจำลองแผ่นดินไหวเคลื่อนที่แบบวงจรรอบอย่างอิสระสองทิศทางในพิกัดฉาก โดยมีทิศทางต่าง ๆ กัน 5 ทิศทาง มีระยะการเคลื่อนที่สูงสุดในแต่ละแกนการเคลื่อนที่ 15 มิลลิเมตร ปรับเปลี่ยนความถี่จาก 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 และ 1.5 รอบต่อวินาทีตามลำดับ ในขณะที่มีการเคลื่อนที่ ปรับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวห้วงของเหลวแม่เหล็กเริ่มจาก 0 แอมแปร์จนถึง 0.8 แอมแปร์เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 แอมแปร์ แล้ววัดค่าแรงห้วงด้วยเครื่องวัดแรง เมื่อพิจารณาแรงห้วงกับระยะการเคลื่อนที่ พบว่าในขณะที่เพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าขึ้น แรงห่วงที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเชิงเส้น เมื่อพิจารณาแรงห่วงและความเร็วพบว่าที่ความเร็วสูงสุด แรงห่วงจะแปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้า และจากความสัมพันธ์ที่มีปริมาณกระแสไฟฟ้าเป็นตัวแปรหลักในการควบคุมแรงห่วง เมื่อนำมาวิเคราะห์แบบถดถอยและคำนวณผกผันจะได้สมการแบบจำลองคณิตศาสตร์ของตัวห้วงของเหลวแม่เหล็ก

3. การทดลองควบคุมแรงห่วงด้วยรูปแบบการควบคุมแรงห่วงแบบหนีดผสมแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปพีชคณิตที่คำนวณย้อนกลับเพื่อ

ควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าป้อนให้แบริง ขณะที่ให้เคลื่อนที่เป็นวัฏจักรด้วยความถี่ 0.5, 0.75 และ 1.0 รอบต่อวินาที โดยกำหนดแรงทวนสูงสุด 30 และ 50 นิวตัน และค่าสัมประสิทธิ์แรงทวน 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25 และ 1.5 นิวตัน-วินาทีต่อมิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าแรงทวนที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากค่าที่กำหนด 8.22% โดยค่าที่คลาดเคลื่อนเกิดกับการทดสอบที่ระยะเคลื่อนที่สูงสุด 15 และ 21.2 มิลลิเมตรมีค่า 10.49% และ 5.94% ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณา ค่าแรงทวนที่คลาดเคลื่อนกับความถี่ จะได้ค่า 8.51%, 7.74% และ 8.40% เมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ 0.5, 0.75 และ 1 รอบต่อวินาทีตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนไม่ขึ้นกับความถี่ในช่วงที่ทำการทดลองนี้

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากแบริงตัวทวนของเหลวแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้นนี้ไม่ได้คิดผลเนื่องจากแรงเสียดทาน ดังนั้นในอนาคตจึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของแบริงและการควบคุมแรง และหากต้องการเพิ่มพิกัดแรงทวนโดยใช้แบริงรูปแบบเดิมอาจทำได้โดยขยายขนาดเพิ่มพื้นที่แรงเฉือน เพิ่มความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและออกแบบให้เส้นแรงแม่เหล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งในแกนกลางและวงแหวนรอบนอก โดยเพิ่มขนาดและจำนวนรอบของขดลวดทองแดงภายในหรือติดตั้งใหม่ภายนอกซึ่งจะทำให้แบริงมีขนาดสูงขึ้นหรือใหญ่ขึ้น หรืออาจเปลี่ยนชนิดของแกนโลหะที่จะทำให้ได้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่สูงขึ้นได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

สันติ อัครศรีพงษ์ศรีธร. สนามแม่เหล็กไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 3. หจก. ฟีนีพับบลิชซิง : 2530.
สมคิด วิริยประสิทธิ์ชัย และ สมบูรณ์ มาลานนท์. ทฤษฎีและการออกแบบแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบเชิงเส้น. หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์

ภาษาอังกฤษ

Chen, P.C. and Lee, T.Y. Time Delay Study on The Semi-Active Control with A Magneto rheological Damper. 14th World Conference on Earthquake Engineering.

Das, D., Datta, T.K., Madan, A. 2008. Seismic Control of Building Frames Using MR Damper. 14th World Conference on Earthquake Engineering.

Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K., Carlson, J.D. 1996. Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction. Smart Materials and Structures. 5:565-575.

Hayt Jr., William H. Engineering Electromagnetics. 5th ed. McGraw-Hill. 1989.

Hurley, W.G. 2004. PWM Control of a Magnetic Suspension System. IEEE Transactions on Education. 47,2:165-173.

Jansen, L.M., Dyke, S.J. 2000. Semi-Active Strategies for MR Dampers: A Comparative Study. Journal of Engineering Mechanics. 126,8:795-803.

Jolly, M.R., Bender, W., Carlson, J.D. 1999. Properties and Applications of Commercial Magentorheological Fluids. SPIE 5th Annual Int. Symposium on Smart Structures and Materials.

Karamodin, A., Kazeimi, H.H., Akbarzadeh-T, M.R. 2008. Semi-active Control of Structures Using Neuro-Predictive Algorithm for MR Dampers. 14th World Conference on Earthquake Engineering.

Kawashima, K., Unjoh, S. 1994. Seismic Response Control of Bridges By Variable Dampers. Journal of Structural Engineering. 120,9:2583-2601.

- Kurata, N., Kobori, T., Takahashi, M., Niwa, N., Midorikawa, H. 1999. Actual Seismic Response Controlled Building with Semi-Active Damper System. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 28:1427-1447.
- Lee, T.Y., Kawashima, K., Chen, P.C. 2008. Experimental and Analytical Study on a Nonlinear Isolated Bridge Under Semiactive Control. 14th World Conference on Earthquake Engineering.
- Ruangrassamee, A. and Kawashima, K. 2001. Experimental Study on Semi-Active Control of Bridges with Use of Magnetorheological Damper. Journal of Structural Engineering. JSCE. 47A: 639-650.
- Ruangrassamee, A. 2001. Pounding Effect on Seismic Response and Semi-active Control of Bridges. PhD. Thesis, Dept. of Civ. Engrg. Tokyo Institute of Technology. Japan.
- Ruangrassamee, A., Kawashima, K. 2003. Control of nonlinear bridge response with pounding effect by variable dampers. Engineering Structures. 25; 593-606.
- Ruangrassamee, A., Srisamai, W., Lukkunaprasit, P. 2005. Response mitigation of the base isolated benchmark building by semi-active control with the viscous-plus-variable-friction damping force algorithm. Structural Control and Health Monitoring. 13:809-822.
- Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D. 1997. Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper. Journal of Engineering Mechanics. ASCE. 123,3:230-238.
- Takesue, N., Furusho, J., Kiyota, Y. 2004. Fast Response MR-Fluid Actuator. JSME International Journal. 47,3:783-791.
- Yang, G., Ramallo, J.C., Spencer Jr., B.F., Carlson, J.D., Sain, M.K. 2000. Large-Scale MR Fluid Dampers: Dynamic Performance Considerations. Proceedings of the International Conference on Advances in Structural Dynamics (ASD2000).
- Yang, G. 2002. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. Engineering Structures. 24:309-323.
- Yang, G. 2001. Large-scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation:

Modeling, Testing and Control. PhD. Thesis, Dept. of Civ. Engrg. and Geo. ScL.
University of Notre' Dame, Indiana, USA.

Yang, N.J., Wu, J.C., Kawashima, K., Unjoh, S. 1995. Hybrid Control of Seismic-Excited Bridge Structures. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 24:1437-1451.

Wu, C., Lin, Y.C., and Hsu, D.S. 2008. Preformance Test and Mathematical Model Simulation of MR Damper. 14th World Conference on Earthquake Engineering.

Zapateiro, M., Luo, N., Rodellar, J., Rodriguez, A. 2008. Modeling and Identification of Hysteretic Dynamics of MR Dampers and Application to Seismic Vibration Control of Smart Structures. 14th World Conference on Earthquake Engineering.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณกรณ์ แก้วปิ่นทอง เกิดปี พ.ศ. 2514 ที่จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2536 ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกรโครงการ บริษัทกำแพงเพชรวิวัฒน์ก่อสร้างจำกัด ในปี พ.ศ. 2536 และ ตำแหน่งวิศวกร บริษัทผลิตภัณฑ์คอนกรีตซีแพคจำกัด ในปี พ.ศ.2537 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2546 และ เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในปี พ.ศ. 2549