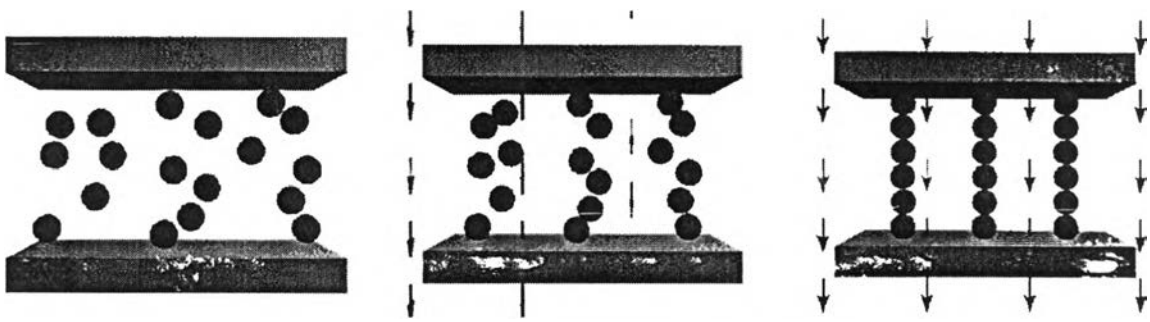
บทที่ 5
การทดสอบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติของตัวหน่วงตัวอย่าง

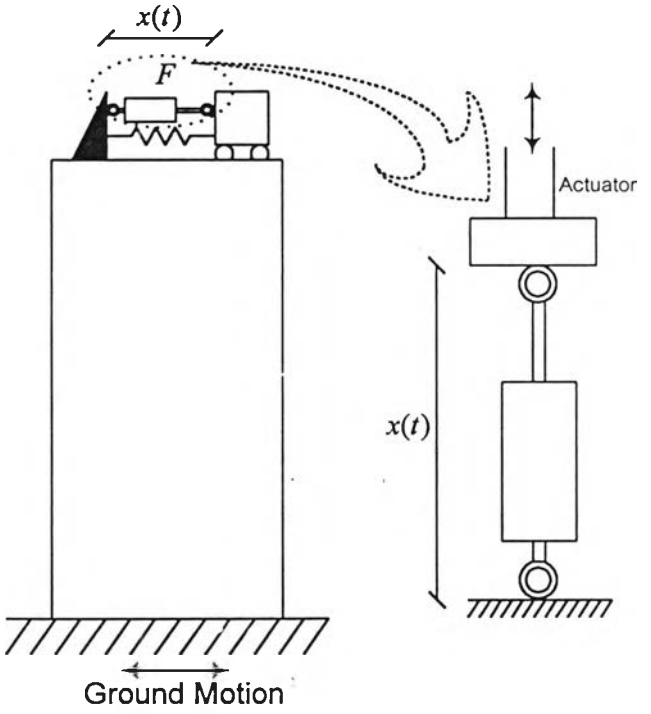
จากผลการศึกษาในเชิงตัวเลขดังที่แสดงในบทที่ 3 พบว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟนี้มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการที่จะพัฒนาระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟนี้มาใช้ในทางปฏิบัติจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้จากเทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถนำมาพัฒนาใช้กับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟได้หลายชนิดเช่น ตัวหน่วงชนิดที่สามารถปรับรูการไหลผ่านของของเหลวได้ (Variable orifice dampers), ตัวหน่วงชนิดที่สามารถปรับค่าแรงเสียดทาน (Variable friction dampers) และ ตัวหน่วงชนิดที่สามารถปรับค่าความหนืดของของเหลวภายในได้ (Controllable fluid dampers)เป็นต้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการใช้ตัวหน่วงชนิดที่สามารถปรับค่าความหนืดของของเหลวภายในได้ เป็นชนิดที่น่าจะเหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากความไวในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุและความทนทานต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุ โดยที่ภายในตัวหน่วงชนิดนี้ประกอบด้วยของเหลวแม่เหล็กปรับค่า (Magneto-Rheological fluid, MR fluid) ซึ่งเป็นของเหลวที่จะปรับเปลี่ยนความหนืดของตัวเองโดยการจัดเรียงโมเลกุลใหม่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่ผ่านตัวมันดังแสดงแบบจำลองได้ในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงแบบจำลองการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก

เมื่อได้รับการป้อนกระแสไฟฟ้าเพื่อไปทำการสร้างสนามแม่เหล็กที่มีค่าเหมาะสมจะทำให้ของเหลวมีค่าความหนืดตามที่ต้องการภายในเวลาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งคุณสมบัติของของเหลวแม่เหล็กปรับค่านี้มีความน่าสนใจที่จะพัฒนามาใช้ในระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟในทางปฏิบัติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟในทางปฏิบัติโดยพิจารณาตัวหน่วงที่บรรจุด้วยของเหลวแม่เหล็กปรับค่าอยู่ภายในเป็นตัวอย่างในการทดสอบคุณสมบัติ โดยในการศึกษานี้จะทำการจำลองการ

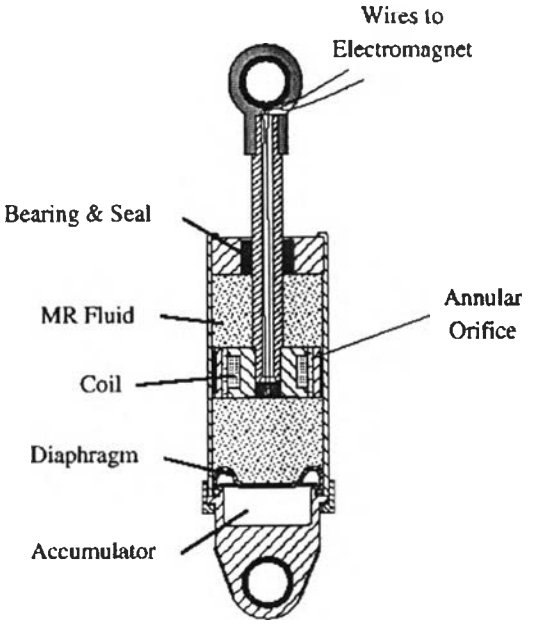
ทำงาน ของตัวหน่วงผ่านการใช้เครื่องออกแรง ซึ่งเครื่องออกแรงจะควบคุมระยะการยืดหดของตัวหน่วงเป็นลักษณะของฟังก์ชั่นฮาร์โมนิกโดยให้มีความถี่ของการยืดหดมีสภาพใกล้เคียงกับการสั่นไหวที่เกิดขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งมีรายละเอียดของการทดสอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.2 แสดงการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของตัวหน่วง

5.1 หลักการทำงานของตัวหน่วงที่เลือกใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษา

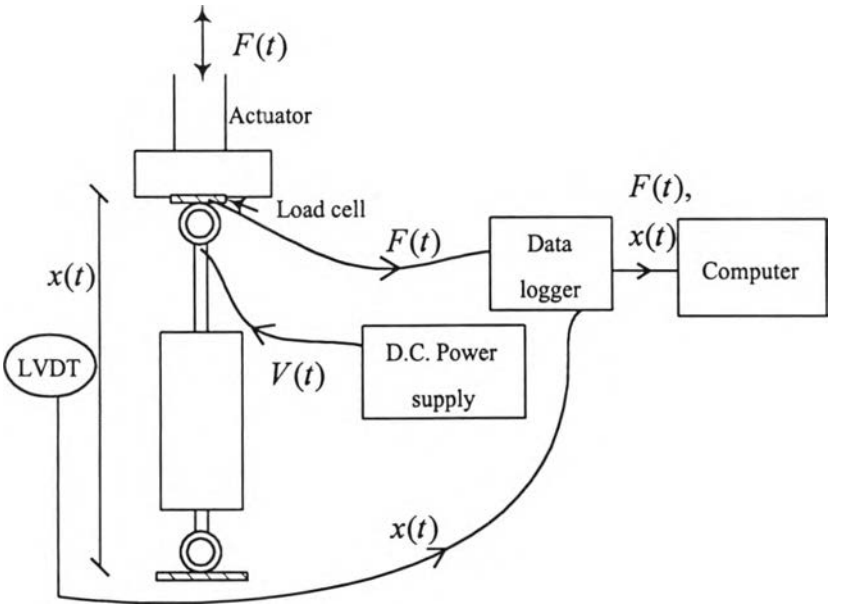
ตัวหน่วงที่ใช้ศึกษาเป็นตัวหน่วงสำเร็จรูปซึ่งบรรจุของเหลวแม่เหล็กปรับค่าไว้ภายในดังแสดงในรูปที่ 5.3 ระหว่างการใช้งานสามารถปรับกระแสไฟที่ป้อนเข้าสู่ตัวหน่วงได้ โดยที่กระแสไฟที่ป้อนเข้าไปนี้จะไปผ่านขดลวดซึ่งอยู่ภายในเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก เมื่อของเหลวแม่เหล็กปรับค่าอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปก็จะเกิดการเรียงตัวโมเลกุลใหม่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของตัวหน่วง ดังนั้นจึงทำให้สามารถนำมาใช้กับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟได้



รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะภายในของตัวหน่วงที่บรรจุของเหลวแม่เหล็กปรับค่าไว้ภายใน [Dyke S.F. และคณะ, 1997]

5.2 การทดสอบหาคุณสมบัติของตัวหน่วงที่บรรจุของเหลวแม่เหล็กปรับค่า

ในระหว่างการทดสอบเครื่องออกแรงจะทำการออกแรงเพื่อยืดหดตัวหน่วงโดยลักษณะของการยืดหดจะเป็นลักษณะแบบฟังก์ชั่นฮาร์โมนิกมีระยะการยืดหดและความถี่ตามที่กำหนดไว้ โดยระหว่างการทดสอบจะมีการเก็บค่าข้อมูลต่างๆดังแผนภาพในรูปที่ 5.4

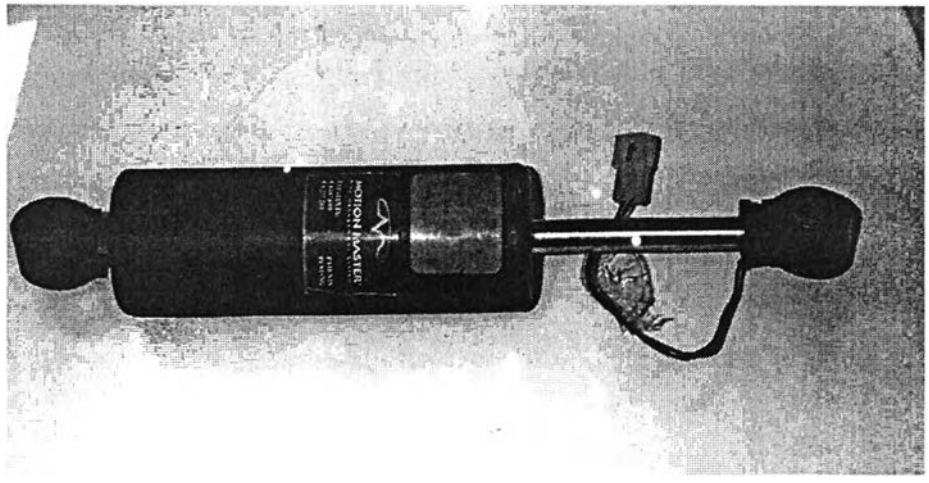


รูปที่ 5.4 แสดงแผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและการเก็บข้อมูล

ในขณะที่ทำการทดสอบจะมีการบันทึกค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ตัวหน่วง (F) โดยผ่านทางหน่วยวัดแรง (Load cell) และบันทึกค่าระยะการยืดหดของตัวหน่วง (x) โดยใช้แอลวีดีที ข้อมูลที่ได้จากหน่วยวัดแรงและแอลวีดีทีซึ่งเป็นสัญญาณแบบอนาลอก(Analog signal) จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแบบดิจิตอล (Digital signal) และบันทึกเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger) ผ่านโปรแกรมที่เขียนขึ้นจากโปรแกรมแล็บวิว (Labview)

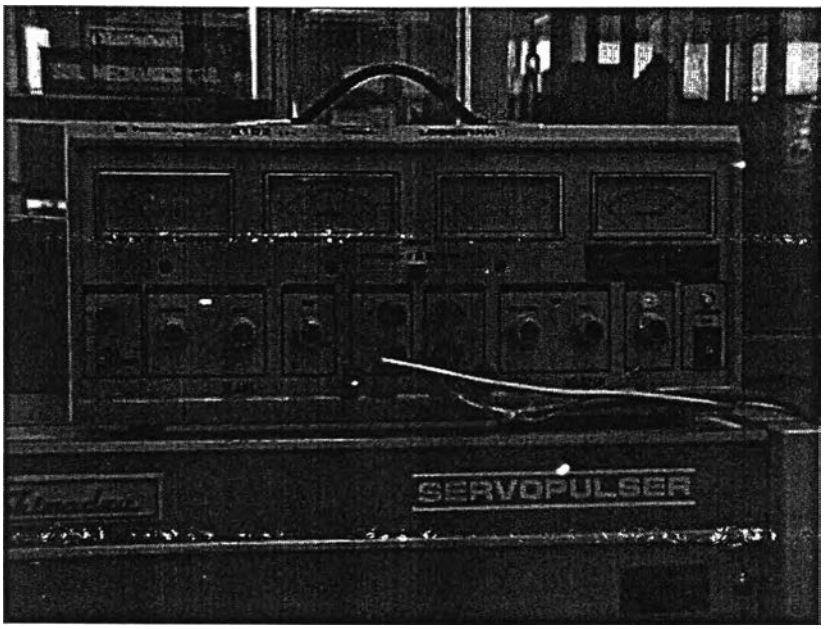
5.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ

1. ตัวหน่วงที่บรรจุของเหลวแม่เหล็กปรับค่าไว้ภายใน (Magneto-rheological damper) ซึ่งจะสามารถป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดอยู่ภายในได้ โดยที่ขดลวดซึ่งอยู่ภายในจะทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นเพื่อปรับค่าความหนืดของของเหลวแม่เหล็กปรับค่า (รูปที่ 5.5)



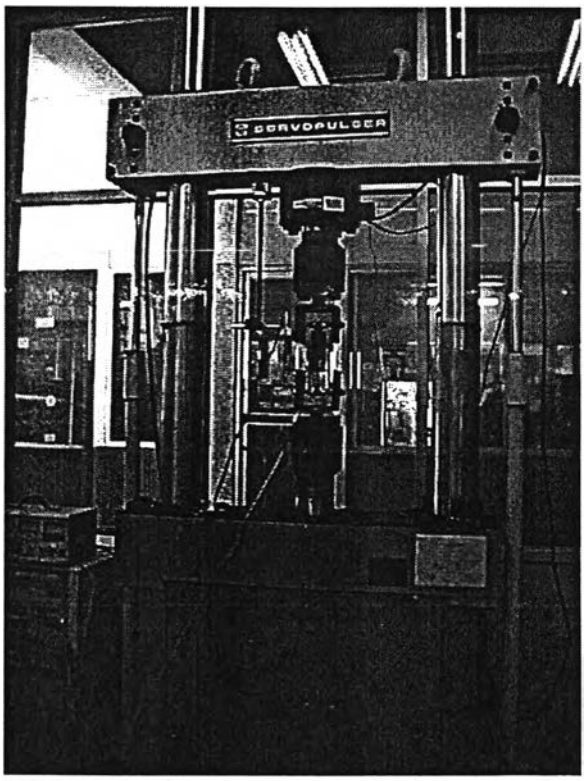
รูปที่ 5.5 แสดงตัวหน่วงที่บรรจุของเหลวแม่เหล็กปรับค่าไว้ภายใน (Magneto-rheological damper)

2. เครื่องป้อนไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. Power supply) เพื่อป้อนให้กับตัวหน่วง เป็นเครื่องมือที่ใช้ปรับค่ากระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ตามที่ต้องการเพื่อที่จะป้อนให้กับตัวหน่วง (รูปที่ 5.6)



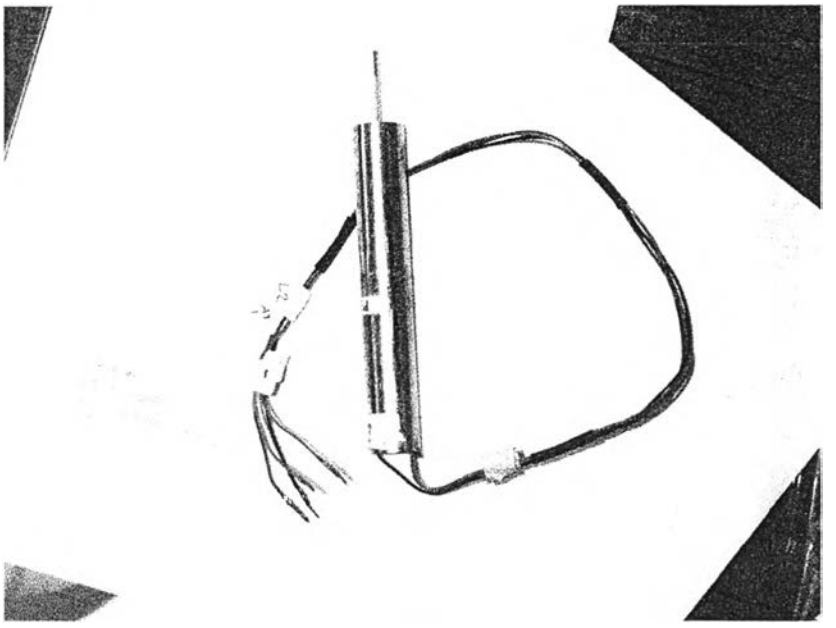
รูปที่ 5.6 แสดงเครื่องป้อนไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับป้อนไฟฟ้าเข้าสู่ตัวหน่วง (DC. Power supply)

3. เครื่องออกแรง (Actuator) เป็นเครื่องออกแรงระบบไฮดรอลิกส์สามารถให้แรงกระทำแก่วัสดุตัวหน่วงที่นำมาทดสอบได้ในลักษณะของฟังก์ชั่นฮาร์โมนิกที่เลือกค่าความถี่และค่าแอมปลิจูดที่ใช้ในการยืดหดตัวหน่วงได้ (รูปที่ 5.7)



รูปที่ 5.7 แสดงเครื่องออกแรง (Actuator)

4. แอลวีดีที (Linear variable differential transformer, LVDT) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดระยะยืดหดของตัวหน่วง โดยจะส่งข้อมูลการยืดหดตัวในลักษณะของความต่างศักย์ (รูปที่ 5.8)

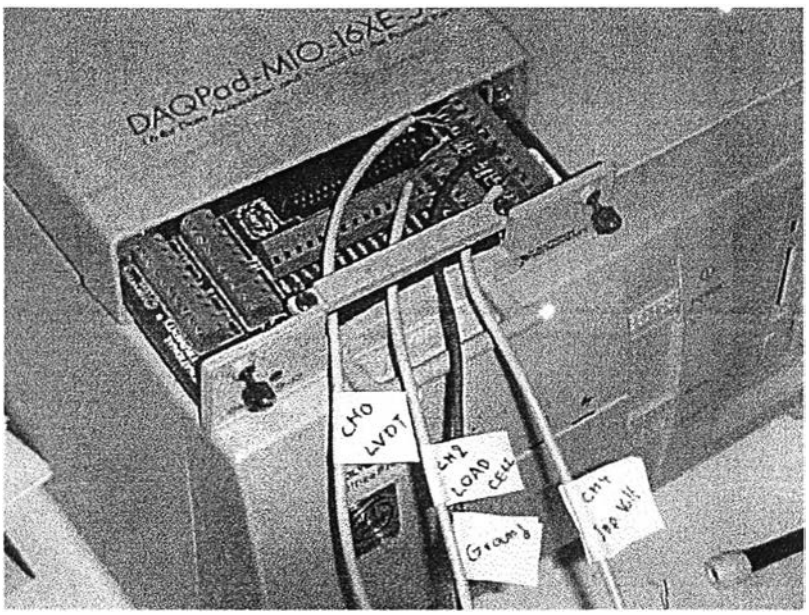


รูปที่ 5.8 แสดงแอลวีดีที (LVDT)

5. หน่วยวัดแรง (Load cell) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าแรงที่เครื่องออกแรงกระทำ ซึ่งจะส่งข้อมูลของแรงในลักษณะของความต่างศักย์เช่นกัน (รูปที่ 5.9)

รูปที่ 5.9 แสดงหน่วยวัดแรง (Load cell)

6. เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) ใช้สำหรับบันทึกค่าแรงที่เครื่องกดกระทำและค่าระยะยืดหดของตัวหน่วงที่วัดได้จากแอลวีดีที (รูปที่ 5.10)



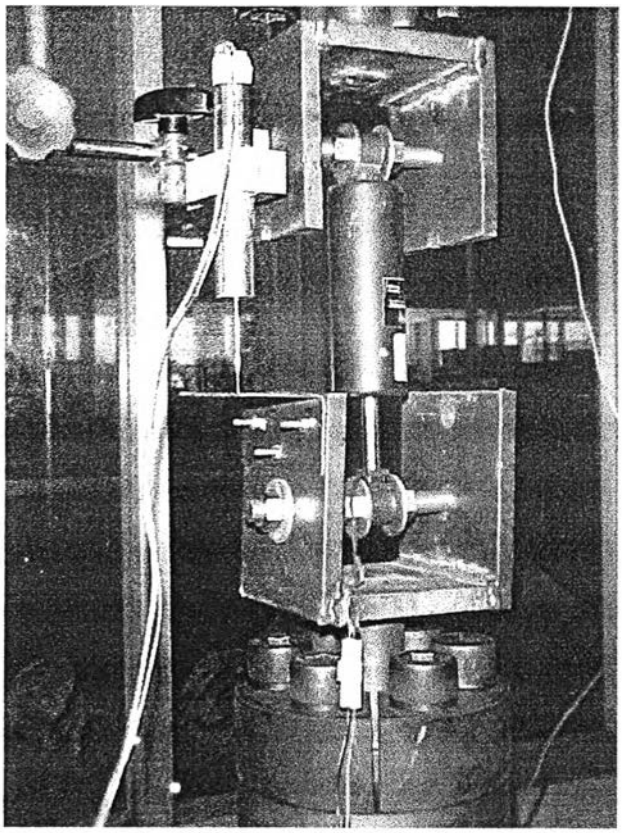
รูปที่ 5.10 แสดงเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger)

7. คอมพิวเตอร์ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลที่ได้รับจากเครื่องเก็บข้อมูล

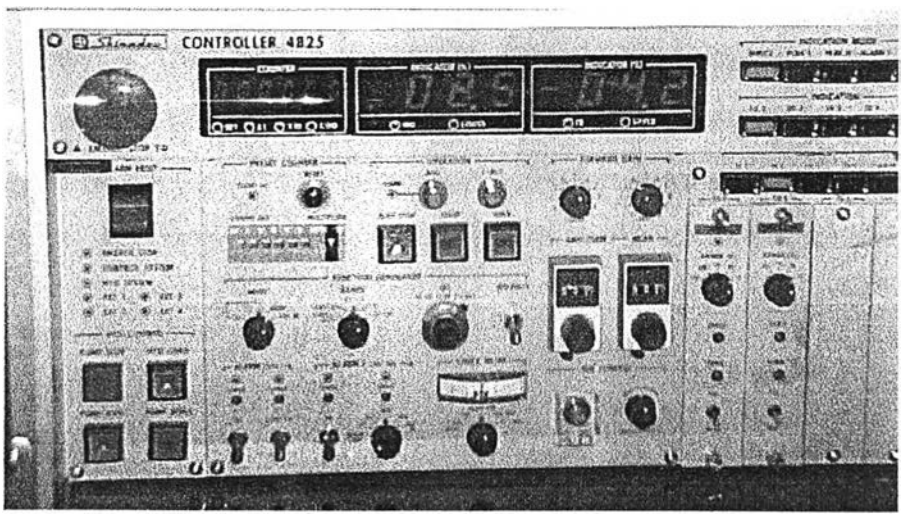
5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ติดตั้งอุปกรณ์โดยทำการยึดตัวหน่วงเข้ากับเครื่องออกแรง และติดตั้งแอลวีดีทีเพื่อวัดระยะยืดหดของตัวหน่วงพร้อมทั้งโยงสายสัญญาณข้อมูลที่ออกจากเครื่องออกแรงและแอลวีดีทีเข้าสู่เครื่องเก็บข้อมูลเพื่อบันทึกลงสู่คอมพิวเตอร์ (รูปที่ 5.11)
2. ตั้งค่าความถี่ของเครื่องเพื่อที่จะใช้ในการออกแรงกระทำต่อตัวหน่วงเป็น 0.3 เฮิร์ท (รูปที่ 5.12)
3. ตั้งค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้แก่ตัวหน่วงเป็น 0 โวลท์
4. เลือกค่าแอมปลิจูดของระยะยืดหดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของความสามารถสูงสุดของเครื่อง
5. ให้เครื่องออกแรงเริ่มทำการออกแรงเป็นฟังก์ชั่นฮาร์โมนิกตามค่าความถี่และค่าแอมปลิจูดที่ตั้งค่าไว้, ทำการบันทึกข้อมูลค่าแรงที่เครื่องกดกระทำ และค่าระยะยืดหดของตัวหน่วง โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถูกบันทึกเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดย

ผ่านเครื่องเก็บข้อมูล ซึ่งได้ตั้งความถี่ในการเก็บข้อมูลไว้ที่ 250 ข้อมูลต่อวินาทีต่อประเภทของสัญญาณ



รูปที่ 5.11 แสดงการติดตั้งตัวหน่วงและแอลวีดีทีเข้ากับเครื่องออกแรง



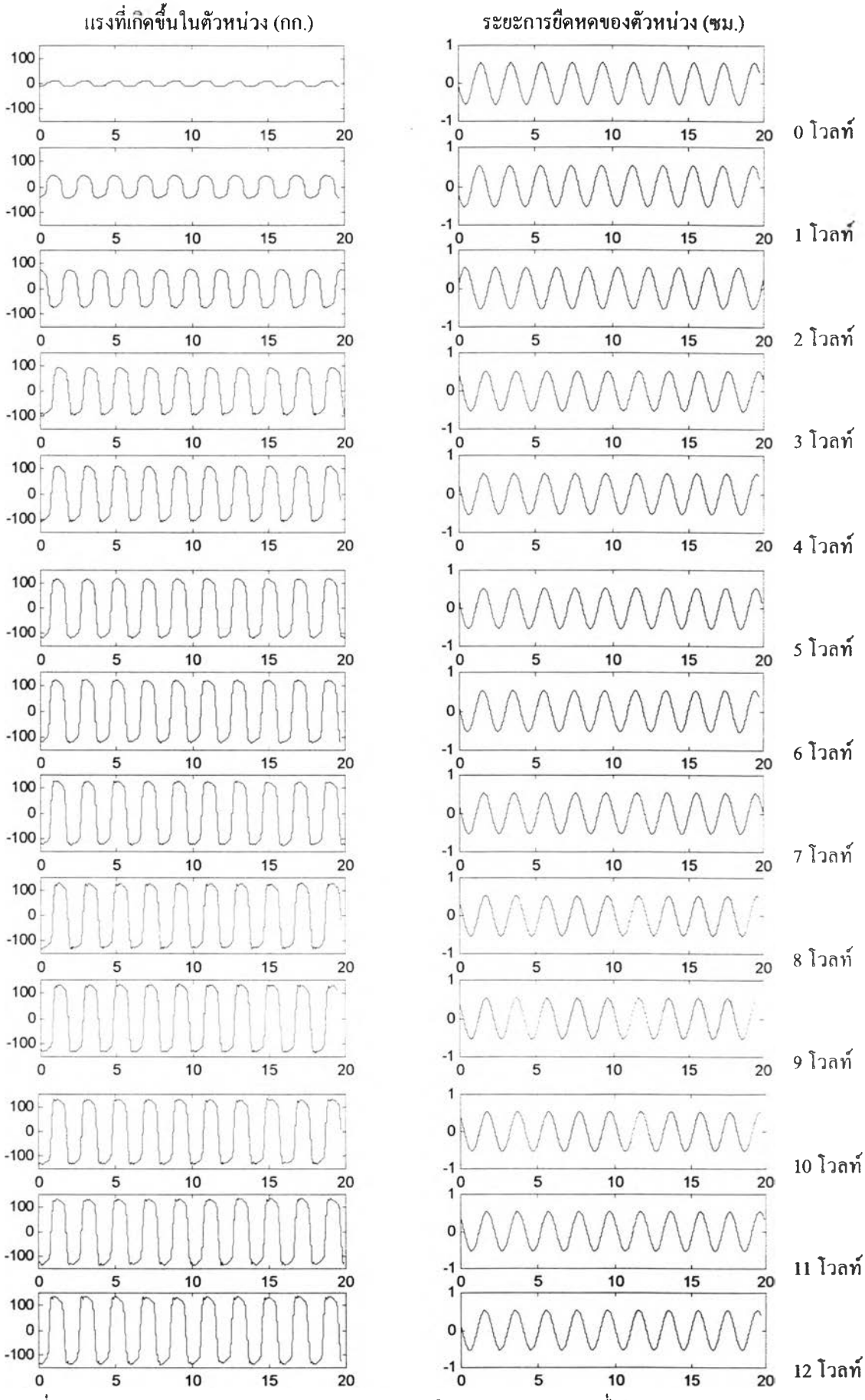
รูปที่ 5.12 แสดงแผงการควบคุมเครื่องออกแรงซึ่งใช้สำหรับควบคุมความถี่และแอมปลิจูดของการยืดหดตัวหน่วง

6. ทำซ้ำข้อ 5 โดยปรับค่าแอมปลิจูดของระยะยืดหดเป็น 20 , 30, 40,...,100 เปอร์เซ็นต์ของความสามารถของเครื่องออกแรง
7. ทำซ้ำข้อ 5 ถึงข้อ 6 โดยปรับค่าความต่างศักย์ที่ป้อนเข้าสู่ตัวหน่วงเป็น 1, 2, 3,...,12 โวลท์
8. ทำซ้ำข้อ 5 ถึงข้อ 7 โดยปรับความถี่ในการออกแรงของเครื่องเป็น 0.5, 1.0 และ 2.0 เฮิร์ท

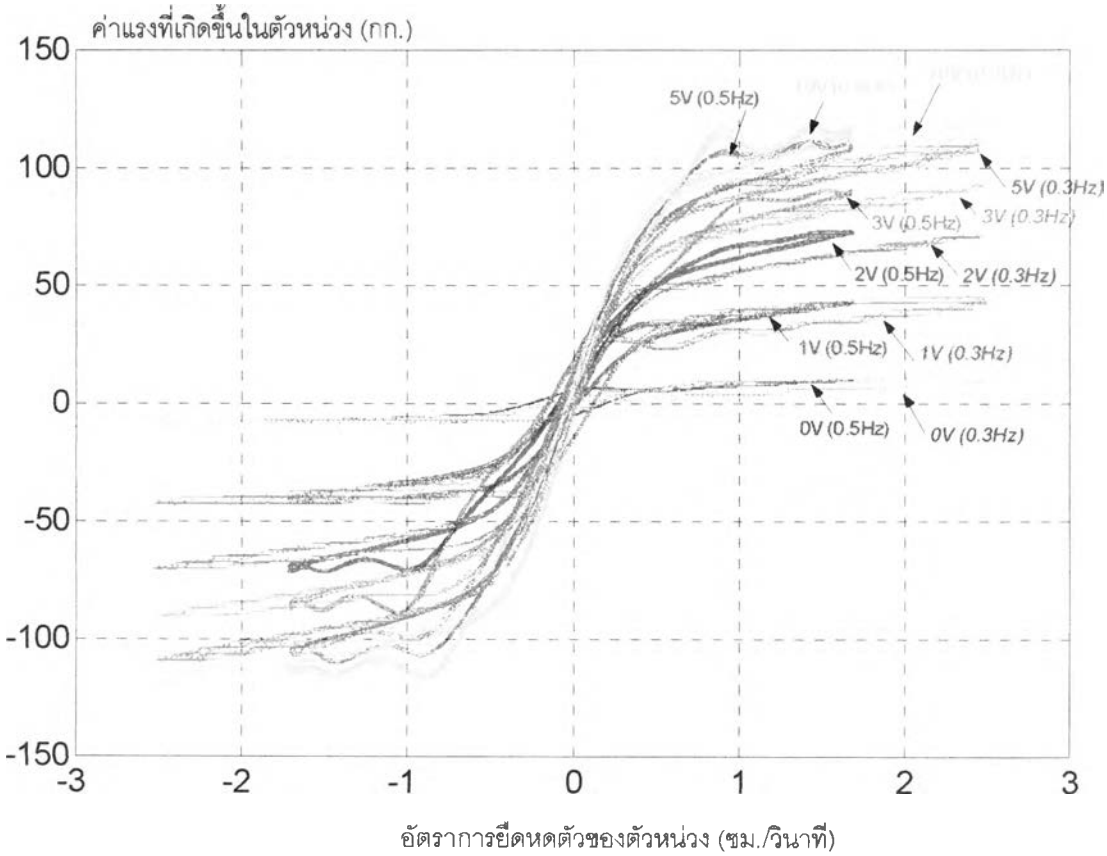
5.2.3 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในแต่ละกรณีในขั้นตอนที่ 5 ของการทดสอบคือค่าแรงที่กระทำโดยเครื่องออกแรงซึ่งสัญญาณที่วัดเข้าเครื่องเป็นข้อมูลเป็นลักษณะของความต่างศักย์ที่ส่งมาจาก Load cell ของเครื่องกดเองจากนั้นจึงจะทำการแปลงสัญญาณความต่างศักย์ที่บันทึกได้เป็นค่าแรง (F) อีกครั้งหนึ่ง โดยค่าแรงที่เครื่องออกแรงกระทำจะมีค่าเท่ากับแรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วง นอกจากจะบันทึกค่าแรงที่กระทำต่อตัวหน่วงแล้วยังทำการเก็บข้อมูลระยะการยืดหดของตัวหน่วงซึ่งข้อมูลของระยะนี้จะวัดได้จาก LVDT ซึ่งลักษณะข้อมูลที่บันทึกจะเป็นความต่างศักย์และนำมาแปลงเป็นระยะยืดหดภายหลัง (x) เช่นกัน ซึ่งตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงได้ดังในรูปที่ 5.13

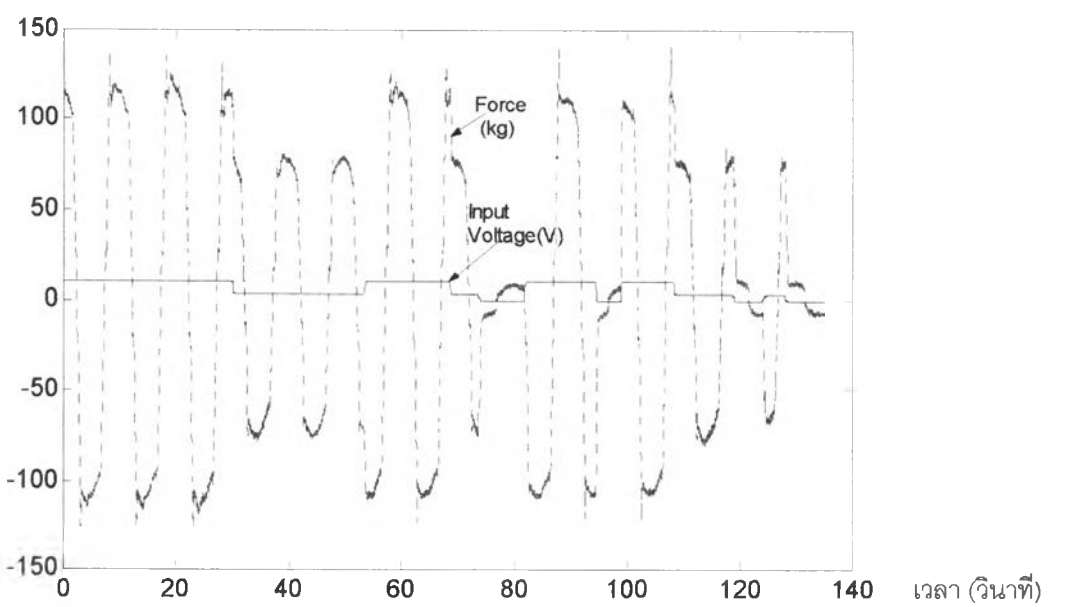
นอกจากนี้จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะสามารถสังเกตได้ว่าของเหลวแม่เหล็กปรับค่าที่บรรจุในตัวหน่วงมีความไวในการปรับค่าความหนืดสูงมาก โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 5.14 ซึ่งเป็นการทดสอบให้ค่าความต่างศักย์ที่ป้อนเข้าสู่ตัวหน่วงมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปมา จะพบว่าแรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงก็มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความต่างศักย์ที่ป้อนเข้าไป โดยในรูปที่ 5.15 ซึ่งเป็นรูปขยายจากรูปที่ 5.14 จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวหน่วงอาศัยเวลาในการปรับตัวเพียงเล็กน้อย โดยใช้เวลาน้อยกว่า 30 มิลลิวินาที



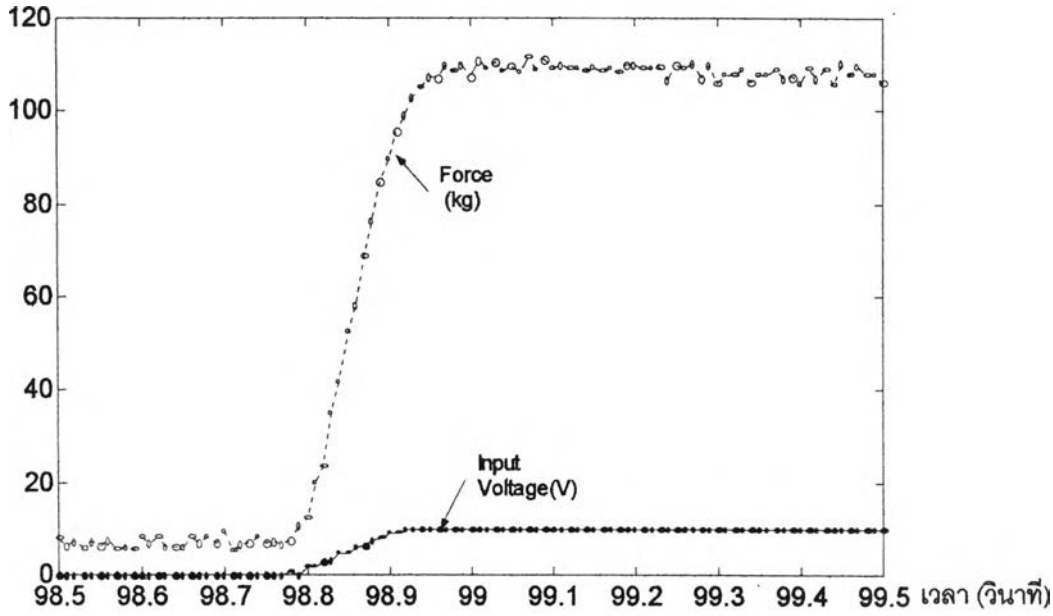
รูปที่ 5.13 แสดงตัวอย่างข้อมูลแรงและระยะการยืดหดของตัวหน่วงที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงและอัตราการยืดหดตัวของตัวหน่วงที่ความถี่ต่างกัน (0.3 Hz และ 0.5 Hz) เมื่อป้อนความต่างศักย์ค่าต่างๆ



รูปที่ 5.15 แสดงข้อมูลการทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เข้าสู่ตัวหน่วง



รูปที่ 5.16 แสดงภาพขยายข้อมูลการทดสอบในช่วงเวลา 98.5 ถึง 99.5 วินาที

5.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงที่ใช้ในการศึกษา

พฤติกรรมของของเหลวแม่เหล็กปรับค่าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองบิงแฮมพลาสติก (Bingham plastic model) [Spencer B.F. และคณะ, 1996] โดยแบบจำลองนี้ได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน (Shear stress) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือน (Shear strain) ดังนี้

$$\tau = \tau_{y(field)} \cdot sign(\dot{\gamma}) + \eta \cdot \dot{\gamma} \qquad (5.1)$$

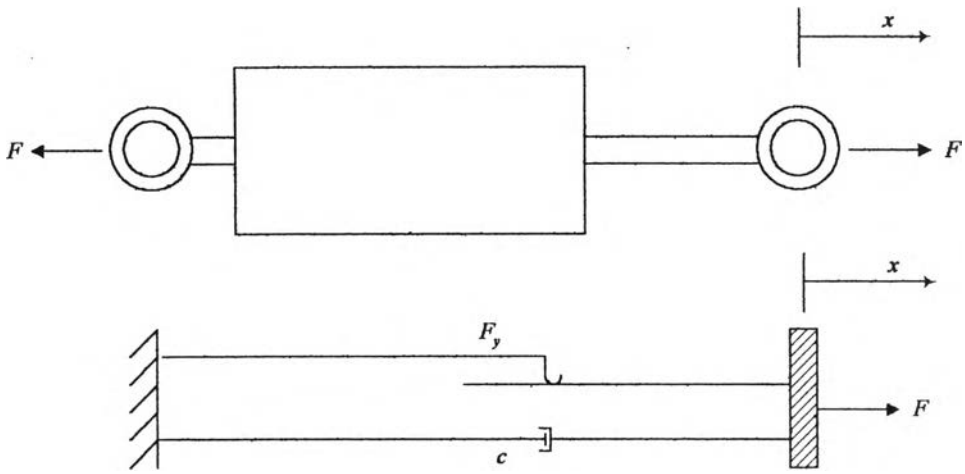
โดยที่ τ คือ ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในของเหลวแม่เหล็กปรับค่า (กก./ซม.^{2})

$\tau_{y(field)}$ คือค่าความเค้นเฉือนครากซึ่งขึ้นกับค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในของเหลวแม่เหล็กปรับค่า (กก./ซม.^{2})

η คือสัมประสิทธิ์ความหนืดของของเหลวแม่เหล็กปรับค่า(กก.-วินาที/ซม.^{2})

$\dot{\gamma}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือน (วินาที$^{-1}$)

$sign(\dot{\gamma})$ คือ เครื่องหมายของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือน



รูปที่ 5.17 แสดงแบบจำลองของตัวหน่วง

จากความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ 5.1 สามารถแปลงเป็นแบบจำลองในรูปแบบแผนภาพดังในรูปที่ 5.17 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วง (F) และระยะยืดหดของตัวหน่วง (x) ได้ดังสมการที่ 5.2 ดังนี้

$$F = F_y \cdot sign(\dot{x}) + c \cdot \dot{x} \tag{5.2}$$

โดยที่ F คือ แรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วง (กก.)

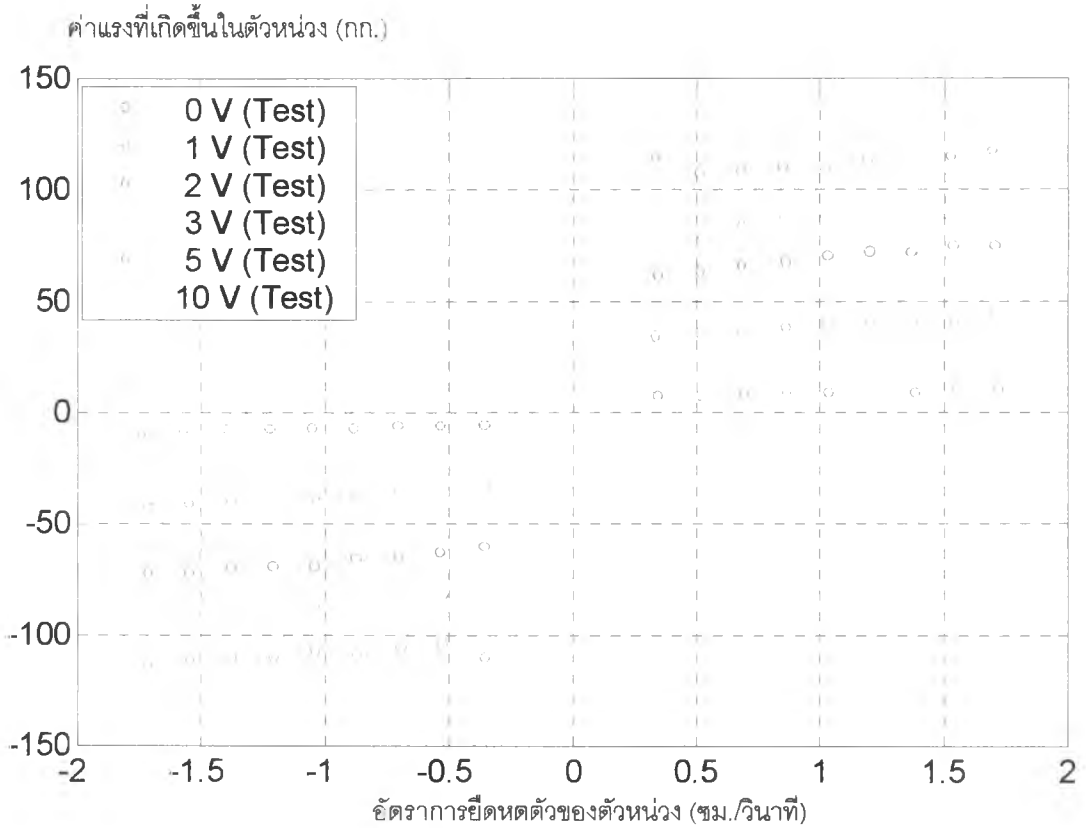
F_y คือแรงที่จุดครากของตัวหน่วงเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น (กก.)

c คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง (กก.-วินาที/ซม.)

x คือ ระยะยืดหดของตัวหน่วง (ซม.)

$\dot{x}$ คือ อัตราการยืดหดของตัวหน่วง (ซม./วินาที)

$sign(\dot{x})$ คือ เครื่องหมายของอัตราการยืดหดของตัวหน่วง



รูปที่ 5.18 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยืดหดตัวของตัวหน่วงและแรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงจากการทดสอบสำหรับค่าความต่างศักย์ต่างๆที่ป้อนเข้าสู่ตัวหน่วง

จากผลการทดสอบสามารถนำค่าแอมปลิจูดของแรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงกับค่าแอมปลิจูดของอัตราการยืดหดของตัวหน่วงในแต่ละกรณีมาเขียนกราฟสำหรับค่าความต่างศักย์ที่ป้อนเข้าสู่ตัวหน่วงค่าต่างๆจะได้ดังแสดงในรูปที่ 5.18 ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้สามารถที่จะใช้แบบจำลองของเหลวแบบบิงแฮมพลาสติก โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าดังนี้

1. F_y เป็นฟังก์ชั่นโพลิโนเมียลของความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับตัวหน่วง โดยในที่นี้ใช้ฟังก์ชั่นโพลิโนเมียลดีกรีสามนั่นคือ

$$F_v = a_3V^3 + a_2V^2 + a_1V + a_0 \tag{5.3}$$

โดยที่ a_3, a_2, a_1, a_0 คือ ค่าคงที่

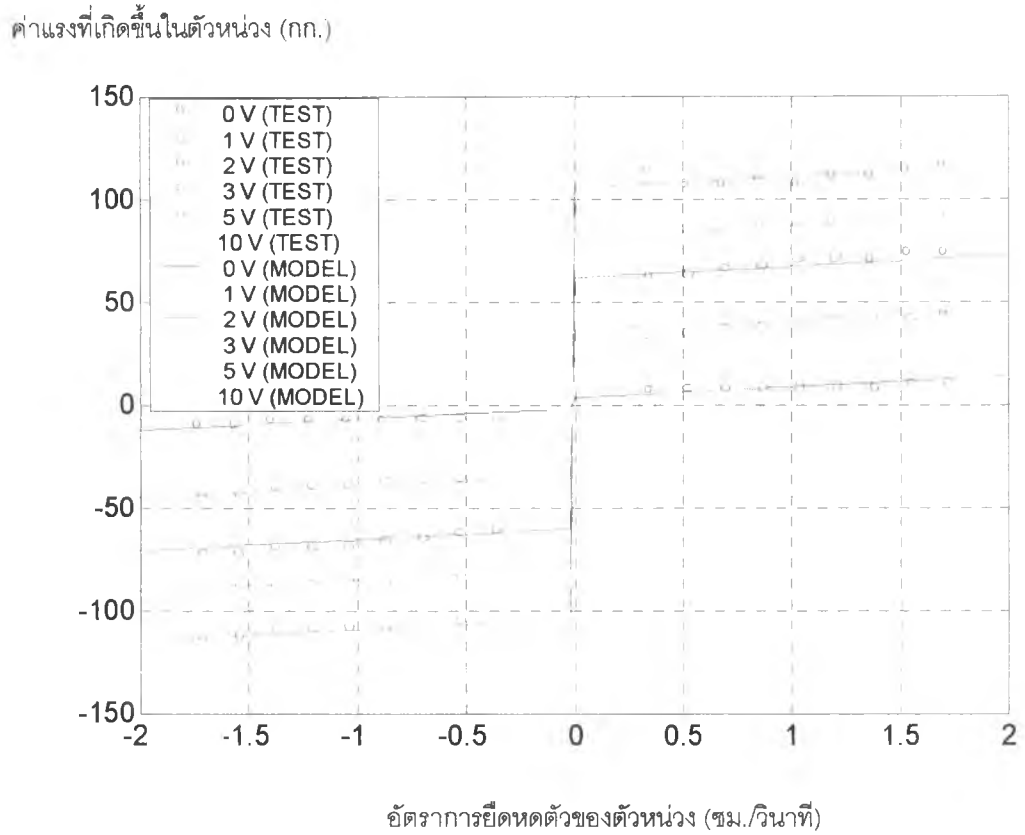
V คือ ค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับตัวหน่วง (โวลท์)

2. c คือค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง

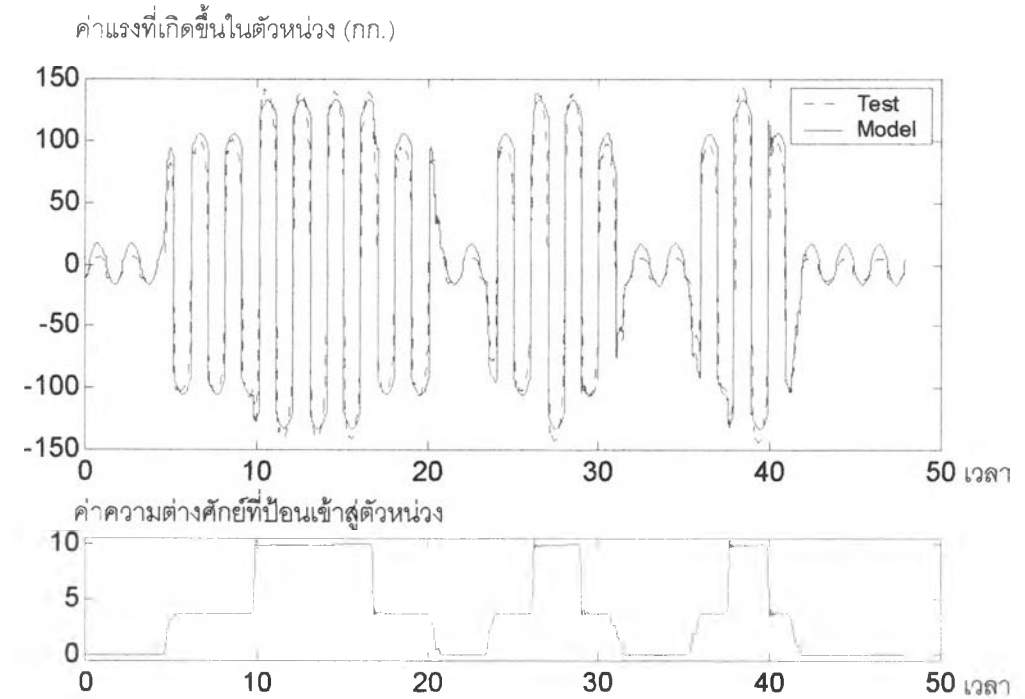
การหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทั้งห้าตัวอันได้แก่ a_3, a_2, a_1, a_0 และ c นี้ สามารถทำได้โดยวิธีการออฟติไมซ์เซชั่น (Optimization) เพื่อจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับข้อมูลทดสอบมากที่สุด โดยที่ค่าดัชนีที่ใช้บอกความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างแรงที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแรงที่ได้จากผลการทดสอบ ขอบเขตของตัวแปร a_3, a_2, a_1, a_0 เป็นช่วงเปิด ส่วนตัวแปร c มีขอบเขตอยู่เฉพาะจำนวนจริงบวกเท่านั้น ซึ่งสามารถหาค่าได้ a_3 มีค่าเท่ากับ 0.1455 กก./โวลท์ ^{3}, a_2 มีค่าเท่ากับ –3.9388 กก./โวลท์ ^{2}, a_1 มีค่าเท่ากับ 36.5336 กก./โวลท์, a_0 มีค่าเท่ากับ 2.4819 กก. และค่า c มีค่าเท่ากับ 5.384 กก.-วินาที/ซม. ซึ่งเมื่อนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มาใส่ในสมการที่ 5.2 จะสามารถใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงได้ดังในสมการที่ 5.4 ดังนี้

$$F = \left(0.1455V^3 - 3.9388V^2 + 36.5336V + 2.4819\right) \cdot sign(\dot{x}) + 5.384 \cdot \dot{x} \qquad (5.4)$$

ซึ่งเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะสามารถเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 5.19 และ 5.20 โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถที่จะใช้แทนคุณสมบัติของตัวหน่วงตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะทำให้การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้งานจริงของตัวหน่วงได้ผลใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงค่อนข้างมากทำให้น่าที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวหน่วงนี้ในระบบมวลหน่วงปรับค่ากึ่งแอกทีฟซึ่งได้แสดงผลการศึกษาในบทที่ 6



รูปที่ 5.19 แสดงค่าการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ (เส้นทึบ) กับ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ (จุด) ที่ค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้แก่ตัวหน่วง 0, 1, 2, 3, 5 และ 10 โวลท์



รูปที่ 5.20 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงจากผลทดสอบกับค่าแรงที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์