

บทที่ 8

การวัดและปรับค่าพารามิเตอร์ของสมการพลศาสตร์ยานพาหนะแบบ 4 ล้อ

ในบทที่นี้กล่าวถึงขบวนการหา และวิธีการวัดค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนในระบบของสมการพลศาสตร์ยานพาหนะแบบ 4 ล้อ โดยข้อมูลที่ได้จะแสดงถึงกลุ่มตัวแปรในการปรับเทียบกับกลุ่มข้อมูลยานพาหนะจริงในแบบ 4 ล้อ แต่ในที่นี้จะแสดงถึงแนวทางในการปรับค่ากลุ่มตัวแปรเท่านั้น เนื่องจากไม่ได้นำข้อมูลยานพาหนะจริงต้นแบบ 4 ล้อ เข้ามาพิจารณาในการปรับอ้างอิง โดยข้อมูลที่ได้จะแสดงถึงแนวโน้มของระบบสมการพลศาสตร์ยานพาหนะแบบ 4 ล้อ โดยสามารถสรุปกลุ่มตัวแปรไร้มิติของพลศาสตร์ยานพาหนะแบบ 4 ล้อ จากบทที่ 4 โดยได้กลุ่มของตัวแปรไร้มิติทั้งหมดดังนี้

$$\begin{aligned}\Pi_1 &= \frac{M_w}{M}, \quad \Pi_2 = \frac{a}{L}, \quad \Pi_3 = \frac{b}{L}, \quad \Pi_4 = \frac{K_T L^2}{Mu^2}, \quad \Pi_5 = \frac{K_{sr} L^2}{Mu^2}, \quad \Pi_6 = \frac{K_{sf} L^2}{Mu^2}, \quad \Pi_7 = \frac{c_{sf} L}{Mu} \\ \Pi_8 &= \frac{c_{sr} L}{Mu}, \quad \Pi_9 = \frac{W}{L}, \quad \Pi_{10} = \frac{h}{L}, \quad \Pi_{11} = \frac{C_f L}{Mu^2}, \quad \Pi_{12} = \frac{C_r L}{Mu^2}, \quad \Pi_{13} = \frac{I_z}{ML^2}, \quad \Pi_{14} = \frac{I_y}{ML^2} \\ \Pi_{15} &= \frac{I_x}{ML^2}\end{aligned}\tag{8.1}$$

จากกลุ่มตัวแปรไร้มิติทั้งหมด 15 กลุ่มของสมการพลศาสตร์แบบ 4 ล้อ จะเห็นว่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติเพิ่มขึ้นอีก 10 กลุ่มจากตัวแปรไร้มิติแบบ 2 ล้อ ที่ได้หามาก่อนหน้านั้นแล้ว ดังนั้นในการอ้างอิงพลศาสตร์แบบ 4 ล้อของยานพาหนะจำเป็นที่จะต้องหากกลุ่มตัวแปรให้ครบทั้งหมด 15 กลุ่มสำหรับการหาค่าตัวแปรได้ใช้เกณฑ์ในการจัดหมวดหมู่ตามลักษณะและวิธีการหาที่คล้ายกัน โดยแบ่งออกเป็น 6 หมวด แต่ละหมวดมีขั้นตอนและวิธีหาดังต่อไปนี้

8.1 การหาหมวดที่ 1 ($\Pi_1 = \frac{M_w}{M}, \Pi_9 = \frac{W}{L}$)

เมื่อกำหนดให้

$$M_w = \text{มวลของล้อ}$$

$$M = \text{มวลของยานพาหนะ}$$

$$W = \text{ความกว้างของตัวยานพาหนะ (วัดจากจุดกึ่งกลางของหน้ายางล้อถึงกึ่งกลางของหน้ายางล้ออีกข้าง)}$$

$$L = \text{ความยาวระหว่างเพลาของล้อหน้าและเพลาล้อหลัง}$$

วิธีการหาค่าตัวแปรในกลุ่มนี้ จะเห็นว่าตัวแปรในกลุ่มนี้มีเพียงแค่น้ำหนักและค่าความยาวเท่านั้น ดังนั้นในการหาค่าตัวแปร ทำโดยการนำไปซึ่งน้ำหนัก และวัดความยาวโดยวิธีทั่วไป แต่สำหรับมวลล้อยแล้วจะซึ่ง โดยตาชั่งที่มีค่าความละเอียดสูง เนื่องจากมวลล้อยมีค่าค่อนข้างเบา มากจึงไม่เหมาะสำหรับเครื่องชั่งทั่วไปหลังจากทำการชั่งและวัดค่าตามตัวแปรที่กำหนดแล้วแทนค่าตัวแปรลงในสมการ 8.1 จะได้ค่ากลุ่มตัวแปรไว้มีติดดังนี้

$$\Pi_1 = \frac{M_w}{M} = \frac{0.08658(kg)}{5.04(kg)} = 0.0172 \quad (8.2)$$

$$\Pi_9 = \frac{W}{L} = \frac{0.18(m)}{0.280(m)} = 0.6429 \quad (8.3)$$

8.2 การหาหมวดที่ 2 ($\Pi_2 = \frac{a}{L}$, $\Pi_3 = \frac{b}{L}$, $\Pi_{11} = \frac{C_f L}{Mu^2}$, $\Pi_{12} = \frac{C_r L}{Mu^2}$, $\Pi_{13} = \frac{I_z}{ML^2}$)

เนื่องจากค่ากลุ่มตัวแปรในกลุ่มนี้มีค่าเช่นเดียวกับตัวแปรในรูปแบบของพลศาสตร์แบบ 2 ล้อที่หามาก่อนหน้านี้แล้ว ดังนั้นวิธีการหาสามารถดูได้บทที่ 7 สำหรับค่าตัวแปรของกลุ่มนี้คือ

$$\Pi_2 = \frac{a}{L} = \frac{0.123(m)}{0.280(m)} = 0.4393 \quad (8.4)$$

$$\Pi_3 = \frac{b}{L} = \frac{0.157(m)}{0.280(m)} = 0.5607 \quad (8.5)$$

$$\Pi_{11} = \frac{C_f L}{Mu^2} = \frac{37.44(N / rad)0.280(m)}{5.04(kg)1(m / s)^2} = 2.0800 \quad (8.6)$$

$$\Pi_{12} = \frac{C_r L}{Mu^2} = \frac{42.77(N / rad)0.280(m)}{5.04(kg)1(m / s)^2} = 2.3761 \quad (8.7)$$

$$\Pi_{13} = \frac{I_z}{ML^2} = \frac{0.0975(kg.m^2)}{5.04(kg)0.280(L^2)} = 0.2468 \quad (8.8)$$

8.3 การหวมวัดที่ 3 ($\Pi_{10} = \frac{h}{L}$)

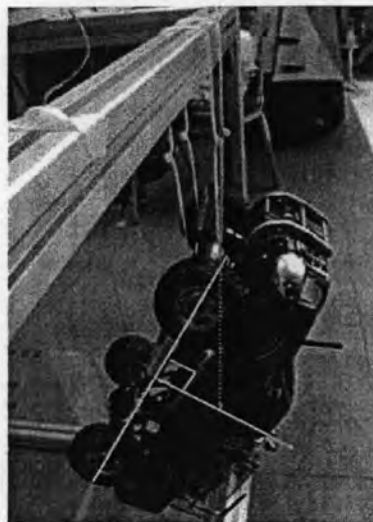
เมื่อกำหนดให้

h = ความสูงของจุดศูนย์ถ่วงของยานพาหนะ

L = ความยาวระหว่างเพลลาของล้อหน้าและเพลาล้อหลัง

สำหรับการหาความสูงของจุดศูนย์ถ่วงของยานพาหนะ หาได้จากการคำนวณเมื่อนำยานพาหนะไปแขวนดังรูปที่ 8.1 เนื่องจากบนตัวยานพาหนะมีอุปกรณ์วัดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งสามารถคำนวณกลับเป็นมุมองศาได้ จากรูปจะเห็นเส้นทึบที่ตั้งฉากกันกับจุดศูนย์ถ่วงของยานพาหนะที่ทราบตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงมาก่อนหน้านี้แล้ว สำหรับเส้นประที่ลากตัดกับเส้นทึบที่ตั้งฉากกัน จะได้ความสูงของจุดศูนย์ถ่วงของยานพาหนะ จากรูปจะเห็นว่ามีการแขวนสองแบบโดยรูปทางขวาจะแขวนจากด้านหน้ายานพาหนะ และรูปด้านซ้ายแขวนจากด้านหลังยานพาหนะ สาเหตุที่วัดค่าทั้งสองด้านก็เพราะต้องการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณ โดยค่าที่ได้ทั้งสองด้านจะต้องมีความสูงของจุดศูนย์ถ่วงของยานพาหนะที่ตำแหน่งเดียวกัน เมื่อแทนค่าตัวแปรที่หาได้จะได้ค่ากลุ่มตัวแปรไว้มีดังนี้

$$\Pi_{10} = \frac{h}{L} = \frac{0.137(m)}{0.280(m)} = 0.4893 \quad (8.9)$$



รูปที่ 8.1 การวัดความสูงของยานพาหนะ แขนงด้านหน้า(ขวา) และแขนงด้านหลัง(ซ้าย)

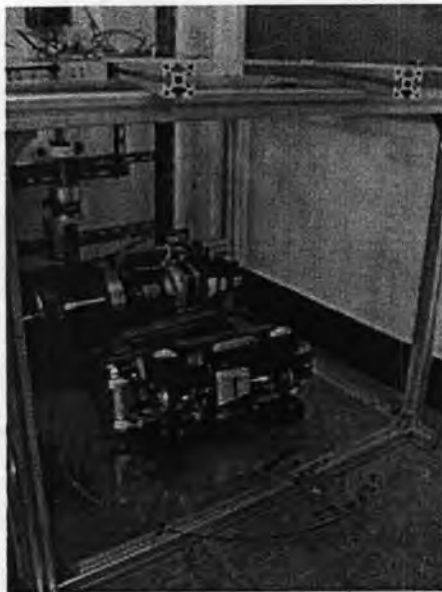
8.4 การหาหมวดที่ 4 ($\Pi_{14} = \frac{I_y}{ML^2}$, $\Pi_{15} = \frac{I_x}{ML^2}$)

เมื่อกำหนดให้

I_y = โมเมนต์ความเฉื่อยของตัวยานพาหนะรอบแกน y

I_x = โมเมนต์ความเฉื่อยของตัวยานพาหนะรอบแกน x

การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวยานพาหนะรอบแกน x และ y หาเช่นเดียวกับวิธีการค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวยานพาหนะรอบแกน z ที่ได้แสดงวิธีการหามาก่อนหน้านี้แล้ว โดยใช้หลักการมีชื่อว่า Trifilar pendulum หลักการ คือนำวัตถุที่ต้องการหาโมเมนต์ความเฉื่อยไปวางไว้บนอุปกรณ์ทดลองที่แขวนด้วยเชือกมวลเบาสามเส้น แล้วแกว่งหาคาบที่เกิดขึ้นไปแทนในสมการแล้วจะได้โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุนั้น จะแตกต่างกันตรงที่การจัดวางตำแหน่งของตัวยานพาหนะในการวัดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวยานพาหนะในแต่ละแนวแกน โดยแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 8.2 การหาค่า โมเมนต์ความเฉื่อยของตัวยานพาหนะรอบแกน y (ซ้าย) และแกน x (ขวา)

จากรูปที่ 8.2 การวางยานพาหนะทดสอบแต่ละแนวแกนนั้นจำเป็นต้องให้ตำแหน่งความสูงของจุดศูนย์ถ่วงยานพาหนะสอดคล้องกับจุดศูนย์ถ่วงแผ่นการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้นี้ เมื่อทำการทดสอบแล้วแทนค่าหาโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวยานพาหนะรอบแกน y และแกน x แล้วจะได้กลุ่มตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\Pi_{14} = \frac{I_y}{ML^2} = \frac{0.26022(\text{kg} \cdot \text{m}^2)}{5.04(\text{kg})0.280(\text{m}^2)} = 0.1844 \quad (8.10)$$

$$\Pi_{15} = \frac{I_x}{ML^2} = \frac{0.155(\text{kg}\cdot\text{m}^2)}{5.04(\text{kg})0.280(\text{m}^2)} = 0.1098 \quad (8.11)$$

8.5 การหาหมวดที่ 5 ($\Pi_4 = \frac{K_T L^2}{Mu^2}$, $\Pi_5 = \frac{K_{sr} L^2}{Mu^2}$, $\Pi_6 = \frac{K_{sf} L^2}{Mu^2}$)

เมื่อกำหนดให้

K_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็งที่ยางล้อกระทำกับผิวถนน

K_{sr} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็งที่ล้อหลังกระทำกับตัวยานพาหนะ

K_{sf} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็งที่ล้อหน้ากระทำกับตัวยานพาหนะ

ค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็งนั้น หาได้จากสมการดังนี้

$$k = \frac{F}{dx} \quad (8.12)$$

โดยที่

F คือ แรงในการกดหรือดึงวัตถุทดสอบ

dx คือ ระยะการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบ

8.5.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็งที่ยางล้อกระทำกับผิวถนน (K_T)

ในการทดลองแรงกดจะใช้ตาชั่งสปริงดึงลงด้วยน้ำหนักคงที่ โดยเพิ่มน้ำหนักขึ้นแล้วทำการบันทึกค่าจากรูปที่ 8.3 การดึงตราชั่งสปริงจะต้องให้แรงดึงทั้ง 2 ด้านมีค่าเท่ากัน ส่วนด้านบนที่ล้อมีที่วัดระดับน้ำใช้สำหรับ อ้างอิงความแม่นยำในการวัด สำหรับการวัดค่าการเคลื่อนที่ใช้เวอร์เนียในการวัด



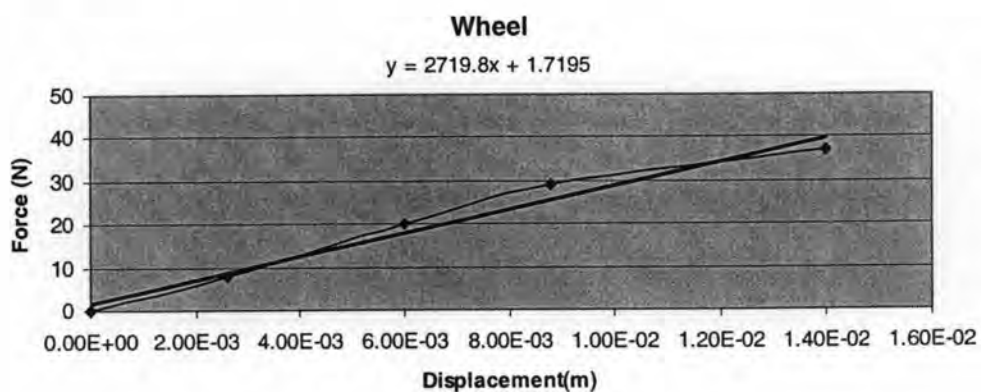
รูปที่ 8.3 การทดลองหาค่า K ของล้อ

ทำการบันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาค่า K ล้อ โดยข้อมูลที่ได้เป็นดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ผลการทดลองหาค่า K ของล้อ

แรง(kg)	ระยะ(mm)	แรง(N)	ระยะ(m)
0	0	0	0.00E+00
0.8	2.6	8	2.60E-03
2	6	20	6.00E-03
2.9	8.8	29	8.80E-03
3.7	14	37	1.40E-02

นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 8.1 ไปพล็อตกราฟแล้วหาความชันของสมการเชิงเส้น เพื่อหาค่า K ดังรูปต่อไปนี้

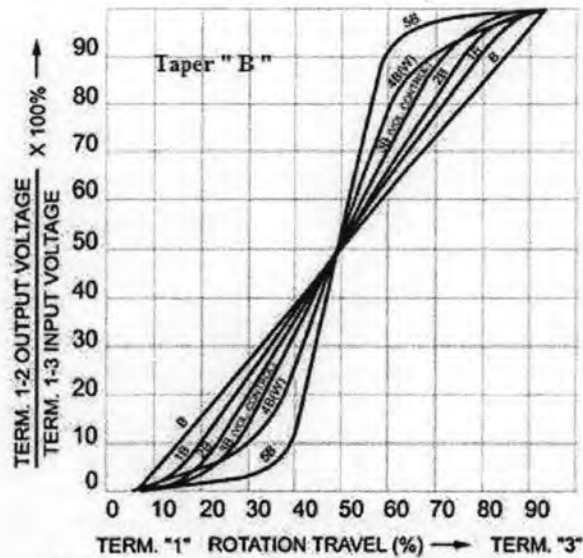


รูปที่ 8.4 แรงกดต่อระยะยุบตัวของล้อ

จากรูปที่ 8.4 จะได้ค่าความชันของสมการเชิงเส้นโดยประมาณจะได้ค่า $K = 2719.8 \text{ N/m}$

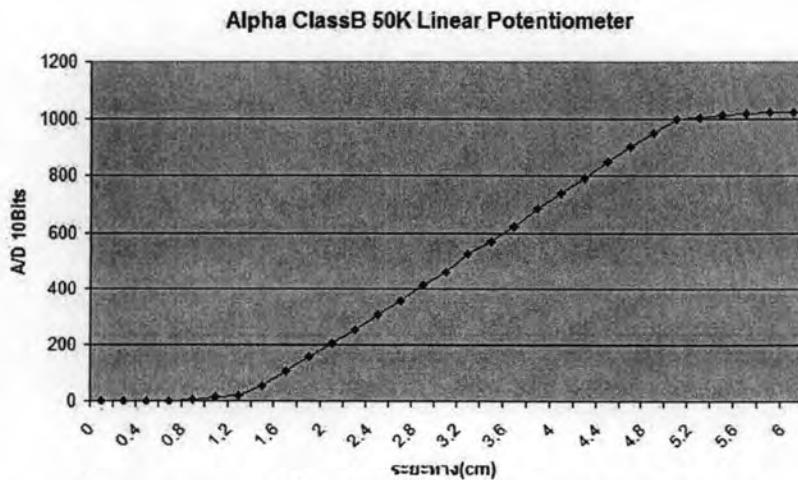
8.5.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงที่ยางล้อกระทำกับตัวยานพาหนะ (K_{sr} K_{sf})

ในการวัดระยะเคลื่อนที่ของตัวแปรในกลุ่มนี้นั้น ได้สร้างอุปกรณ์วัดขึ้นมา โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดระยะเคลื่อนที่ ได้เลือกใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เชิงเส้นแบบเลื่อน โดยอุปกรณ์ที่เลือกใช้นั้นต้องมีระยะที่สามารถยานพาหนะเคลื่อนที่ได้ไม่ต่ำกว่า 2.5cm ซึ่งเป็นค่าระยะต่ำสุดไปถึงสูงสุดการเคลื่อนที่ของระบบช่วงล่างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ใช้ต้องเลือกชนิดที่เป็นเชิงเส้น โดยเลือกใช้ชนิด B ของ Alpha รุ่น 50k Ω โดยมีกราฟช่วงทำงานดังนี้



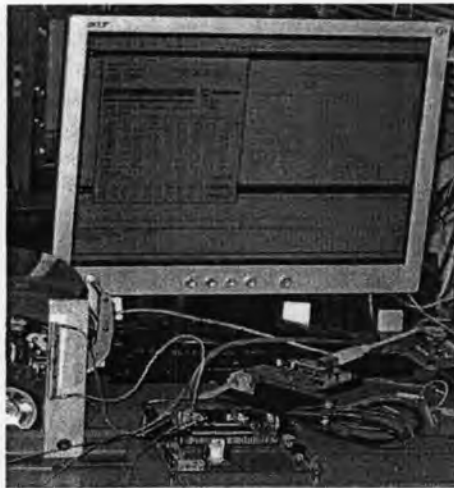
รูปที่ 8.5 คุณลักษณะของตัวต้านทานชนิด B [29]

จากรูปที่ 8.5 จะเห็นว่าคุณลักษณะของตัวต้านทานปรับค่าได้มีช่วงระยะในการเคลื่อนที่ช่วงหัวและท้ายกราฟมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นก่อนทำการทดสอบจึงต้องหาระยะที่เป็นเชิงเส้นของตัวต้านทานปรับค่าได้ที่จะนำไปใช้ทดสอบกับยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน ทำการทดสอบโดยป้อนไฟ 5v ไปที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ แล้วใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30f4011 อ่านค่าระดับแรงดันศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเลื่อนตำแหน่ง โดยแปลงค่าจากสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลด้วยความละเอียด 10 บิต ในการเลื่อนตำแหน่งจะอ้างอิงการเคลื่อนที่เทียบกับเวอร์เนียในการระบุตำแหน่ง ช่วงการเคลื่อนที่ทั้งหมดของตัวต้านทานปรับค่าได้มีระยะ 6cm ในการทดสอบจะเลื่อนระยะทุก 0.2cm แล้วบันทึกค่าโดยค่าที่บันทึกจะเป็นค่าอนาลอกเป็นดิจิตอล(A/D) ต่อการเคลื่อนที่ดังกราฟรูปที่ 8.6



รูปที่ 8.6 ระยะการเคลื่อนที่ต่อค่าสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

รูปที่ 8.6 จะเห็นว่าช่วงที่สามารถใช้งานได้อยู่ในช่วงระหว่าง 1.4-4.8cm หลังจากที่ได้ช่วงเชิงเส้นจากการทดลอง ทำการหาสมการสำหรับแปลงค่าสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลให้อยู่ในรูปแบบของระยะการเคลื่อนที่ในหน่วย cm สำหรับในการทดลองต่อไปในส่วนของการบันทึกข้อมูลในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่นั้นจะใช้ค่าเฉลี่ย เนื่องจากการบันทึกค่าจากไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านข้อมูลผ่านทางพอร์ทอนุกรม ด้วยอัตรารับส่ง 38000 บิต/วินาที ส่งข้อมูลที่ 100Hz ข้อมูลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.3\%$ ดังนั้นการนำค่าไปใช้ในการคำนวณจะใช้ค่าเฉลี่ยจากข้อมูลประมาณ 3000 ข้อมูลแต่ละช่วงเพื่อลดค่าความผิดพลาด



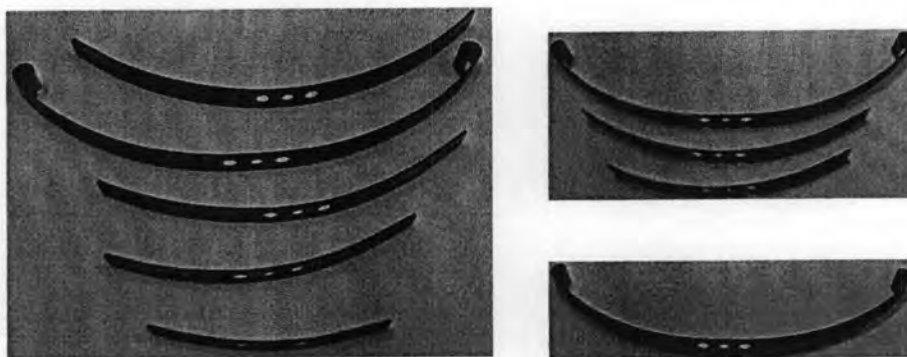
รูปที่ 8.7 การบันทึกค่าจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางพอร์ทอนุกรมของคอมพิวเตอร์

ในการทดลองในส่วนนี้ ได้แบ่งกรณีทดสอบออกไปอีก 16 กรณี โดยเงื่อนไขที่ทดสอบเพื่อต้องการทราบแนวโน้มว่าเมื่อเปลี่ยนโครงสร้างแต่ละส่วนแล้ว จะได้ผลต่อข้อมูลที่จะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใดเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไว้มิติสำหรับเปรียบเทียบกับยานพาหนะจริงต่อไป จากรูปที่ 10 คือแผนที่ใช้ในการทดสอบ



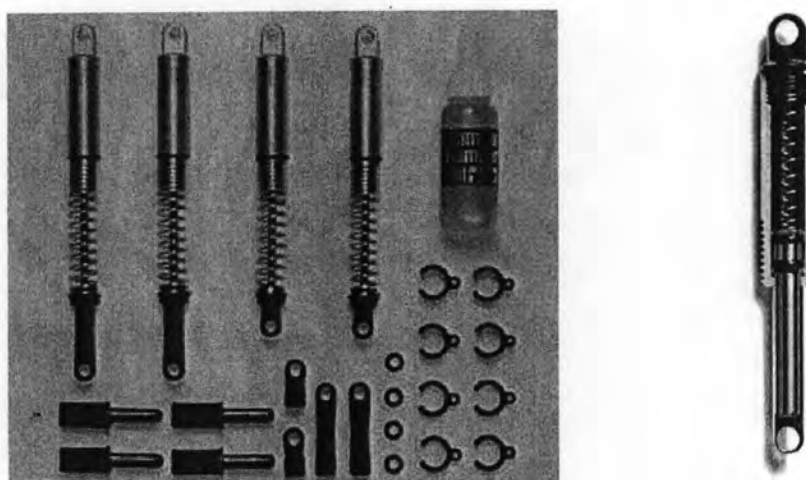
รูปที่ 8.8 แหนบ 5 แผ่นก่อนทำการแยกชิ้น

จากรูป 8.8 เป็นรูปแหวนทั้งหมด 5 แผ่น ในการทดลองได้ทำการแยกออกเป็น 5 3 และ 1 แผ่นตามลำดับ



รูปที่ 8.9 แหนบ 5 3 และ 1 แผ่น ก่อนประกอบทำการทดลอง

ในส่วนช่วงล่างนั้นยังมีการปรับเปลี่ยนระบบรองรับแบบสปริง จากรูป 8.10 จะเห็นว่าชุดสปริงด้านซ้ายใช้น้ำมันช่วยหล่อลื่น และด้านขวานั้นเป็นแบบไม่มีน้ำมัน

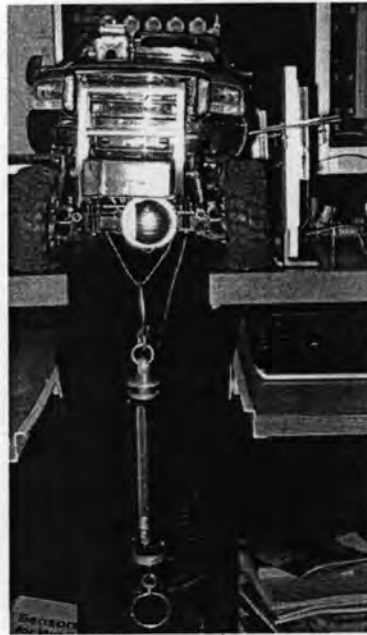


รูปที่ 8.10 สปริงระบบรองรับแบบที่1 (ซ้าย) และแบบที่2 (ขวา)

การทดลองในส่วนของแรงที่เกิดใช้ตราชั่งสปริงแบบขนาด 5kg โดยมีความละเอียด 100g ต่อการดึงระยะตราชั่งสปริง ตำแหน่งที่ทดลองจากรูปที่ 8.12 ใช้ตราชั่งสปริงแขวนไว้ระหว่างล้อหน้าทั้งสอง แล้วดึงลงด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นตามลำดับในการทดลองด้านหน้า ส่วนการทดลองด้านหลังใช้ตราชั่งสปริงดึงระหว่างล้อหลังทั้งสองเช่นเดียวกัน



รูปที่ 8.11 การทดลองหาค่า K ของยานพาหนะ



รูปที่ 8.12 ตำแหน่งที่ตั้งด้วยตราขังสปริง(ซ้าย) ตำแหน่งตัววัดการเคลื่อนที่(ขวา)

ในการทดลองใช้เงื่อนไขทั้งหมด 16 กรณี โดยแต่ละกรณีแบ่งการทดลองออกเป็น การใช้
 แหนบในจำนวนที่แตกต่างกันในการทดลอง รวมถึงการเปลี่ยนระบบรองรับ สำหรับผลการทดลอง
 ทั้งหมดดูได้ที่ภาคผนวก ค จากผลการทดลองตารางที่ 8.2 มีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ความแข็ง
 เกร็งในทิศทางลดลงเมื่อจำนวนแหนบที่น้อยลง ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามลักษณะของสมการของค่า
 สัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็ง และจากตารางที่ 8.2 เมื่อแทนค่าตัวแปรในกรณีที่ใช้น้ำมัน 5 แผ่น มีล้อ
 และสปริงชนิดที่ 1 และกำหนดใช้ความเร็ว $u = 1\text{m/s}$ จะได้ค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\Pi_4 = \frac{K_T L^2}{Mu^2} = \frac{2719.8(\text{kg.m/s}^2/\text{m})0.28^2(\text{m}^2)}{5.04(\text{kg})1^2(\text{m/s})^2} = 42.308 \quad (8.13)$$

$$\Pi_5 = \frac{K_{sr} L^2}{Mu^2} = \frac{2599(\text{kg.m/s}^2/\text{m})0.28^2(\text{m}^2)}{5.04(\text{kg})1^2(\text{m/s})^2} = 40.429 \quad (8.14)$$

$$\Pi_6 = \frac{K_{sf} L^2}{Mu^2} = \frac{3828(\text{kg.m/s}^2/\text{m})0.28^2(\text{m}^2)}{5.04(\text{kg})1^2(\text{m/s})^2} = 59.547 \quad (8.15)$$

ตารางที่ 8.2 สรุปค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็ง

กรณีทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็ง (K)	K (N/m)
001. Front=5 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	3828.00
002. Front=5 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	5280.30
003. Rear =5 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	2599.00
004. Rear =5 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	3389.10
005. Front=3 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	7383.90
006. Front=3 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	7956.90
007. Front=3 Leaf Spring + Wheel + Spring Type2	3553.40
008. Front=3 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type2	6836.20
009. Rear =3 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	3250.60
010. Rear =3 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	7219.40
011. Rear =3 Leaf Spring + Wheel + Spring Type2	3337.50
012. Rear =3 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type2	3606.00
013. Front=1 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	3602.20
014. Front=1 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	3675.10
015. Rear =1 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	1863.60
016. Rear =1 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	3231.70

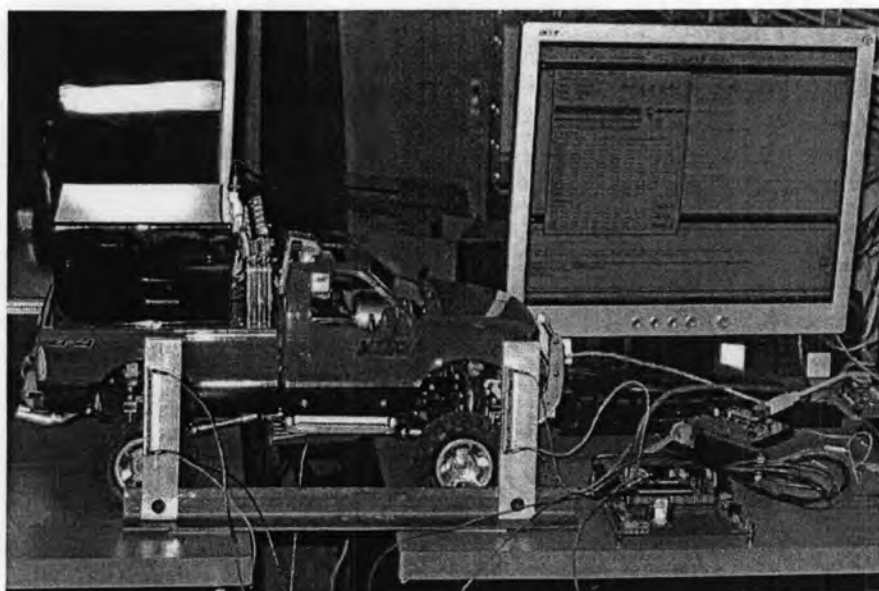
8.6 การหาค่าหมวดที่ 6 ($\Pi_7 = \frac{c_{sf}L}{Mu}$, $\Pi_8 = \frac{c_{sr}L}{Mu}$)

เมื่อกำหนดให้

c_{sf} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อหน้ากระทำกับตัวยานพาหนะ

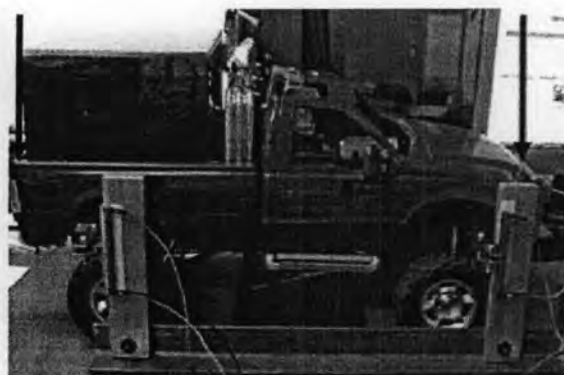
c_{sr} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อหลังกระทำกับตัวยานพาหนะ

ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อนั้น จะต้องเก็บข้อมูลเทียบกับค่าเวลาดังนั้นได้ใช้อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ก่อนหน้านี้ คือ ตัวต้านทานปรับค่าได้เชิงเส้นแบบเลื่อนที่ให้ข้อมูลออกมาเป็นระยะทาง ดังนั้นจึงต้องแก้ไขโปรแกรมจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ให้อ่านข้อมูลออกมาเป็นระยะทางเทียบกับค่าเวลาโดยสร้างฐานเวลาที่ 1ms ในการส่งข้อมูล โดยข้อมูลจะถูกบันทึกผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ผ่านการรับข้อมูลทางพอร์ทอนุกรมของคอมพิวเตอร์บนโปรแกรมไฮเปอร์เทอร์มินอล



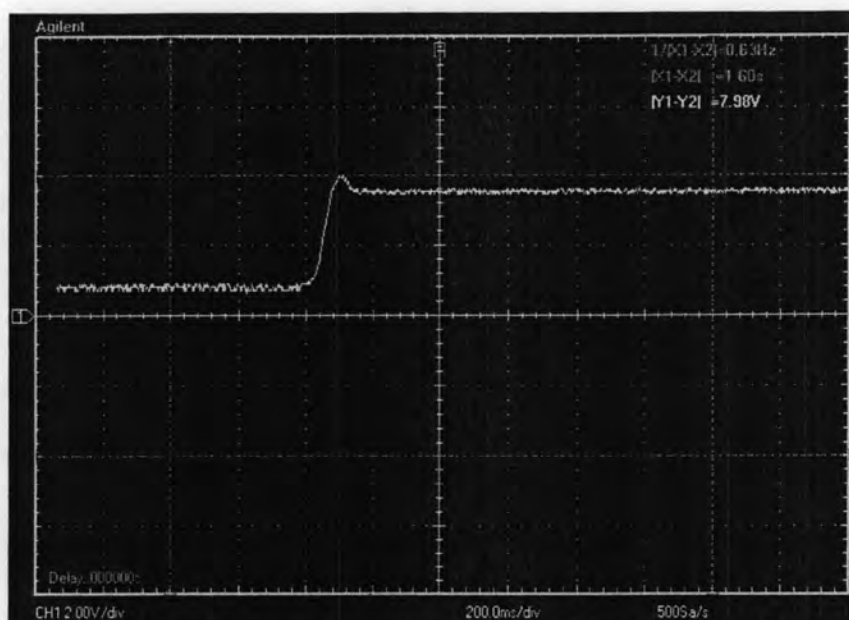
รูปที่ 8.13 การทดลองหาค่า c ผ่านทางไมโครคอนโทรลเลอร์

การทดลองจะป้อนแรงกดไปยังบริเวณด้านหน้าตามรูปที่ 8.14 สำหรับการหาค่าด้านหน้า และป้อนแรงที่ด้านหลังสำหรับการหาค่าด้านหลัง สำหรับแรงที่กดป้อนเข้าไปเป็นแบบฟังก์ชันหนึ่งหน่วย



รูปที่ 8.14 การทดสอบหาค่า c กรณีไม่มีล้อ(ซ้าย) และกรณีมีล้อ(ขวา)

ผลที่ได้จากการทดลองผ่านคอมพิวเตอร์ เมื่อนำมาวิเคราะห์ปรากฏว่าข้อมูลมีการขาดหายไม่สมบูรณ์ เนื่องจากว่าการรับข้อมูลบนโปรแกรมไฮเปอร์เทอร์มินอลของระบบปฏิบัติการ WindowXP ไม่สามารถรับข้อมูลด้วยอัตราส่ง 100 ms จากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ส่งไปให้ ดังนั้นจึงนำออสซิลโลสโคปของ Agilent Technologies รุ่น DSO3062A ที่สามารถบันทึกผลที่เกิดขึ้นตามการตอบสนองของระบบที่ต้องการได้ ผ่านโปรแกรมบันทึกค่าของอุปกรณ์เอง การทดลองทำโดยนำตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนต่อเข้ากับสายวัดออสซิลโลสโคป เมื่อทำการกดด้วยแรงหนึ่งหน่วย แล้วบันทึกผลผ่านโปรแกรมจะได้ข้อมูลดังรูปที่ 8.15



รูปที่ 8.15 ผลการทดสอบหาค่า c ผ่านทางออสซิลโลสโคป

จากรูปที่ 8.15 โดยกำหนดให้

แกน y คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ามีความละเอียด 2.00V/div

แกน x คือ เวลาที่มีความละเอียด 200.0ms/div

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงมีหน่วยเป็นระยะต่อเวลา ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงหน่วยจากค่าศักย์ไฟฟ้าไปเป็นระยะทางก่อน หลังจากนั้นจึงจะสามารถนำคำนวณหาค่าตัวแปรได้

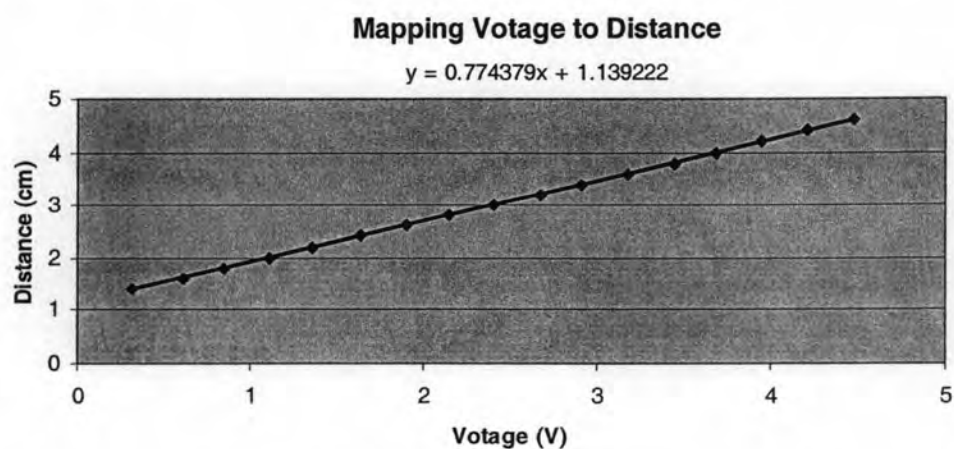
8.6.1 วิธีแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นระยะทางการเคลื่อนที่

การแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นระยะทางการเคลื่อนที่นั้น ทำโดยนำความต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนเชิงเส้นที่ผ่านการแปลงข้อมูลในหัวข้อการแปลงค่าความต้านทานเป็นระยะทาง ทำโดยเลื่อนตัวต้านทานที่ละ 0.2cm ในช่วงที่เป็นเชิงเส้นที่หาได้ก่อนหน้านี้ แล้วทำการบันทึกระยะที่เกิดขึ้นผ่านทางพอร์ทอนุกรมของคอมพิวเตอร์ (ใช้ค่าเฉลี่ยประมาณ 2000 ข้อมูล) พร้อมกับบันทึกค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปจากโปรแกรมของออสซิลโลสโคป (ใช้ค่าเฉลี่ยจาก 1200 ข้อมูล) โดยข้อมูลที่ได้จะหาค่าเฉลี่ยแต่ละช่วงเพื่อนำมาหาสมการความสัมพันธ์ ข้อมูลที่ได้เป็นดังตารางที่ 8.3

ตารางที่ 8.3 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ต่อค่าศักย์ไฟฟ้า

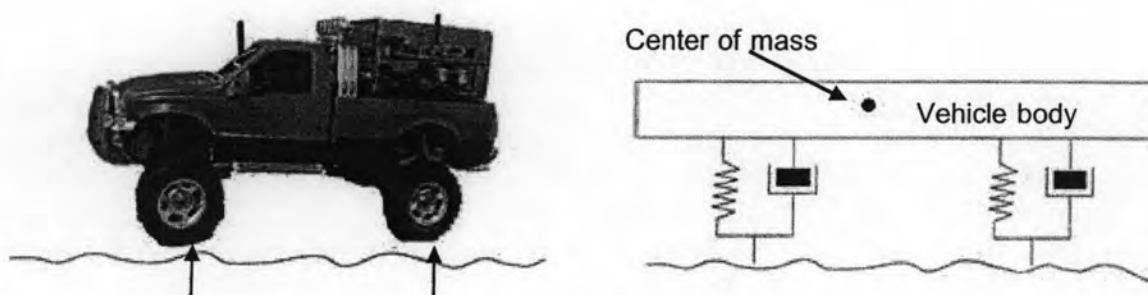
Distance (cm)	Voltage (V)
1.400611518	0.324066667
1.608232359	0.62
1.799923077	0.854933333
2.00184707	1.113733333
2.195406602	1.347066667
2.405184926	1.6256
2.603746256	1.8966
2.79412332	2.1472
2.999187265	2.412333333
3.206435847	2.677466667
3.397738613	2.908533333
3.596779163	3.1792
3.80255634	3.45302299
3.99982667	3.687889598
4.20233389	3.953737874
4.404615385	4.209061246
4.601551215	4.465313531

นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 8.3 ไปพล็อตกราฟเพื่อหาสมการ ในการแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า เป็นระยะทาง ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 8.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าต่อระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวต้านทาน

จากรูปที่ 8.16 จะได้สมการความสัมพันธ์ระยะทางการเคลื่อนที่เมื่อแทนค่าศักย์ไฟฟ้า หลังจากนั้นนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการแปลงหน่วยของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ สำหรับการคำนวณระบบสมการช่วงล่างนั้นจากรูปที่ 8.17 พิจารณาให้เป็นระบบสมการอนุพันธ์อันดับสอง ในการทดลองและคำนวณจะมีกรณีที่มีล้อเข้ามาพิจารณาในระบบ กับกรณีไม่มีล้อเข้ามาพิจารณา เพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการทดลอง



รูปที่ 8.17 รูปแบบจำลองสมการอนุพันธ์อันดับ 2 ของยานพาหนะ

8.6.2 ระบบสมการอนุพันธ์อันดับสอง (Second-Order Model)

จากรูปที่ 8.17 เมื่อพิจารณารูปแบบระบบสมการอนุพันธ์อันดับสองที่มีผลของค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็ง (K) และ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (c) จะได้ระบบสมการอนุพันธ์ดังนี้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Kx = F(t) \quad (8.16)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = G(s) = \frac{1}{K} \cdot \frac{\frac{K}{m}}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{K}{m}} \quad (8.17)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = G(s) = \frac{1}{K} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (8.18)$$

เมื่อกำหนดให้

$$2\xi\omega_n = \frac{c}{m} \quad \text{และ} \quad \omega_n^2 = \frac{K}{m}$$

ดังนั้นจะได้

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \text{และ} \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{mK}} \quad (8.19)$$

ในการทดลอง ทำการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันหนึ่งหน่วย โดยการกดแล้วปล่อย
จะได้ว่า $R(s) = \frac{1}{s}$ จากสมการจะได้

$$X(s) = \frac{1}{K} \cdot \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} * \frac{1}{s} \quad (8.20)$$

สามารถเขียนพจน์ที่อยู่ในวงเล็บของสมการ (8.20) ได้ดังนี้คือ

$$(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2) = (s + \xi\omega_n + \omega\sqrt{\xi^2 - 1}) + (s + \xi\omega_n - \omega\sqrt{\xi^2 - 1}) \quad (8.21)$$

เมื่อกำหนดให้ $\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$ = Damped natural frequency แทนค่าในสมการได้

$$(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2) = (s + \xi\omega_n + j\omega_d) + (s + \xi\omega_n - j\omega_d) \quad (8.22)$$

แบ่งพิจารณา 3 กรณีคือ

1. กรณี $0 < \xi < 1$ เรียกว่ากรณีหน่วงต่ำกว่าวิกฤต (Under damped) สามารถหาผลตอบสนองของระบบเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันหนึ่งหน่วย จากสมการดังนี้

$$X(s) = \frac{1}{K} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} * \frac{1}{s} \quad (8.23)$$

เมื่อทำการแยกส่วนด้วยวิธีเศษส่วนย่อย จะได้

$$X(s) = \frac{1}{K} \left(\frac{1}{s} - \frac{s + 2\xi\omega_n}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \right) \quad (8.24)$$

$$X(s) = \frac{1}{K} \left(\frac{1}{s} - \frac{s + 2\xi\omega_n}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2} - \frac{\xi\omega_n}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2} \right) \quad (8.25)$$

จากสมการสามารถหาผลตอบสนอง $x(t)$ ได้จากการหาผลแปลงกลับลาปลาซ ดังนี้
เมื่อกำหนดให้

$$\ell^{-1} \left\{ \frac{s + \zeta\omega}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} \right\} = e^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_d t) \quad (8.26)$$

$$\ell^{-1} \left\{ \frac{\omega_d}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} \right\} = e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t) \quad (8.27)$$

แทนค่าจากสมการ 8.26-8.72 ลงในสมการ 8.28 จะได้

$$x(t) = \ell^{-1} \{ X(s) \} \quad (8.28)$$

$$x(t) = \frac{1}{K} \left\{ 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_d t) + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t) \right\} \quad (8.29)$$

$$x(t) = \frac{1}{K} \left\{ 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}) \right\} \quad (8.30)$$

2.กรณีที่ $\zeta = 1$ เรียกว่ากรณีหน่วงวิกฤต (Critical damp) สามารถหาผลตอบสนองได้จากสมการ เมื่อแทน $\zeta = 1$ จะได้สมการดังนี้

$$X(s) = \frac{1}{K} \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2} * \frac{1}{s} \quad (8.31)$$

เมื่อแปลงกลับลาปลาซ (Inverse Laplace Transform) แทนค่าจะได้

$$x(t) = \ell^{-1} \{ X(s) \} \quad (8.32)$$

$$x(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad (8.33)$$

3. กรณีที่ $\xi > 1$ เรียกว่ากรณีหน่วงสูงกว่าวิกฤต (Over damped) สามารถหาคำตอบสนองได้จากสมการ เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันหนึ่งหน่วย จะได้สมการดังนี้

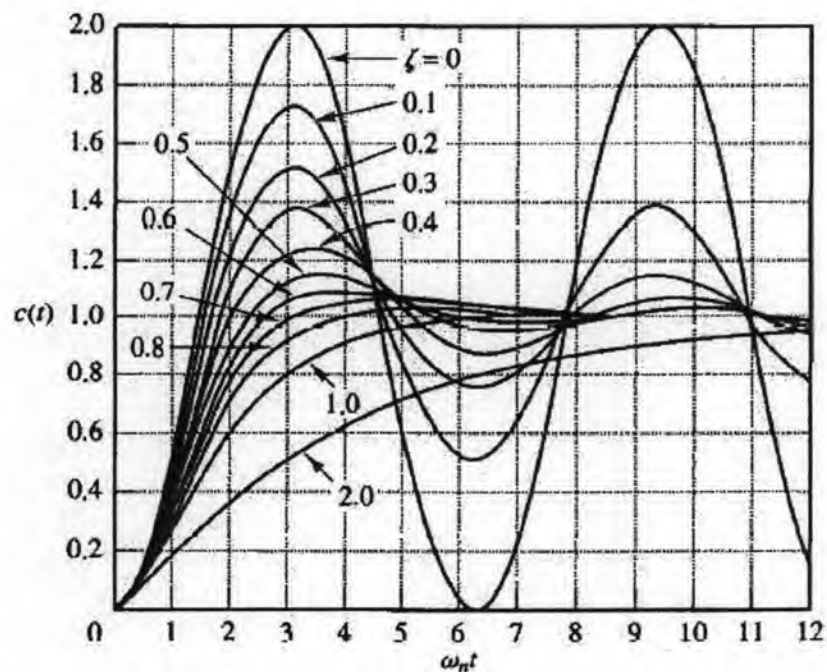
$$X(s) = \frac{1}{K} \frac{\omega_n^2}{(s + \xi\omega_n + \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1})(s + \xi\omega_n - \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1})} * \frac{1}{s} \quad (8.34)$$

เมื่อกำหนดให้

$$s_1 = \xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \quad \text{และ} \quad s_2 = \xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (8.35)$$

จะได้สมการ

$$x(t) = \frac{1}{K} \left[1 + \frac{1}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left(\frac{e^{-s_1\omega_n t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2\omega_n t}}{s_2} \right) \right] \quad (8.36)$$



รูปที่ 8.18 รูปแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับสอง

ดังนั้นจากระบบสมการทำให้สามารถคาดเดาผลที่เกิดขึ้น จากการประมาณค่า ξ แทนลงในสมการระบบได้ โดยสมการที่ใช้ในการพิจารณาระบบรองรับของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนเป็นดังนี้

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (8.37)$$

โดยที่

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \text{และ} \quad c = 2\xi\sqrt{mK} \quad (8.38)$$

8.6.3 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง

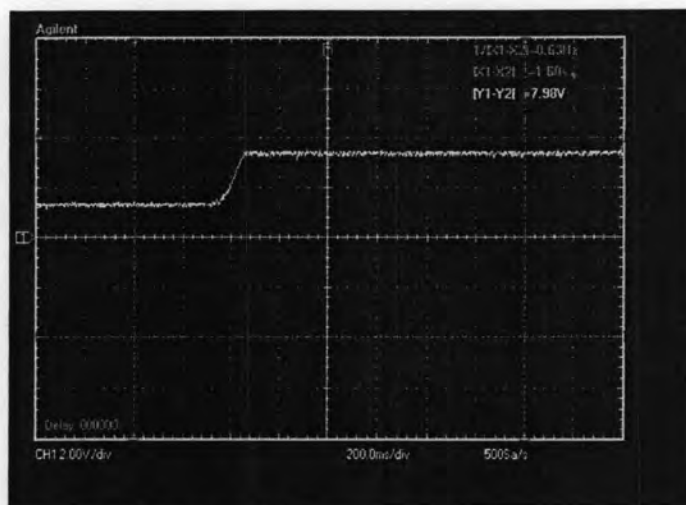
การทดลองแบ่งออกทั้งหมด 14 กรณี โดยมีเงื่อนไขทดสอบเหมือนดังกรณีทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแกร่ง (K) ในการคำนวณจะนำค่า K ที่หาได้แต่ละกรณีก่อนหน้านี้ เข้ามาคำนวณหาค่า c แต่ละกรณีเช่นกัน โดยขั้นตอนมีดังนี้

1. ทดลองป้อนแรงหนึ่งหน่วยตามเงื่อนไขที่กำหนด
2. นำข้อมูลผลตอบสนองที่ได้จากค่าศักย์ไฟฟ้าแปลงเป็นหน่วยการเคลื่อนที่
3. นำข้อมูลที่ได้จากขั้นที่ 2 ไปกรองความถี่ต่ำผ่าน 80 Hz โดยโปรแกรม Matlab แล้วพล็อตผลตอบสนองที่เกิดขึ้น
4. เปรียบเทียบผลตอบสนองจากการทดลองกับผลตอบสนองของระบบสมการอนุพันธ์อันดับสอง โดยแทนค่า K แล้วทำการสุ่มค่า ξ เพื่อดูผลตอบสนองว่ามีแนวโน้มเดียวกันหรือไม่
5. ทำการสุ่มค่า ξ จนได้ผลตอบสนองเดียวกันระหว่างการทดลองและการคำนวณ
6. นำค่า ξ ที่ได้ ไปแทนค่าในสมการ 8.38 เพื่อหาค่า c ของการทดลอง

การทดลองแต่ละกรณีมีดังนี้

8.6.3.1 กรณีล้อยหน้า แหนบ 5 แผ่น มีล้อ สปริงชนิดที่ 1

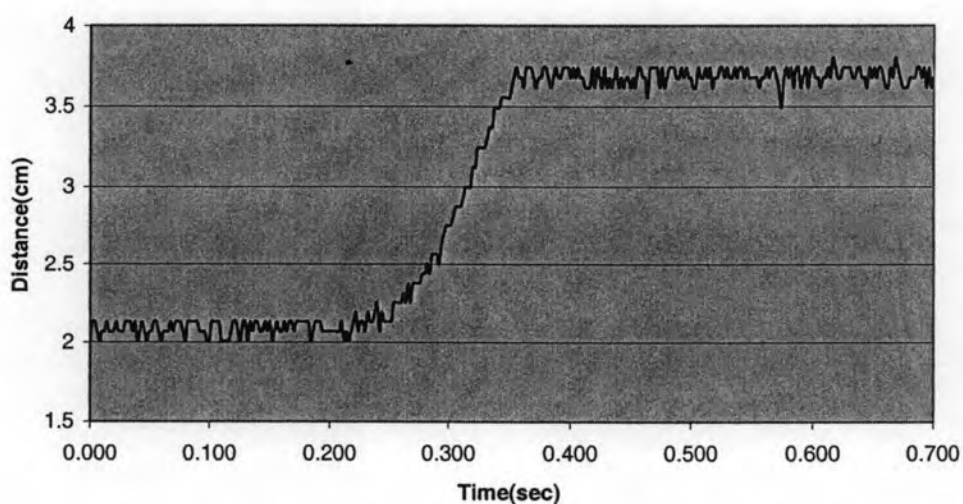
ผลจากการทดลองเมื่อป้อนแรงกหนดขนาดหนึ่งหน่วยที่บริเวณด้านหน้า เมื่อทำการบันทึกผลจากออสซิลโลสโคป ผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ ทางสายสัญญาณของบัตรการสื่อสารแบบอนุกรม (USB) จะได้ผลดังรูปที่ 8.19



รูปที่ 8.19 ผลที่ได้จากออสซิลโลสโคปในการทดลองที่ 1

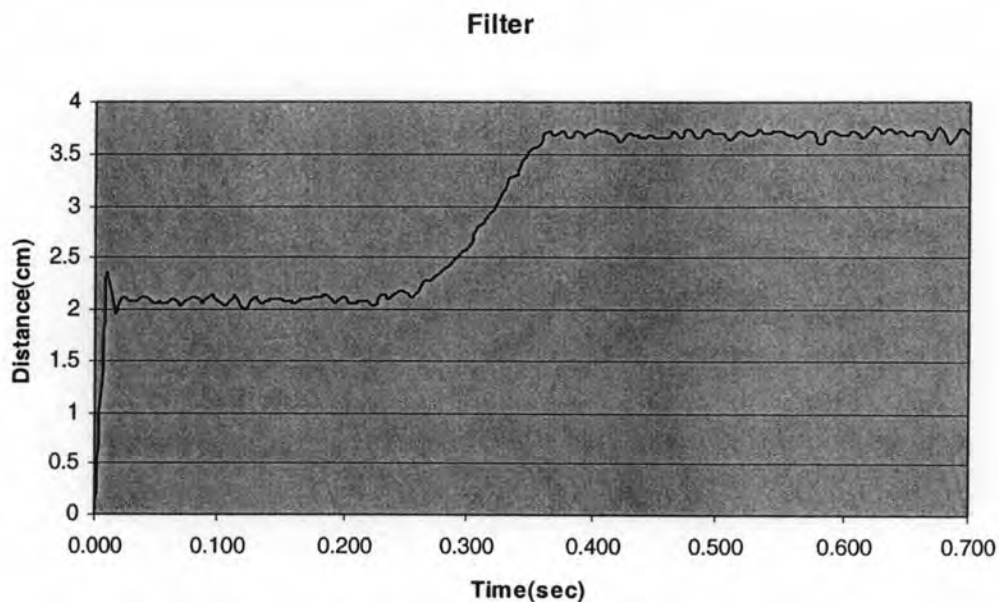
เมื่อได้ผลตอบสนองจากการทดลองบันทึกค่าผ่านออสซิลโลสโคป แล้วนำค่าที่ได้ไปแปลงจากค่าศักย์ไฟฟ้าต่อเวลาเป็นระยะเวลาเคลื่อนที่ต่อเวลา เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงหน่วยแล้วจะได้ผลตอบสนองของระบบดังรูปที่ 8.20

Front=5 Leaf Spring +Wheel + Spring Type1



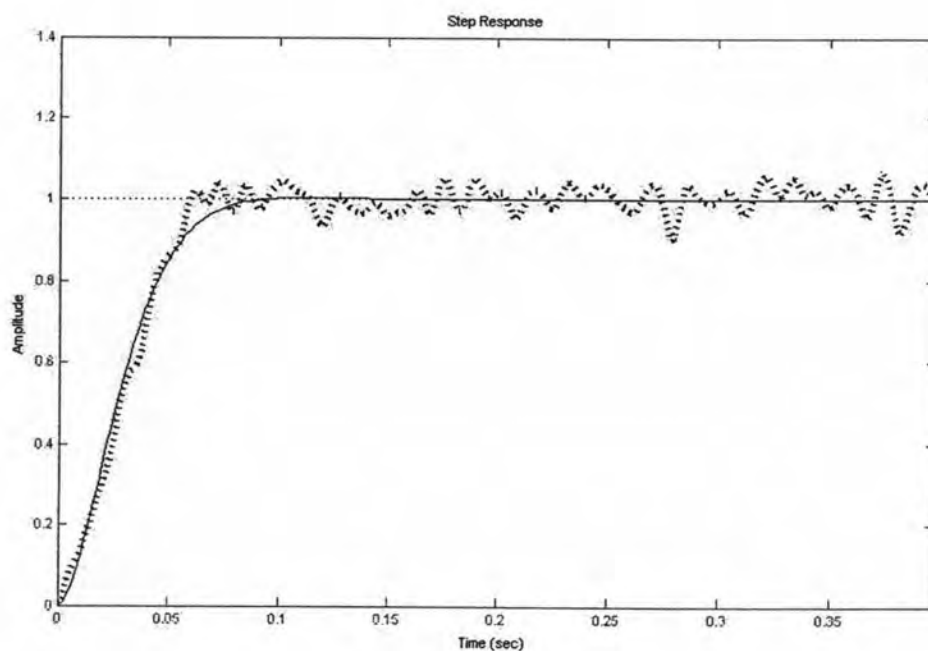
รูปที่ 8.20 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนเป็นหน่วยการเคลื่อนที่

จากข้อมูลที่ได้เมื่อทำการเปลี่ยนหน่วยแล้ว นำข้อมูลที่ได้ไปกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อจะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลตอบสนองจากการคำนวณระบบสมการอนุพันธ์อันดับสอง



รูปที่ 8.21 ผลการทดลองเมื่อผ่านการกรองความถี่ต่ำผ่าน

หลังจากได้ชุดข้อมูลที่ได้จากการกรองความถี่ต่ำผ่านแล้ว นำข้อมูลการตอบสนองจากการทดลองเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ ขั้นตอนนี้ทำผ่านโปรแกรมแมทแล็บ โดยทำการสุ่มค่า ξ โดยดูแนวโน้มการแทนค่าจากรูปที่ 8.18 แล้วสุ่มค่าจนกว่าจะได้ผลตอบสนองของระบบที่คล้ายกัน



รูปที่ 8.22 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที 1

จากรูปที่ 8.22 กำหนดให้

กราฟเส้นประ คือ ผลตอบสนองจากการทดลอง

กราฟเส้นทึบ คือ ผลตอบสนองของระบบจากการคำนวณ

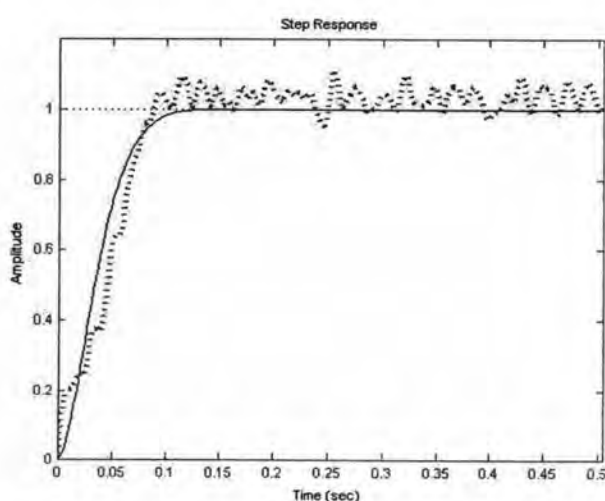
จากการสุ่มค่า ζ ในกรณีที่ 1 จะได้ ζ ค่าเท่ากับ 0.88 โดยนำค่าที่ได้ไปแทนลงในสมการ (8.38) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยังนี้

$$c = 114.57 \text{ N.s/m}$$

สำหรับการทดลองกรณีที่เหลืออีก 13 กรณีมีขั้นตอน และวิธีทำเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงจะแสดงกราฟการทดลองเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยจะแสดงค่ากราฟในกรณีที่ทำการเปรียบเทียบ ผลตอบสนองของการทดลองกับการคำนวณผลตอบสนองของระบบเมื่อทำการสุ่มค่า ζ

8.6.3.2 กรณีล้อยหน้า แหนบ 5 แผ่น ไม่มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

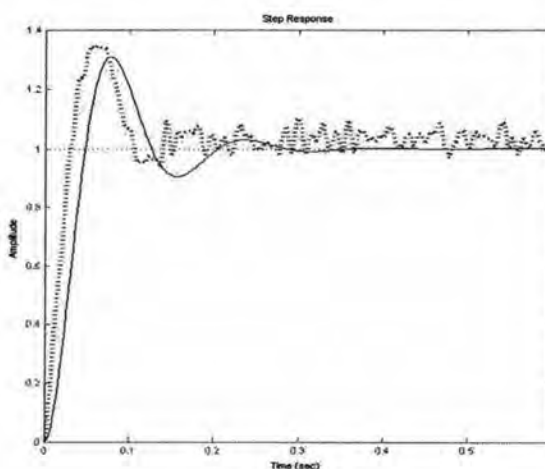
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีที่ 2 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ζ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลอง และการคำนวณดังรูปที่ 8.23 โดยแทนค่า $\zeta = 0.9$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 96.5494 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.23 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 2

8.6.3.3 กรณีล้อยหลัง แหนบ 5 แผ่น มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

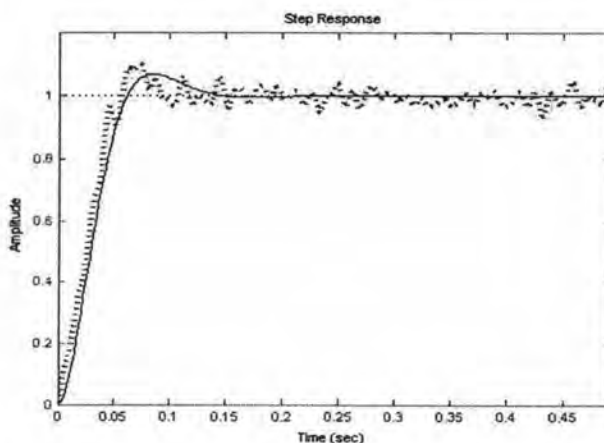
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ที่ 3 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.24 โดยแทนค่า $\xi = 0.35$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 42.57 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.24 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณในกรณีนี้ที่ 3

8.6.3.4 กรณีล้อยหลัง แหนบ 5 แผ่น ไม่มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

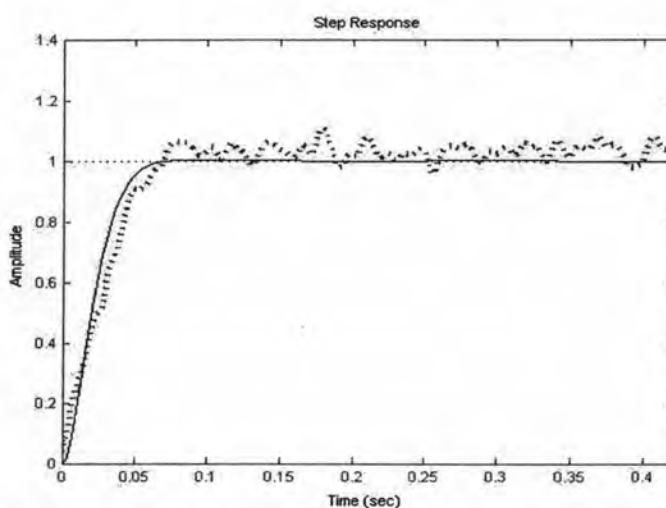
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ที่ 4 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.25 โดยแทนค่า $\xi = 0.65$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 90.2793 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.25 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณในกรณีนี้ที่ 4

8.6.3.5 กรณีล้อยหน้า แหนบ 3 แผ่น มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

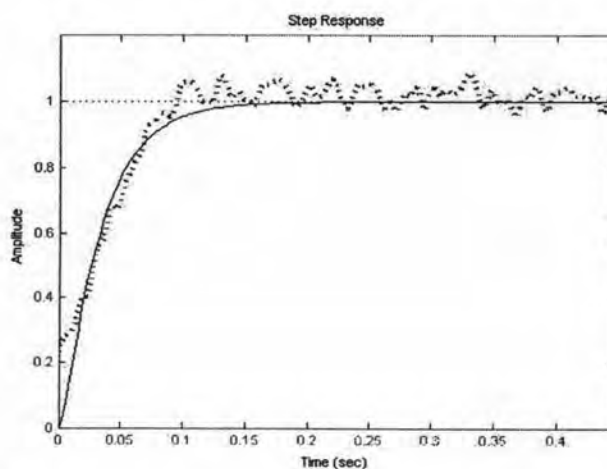
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ที่ 5 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.26 โดยแทนค่า $\xi = 0.9$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 162.7381 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.26 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณในกรณีนี้ที่ 5

8.6.3.6 กรณีล้อยหน้า แหนบ 3 แผ่น ไม่มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

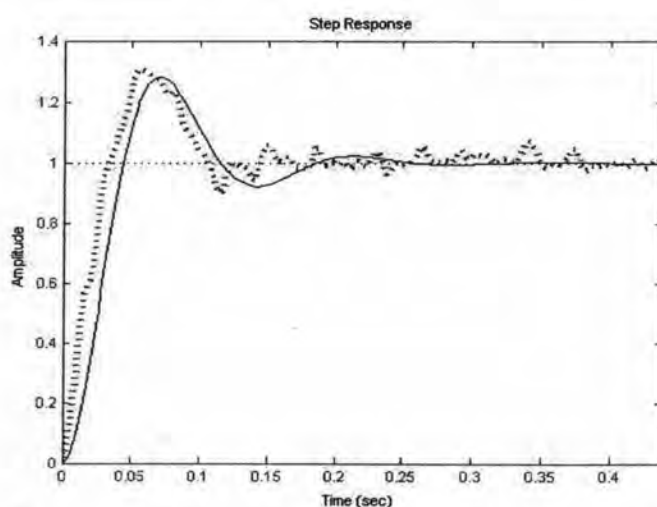
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ที่ 6 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.27 โดยแทนค่า $\xi = 1.5$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 281.5574 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.27 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณในกรณีนี้ที่ 6

8.6.3.7 กรณีล้อยหลัง แหนบ 3 แผ่น มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

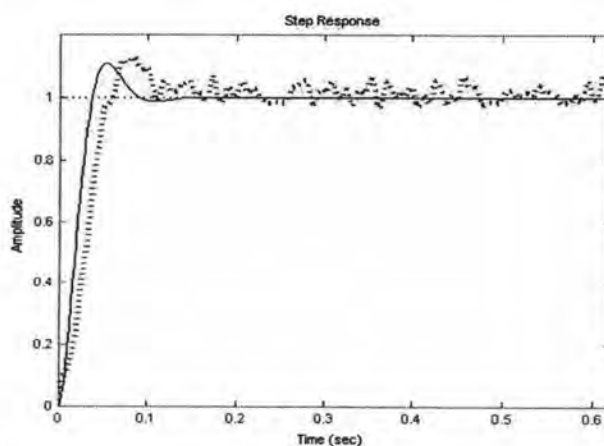
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ที่ 7 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.28 โดยแทนค่า $\xi = 0.375$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 51.0088 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.28 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณในกรณีนี้ 7

8.6.3.8 กรณีล้อยหลัง แหนบ 3 แผ่น ไม่มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

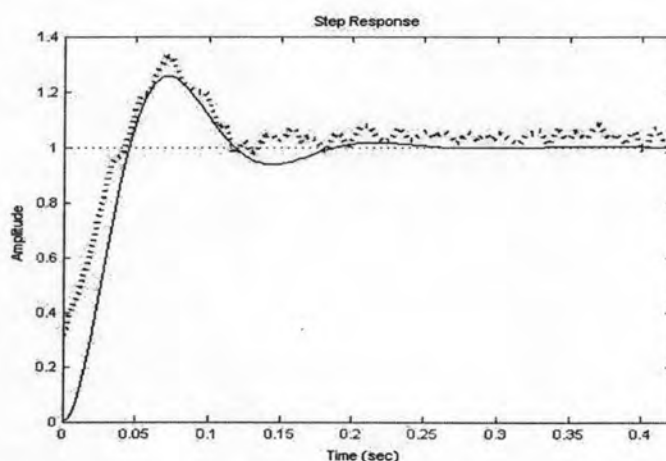
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ที่ 8 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.29 โดยแทนค่า $\xi = 0.575$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 116.5604 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.29 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณในกรณีนี้ 8

8.6.3.9 กรณีล้อยหลัง แหนบ 3 แผ่น มีล้อย สปริงชนิดที่ 2

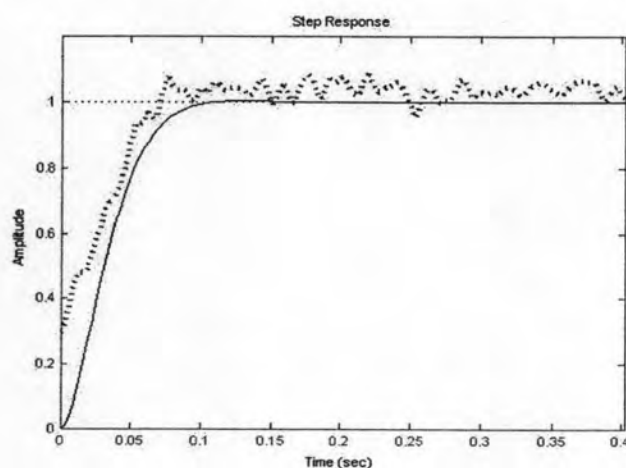
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ที่ 9 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.30 โดยแทนค่า $\xi = 0.4$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 54.251 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.30 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีนี้ที่ 9

8.6.3.10 กรณีล้อยหลัง แหนบ 3 แผ่น ไม่มีล้อย สปริงชนิดที่ 2

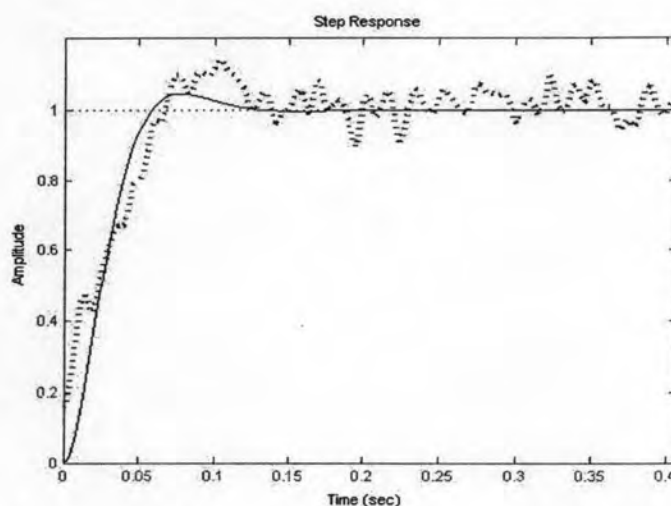
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ที่ 10 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย, ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.31 โดยแทนค่า $\xi = 0.875$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 125.3584 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.31 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีนี้ที่ 10

8.6.3.11 กรณีล้อยหน้า แหนบ 1 แผ่น มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

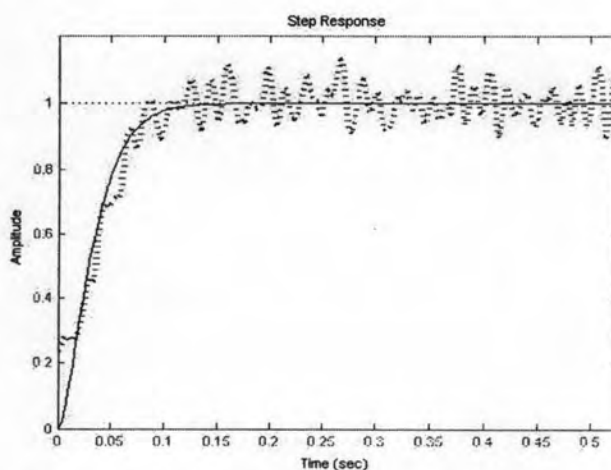
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ 11 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.32 โดยแทนค่า $\xi = 0.7$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 88.4044 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.32 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีนี้ 11

8.6.3.12 กรณีล้อยหน้า แหนบ 1 แผ่น ไม่มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

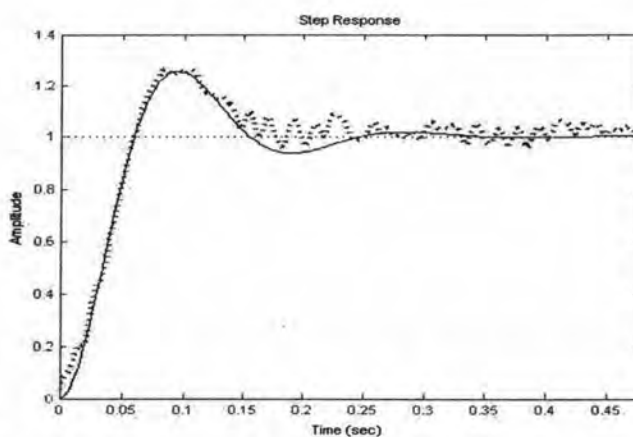
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ 12 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.33 โดยแทนค่า $\xi = 1$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 127.567 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.33 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีนี้ 12

8.6.3.13 กรณีล้อยหลัง แหนบ 1 แผ่น มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

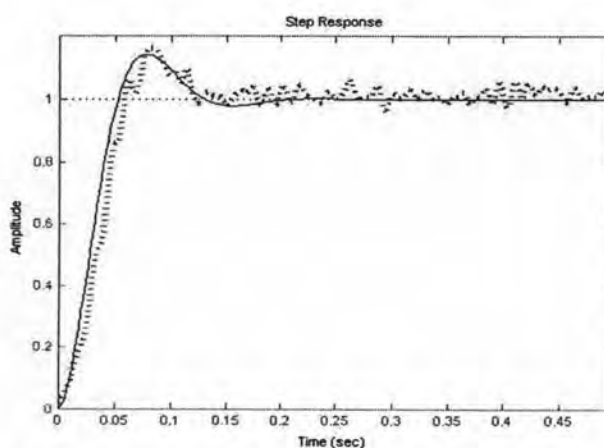
เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ที่ 13 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.34 โดยแทนค่า $\xi = 0.4$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 41.1973 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.34 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณในกรณีนี้ที่ 13

8.6.3.14 กรณีล้อยหน้า แหนบ 5 แผ่น ไม่มีล้อย สปริงชนิดที่ 1

เมื่อนำผลตอบสนองจากการทดลองกรณีนี้ที่ 14 ผ่านขั้นตอนการแปลงหน่วย ขั้นตอนการกรองความถี่ต่ำผ่าน และการสุ่มค่า ξ จะได้ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณดังรูปที่ 8.35 โดยแทนค่า $\xi = 0.525$ ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อยมีค่าเท่ากับ $c = 71.2045 \text{ N.s/m}$



รูปที่ 8.35 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณในกรณีนี้ที่ 14

สรุปค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็งและค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง จากการทดลองเมื่อนำมาสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 8.4 สรุปค่าสัมประสิทธิ์ความความแข็งเกร็งและความหน่วง

สรุปค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็ง (k)	K (N/m)	c (N.s/m)
001. Front=5 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	3828.00	114.57
002. Front=5 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	5280.30	96.5494
003. Rear =5 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	2599.00	42.57
004. Rear =5 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	3389.10	90.2793
005. Front=3 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	7383.90	162.7381
006. Front=3 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	7956.90	281.5574
007. Front=3 Leaf Spring + Wheel + Spring Type2	3553.40	-
008. Front=3 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type2	6836.20	-
009. Rear =3 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	3250.60	51.0088
010. Rear =3 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	7219.40	116.5604
011. Rear =3 Leaf Spring + Wheel + Spring Type2	3337.50	54.251
012. Rear =3 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type2	3606.00	125.3584
013. Front=1 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	3602.20	88.4044
014. Front=1 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	3675.10	127.567
015. Rear =1 Leaf Spring + Wheel + Spring Type1	1863.60	41.1973
016. Rear =1 Leaf Spring + No Wheel + Spring Type1	3231.70	71.2045

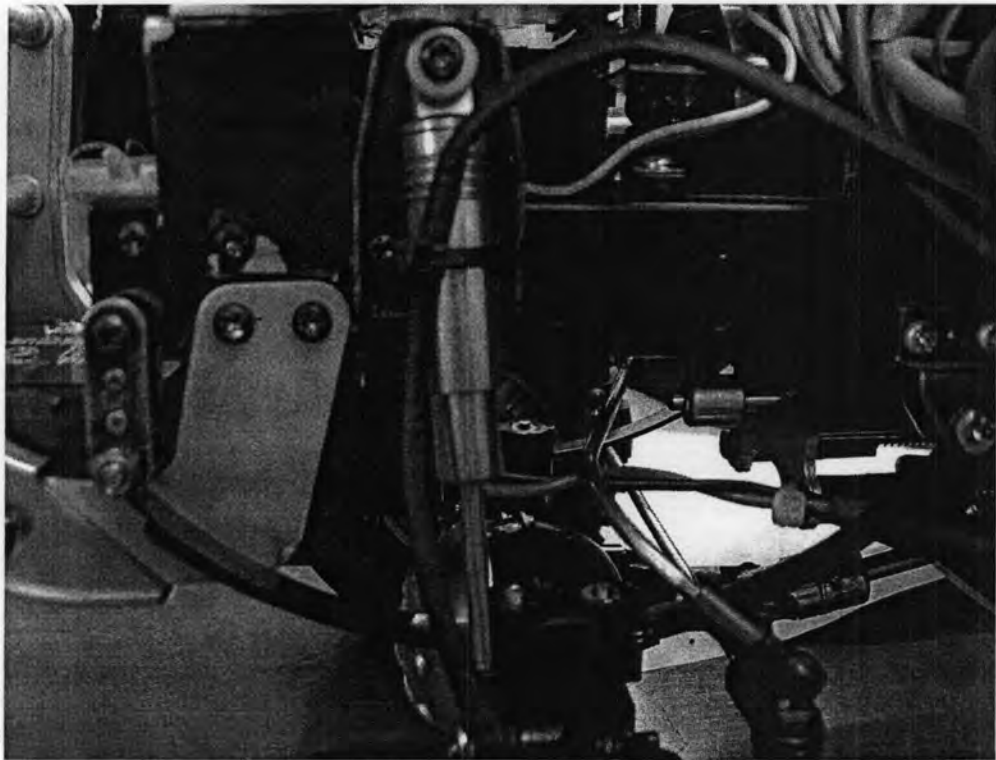
เมื่อแทนค่าตัวแปรในกรณีที่ใช้หนาม 5 แผ่น มีล้อและสปริงชนิดที่ 1 และกำหนดใช้ความเร็ว $u = 1\text{m/s}$ จะได้ค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\Pi_7 = \frac{c_{sf}L}{Mu} = \frac{114.57(\text{kg/s})0.280(\text{m})}{5.04(\text{kg})1(\text{m/s})} = 6.365 \quad (3.39)$$

$$\Pi_8 = \frac{c_{sr}L}{Mu} = \frac{42.57(\text{kg/s})0.280(\text{m})}{5.04(\text{kg})1(\text{m/s})} = 2.365 \quad (3.40)$$

8.7 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของความถี่ระบบช่วงล่าง

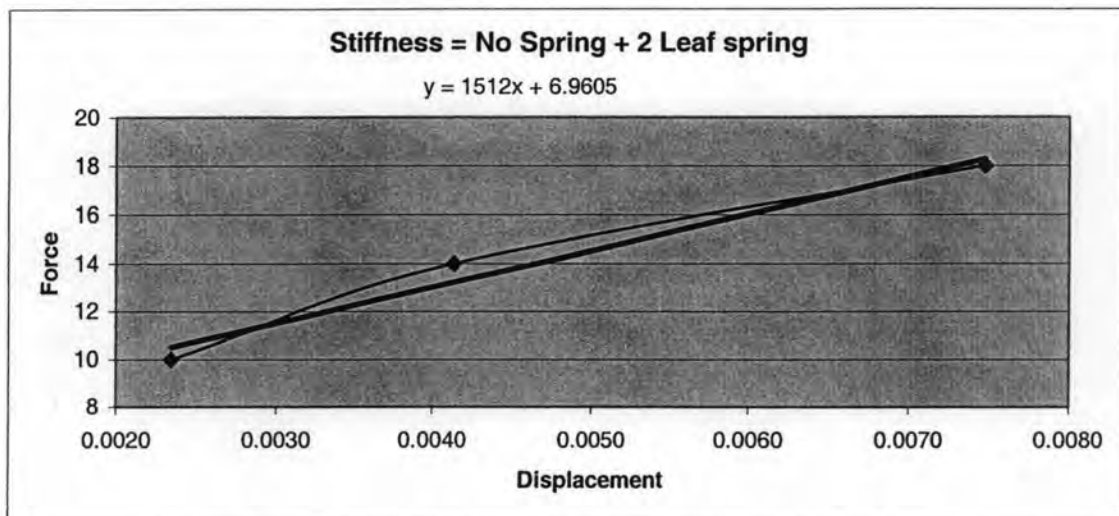
จากการทดลอง เมื่อได้ข้อมูลจากยานพาหนะขนาดจริงแบบย่อส่วน ในเรื่องของค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแกร่งและค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง เมื่อพิจารณาในช่วงค่าความถี่ของระบบช่วงล่างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนมีค่าตั้งแต่ประมาณ 12-18 Hz แต่จากข้อมูลยานพาหนะจริง [26] ถ้าเป็นยานพาหนะแบบแก่งจะอยู่ในช่วง 1-1.5 Hz ยานพาหนะแก่งแบบสปอร์ต 2-2.5 Hz ยานพาหนะแบบกระบะ 2-3Hz ดังนั้น เพื่อให้ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน มีคุณลักษณะพฤติกรรมช่วงล่างของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนมีค่าใกล้เคียงกับยานพาหนะจริงแล้วต้องปรับแต่งให้มีค่าความถี่ของระบบช่วงล่างที่ใกล้เคียงกัน โดยจากการวิเคราะห์ข้อมูลทำให้ทราบว่า ในการลดค่า K จะช่วยให้ค่าความถี่ของระบบช่วงล่างลดลง ดังการทดลองจะทำการลดค่า K โดยการนำเอาสปริงออก และใช้จำนวนแทน 2 แผ่น โดยเงื่อนไขนี้ เป็นเงื่อนไขที่ทำให้ค่า K ของระบบน้อยสุดที่ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนยังสามารถคงสมรรถนะช่วงล่างที่ใช้งานได้อยู่



รูปที่ 8.36 การทดลองที่ใช้แทน 2 แผ่น และ ไม่มีสปริง

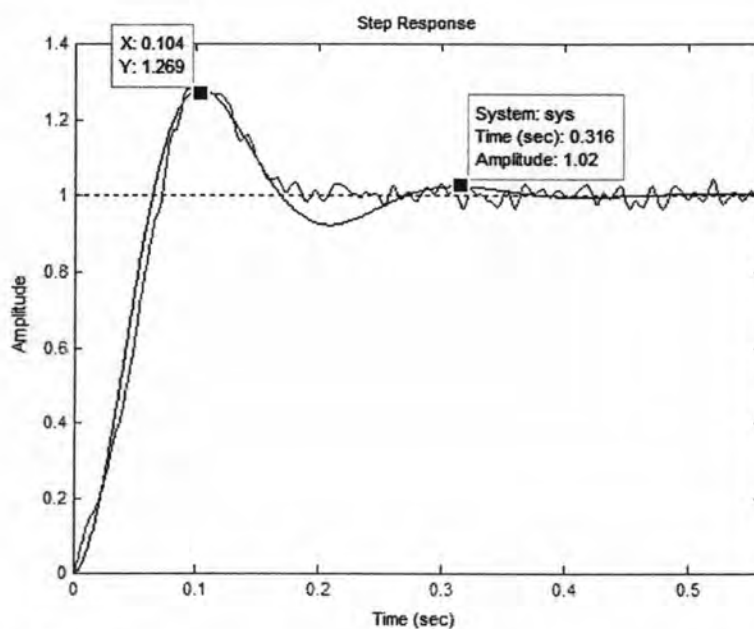
8.8 การทดสอบหลังปรับแต่งโดยใช้กรณีไม่มีสปริง และแหนบ 2 แผ่น

แหนบที่ใช้ทั้ง 2 ชั้นนี้จะเลือกใช้ตัวใหญ่ทั้งหมด เพื่อต้องการให้ระบบมีความนุ่มลง (ลดค่า K) อาศัยเงื่อนไขที่ต้องการลดค่า K ให้มากที่สุด โดยเมื่อทำการลดค่า K ของระบบแล้วช่วงล่างของยานพาหนะจริงแบบย่อบางส่วนจะต้องยังอยู่ในช่วงที่ทำงานได้



รูปที่ 8.37 ค่า K ผลทดลองที่ใช้แหนบ 2 แผ่น และ ไม่มีสปริง

เมื่อนำข้อมูลที่ได้ ทำการหาค่า K จะได้ $K=1512$ ในส่วนการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง นำผลที่ได้ทำการกรองความถี่ต่ำผ่าน แล้วทำการสุ่มค่า ξ โดยทำเหมือนขั้นตอนก่อนหน้า



รูปที่ 8.38 ค่า ξ ของผลการทดลองที่ใช้แหนบ 2 แผ่น และ ไม่มีสปริง

จากการทดลอง เมื่อนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์จะได้ค่า
ความถี่ระบบช่วงล่าง = 4.7 Hz และ $c = 34.7888 \text{ N.s/m}$

ผลจากการทดสอบปรับระบบช่วงล่างของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนให้มีความสมมูลกับช่วง
ข้อมูลยานพาหนะจริง จะเห็นได้ว่าค่าความถี่ของระบบช่วงล่างลดลงจากช่วง 12-18 Hz มาอยู่ที่
4.7 Hz ซึ่งมีค่าใกล้เคียงมากขึ้นกับระบบช่วงล่างของยานพาหนะจริง