

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสั่นสะเทือนของระบบส่งกำลัง  
Experimental Study on Vibration Reduction of a Rotating Shaft System



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... 50160  
วัน,เดือน,ปี... 2 1 เม.ย. 2547

.b.....
.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสั่นสะเทือนของระบบส่งกำลัง  
Experimental Study on Vibration Reduction of a Rotating Shaft System

โดย

ปรัชญา สมายดี

พุฒิพล เทอดเหนือเกล้า

วรุตม์ ศรีเศรษฐกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสั่นสะเทือนของระบบส่งกำลัง

Experimental Study on Vibration Reduction of a Rotating Shaft System

ผู้จัดทำ

1. นาย ปรัชญา สบายดี รหัสประจำตัว 42010556
2. นาย พุฒิพล เทอดเหนือเกล้า รหัสประจำตัว 42010582
3. นาย วรุตม์ ศรีเศรษฐกุล รหัสประจำตัว 42010616



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสิ้นสะท้อนของระบบส่งกำลัง

นายปรัชญา สาขาดี 42010556

นายพุดพิพล เทอดเหนือเกล้า 42010582

นายวรุฒม์ ศรีเศรษฐกุล 42010616

รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2545

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวกับการศึกษาเพื่อลดการสิ้นสะท้อนในระบบโรเตอร์ ด้วยเพลลาแข็งเกร็ง การทดลองเกี่ยวกับการวัดค่าความเร่งที่ห้องแบริง โดยใช้ตัววัดสัญญาณเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์และเดซีแลบซอฟต์แวร์ จะเป็นตัวแปลงค่าสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณความเร็วและการกระจัดอยู่ในช่วงของเวลาและช่วงของความถี่ ความถี่ที่สั้นห้องสามารถหาได้จากผลการทดลองด้วย ในการศึกษาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะทางไดนามิกส์ของยางรองรับ โดยนำยาง 3 ชนิดมาศึกษาทดลองคือค่าคงที่ของสปริงและค่าคงตัวของตัวหน่วง เพื่อลดการสิ้นสะท้อนของระบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่น้ำหนักมาก ยางสะพานที่ค่าคงที่ของสปริงสูง สามารถลดการสิ้นสะท้อนของระบบลงได้ระดับขั้นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับยางชนิดอื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Experimental Investigation of Vibration Reduction in Rotating Shaft System

Prachya Sabaidee

Puttipol Thoetnuaklao

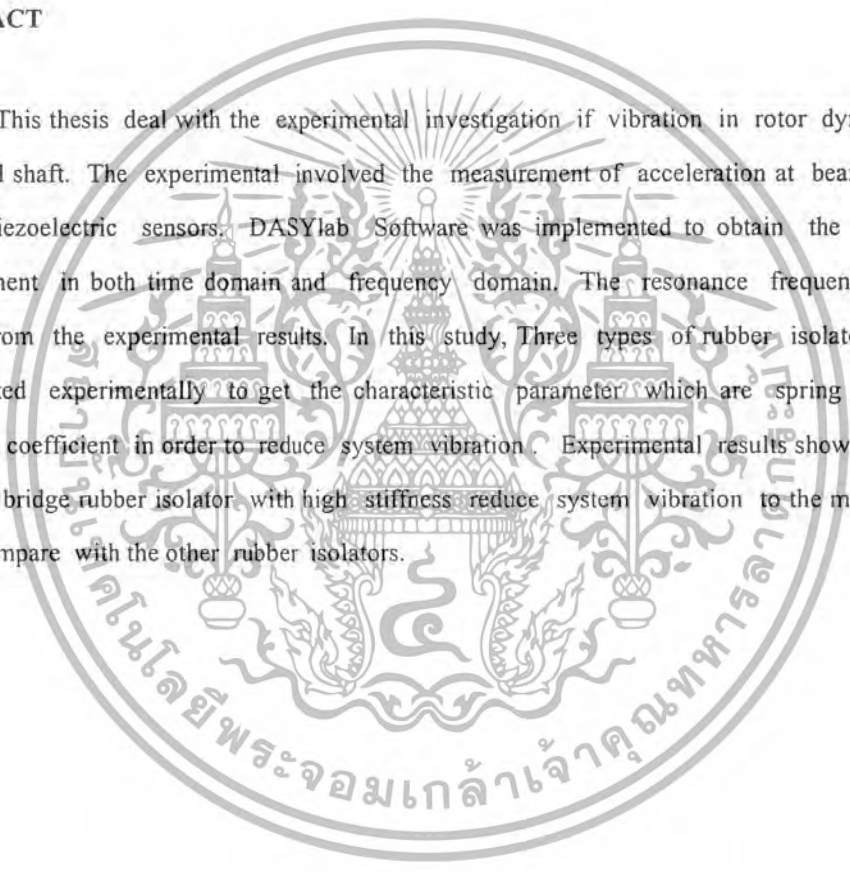
Warut Srisethagul

Assoc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongrojn

Advisor

### ABSTRACT

This thesis deal with the experimental investigation if vibration in rotor dynamic system with rigid shaft. The experimental involved the measurement of acceleration at bearings housing using Piezoelectric sensors. DASYlab Software was implemented to obtain the velocity and displacement in both time domain and frequency domain. The resonance frequency were also obtain from the experimental results. In this study, Three types of rubber isolator were also investigated experimentally to get the characteristic parameter which are spring constant and damping coefficient in order to reduce system vibration. Experimental results show that at high load the bridge rubber isolator with high stiffness reduce system vibration to the minimum level when compare with the other rubber isolators.



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ.ดร. มงคล มงคลวงส์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญตาราง	IV
สารบัญภาพ	V
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 Single-mass Rotor Dynamics	3
2.2 Rotating Unbalance	3
2.3 Rotor Unbalance	5
2.4 Whirling of rotating shafts	6
2.5 Synchronous whirl	8
2.6 การสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มีการหน่วงด้วยความหนืด	10
2.7 การลดลงแบบลอการิทึมของแอมพลิจูด	11
2.8 Time and Frequency Domain	12
บทที่ 3 อุปกรณ์การทดลอง	14
3.1 เพลลา	14
3.2 ตัวรองรับเพลลา	14
3.3 มอเตอร์กระแสตรง	14
3.4 ฐานรองรับ	15
3.5 ชุดรับภาระ	16
3.6 ตัวแยกการสั่น	16
3.7 อุปกรณ์รับสัญญาณการสั่นสะเทือน	17
บทที่ 4 วิธีการทดลอง	18
4.1 การหาค่าคงตัวของสปริง	18
4.2 การหาค่าคงตัวของตัวหน่วง	18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
4.3 การทดลองเพื่อหาค่าการสั้นสะท้อน	18
บทที่ 5 ผลการทดลอง	20
5.1 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของจำนวนชั้นความหนากับค่าคงตัวของตัวหน่วง	21
5.2 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของจำนวนชั้นความหนากับค่าคงตัวของสปริง	22
5.3 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองสะพานกับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกันตำแหน่งที่ 1	23
5.4 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองสะพานกับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกันตำแหน่งที่ 2	24
5.5 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองแท่นเครื่องกับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกันตำแหน่งที่ 1	25
5.6 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองแท่นเครื่องกับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกันตำแหน่งที่ 2	26
5.7 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางพองน้ำกับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกันตำแหน่งที่ 1	27
5.8 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางพองน้ำกับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกันตำแหน่งที่ 2	28
5.9 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองสะพานกับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกันตำแหน่งที่ 1	29
5.10 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองสะพานกับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกันตำแหน่งที่ 2	30
5.11 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองแท่นเครื่องกับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกันตำแหน่งที่ 1	31
5.12 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองแท่นเครื่องกับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกันตำแหน่งที่ 2	32
5.13 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางพองน้ำกับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกันตำแหน่งที่ 1	33
5.14 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางพองน้ำกับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกันตำแหน่งที่ 2	34
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	35
6.1 สรุปผลการทดลอง	35
6.2 ข้อเสนอแนะ	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

ภาคผนวก ก. การคำนวณหาค่าแรงบิด

ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ

ภาคผนวก ค. ข้อมูลยาง

ภาคผนวก ง. กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นกับเวลา

ภาคผนวก จ. กราฟ Power Spectrum แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็ว

บรรณานุกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

รูปที่	หน้าที่	
2.1	แสดงระบบ rotating unbalance	3
2.2	แสดงกราฟสำหรับสมการ (2.6) และ (2.7) ของ rotating unbalance	5
2.3	แสดงระบบ dynamic unbalance	6
2.4	แสดงระบบ balancing machine	6
2.5	แสดงการเหวี่ยงของเพลลาหมุน	7
2.6	แสดงสามเหลี่ยมของเวกเตอร์	9
2.7	แสดงระบบภายใต้ความเร็วต่างๆกัน 3 แบบ	9
2.8	อัตราการผลิตของแอมพลิจูด	11
2.9	ภาพแสดงสัญญาณคลื่นแบบต่างๆ	13
3.1	เพลลาและโรเตอร์	14
3.2	ตัวรองรับเพลลา	14
3.3	มอเตอร์กระแสตรง	15
3.4	ฐานรองรับ	15
3.5	ตุ้มถ่วงน้ำหนักและเครื่องชั่งสปริง	16
3.6	ตัวแยกการสั่นสะเทือน	17
3.7	ตัวรับสัญญาณการสั่นสะเทือน	17



## รายการสัญลักษณ์

$m$	มวลเบื้องต้น
$c$	ระยะเบื้องต้น
$\omega$	ความเร็วเชิงมุม
$x$	การกระจัดของมวลที่ไม่มีการหมุน
$k$	ค่าคงตัวสปริง
$c$	ค่าคงตัวของตัวหน่วง
$t$	เวลา
$M$	มวลของระบบ
$F_0$	แรงที่กระทำต่อระบบ
$\omega_0$	ความถี่ธรรมชาติ
$X$	แอมพลิจูด
$\phi$	มุมที่เปลี่ยนไป
$\zeta$	damping ratio
$\theta$	มุมที่เปลี่ยนไป
$a$	ความเร่งเชิงเส้น
$a_g$	ความเร่งที่จุด $g$
$a_s$	ความเร่งที่จุด $s$
$a_{g/s}$	ความเร่งสัมพัทธ์ที่จุด $g$ เมื่อเทียบกับ $s$
$\delta$	logarithmic decrement
$\tau_d$	คาบในการดับ 1 ช่วง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันได้มีการใช้เครื่องจักรที่มีระบบส่งกำลังกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการใช้งานแต่ละครั้งย่อมมีการสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนเกิดจากการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของชิ้นส่วนเครื่องจักรที่อยู่ในช่วงยึดหยุ่นได้ เนื่องจากแรงกระทำซึ่งอาจเป็นแรงภายนอก แรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนอาจส่งผ่านฐานเครื่องหรือชิ้นส่วนที่อยู่ข้างเคียง ทำให้เกิดเสียง เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรและความไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องจักรสั้นลง จึงได้มีการศึกษาและวิจัยเพื่อลดการสั่นสะเทือนให้น้อยลงหรืออยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาพฤติกรรมตัวแยกการสั่นสะเทือน (Isolator) เพื่อหาสาเหตุและปัจจัยของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร การสั่นสะเทือนที่โหลดต่างๆกัน จะมีค่าไม่เท่ากันและตัวแยกการสั่นสะเทือนที่ต่างชนิดกันและมีขนาดต่างกันก็จะให้ค่าแรงสั่นสะเทือนที่ต่างกัน เราจึงทำการศึกษาเพื่อหาค่าโหลด ชนิดและขนาดของตัวแยกการสั่นสะเทือน เพื่อหลีกเลี่ยงค่าของโหลดและตัวแยกการสั่นสะเทือนที่มีผลทำให้ค่าของการสั่นสะเทือนมีค่ามากจนทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรและผู้ใช้งาน จะได้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาเพื่อลดการสั่นสะเทือนต่อไปในอนาคต

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาตัวแยกการสั่นสะเทือนโดยใช้ยางแต่ละชนิดนำมาทดลองหาค่าคงตัวสปริง ค่าคงตัวของตัวหน่วงและนำมาทดลองกับชุดทดลองระบบส่งกำลังที่สร้างขึ้นเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าคงตัวสปริงและค่าคงตัวของตัวหน่วงของยางว่ายางชนิดใดสามารถลดแรงสั่นสะเทือนที่รับจากระบบส่งกำลังที่ฐานได้มากที่สุด เมื่อระบบส่งกำลังได้รับภาระที่ต่างกัน

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างชุดทดลองของระบบส่งกำลังเพื่อใช้ในการทดลองหาค่าแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากการรองรับของยางแต่ละชนิด

1.3.2 นำยางแต่ละชนิดมาทดลองเพื่อหาค่าคงตัวสปริงและค่าคงตัวของตัวหน่วง

1.3.3 นำยางแต่ละชนิดมาทดลองกับชุดทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อหาว่ายางชนิดใดสามารถลดแรงสั่นสะเทือนได้มากที่สุดเมื่อระบบส่งกำลังได้รับภาระที่ต่างกัน

1.3.4 หาความสัมพันธ์ของค่าคงตัวสปริง ค่าคงตัวของตัวหน่วงและความสามารถในการลดแรงสั่นสะเทือนเพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินงานแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือนำยาง 3 ชนิดที่นำมาใช้ในการทดลองได้แก่ ยาง ฟองน้ำ ยางรองแท่นเครื่อง ยางรองสะพาน มาทดลองหาค่าคงตัวสปริง โดยการใช้เครื่อง Universal testing machine มาทดสอบยางแต่ละชนิด จากนั้นจึงหาค่าคงตัวของตัวหน่วงโดยการใช้ค้อนทุบไปที่ ยางแล้ววัดค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นเพื่อนำมาคำนวณหาค่าคงตัวของตัวหน่วงโดยใช้สูตรตามทฤษฎี ในส่วน ที่ 2 คือการนำยางไปใช้กับชุดทดลองโดยการจ่ายไฟเข้ามอเตอร์ให้ถ่ายแรงไปที่เพลาและเกิดการสั่น สะเทือนเพื่อหาค่าการกระจัดที่ฐานของชุดรองรับ จากนั้นจึงทดลองเปลี่ยนแปลงขนาด ชนิด และภาระที่ ให้กับระบบส่งกำลังว่ายางที่ใช้แบบใดสามารถลดแรงสั่นสะเทือนได้มากที่สุด แล้วจึงนำมาหาความสำ พันธ์กับค่าคงตัวสปริงและค่าคงตัวของตัวหน่วงเพื่อนำมาสรุปผลการทดลองและนำไปประยุกต์ใช้งานต่อ ไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2

## ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 Single-mass Rotor Dynamics

ในเครื่องจักรกลหลาย ๆ ชนิดที่มีการหมุน มวลโรเตอร์ (rotor) รวมอยู่ที่จุด ๆ เดียวบนเพลลา จะพิจารณาว่าเพลลามีน้ำหนักเบามากในการคำนวณแบบง่าย ๆ ที่ต้องการจะทำนายพฤติกรรมของระบบนั้น ในกรณีอื่นมวลโรเตอร์อาจไม่รวมอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งบนเพลลา เพื่อจะช่วยให้การออกแบบเครื่องกล เราจะพิจารณาเสมือนว่ามวลรวมอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งแทน ถึงแม้ในบางกรณีจะไม่เข้ากับสถานการณ์ดังกล่าว แต่ยังคงใช้หลักการพื้นฐานของ Rotating Machine Dynamics โดยการศึกษาระบบนั้น จะทำให้ทราบพฤติกรรมของ Dynamics Loading และ แสดงถึงผลของตัวแปร (Parameters) ต่าง ๆ เช่น แอมพลิจูด (Amplitude) ของการสั่นสะเทือน และแรงที่ส่งถ่าย (Transmiss) ไปยังฐาน

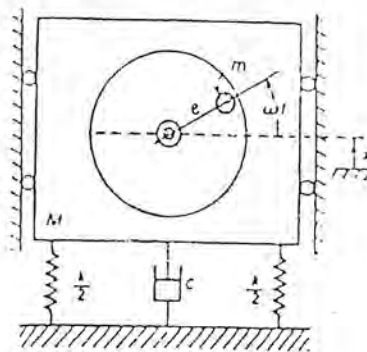
### 2.2 Rotating Unbalance

ความไม่สมดุลในอุปกรณ์ที่มีการหมุนเป็นต้นเหตุให้เกิดความสั่นสะเทือน เราพิจารณามวลติดสปริงซึ่งถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งเท่านั้น และถูกกระตุ้นโดยอุปกรณ์ที่มีการหมุนซึ่งไม่สมดุล ดังแสดงในรูป 2.1 ความไม่สมดุลถูกกำหนดโดยมวลเยื้องศูนย์กลาง  $m$  ซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์กลาง  $e$  ทำให้เกิดการหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega$  ให้  $x$  เป็นการกระจัดของมวลที่ไม่มีอาการหมุน ( $M-m$ ) จากตำแหน่งสมดุลทางสถิตศาสตร์ การกระจัดของมวล  $m$  คือ

$$x = e \sin \omega t \tag{2.1}$$

ได้สมการของการเคลื่อนที่

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_0 e \omega^2 \sin \omega t \tag{2.2}$$



รูปที่ 2.1 แสดงระบบ rotating unbalance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้ชัดว่าสมการ (2.2) เป็นสมการ Forced harmonic vibration คือ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (2.3)$$

โดย  $F_0$  ถูกแทนด้วย  $m_0 e \omega^2$  และแก้สมการ steady state แทนด้วย

$$X = m_0 e \omega^2 / \sqrt{(k - M\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \quad (2.4)$$

และ

$$\tan \phi = c\omega / (k - M\omega^2) \quad (2.5)$$

สามารถลดรูปเป็นตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$\frac{M X}{m e} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}} \quad (2.6)$$

และ

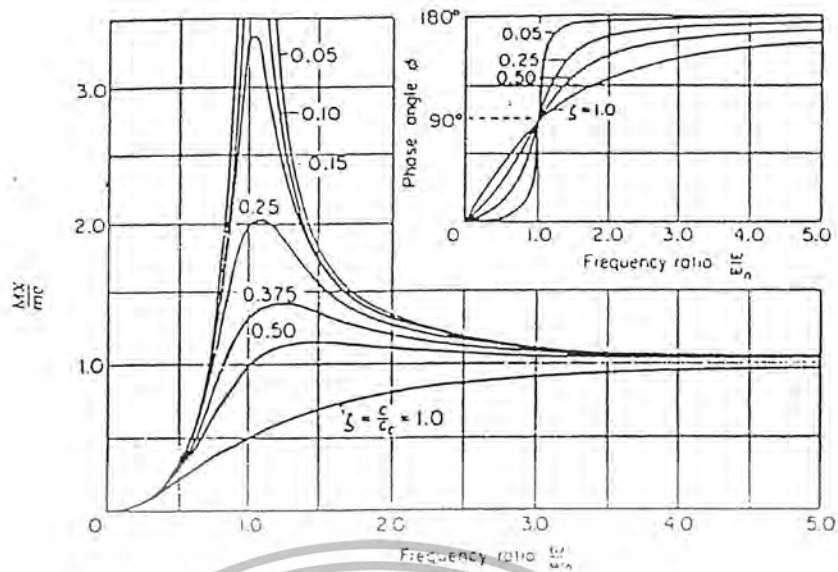
$$\tan \phi = \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.7)$$

แสดงได้ดังกราฟในรูป

จะได้สมการสำเร็จคือ

$$x(t) = X_1 e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + \phi_1) + \frac{(m_0 e \omega^2 / k) \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{\left[1 - (\omega / \omega_n)^2\right]^2 + (2\zeta \omega / \omega_n)}} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงกราฟสำหรับสมการ (2.6) และ (2.7) ของ rotating unbalance

### 2.3 Rotor Unbalance

ทฤษฎีที่ผ่านมามีเกิดขึ้นในระนาบเดียว แต่ความไม่สมดุลในล้อที่หมุนโรเตอร์ประกอบด้วยหลายระนาบ เราแบ่งแยกออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

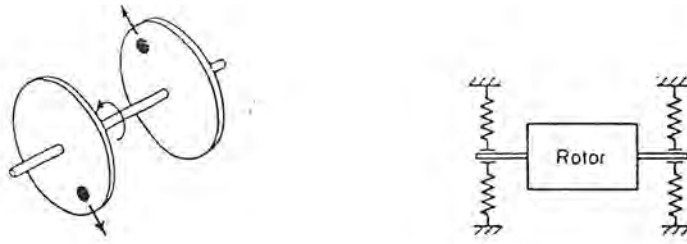
ความไม่สมดุลทางสถิตศาสตร์ ( Static Unbalance )

เมื่อมวลไม่สมดุลถูกวางควอยู่ในระนาบเดียว เหมือนกรณีของจาน โรเตอร์บาง ๆ ผลของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเป็นแรงในแนวรัศมี ดังในรูปที่ เราใช้ตรวจสอบทางสถิตศาสตร์เพื่อหาความไม่สมดุลของล้อที่มีแกนวางขนาน ซึ่งจะคลิ้งไปจนกว่าจุดที่หนักที่สุดของมันจะลงไปอยู่ด้านล่างของแกน เนื่องจากความไม่สมดุลเช่นนี้สามารถตรวจสอบได้โดยไม่ต้องหมุนเพลลา จึงเรียกว่า ความไม่สมดุลทางสถิตศาสตร์

ความไม่สมดุลทางพลศาสตร์ ( Dynamic Unbalance )

เมื่อเกิดความไม่สมดุลมากกว่า 1 ระนาบ ผลที่ได้คือแรงและ โมเมนต์โยก ซึ่งหมายถึง ความไม่สมดุลทางพลศาสตร์ โมเมนต์โยกไม่สามารถหาได้ถ้าไม่มีการหมุนโรเตอร์ เช่น เพลลาซึ่งมีงาน 2 อันติอยู่ ดังรูปที่ ถ้ามวลที่ไม่สมดุลมีค่าเท่ากันและห่างกัน 180 องศา โรเตอร์จะสมดุลทางสถิตศาสตร์รอบแกนเพลลา แต่เมื่อโรเตอร์หมุนโรเตอร์แต่ละตัวจะสร้างแรงหนีศูนย์กลางของการหมุน ทำให้เกิดการ โยกของเพลลาบน bearings

โดยทั่วไปโรเตอร์ยาว ๆ เช่น เพลลาข้อเหวี่ยง อาจพิจารณาว่าเป็นจานบาง ๆ หลายอันต่อกันเป็นชุด แต่ละอันก็ไม่สมดุล โรเตอร์จะหมุนเพื่อหาความไม่สมดุล อุปกรณ์ที่ถูกตรวจและแก้ไขค่าความไม่สมดุลแล้วเรียกว่า balancing machines ประกอบด้วย bearing ซึ่งติดตั้งสปริงเอาไว้เพื่อตรวจจับแรงที่ไม่สมดุลด้วยการเคลื่อนที่ของตัวมันเอง

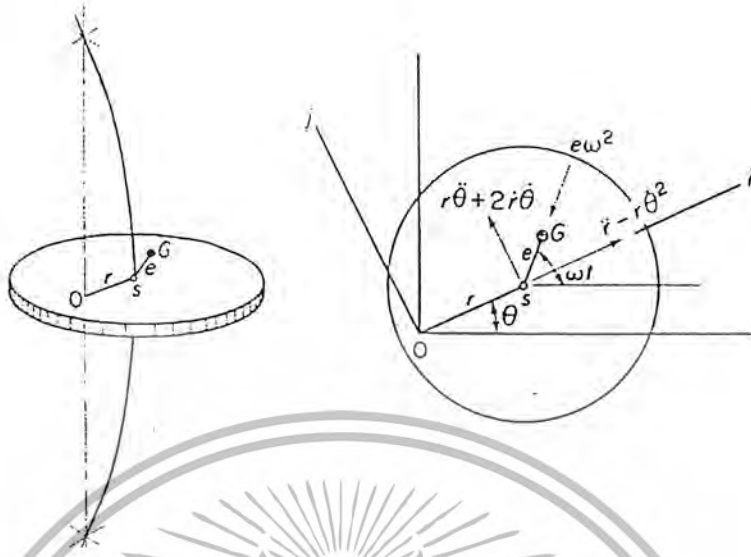


รูปที่ 2.3 และ 2.4 แสดงระบบ *dynamic unbalance* และ *balancing machine* ตามลำดับ

#### 2.4 Whirling of rotating shafts

เพลลาที่หมุนจะโค้งออกที่บางความเร็วและเหวี่ยง (whirl) ในลักษณะที่ซับซ้อนการเหวี่ยงคือการหมุนของระนาบซึ่งเกิดจากเพลลาโค้ง และแนวศูนย์กลางของ bearing เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ความไม่สมดุลของมวล, damping ในเพลลา, ความเสียดทานของของไหลใน bearing และสาเหตุอื่น การเหวี่ยงของเพลลาอาจเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันหรือทิศทางตรงข้ามกับการหมุนของเพลลา และความเร็วในการเหวี่ยงอาจจะเท่ากับความเร็วในการหมุนหรือไม่ก็ได้

เราพิจารณาจาน (disk) ซึ่งมีมวล  $m$  ติดอยู่อย่างสมมาตรบนแกนเพลลา ซึ่งรองรับด้วย Bearings 2 ตัว ตามรูป จุดศูนย์กลางมวลของจาน  $G$  อยู่ที่ระยะเบี่ยงศูนย์กลาง  $e$  จากจุดศูนย์กลางทางเรขาคณิต  $S$  ของจาน เส้นศูนย์กลางของ Bearings ตัดกับระนาบของจานที่  $O$  และศูนย์กลางเพลลาเบี่ยงเบนไปจากเดิมเป็นระยะทาง  $r = OS$



รูปที่ 2.5 แสดงการเหวี่ยงของเพลานหมุน

เราสมมติว่าเพลาน (แนว  $e = SG$ ) หมุนที่ความเร็วคงที่  $\omega$  และโดยทั่วไป แนว  $r = OS$  จะเหวี่ยงที่ความเร็ว  $\dot{\theta}$  ซึ่งไม่เท่ากับความเร็ว  $\omega$  สำหรับสมการการเคลื่อนที่ เราสามารถหาความเร่งของจุดศูนย์กลางมวลได้ดังนี้

$$a_G = a_s + a_{G/s} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $a_s$  เป็นความเร่งของจุด S และ  $a_{G/s}$  เป็นความเร่งของ G สัมพันธ์กับ S พจน์หลังเป็นความสัมพันธ์โดยตรงของ G กับ S เพราะ  $\omega$  คงที่ แก่สมการหาค่า  $a_G$  ในทิศทางรัศมีและทิศทางสัมผัส (radial and tangential direction) เราจะได้

$$a_G = \left[ (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) - e\omega^2 \cos(\omega t - \theta) \right] i + \left[ (r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}) - e\omega^2 \sin(\omega t - \theta) \right] j \quad (2.10)$$

เนื่องจากแรงที่สะสมอยู่ในเพลาน เราจะสมมติว่ามีแรง viscous damping กระทำที่ S สมการของการเคลื่อนที่ที่ถูกแก้ในทิศทางรัศมีและทิศทางสัมผัสเป็น

$$-kr - c\dot{r} = m[\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - e\omega^2 \cos(\omega t - \theta)] \quad (2.11)$$

$$-cr\dot{\theta} = m[r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} - e\omega^2 \sin(\omega t - \theta)] \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\ddot{r} + \frac{c}{m} \dot{r} + \left( \frac{k}{m} - \dot{\theta}^2 \right) r = e\omega^2 \cos(\omega t - \theta) \quad (2.13)$$

$$r\ddot{\theta} + \left( \frac{c}{m}r + 2\dot{r} \right) \dot{\theta} = e\omega^2 \sin(\omega t - \theta) \quad (2.14)$$

ในกรณีทั่วไปของการเหวี่ยง เราใช้สมการข้างบนอธิบายได้ ภายใต้การแบ่งแยกการเคลื่อนที่ กระตุ้นด้วยตัวเอง (self-excited) ซึ่งแรงกระตุ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ถูกควบคุมโดยการเคลื่อนที่ของ ตัวมันเอง ถ้าตัวแปรในสมการนี้เป็น  $r$  และ  $\theta$  ปัญหาจะเป็นแบบ 2 DOF อย่างไรก็ตามในการเหวี่ยงแบบ steady-state synchronous ซึ่ง  $\dot{\theta} = \omega$  และ  $\ddot{\theta} = \dot{r} = \ddot{r} = 0$  ปัญหาจะกลายเป็น 1 DOF

## 2.5 Synchronous whirl

สำหรับการเหวี่ยงแบบ synchronous ความเร็วในการเหวี่ยงเท่ากับความเร็วในการหมุน  $\omega$  ซึ่งเรา สมมติว่าคงที่จะได้  $\dot{\theta} = \omega$  ผลจากการอินทิเกรตเราได้ว่า  $\theta = \omega t - \phi$

เมื่อ  $\theta$  เป็นมุมระหว่าง  $e$  และ  $r$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ดังแสดงในรูป จาก  $\dot{\theta} = \dot{r} = \ddot{r} = 0$  สมการ และ ลดรูปเป็น

$$\left( \frac{k}{m} - \omega^2 \right) r = e\omega^2 \cos \phi \quad (2.15)$$

$$\frac{c}{m} \omega r = e\omega^2 \sin \phi \quad (2.16)$$

เอาสองสมการมาหารกันจะได้

$$\tan \phi = \frac{\frac{c}{m} \omega}{\frac{k}{m} - \omega^2} = \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  เป็นความเร็ววิกฤต และ  $\zeta = c/c_c$  จากสามเหลี่ยมของเวกเตอร์ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\cos \phi = \frac{\frac{k}{m} - \omega^2}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{c}{m}\omega\right)^2}} \quad (2.18)$$

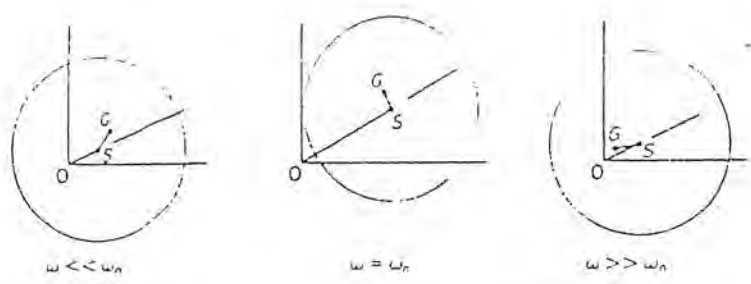
แทนลงในสมการแรกของสมการ จะได้สมการของแอมพลิจูด

$$r = \frac{me\omega^2}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} = \frac{e\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.6 แสดงสามเหลี่ยมของเวกเตอร์

จากสมการต่างๆ ข้างบน บอกให้เราทราบว่าแอมพลิจูด  $e = SG$  มีเฟสนำแนวการขจัด  $r = OS$  อยู่เป็นมุมเฟส  $\phi$  ซึ่งขึ้นอยู่กับการมี damping และอัตราส่วนความเร็ว  $\omega/\omega_n$  เมื่อความเร็วในการหมุนใกล้เคียงกับความเร็ววิกฤต  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  หรือความถี่ธรรมชาติของเพลา ในการตั้งสะพานแขวนต้องมีเงื่อนไขของการ resonance ซึ่งแอมพลิจูดจะถูกกำหนดโดย damping เท่านั้น รูป แสดงระบบที่ประกอบด้วยจานและเพลาภายใต้เงื่อนไขของความถี่ต่างๆกัน 3 แบบ ที่ความเร็วสูงๆ  $\omega \gg \omega_n$  จุดศูนย์กลางมวลมีแนวโน้มที่จะเข้าหาจุด O และจุดศูนย์กลางของเพลา S หมุนอยู่ใกล้กับ G เป็นวงกลมรัศมี e



รูปที่ 2.7 แสดงระบบภายใต้ความถี่ต่างๆกัน 3 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ให้คนอื่นได้ใช้โดยไม่ผ่านการยินยอมจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตได้ว่า สมการสำหรับการเหวี่ยงแบบ synchronous คล้ายกับ Rotating Unbalance เพราะทั้ง 2 แบบมีแรงกระตุ้น ให้เกิดการหมุนมีค่าเท่ากับ  $m\omega^2$

อย่างไรก็ตามใน Rotating Unbalance ความไม่สมดุลอยู่ในทอมของมวลไม่สมดุลขนาดเล็ก  $m$  แต่ในเรื่องการเหวี่ยงนี้ความไม่สมดุลกำหนดโดยมวลทั้งหมด  $m$  และระยะเชิงศูนย์กลาง  $e$  รูป อาจจะใช้ในปัญหานี้ได้โดยใช้  $r/e$  แทน  $MX/me$

## 2.6 การสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มีการหน่วงด้วยความหนืด

การหน่วงเพื่อใช้ลดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนนั้นแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

2.6.1. การหน่วงด้วยความหนืด (viscous damping) แรงหน่วงในแดชพอต (dashpot) เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเร็วของระบบ ( $F_d = -c\dot{x}$ ) ถ้าเป็นการหน่วงกับระบบที่มีความเร็วสูง (turbulent damping) แรงหน่วงจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเร็วยกกำลังสอง

2.6.2. การหน่วงด้วยความเสียดทานแห้ง (dry friction of coulomb damping) ผลของการสั่นไถลระหว่างพื้นผิวที่มีความเสียดทานจลน์ในตัวหน่วงทำให้แรงหน่วงมีค่าคงตัว

2.6.3. การหน่วงด้วยความเสียดทานภายในของแข็ง (solid damping) การหน่วงชนิดนี้อาศัยผลของความเสียดทานภายในเนื้อของแข็งนั้นเกิดความเค้นและมีการผิดรูป พบว่าพลังงานสูญเสียของระบบที่มีการหน่วงชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของการสั่น แต่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ธรรมชาติของระบบ

1. การหน่วงเหมาะสม (underdamp case) หมายถึงการสั่นไปมาของระบบที่มีการหน่วงรอบตำแหน่งสมดุลสถิต โดยแอมพลิจูดของการสั่นจะลดลงกับเวลาและเป็นศูนย์ในที่สุด กรณีนี้พิจารณาภายใต้เงื่อนไขของ  $\zeta < 1$  หรือ  $c^2/4m^2 < k/m$

2. การหน่วงเกิน (overdamp case) หมายถึงระบบจะไม่มีการสั่นไปมาเมื่อระบบนั้นมีการกระจัดออกจากตำแหน่งสมดุลสถิต และเมื่อเวลาผ่านไปนานมากๆ ระบบจะกลับสู่ตำแหน่งสถิตนั้น กรณีนี้พิจารณาภายใต้เงื่อนไขของ  $\zeta > 1$  หรือ  $c^2/4m^2 > k/m$

3. การหน่วงวิกฤต (critical damping) หมายถึงระบบจะไม่มีการสั่นไปมาเมื่อระบบนั้นมีการกระจัดออกจากตำแหน่งสมดุลสถิต ระบบจะกลับสู่ตำแหน่งสถิตนั้นในช่วงเวลาที่สั้นที่สุด (สั้นกว่าระยะเวลาในกรณีของการหน่วงเกิน) กรณีนี้พิจารณาภายใต้เงื่อนไขของ  $\zeta = 1$  หรือ  $c^2/4m^2 = k/m$

สำหรับการหน่วงวิกฤตนี้พบว่าค่าคงที่การหน่วงวิกฤตหาได้จาก

$$\frac{c_{cr}^2}{4m^2} = \frac{k}{m} \quad (2.20)$$

$$c_{cr} = \sqrt{4mk} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (2.21)$$

### ตัวประกอบการหน่วงคำนวณจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}} \tag{2.22}$$

2.7 การลดลงแบบลอการิทึมของแอมพลิจูด

ระบบที่มีการสั่นไปมาแบบอิสระที่มีการหน่วง อัตราการลดลงของแอมพลิจูดพิจารณาในพจน์ของการลดลงแบบลอการิทึม (logarithmic decrement,  $\delta$ ) พิจารณาการสั่นไปมาแบบอิสระที่มีการหน่วง ( $\zeta < 1.0$ ) ในรูปที่ 2.8 การลดลงแบบลอการิทึมหมายถึง “ลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดสองค่าที่รอบต่อเนื่องกัน ดังนั้น

$$\delta = \ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) = \ln\left(\frac{e^{-\zeta\omega_n t_1}}{e^{-\zeta\omega_n (t_1 + \tau_d)}}\right) \tag{2.23}$$

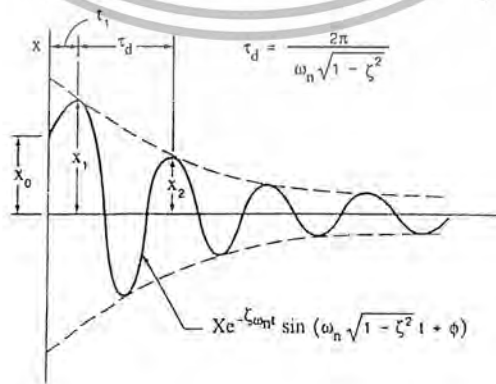
$$= \ln e^{\zeta\omega_n \tau_d} = \zeta\omega_n \tau_d \tag{2.24}$$

เนื่องจาก  $\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$  ดังนั้น

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{2.25}$$

ถ้า  $\zeta \ll 0.1$  พบว่า  $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1.0$  โดยการประมาณพบว่า

$$\delta \approx 2\pi\zeta \tag{2.26}$$



รูปที่ 2.8 อัตราการลดลงของแอมพลิจูด พิจารณาจากการลดลงแบบลอการิทึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนรอบ (n) ที่ทำให้ระบบมีแอมพลิจูดของการสั่นลดลงตามที่ต้องการ กำหนดให้ที่รอบใดรอบหนึ่งของการสั่นไปมาของระบบมีแอมพลิจูดเท่ากับ  $X_0$  และระบบสั่นไปมาจนครบ n รอบและแอมพลิจูดเป็น  $X_n$  จากสมการที่ (2.23) พบว่า

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{X_1}{X_2} = \frac{X_2}{X_3} = \dots = \frac{X_{n-1}}{X_n} = e^{\delta} \quad (2.27)$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ  $X_0/X_n$  สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{X_0}{X_n} = \left( \frac{X_0}{X_1} \right) \left( \frac{X_1}{X_2} \right) \left( \frac{X_2}{X_3} \right) \dots \left( \frac{X_{n-1}}{X_n} \right) = e^{n\delta} \quad (2.28)$$

$$\ln \left( \frac{X_0}{X_n} \right) = n\delta \quad (2.29)$$

ถ้าระบบทราบค่า  $X_0, X_n$  และ  $\zeta$  จำนวนรอบของการสั่นของระบบคำนวณจาก

$$n = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{2\pi\zeta} \ln \left( \frac{X_0}{X_n} \right) \quad (2.30)$$

## 2.8 Time and Frequency Domain

การแสดงความถี่และความถี่สัมพันธ์กันสามารถแสดงได้ 2 ลักษณะ คือ Time Domain และ Frequency Domain

Time Domain คือ การแสดงขนาดของความถี่สัมพันธ์ ( Amplitude ) กับเวลา โดยแกนตั้งแสดงขนาดของความถี่สัมพันธ์ และแกนนอนเป็นเวลา ซึ่งก็คือการแสดงผลในออสซิลโลสโคป ( Oscilloscope ) นั่นเอง

Frequency Domain คือ การแสดงขนาดของความถี่สัมพันธ์กับความถี่ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ความถี่สัมพันธ์แทบทุกชนิดจะแสดงผลในลักษณะนี้ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ความถี่สัมพันธ์ในเครื่องจักรกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สัญญาณาร์โมนิกที่ซับซ้อนทุกสัญญาณจะสามารถแยกออกเป็นชุดของคลื่นสัญญาณรูป sine ได้โดยแต่ละคลื่น sine จะมีขนาดและความถี่แตกต่างกัน เมื่อนำคลื่น sine มารวมกันหรือบวกกันก็จะเกิดสัญญาณที่ซับซ้อนขึ้นอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 แสดงแนวความคิดของการแยกคลื่นที่ซับซ้อนดังกล่าวออกเป็นองค์ประกอบย่อยๆ ซึ่งเป็นคลื่น sine รูป 2.9a แสดงคลื่น sine 2 ชุด คลื่นชุดบนถี่เป็น 4 เท่าและขนาดเป็น 1/4 เท่าของคลื่นชุดล่าง เมื่อรวมคลื่นทั้งสองเข้าด้วยกันผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.9b ซึ่งจะยังเห็นคลื่นทั้งสองอยู่ในคลื่นรวมด้วย ถ้าหากคลื่นรวมถูกแยกออกเป็นองค์ประกอบของคลื่นผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 2.9c ซึ่งเป็นการแสดงขนาดของคลื่นกับความถี่ คลื่น sine ทั้งสองแสดงด้วยเส้นตั้งตามขนาดของคลื่นในตำแหน่งที่เหมาะสมบนแกนความถี่ ส่วนรูปที่ 2.9d และ 2.9e แสดงข้อมูลชุดเดียวกันแก่มองคนละด้าน

สัญญาณใด ๆ ก็ตามจะสามารถแยกออกเป็นคลื่น sine ย่อยๆ ได้ โดยอาศัยเครื่อง FFT Analyser เมื่อรับสัญญาณที่ซับซ้อนมาจากทรานสดิวเซอร์ ( Transducer ) มันจะคำนวณหาชุดของคลื่น sine ที่ประกอบเป็นคลื่นนั้น แล้วแสดงขนาดของแต่ละคลื่นบนแกนของความถี่



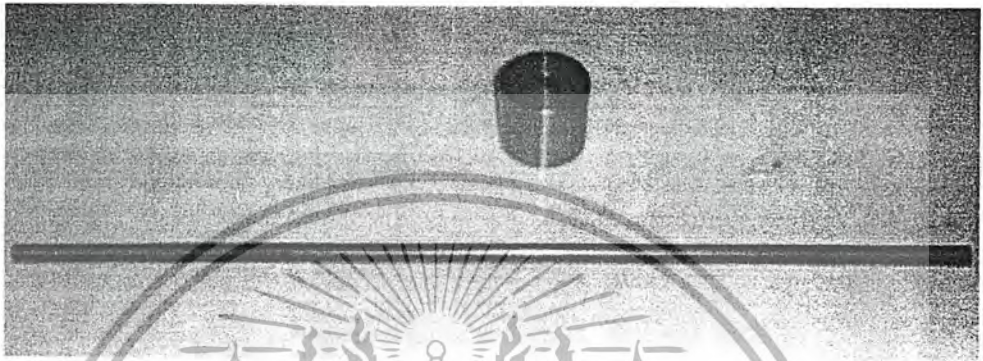
รูปที่ 2.9 (a) คลื่น sine 2 ชุด (b) ผลรวมของคลื่น sine ทั้ง 2 ชุด  
(c) แสดงภาพ 3 มิติ (d) ภาพแสดง Time Domain ซึ่งจะเห็นใน Oscilloscope  
(e) ภาพแสดง Frequency Domain ซึ่งจะเห็นใน FFT Analyser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

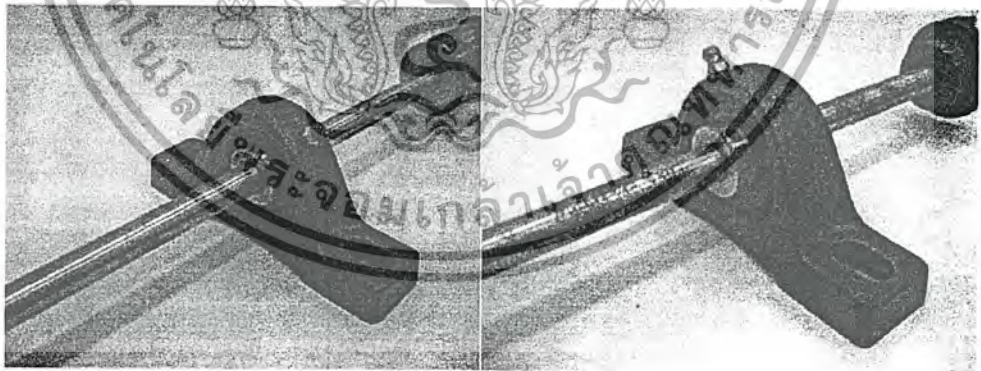
### อุปกรณ์การทดลอง

1. เพลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 ม.ม. ยาว 540 ม.ม. ทำจากเหล็กกล้า โรเตอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12 ม.ม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 40 ม.ม. ยาว 50 ม.ม. ทำจากเหล็กกล้า



รูปที่ 3.1 เพลาและโรเตอร์

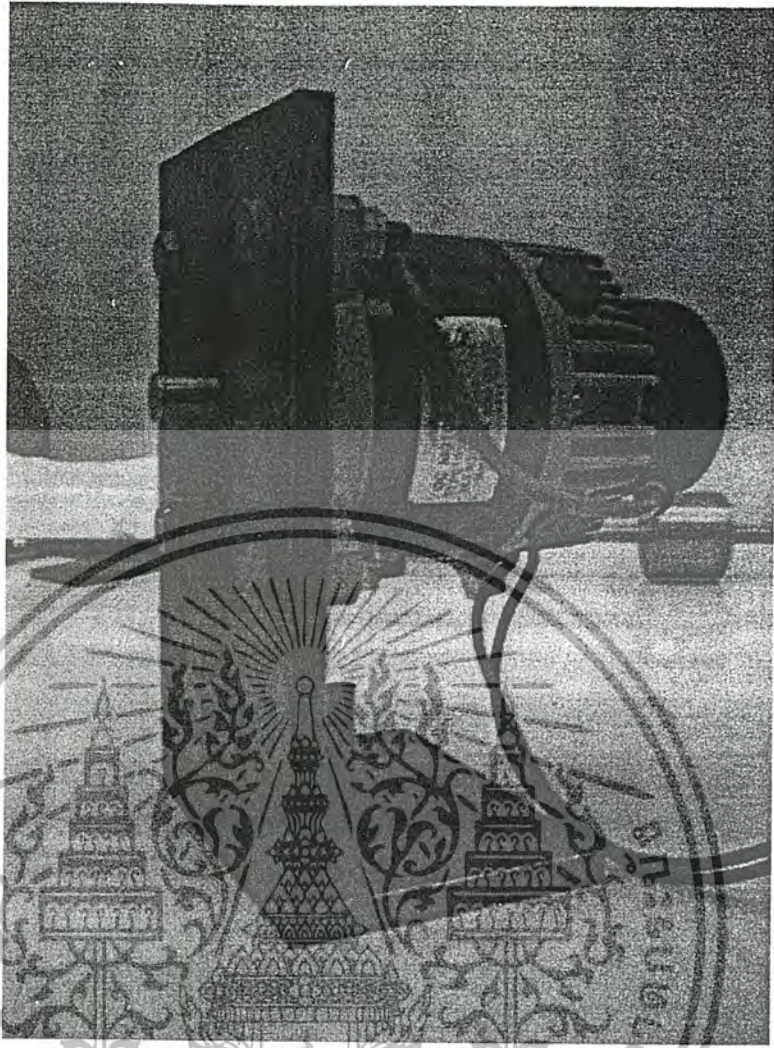
2. ตัวรองรับเพลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 12 ม.ม. แบบมี housing ในตัว ชื่อชนิด Y Bearing plummer block units with housing d 12 mm รุ่น SY 503 M ทำด้วย Stainless Steel เป็นชนิดบอลเบริง อนุกรมมิติ 34 เส้นผ่านศูนย์กลางรูใน 12 ม.ม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 56 ม.ม. หนา 18 ม.ม. Housing ทำจากเหล็กหล่อมีขนาดความกว้าง 32 ม.ม. ยาว 127 ม.ม.



รูปที่ 3.2 ตัวรองรับเพลา

3. มอเตอร์กระแสตรง ใช้เป็นต้นกำลังในการขับเพลา TYPE T31978N116E8 C SER.NO A6093 กำลังขับ 300 วัตต์ 24 โวลต์ เส้นผ่านศูนย์กลางเพลา 14 ม.ม. ทำจาก Stainless Steel และอุปกรณ์จ่ายกระแส REGULATED DC POWER SUPPLY MODEL PAD 35-10L 0-35 โวลต์ 10 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 มอเตอร์กระแสตรง

4. ฐานรองรับ ขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 1 ม.หนา 16 ม.ม. ทำจากเหล็กเหนียว



รูปที่ 3.4 ฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

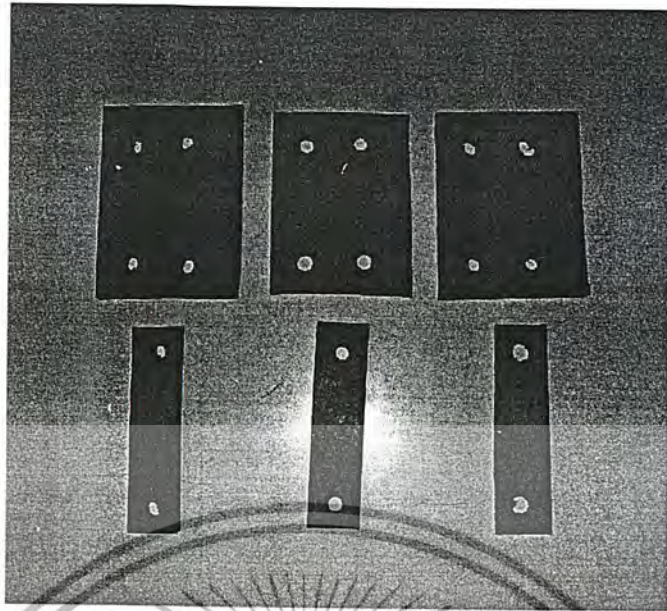
5. ชุดรับภาระ ตาชั่งสปริง สายพาน เครื่องชั่งสปริง ชนิด T6 รุ่น DP รับน้ำหนัก 0-15 กิโลกรัม



รูปที่ 3.5 ตาชั่งสปริงและตุ้มน้ำหนัก

6. ตัวแยกการสั่น (Isolator) แผ่นเหล็กกว้าง 46 ม.ม.ยาว150 ม.ม.หนา 6 ม.ม.และ 10 ม.ม. และแผ่นยางตัวอย่าง ยางรองแท่นเครื่อง ยางรองสะพานและยางรองน้ำกว้าง 35 ม.ม.ยาว 130 ม.ม. รองมอเตอร์กว้าง 95 ม.ม.ยาว125 ม.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ตัวแยกการสั่นสะเทือน

- อุปกรณ์รับสัญญาณการสั่นสะเทือน ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ DEWE-3010 โปรแกรม DASyLab เวอร์ชัน 5.6.1.10 ใช้งานบนระบบปฏิบัติการ Windows 98 และ Piezoelectric acceleration sensors



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์รับสัญญาณการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วิธีการทดลอง

#### ขั้นตอนการทดลอง

ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ 1. การหาค่าคงตัวของสปริง ( k ) 2.การหาค่าคงตัวของตัวหน่วง ( c ) และ 3.การทดลองและเก็บผลค่าสัญญาณการสั่นสะเทือน

#### 4.1.การหาค่าคงตัวของสปริง ( k )

1.1.นำยางทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดลองมาตัดเป็นแท่งให้ได้ขนาดหน้าตัด 100 ตารางมิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร

1.2.นำยางรองสะพานเข้าทดสอบกับเครื่อง Universal Tasting Machine ( UTM ) โดยการจับปลายทั้งสองของยางไว้กับปลายจับยึดทั้งสองของเครื่องแล้วให้เครื่องทดสอบโดยการดึงเพื่อหาค่าความเค้นและความเครียด

1.3.แสดงผลการทดสอบในรูปของค่าความสัมพันธ์ของค่าความเค้นกับระยะยืดออกของยาง

1.4.เปลี่ยนชนิดของยางเป็นยางรองแท่นเครื่องและยางพองน้ำตามลำดับ ทดลองตามข้อ 1.2.

1.5.หาค่าคงตัวของสปริง ( k ) โดยการ ใช้ความสัมพันธ์จากกราฟที่ได้มาคำนวณ

#### 4.2.การหาค่าคงตัวของตัวหน่วง ( c )

2.1.นำยางรองสะพานมายึดเข้ากับชุดทดลอง

2.2.ทำการทดสอบโดยใช้ก้อนเคาะส่งแรงชุดทดลอง

2.3.วัดค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนออกมาในรูประยะการกระจัดกับเวลาเพื่อหาค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนเพื่อมาคำนวณหาค่าคงตัวของตัวหน่วงต่อไป

2.4.เพิ่มจำนวนชั้นของยางจาก เริ่มเป็น 2 ชั้น และจาก 2 ชั้นเป็น 3 ชั้น แล้วบันทึกผลการทดลอง

2.5.เปลี่ยนเป็นยางรองแท่นเครื่องและยางพองน้ำตามลำดับและทดลองตามข้อ 2.1.

2.6.หาค่าคงตัวของตัวหน่วง ( c ) โดยการ ใช้ความสัมพันธ์จากกราฟที่ได้มาคำนวณ

#### 4.3.การทดลองเพื่อหาค่าการสั่นสะเทือน

3.1.ติดตั้งชุดทดลอง

3.2.จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์แล้ววัดค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นเวลา 60 วินาที แล้วบันทึกผล

3.3.เมื่อครบแล้วจากนั้นจะทดลองในส่วนของแบบมี load torque โดยการ ใช้มวลขนาด 500 1000

และ 1500 กรัมตามลำดับ อ่านค่าจากคราซิ่งสปริง แล้วทดลองตามข้อ 3.2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.4. นำยางรองสะพานมายึดเข้ากับชุดทดลอง
- 3.5. จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์แล้ววัดค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นเวลา 60 วินาที แล้วบันทึกผล
- 3.6. เพิ่มจำนวนชั้นของยางรองสะพานจาก 1 ชั้นเป็น 2 ชั้น
- 3.7. จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์แล้ววัดค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นเวลา 60 วินาที แล้วบันทึกผล
- 3.8. เพิ่มจำนวนชั้นของยางรองสะพานจาก 2 ชั้นเป็น 3 ชั้น
- 3.9. เมื่อครบแล้วเปลี่ยนจากยางรองสะพานเป็นยางรองแท่นเครื่องทำการทดลองตามข้อ 3.2.
- 3.10. เปลี่ยนจากยางรองแท่นเครื่องเป็นยางฟองน้ำแล้วทำการทดลองตามข้อ 3.2.
- 3.11. จากนั้นทำการทดลองในส่วนของการเพิ่มมวลของชุดทดลอง โดยการเพิ่มมวลขนาด 270 กรัมเข้าไปในชุดทดลองและทดลองตามข้อ 3.2.
- 3.12. เมื่อครบแล้วให้เพิ่มมวลขนาด 540 กรัมเข้าไปในชุดทดลองและทดลองตามข้อ 3.2.
- 3.13. นำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

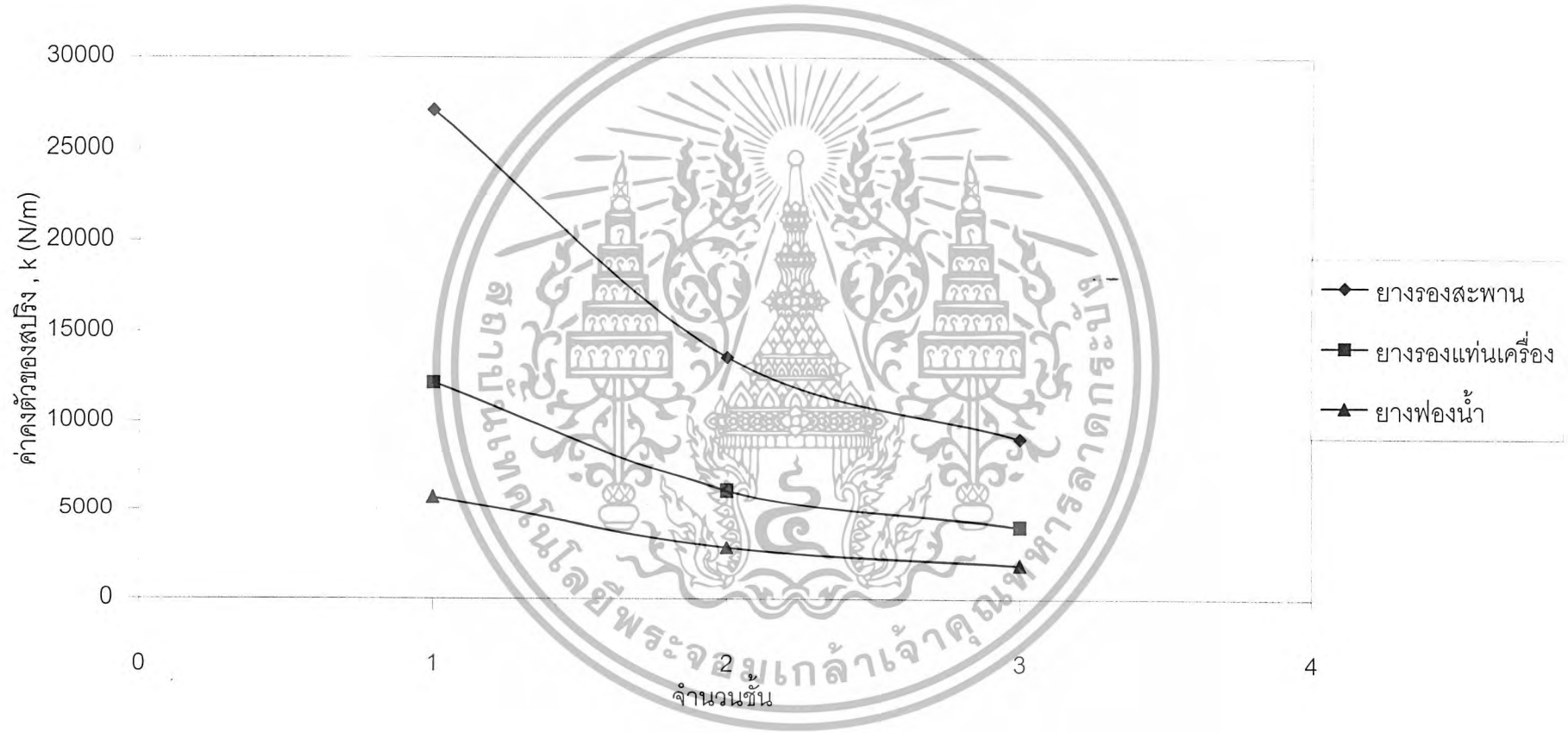
#### วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อลดการสั่นสะเทือน เมื่อใส่ยางรองแต่ละชนิดเข้ากับชุดทดลองทำให้ค่า  $\omega/\omega_n$  เปลี่ยนแปลงไป สังเกตได้จากกราฟ Power Spectrum ในภาคผนวก เมื่อไม่มียางรองกราฟจะขึ้นสูงมากเนื่องจากเกิดการสั่นพ้องของระบบในหลายๆตำแหน่ง จากนั้นเมื่อใส่ยางรองเข้าไปกราฟจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการสั่นพ้องได้ถูกลดลงไป โดยเมื่อใส่ยางรองแล้ว  $\omega_n$  ได้เปลี่ยนค่าไปทำให้ความถี่ของระบบไม่เท่ากับความถี่ธรรมชาติ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสั่นพ้อง ระบบจึงสั่นน้อยลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

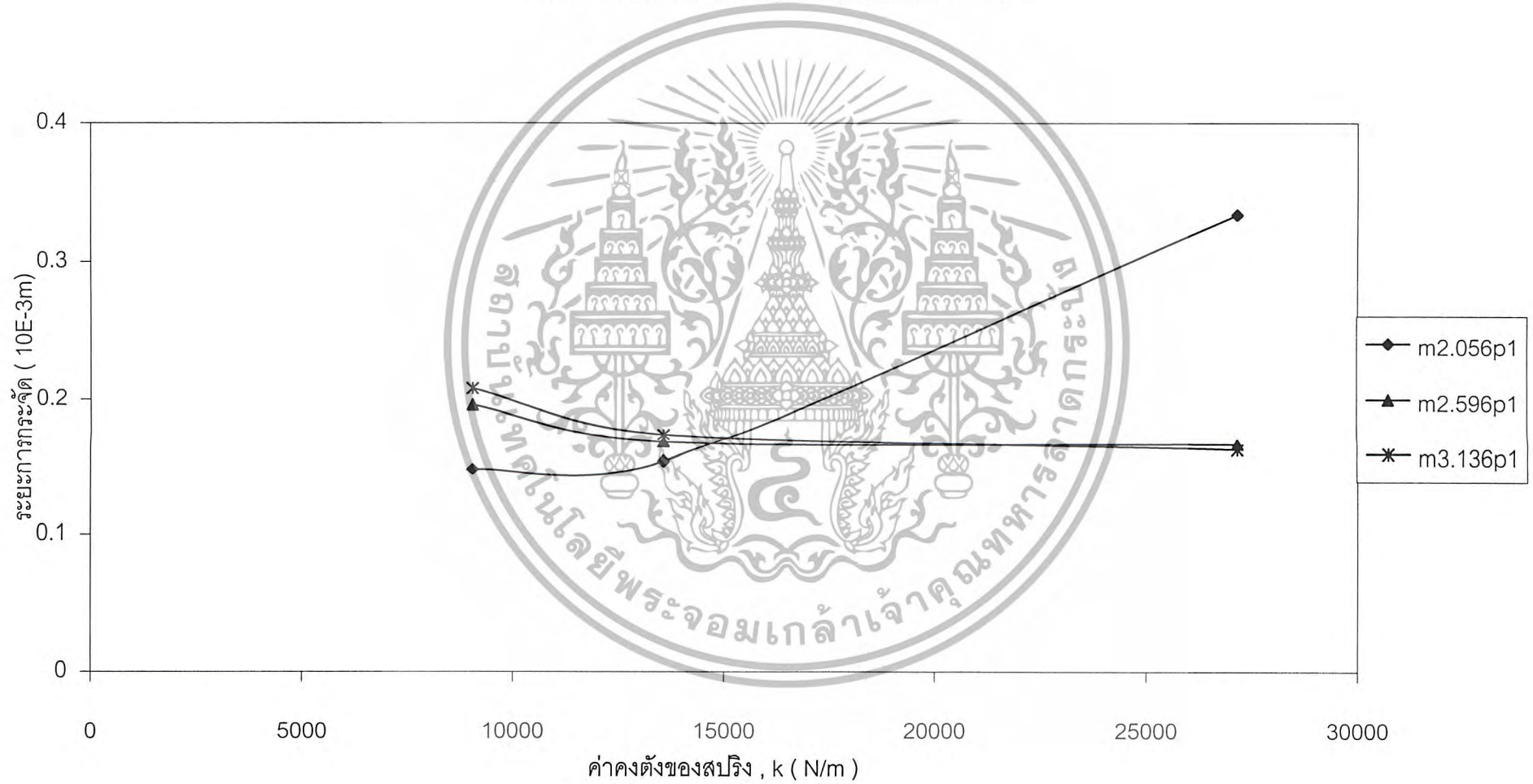
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของจำนวนชั้นความหนากับค่าคงตัวของสปริง



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของจำนวนชั้นความหนากับค่าคงตัวของตัวหน่วง



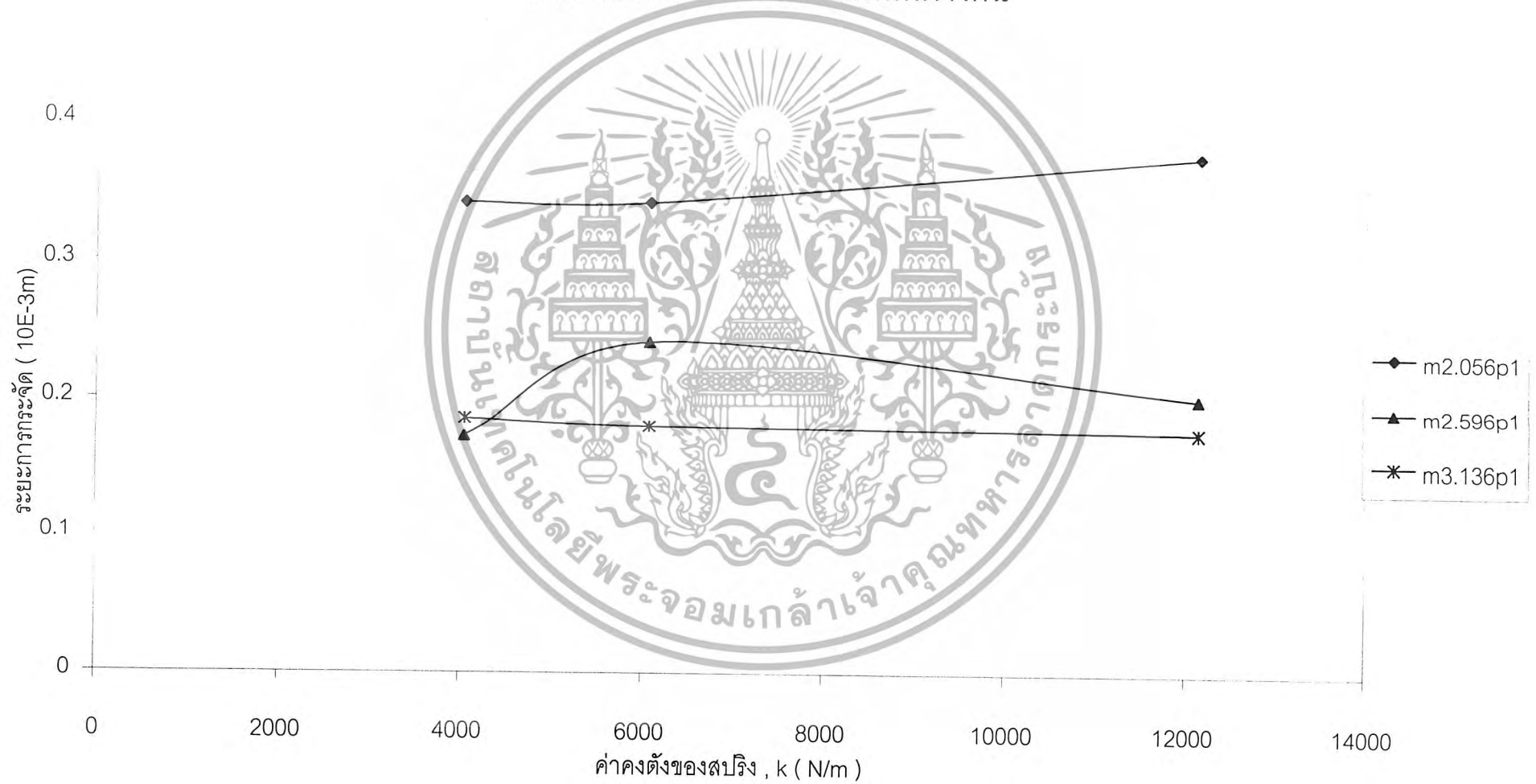
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองสะพาน  
กับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกัน



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองสะพาน  
กับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกัน



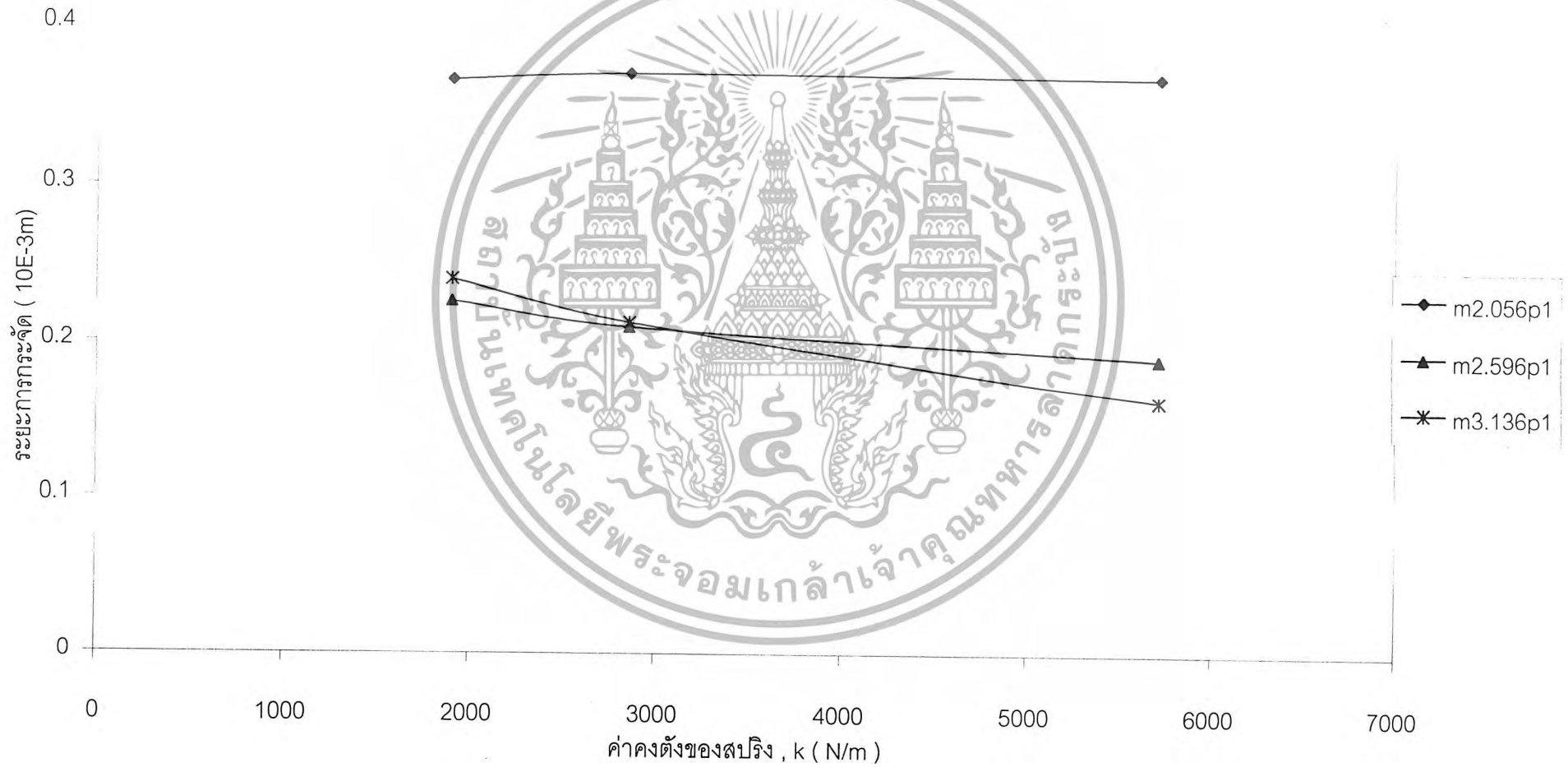
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองแท่นเครื่อง  
กับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกัน



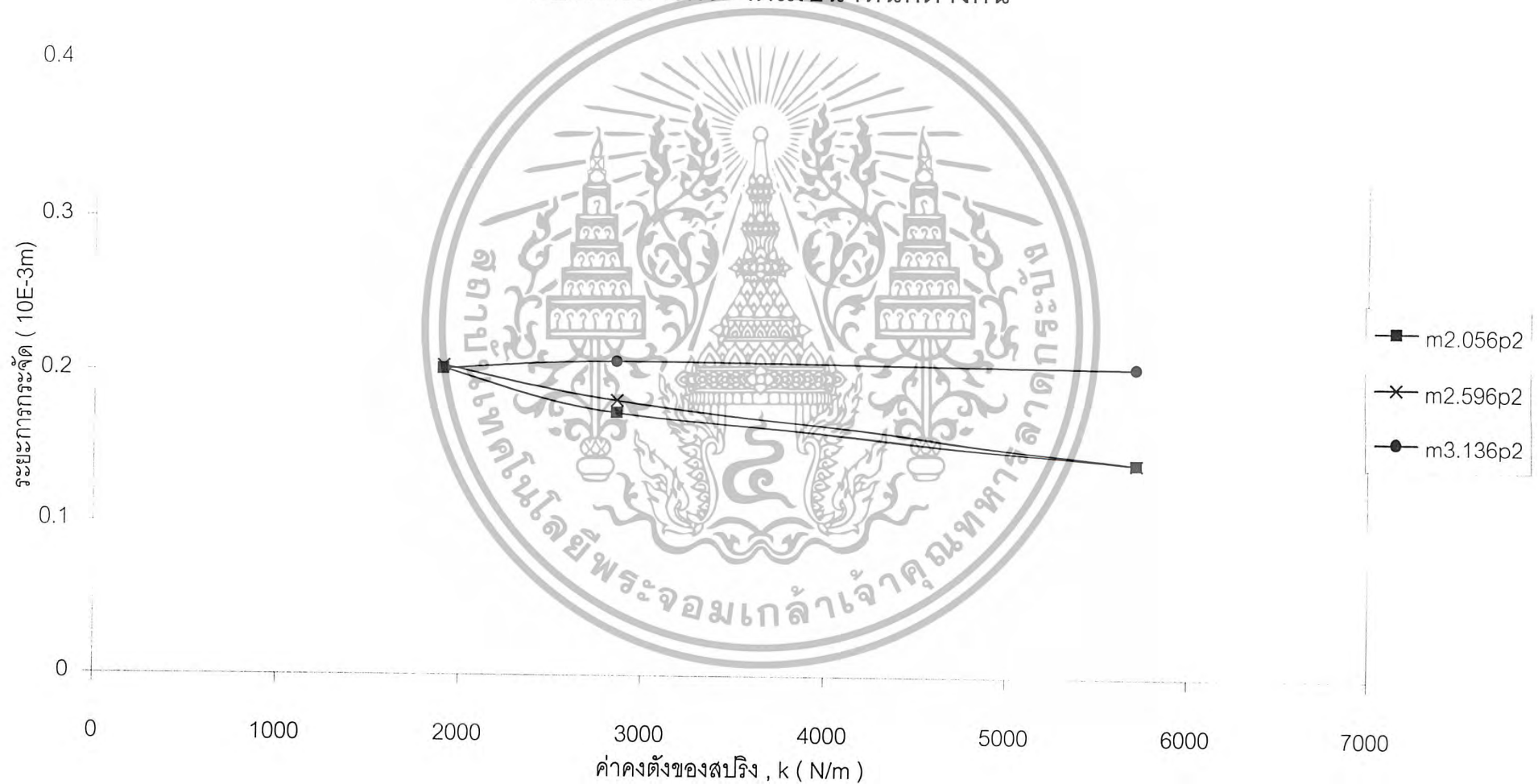
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองแท่นเครื่อง  
กับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกัน



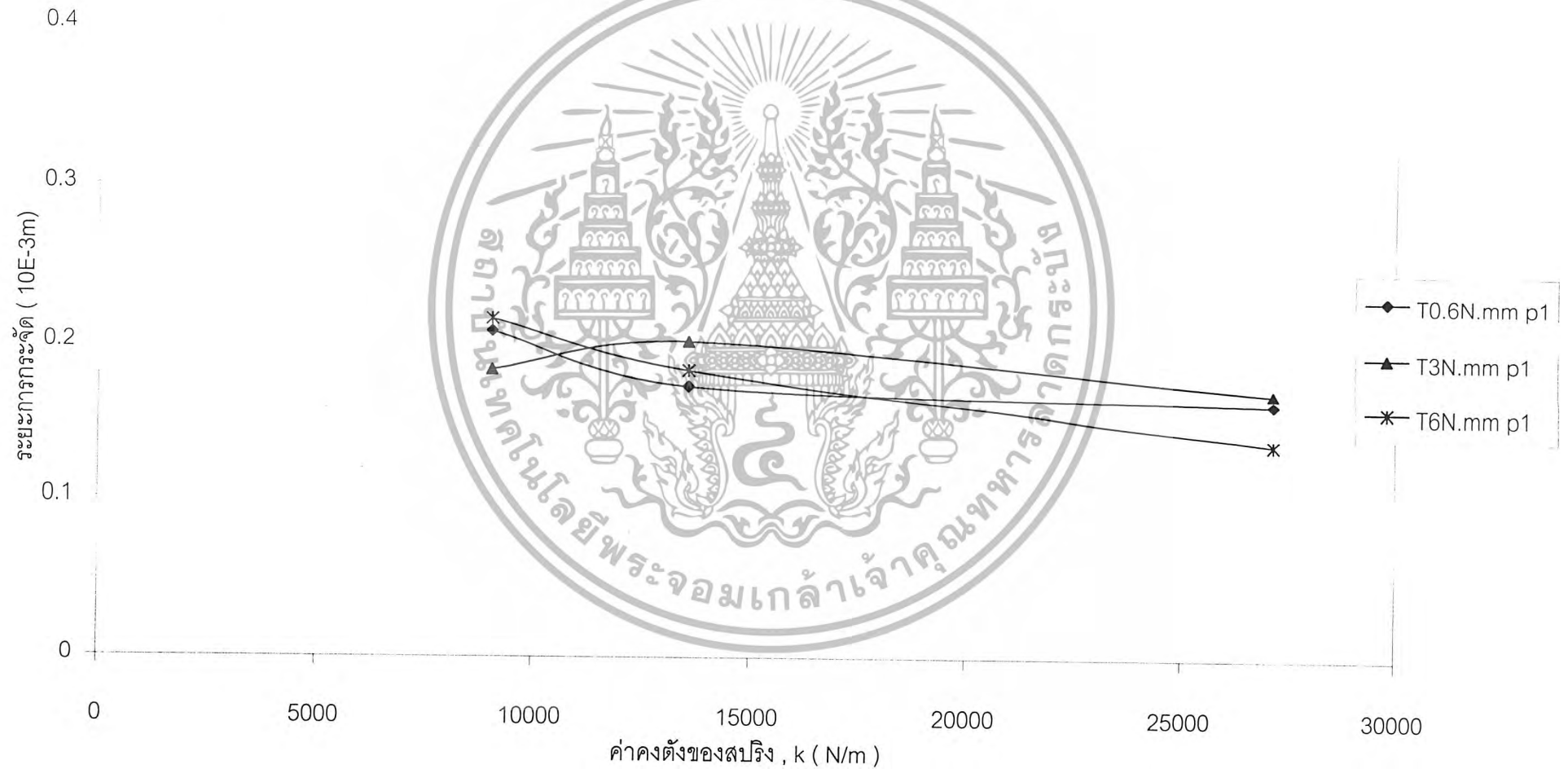
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางพองน้ำ  
กับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกัน



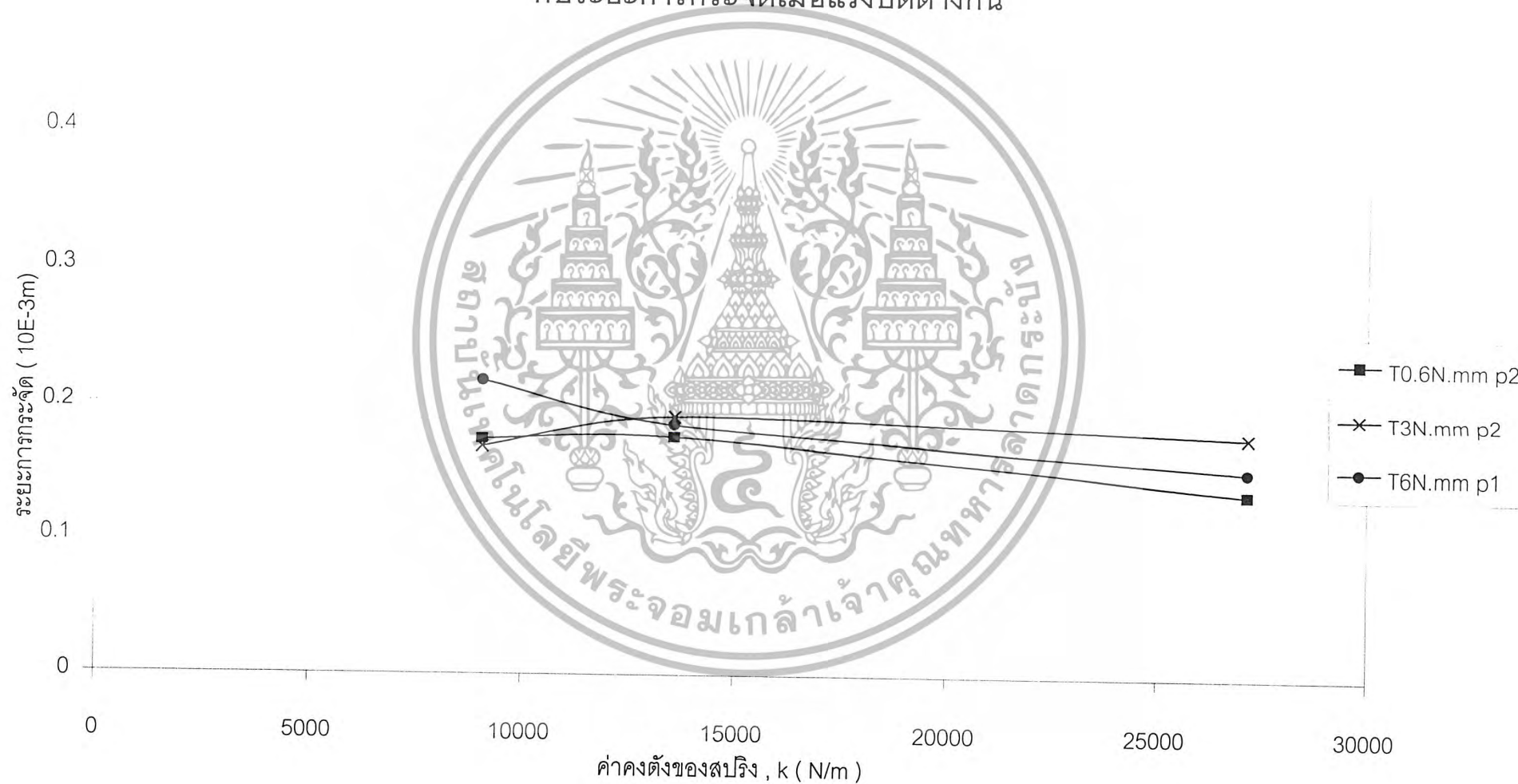
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางพองน้ำ  
กับระยะการกระจัดเมื่อน้ำหนักต่างกัน



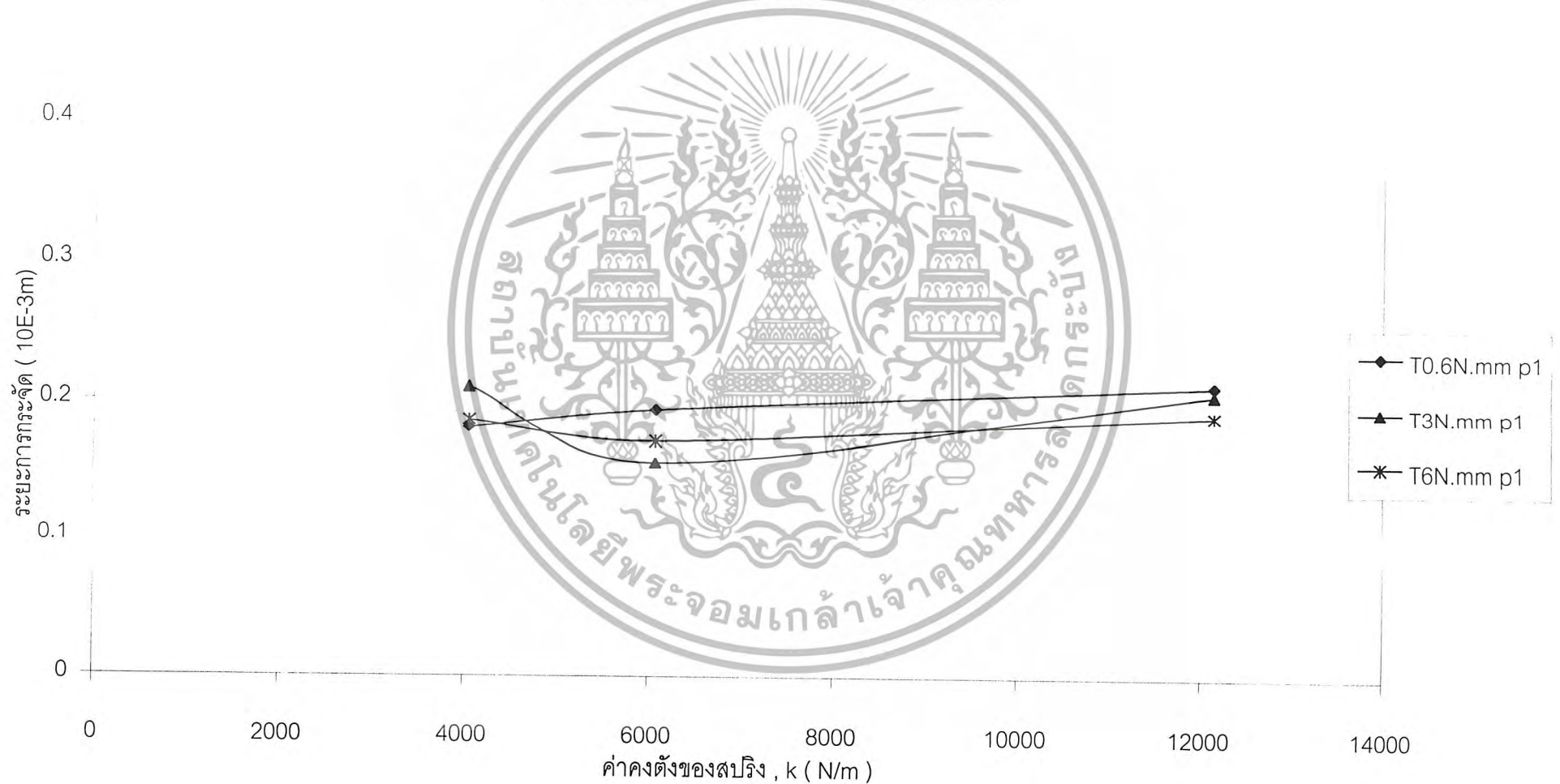
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองสะพาน  
กับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกัน



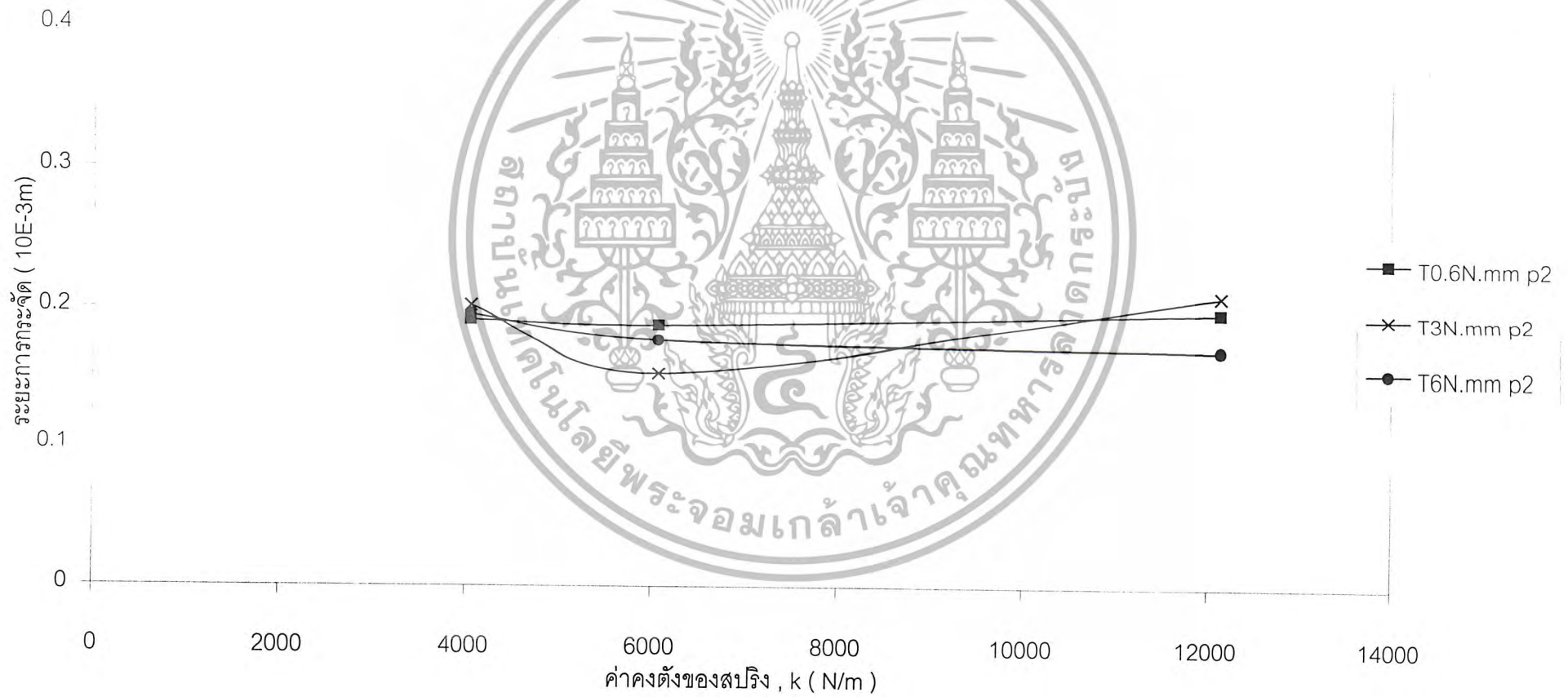
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของสปริงของยางรองสะพาน  
กับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกัน



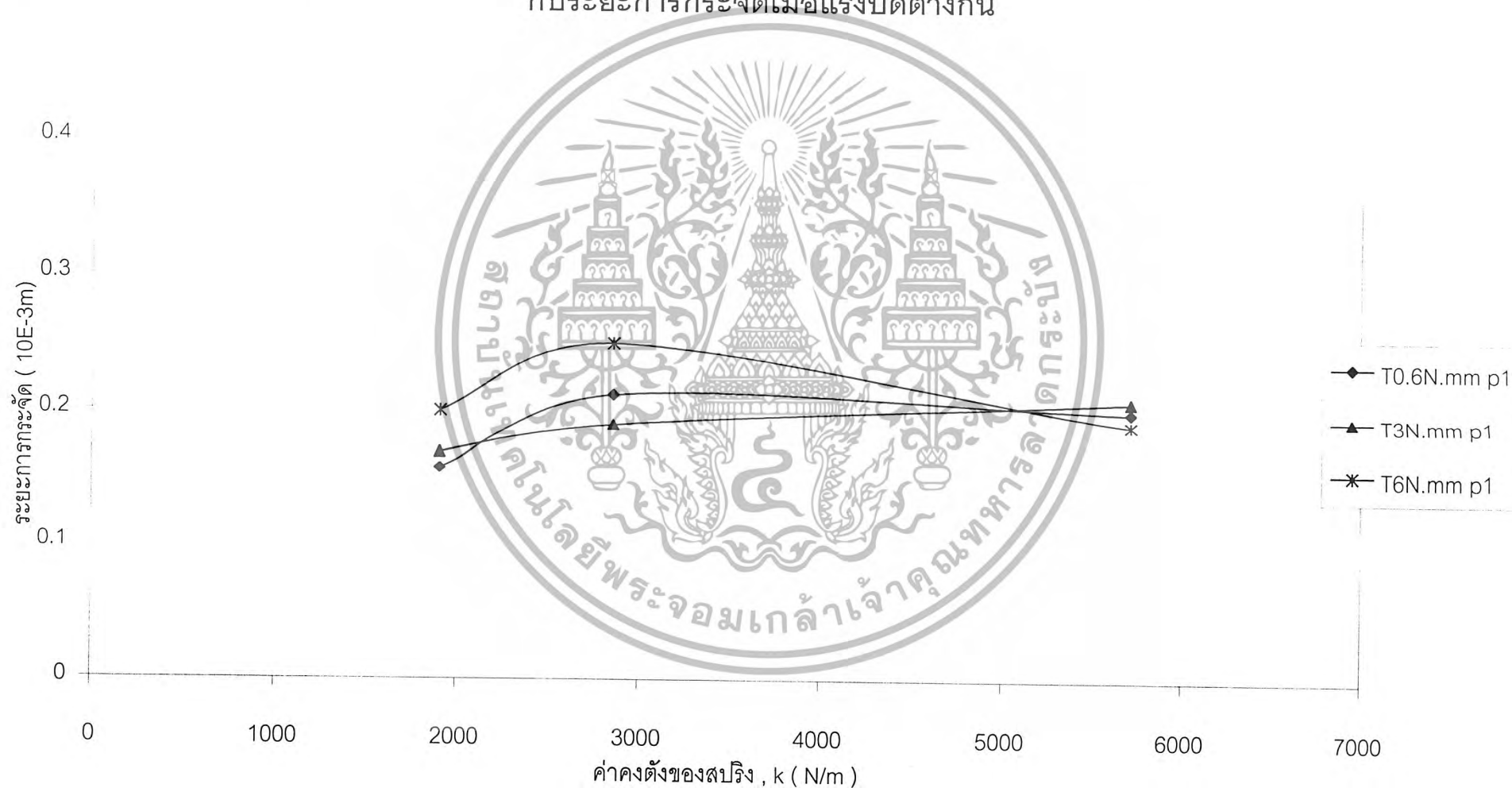
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองแท่นเครื่อง  
กับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกัน



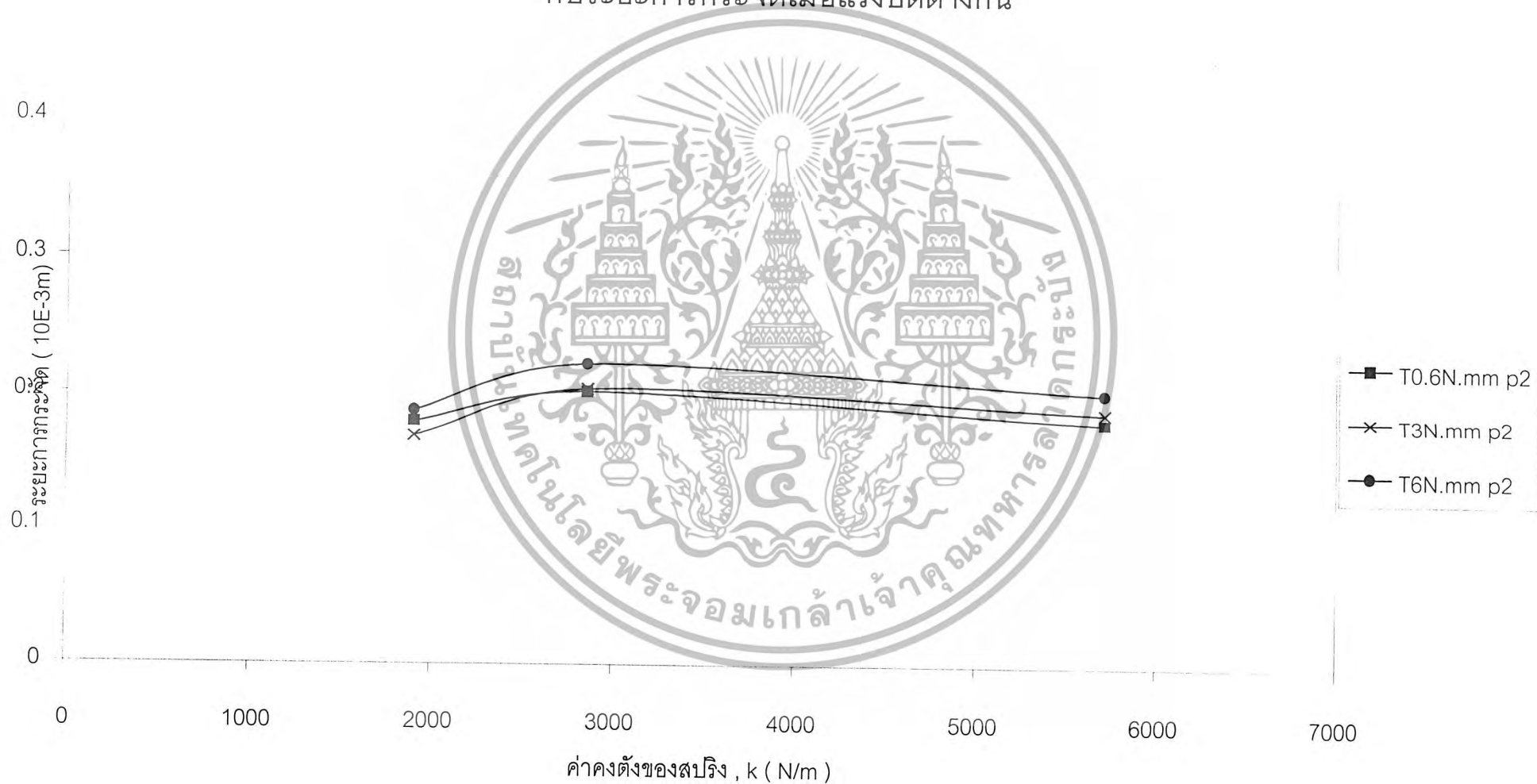
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางรองแท่นเครื่อง  
กับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกัน



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวสปริงของยางพองน้ำ  
กับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกัน



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของสปริงของยางพองน้ำ  
กับระยะการกระจัดเมื่อแรงบิดต่างกัน



## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 6.1.สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองเราสามารถวัดค่าแรงต้านสะเทือนของชุดทดลองที่สร้างขึ้น โดยใช้ computer and software เป็นเครื่องวัดแรงต้านสะเทือน จากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่า

- 1.เมื่อ ไม่มีการเพิ่มน้ำหนักให้แก่ระบบและไม่มี Load torque การกระจัดจะต่ำสุดที่ขางพองน้ำ 3 ชั้น
- 2.มีน้ำหนักเพิ่ม การกระจัดจะต่ำสุดที่ ขวงรองสะพานความหนา 1 ชั้น
- 3.เมื่อมี Load torque การกระจัดจะต่ำสุดที่ขางรองสะพานความหนา 1 ชั้น
4. ค่า  $k$ ,  $c$ ,  $m$  มีความสัมพันธ์กับแรงต้านสะเทือนของเครื่องจักร การเลือกตัวแยกการสั่นสะเทือนที่เหมาะสม จะช่วยลดการสั่นสะเทือนให้เหลือน้อยที่สุดได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า  $k$  มีผลมากต่อการสั่นสะเทือนของระบบ ดังกล่าว

จากผลการศึกษาทดลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรอุตสาหกรรมได้

#### 6.2.ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองอาจจะได้ค่าที่คลาดเคลื่อนจากทฤษฎี จึงมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ในการติดตั้งอุปกรณ์แต่ละครั้งควรทำอย่างระมัดระวัง และทำด้วยความแม่นยำมีอุปกรณ์วัดที่แน่นอน เพื่อให้การวัดแต่ละครั้งเป็นไปด้วยความแม่นยำและได้ค่าที่แน่นอน
2. ระหว่างการทดลองต้องมีการควบคุมสิ่งแวดล้อมให้ดี หากสิ่งแวดล้อมภายนอกมีการรบกวนจะทำให้การสั่นสะเทือนของระบบมีค่าสูงขึ้น
3. การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ทำได้ยาก เนื่องจากกระแสไฟในมอเตอร์ตอนเริ่มหมุนจะมีค่าสูง กระแสไฟจะเกิดการกระชาก ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าไม่คงที่ ควรมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่แม่นยำ
4. มอเตอร์ที่ใช้ควรมีแรงบิดที่สูงพอ เมื่อเวลาได้ torque เข้าไปเพื่อเพิ่มภาระให้แก่ระบบ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าคงที่กว่านี้
5. คัปปลิงที่ใช้เป็นแบบยึดหยุ่น เมื่อมีการทดลองใช้งานหลายๆครั้ง อาจทำให้เกิดการสึกหรอ ทำให้การวัดค่าต่างๆมีโอกาสผิดพลาด เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำยิ่งขึ้นควรใช้คัปปลิงแบบที่ทนทานกว่านี้ และควรมีการเปลี่ยนคัปปลิงเมื่อมีการสึกหรอ
6. คาซังที่ใช้ในการอ่านค่าควรมีมาตรฐานและมีความละเอียดสูงเพียงพอ ค่าที่อ่านได้จะไม่มีคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ในการติดตั้ง ACCELEROMETER ผิวหน้าที่ติดตั้งควรจะเรียบสนิทและสะอาดอยู่ตลอดเวลาจึงจะส่งสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

TORQUE

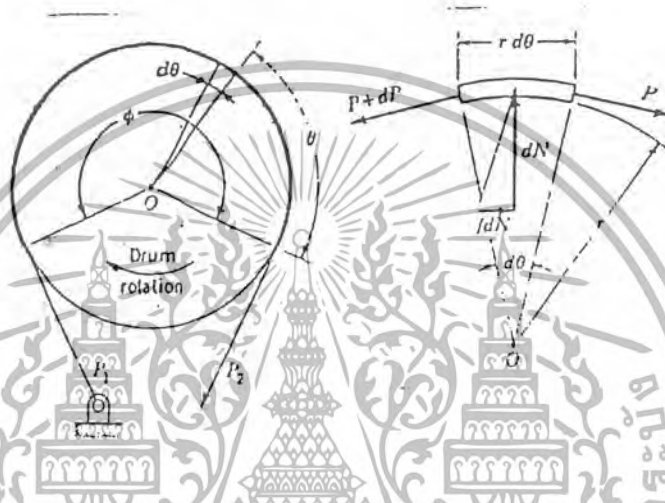
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### TORQUE

การคำนวณหาค่าแรงบิด

การคำนวณหาค่าแรงบิด ใช้หลักการ BAND-TYPE CLUTCHES AND BRAKES โดยวิเคราะห์ได้ดังรูป



รูปที่ ก.1 แสดงแรงดึงใน Brake band

ผลของแรงเสียดทานในสายพานและการหมุนของดรัม ( Drum ) ทำให้แรงดึง  $P_2$  มีค่าน้อยกว่าแรงปฏิกิริยาของจุดยึด  $P_1$  กำหนดให้มุมของสายพานที่สัมผัสผิวของดรัมมีค่าเป็น  $d$  ภายใต้เงื่อนไขสถานะสมดุล จะได้ว่า

ผลรวมแรงลัพธ์ในแนวตั้ง ( แกน Y )

$$\sum F_y = 0 \quad (ก.1)$$

$$(P + dP)\sin d(\theta/2) + P\sin d(\theta/2) - dN = 0 \quad (ก.2)$$

$$dN = Pd\theta \quad (ก.3)$$

ผลรวมแรงลัพธ์ในแนวนอน ( แกน X )

$$\sum F_x = 0 \quad (ก.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(P + dP)\cos d(\theta/2) - P\cos d(\theta/2) - fdN = 0 \quad (\text{ก.5})$$

$$dN = fdN \quad (\text{ก.6})$$

แทนค่าของ  $dN$  จากสมการ ( 1 ) ลงในสมการที่ ( 2 ) แล้วอินทิเกรต จะได้ว่า

$$\int_{P_2}^{P_1} dP/P = f \int_0^\phi d\theta \quad (\text{ก.7})$$

$$\ln P_1/P_2 = f\phi \quad (\text{ก.8})$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของแรง  $P_1$  และ  $P_2$  ดังสมการ

$$P_1/P_2 = e^{f\phi} \quad (\text{ก.9})$$

และสามารถหาแรงบิด ( TORQUE ) ได้จากสมการ

$$T = (P_1 - P_2)D/2 \quad (\text{ก.10})$$





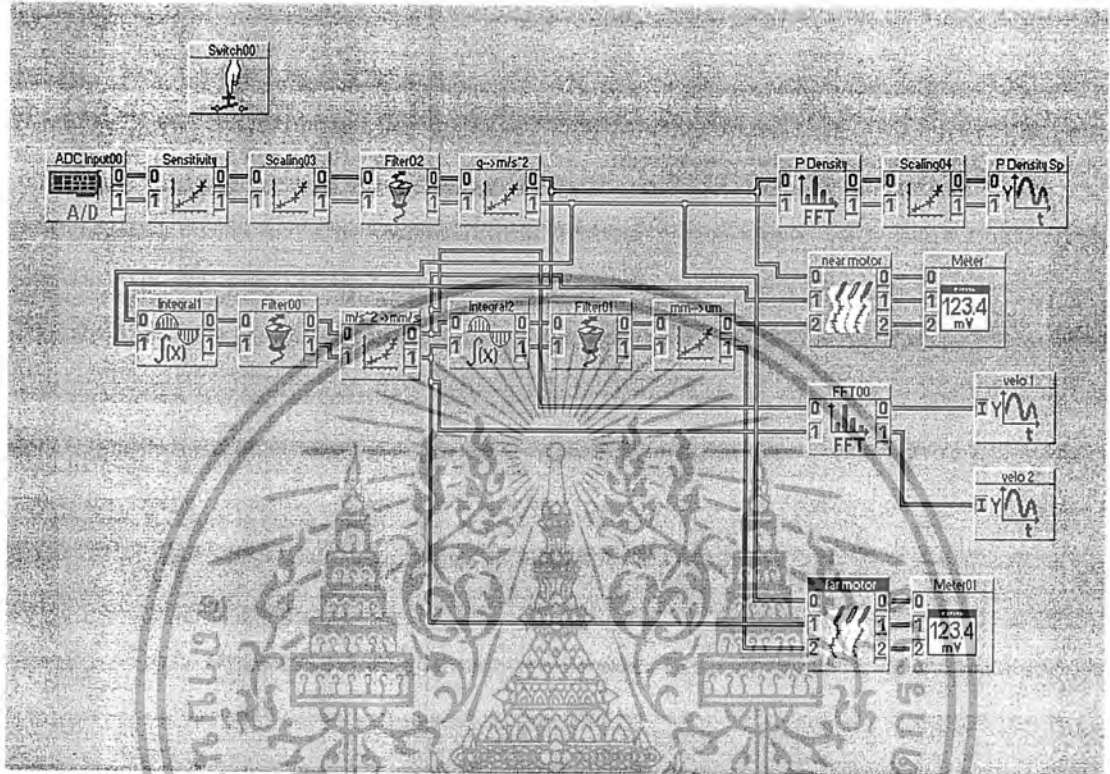
ภาคผนวก ข.

## โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

# โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ



รูปที่ ข.1 แผนผังของโปรแกรมDASyLabสำหรับรับสัญญาณและวิเคราะห์ผล

Module ที่ใช้ในแผนผังโปรแกรม DASyLab

1. A/D module ทำหน้าที่รับสัญญาณมาจาก sensor โดยแปลงสัญญาณจาก analog เป็น digital
2. Sensitivity module ทำหน้าที่ปรับค่าสัญญาณและแปลงหน่วยของสัญญาณให้ถูกต้อง
3. Scaling module ทำหน้าที่ปรับค่าสัญญาณให้แสดงอยู่ในรูปกราฟเส้นตรง
4. Filter module ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนออก
5. Integration module ทำหน้าที่ integrate สัญญาณ
6. FFT module ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจาก time domain เป็น frequency domain
7. Y/T module ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้ออกมาเป็นกราฟ
8. Recorder module ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้ออกมาเป็นกราฟหน้าจอแบบ osilloscope
9. Meter module ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้ออกมาเป็นตัวเลข

การทำงานของโปรแกรม DASyLab

1. A/D module รับสัญญาณมาจาก sensor ในหน่วย volt
2. แล้วนำค่าสัญญาณมาปรับค่า sensitivity ของ sensor ที่ Sensitivity module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำค่าสัญญาณที่ได้มาผ่าน Scaling module เพื่อแปลงหน่วยจากหน่วย volt เป็น หน่วย g และทำให้กราฟเป็นเส้นตรง
4. นำค่าสัญญาณที่ได้มาผ่าน Filter module เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกโดยตั้งความถี่ที่สูงกว่า 10 Hz สามารถผ่านได้
5. หลังจากสัญญาณที่ผ่าน Filter module นำมาแปลงหน่วยจากหน่วย g เป็นหน่วย  $m/s^2$  ใน Scaling module
6. นำสัญญาณส่วนหนึ่งมาเข้า FFT module เพื่อแปลงสัญญาณจาก time domain เป็น frequency domain
7. แล้วนำสัญญาณที่ได้มาเข้า Scaling module เพื่อแปลงหน่วยและปรับกราฟให้อยู่ในรูปเส้นตรง แล้วนำสัญญาณที่ได้มาแสดงผลใน Y/T module
8. สัญญาณที่ได้จากข้อ 5 นำมาเข้า Integration module เพื่อ integrate สัญญาณจากความเร่งเป็นความเร็ว
9. แล้วนำสัญญาณมาเข้า Filter module เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกโดยตั้งความถี่ที่สูงกว่า 10 Hz สามารถผ่านได้อีกครั้งหนึ่ง
10. หลังจากสัญญาณที่ผ่าน Filter module นำมาแปลงหน่วยจากหน่วย m/s เป็นหน่วย mm/s ใน Scaling module
11. นำสัญญาณส่วนหนึ่งมาเข้า FFT module เพื่อแปลงสัญญาณจาก time domain เป็น frequency domain ในช่วงของความเร็วกับความถี่โดยแสดงผลออกมาเป็นกราฟใน Y/T module
12. นำสัญญาณที่ได้จากข้อ 11 มาเข้า Recorder module เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา แล้วนำสัญญาณมาเข้า Meter module เพื่อให้แสดงออกมาเป็นตัวเลข
13. นำสัญญาณที่ได้จากข้อ 11 มาเข้า Integration module เพื่อ integrate สัญญาณจากความเร็วเป็นการกระจัด
14. แล้วนำสัญญาณมาเข้า Filter module เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกโดยตั้งความถี่ที่สูงกว่า 10 Hz สามารถผ่านได้อีกครั้งหนึ่ง
15. หลังจากสัญญาณที่ผ่าน Filter module นำมาเพื่อปรับกราฟให้อยู่ในรูปเส้นตรงใน Scaling module
16. แล้วนำสัญญาณมาเข้า Recorder module เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลา แล้วนำสัญญาณมาเข้า Meter module เพื่อให้แสดงออกมาเป็นตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

ลักษณะของยาง

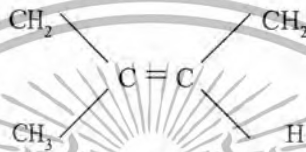
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### ลักษณะของยาง

#### โครงสร้างทางเคมี

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียว มีสมบัติที่สำคัญคือความยืดหยุ่น โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อยของยางธรรมชาติประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>) มีชื่อทางเคมีว่า ไอโซพรีน (isoprene) หน่วยย่อยดังกล่าวเมื่อเกิดการเชื่อมโยงเป็นโมเลกุล จะเรียงตัวกันแบบ cis-



เรียกชื่อโมเลกุลยางว่าเป็น polyisoprene มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณหนึ่งล้าน พืชที่ให้น้ำยางสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงการค้าคือ ยางธรรมชาติได้จากพืชในรูปยาง ยางพาราและยางวายุเล ส่วนประกอบของน้ำยาง

น้ำยางสดจากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือครีมโดยมีอนุภาคยางแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ อนุภาคยางมีรูปร่างกลมหรือรูปลูกแก้ว มีขนาด 0.05 - 5 ไมครอน ความหนาแน่น 0.975 - 0.980 กรัม/มิลลิลิตร มีความเป็นกรด - ค่าประมาณ 6.5 - 7.0 มีส่วนประกอบดังนี้

ส่วนประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	36
เนื้อยางแห้ง	33
สารกลุ่มโปรตีนและไขมัน	1 - 1.2
สารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต	1
เถ้า	<=1
น้ำ	64

ผิวของอนุภาคยางเมื่อมีเยื่อหุ้ม (membrane) ที่ประกอบด้วยไขมันและโปรตีน โดยแต่ละอนุภาคมีอนุโมลตบของโปรตีนอยู่รอบนอก ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคยาง ซึ่งมีผลให้น้ำยางสามารถคงสภาพเป็นของเหลวได้ ดังนั้นเมื่อมีการทำลายเยื่อหุ้มอนุภาคหรือมีการสะเทินอนุโมลตบ จะทำให้อนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางเกิดการรวมตัวจับกันเป็นก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเลือกใช้ยาง

ยางที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อาจเป็นยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือใช้ยางทั้งสองประเภทผสมกัน

ยางธรรมชาติใช้ทั้งในรูปยางแห้ง ได้แก่ ยางแผ่น ยางแท่ง และยางที่มีความหนืดคงที่ เป็นต้น และในรูปของเหลว ได้แก่ น้ำยางข้น

ยางสังเคราะห์ หมายถึง ยางที่สังเคราะห์ขึ้นโดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสารตั้งต้นชนิดต่างๆ ยางสังเคราะห์ที่ใช้กันมากแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. ยางสังเคราะห์ชนิดใช้งานทั่วไป มีคุณภาพใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ ได้แก่ ยาง SBR ยาง BR ยางสังเคราะห์โพลีไอโซพรีน ยาง EPDM

2. ยางสังเคราะห์ชนิดพิเศษมีคุณภาพเด่นในบางด้าน เช่น ทนต่อน้ำมัน ทนต่ออุณหภูมิสูง สามารถกักเก็บลมได้อย่างดี ได้แก่ ยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ ยางบิวทาย และยางซิลิโคน

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง วัตถุดิบที่จำเป็นต้องใช้และตัวอย่างสูตรพื้นฐานแสดงไว้ในตารางที่ 51 ส่วนการเลือกใช้ยางธรรมชาติชนิดต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.  
กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับ

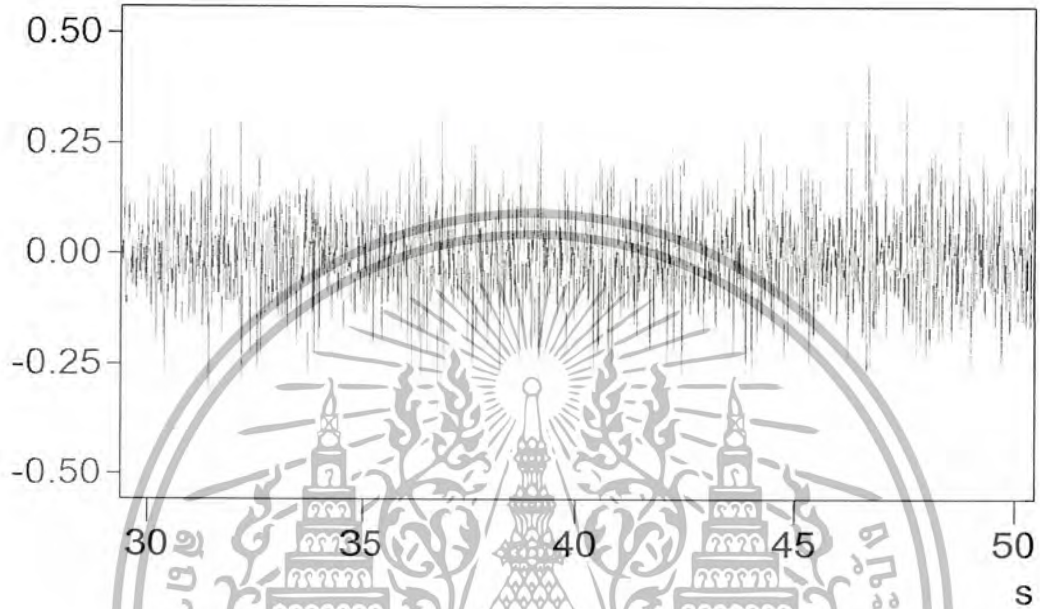


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

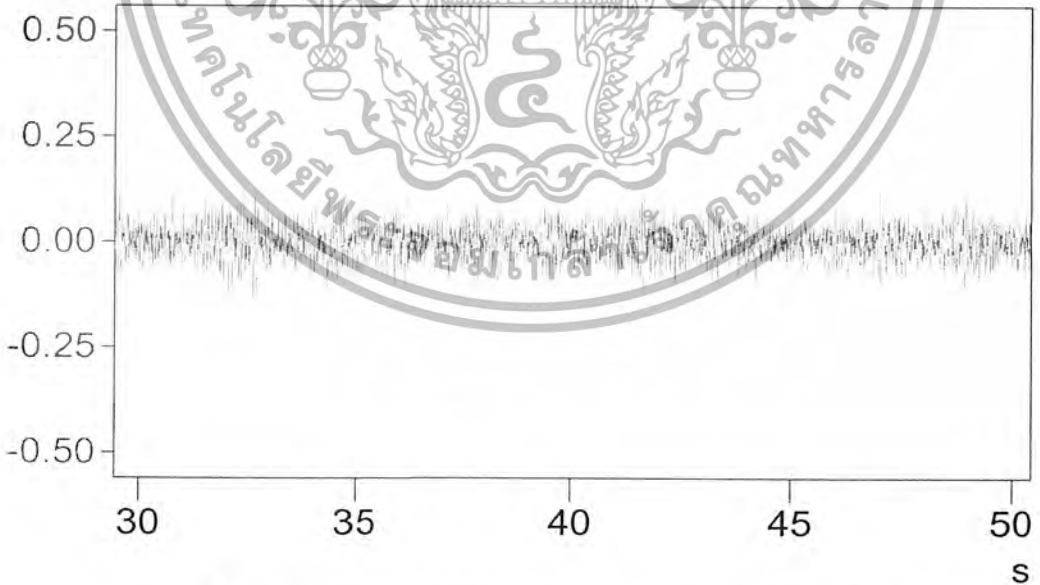
## ภาคผนวก ง.

### กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลา

เมื่อไม่มียางรอง



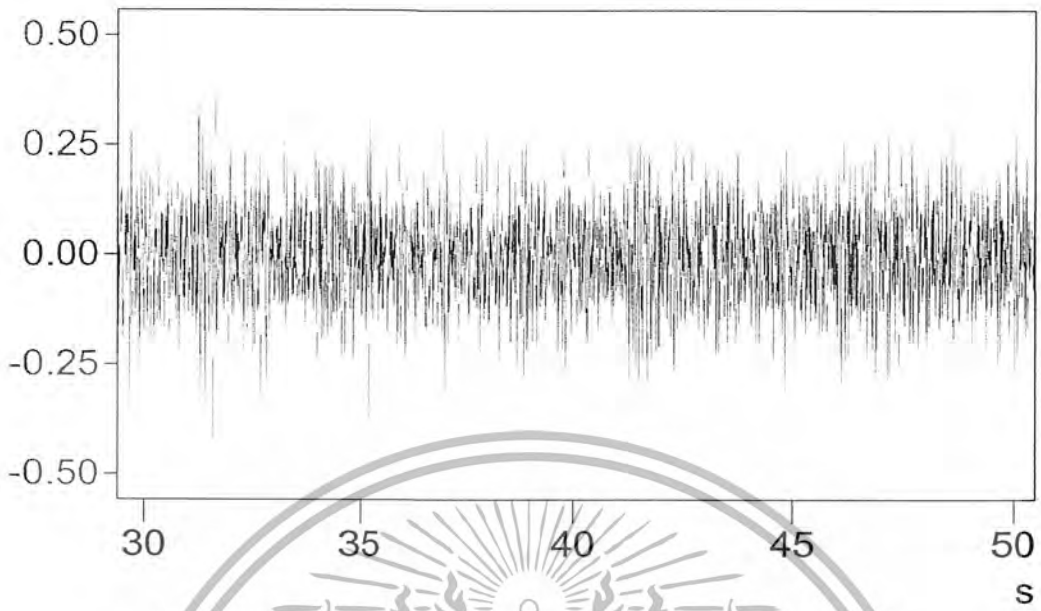
รูปที่ ง.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



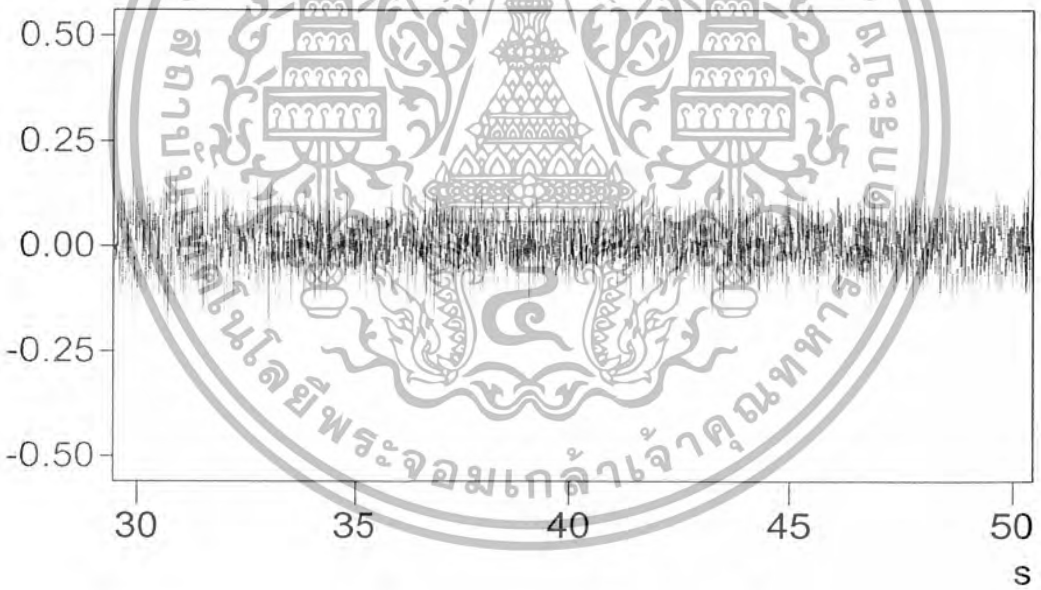
รูปที่ ง.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขางฟองน้ำความหนา 1 ชั้น



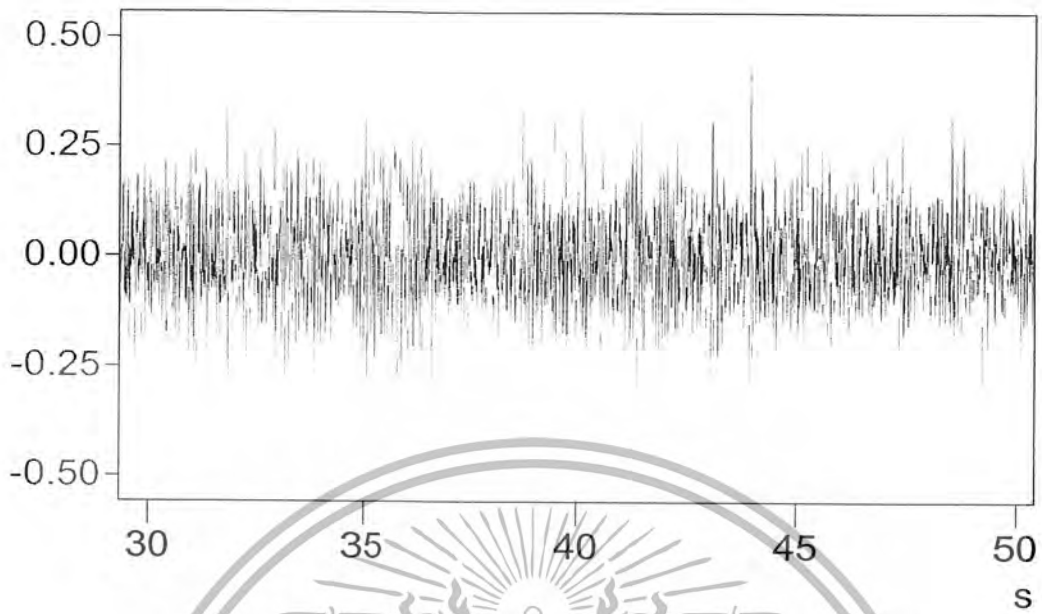
รูปที่ ๓.๓ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



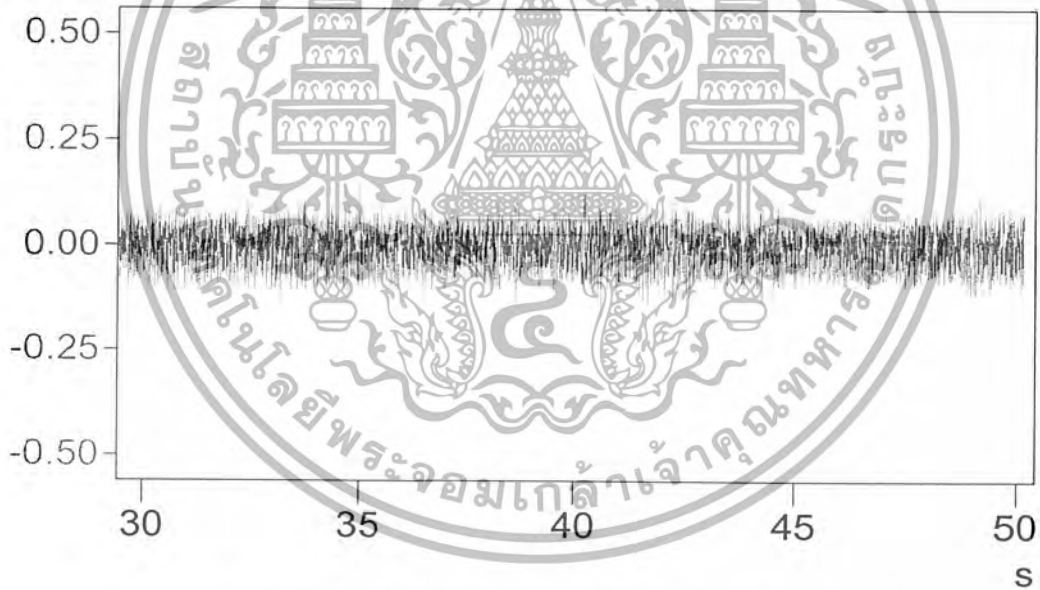
รูปที่ ๓.๔ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 2 ชั้น



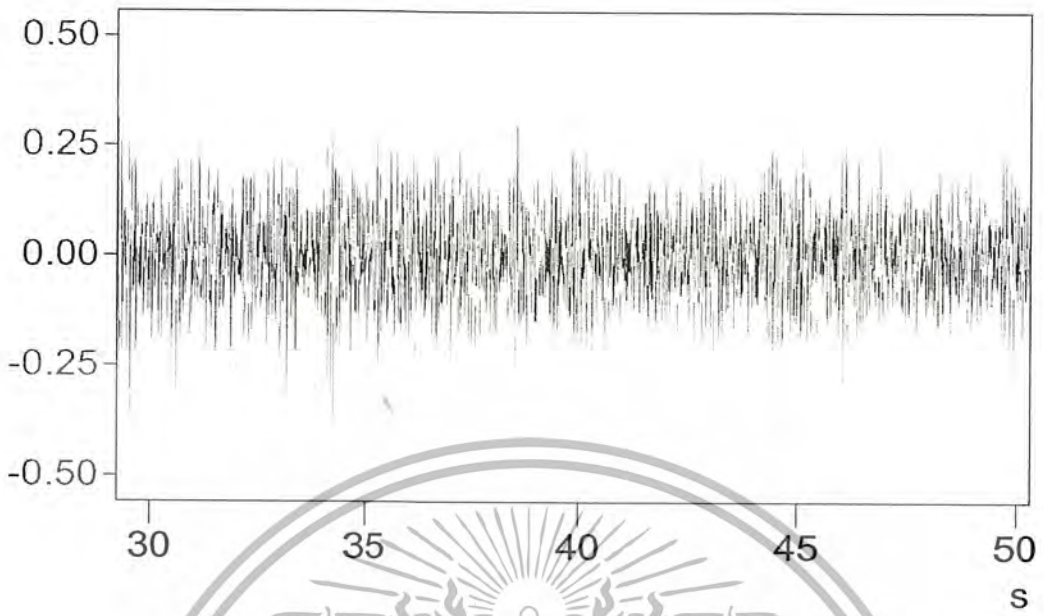
รูปที่ ง.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



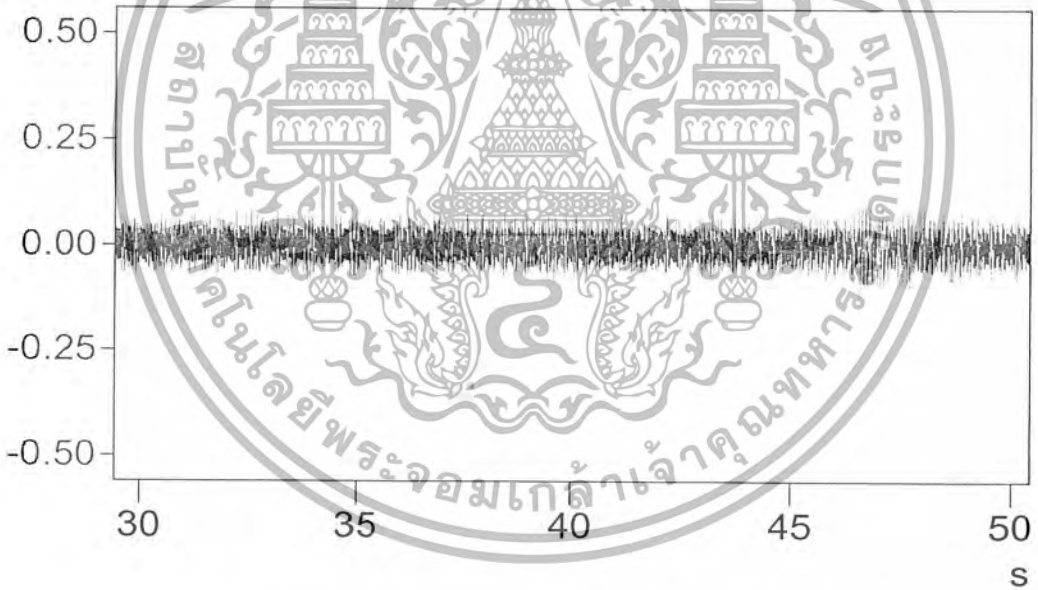
รูปที่ ง.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 3 ชั้น



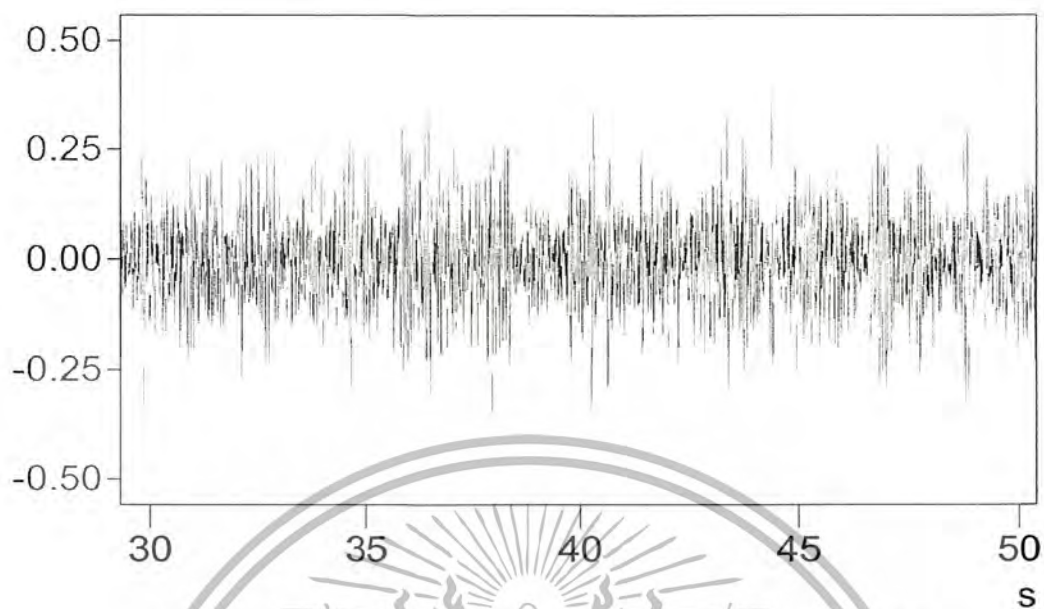
รูปที่ ง.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



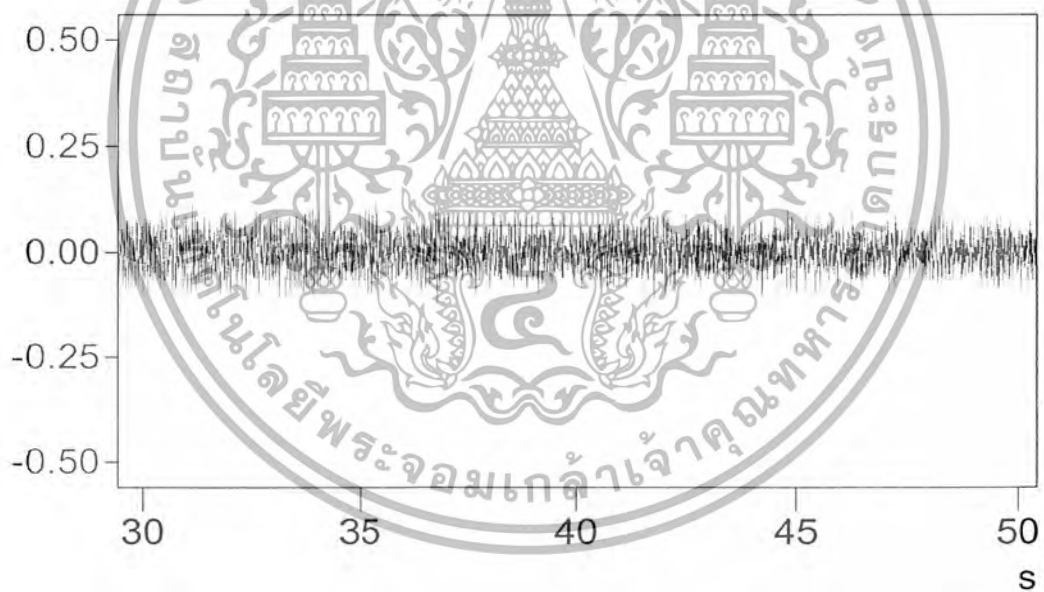
รูปที่ ง.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขารองแทนเครื่องความหนา 1 ชั้น



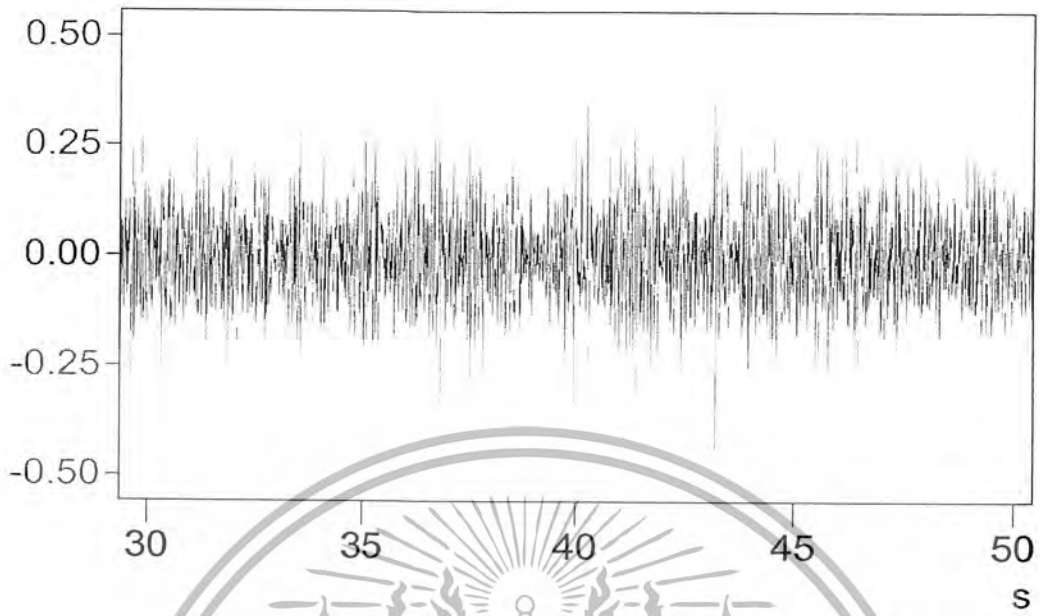
รูปที่ ๙.๙ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



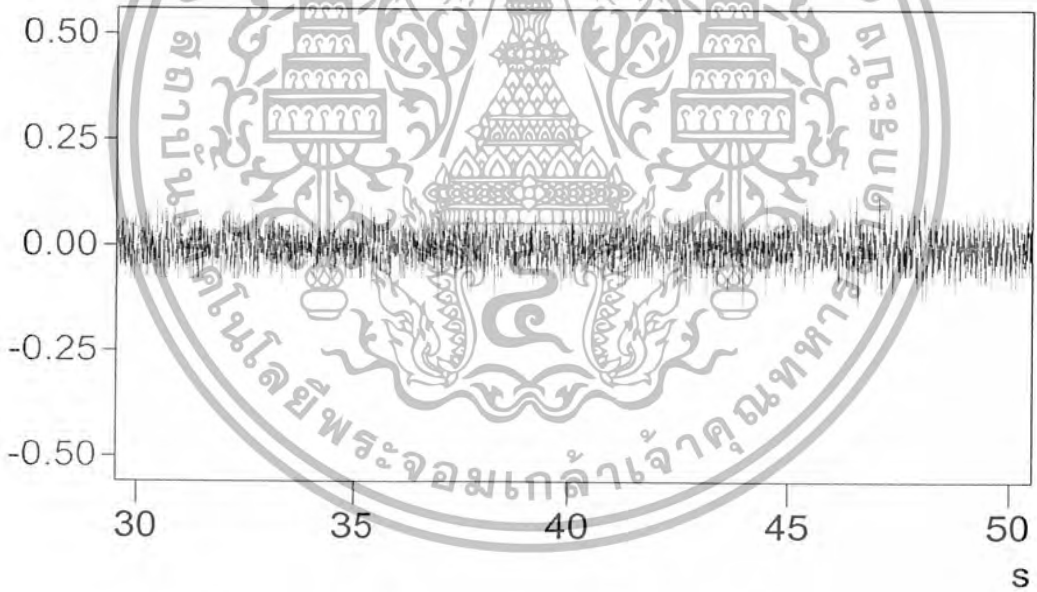
รูปที่ ๙.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 2 ชั้น



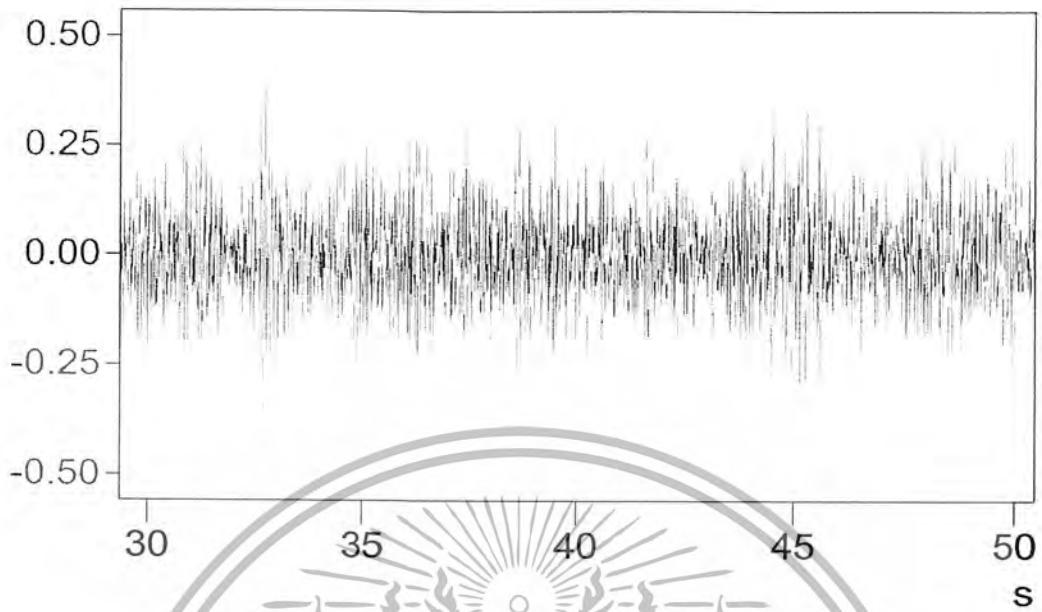
รูปที่ ง.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



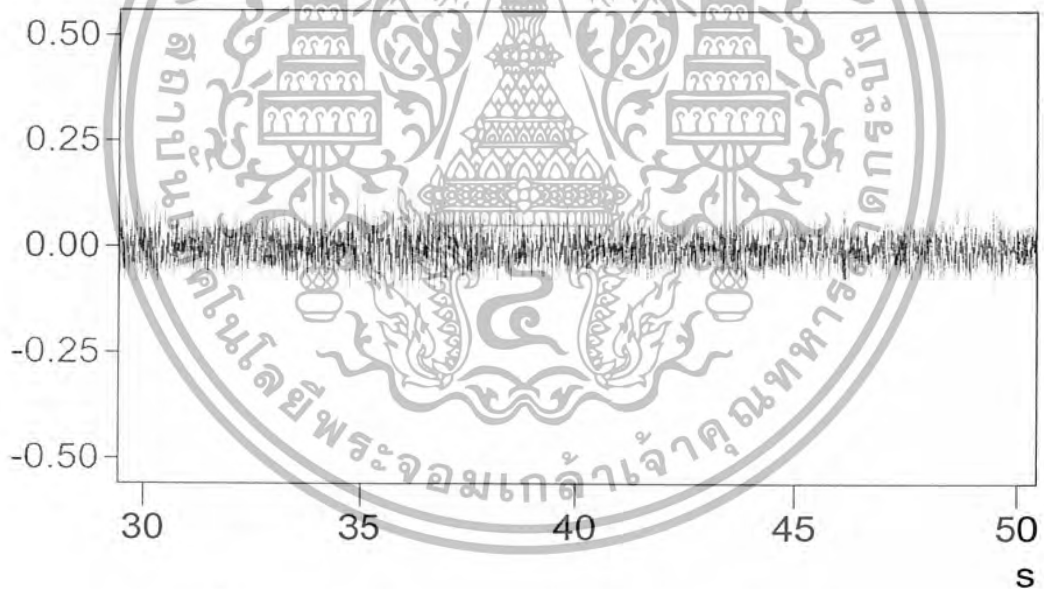
รูปที่ ง.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 3 ชั้น



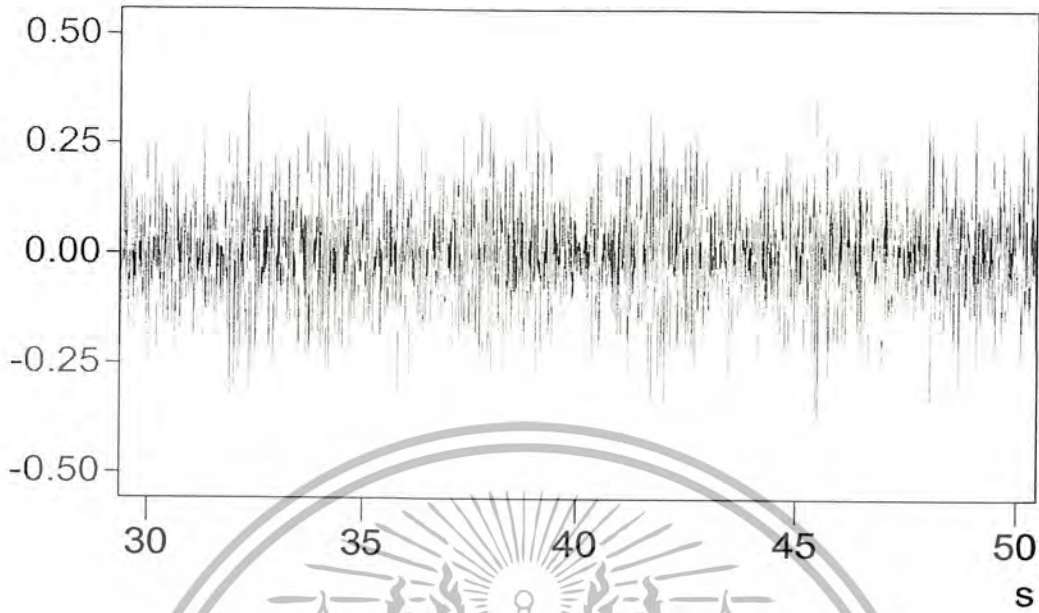
รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



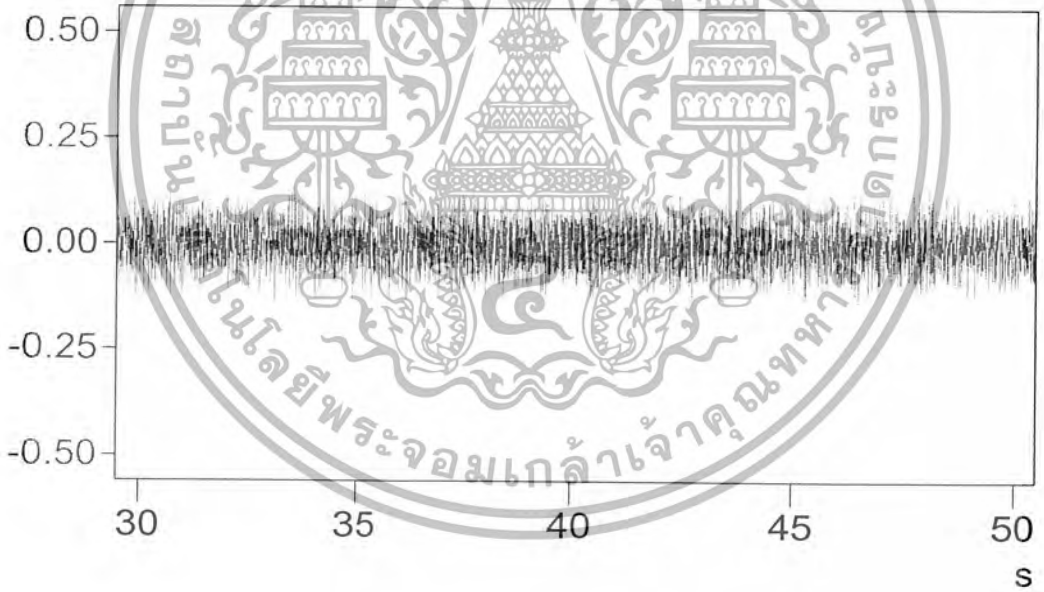
รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยงรยงสะพวนควมหนง 1 ชัณ



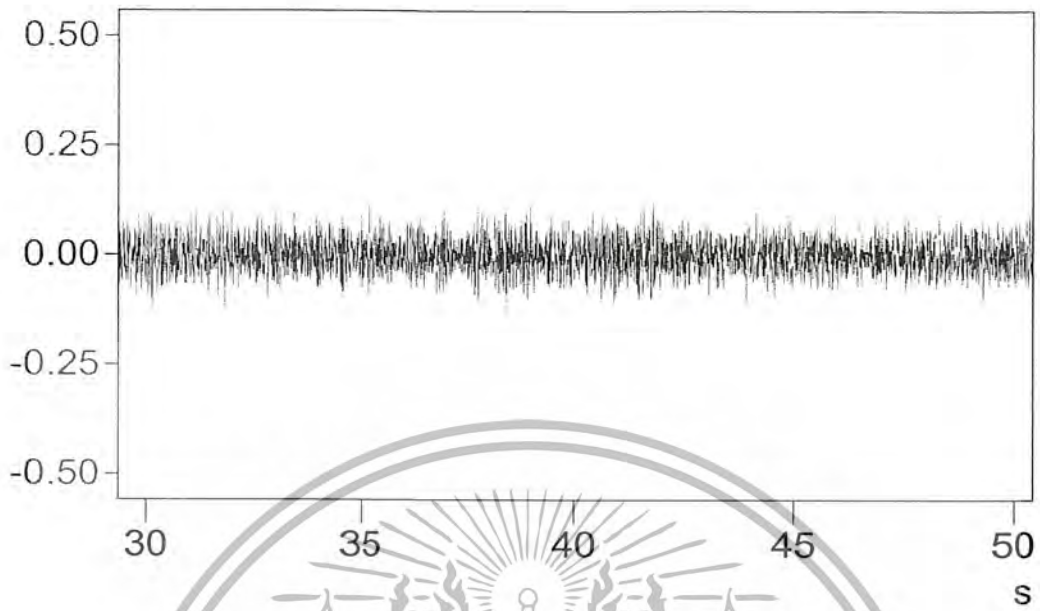
รูปที่ ง.15 แสดงควมสัณพัณธ์ะหวังการกระจัดกับเวลยที่ด้าหน่งที่ 1



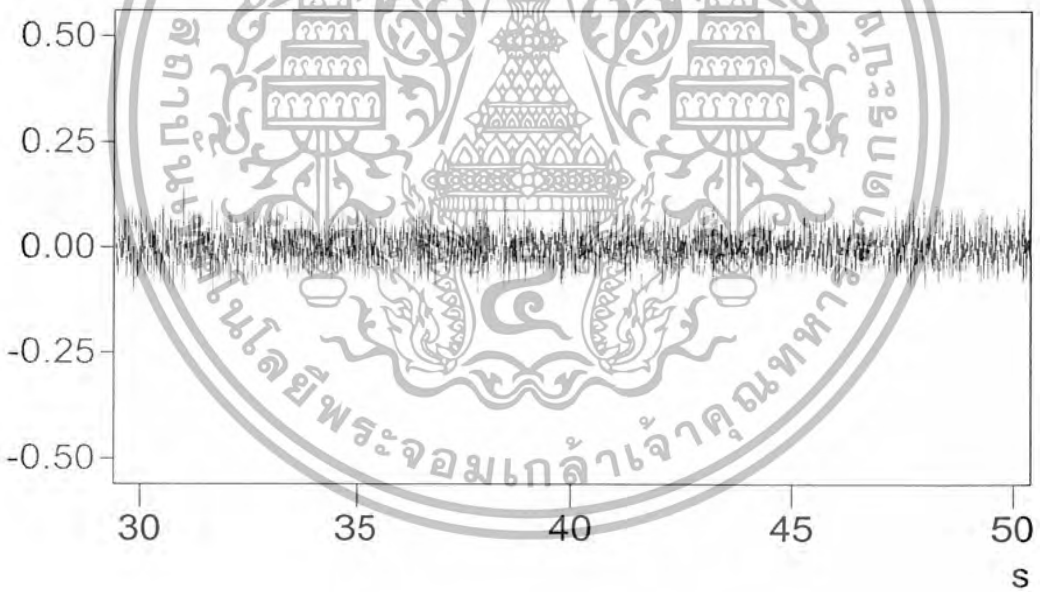
รูปที่ ง.16 แสดงควมสัณพัณธ์ะหวังการกระจัดกับเวลยที่ด้าหน่งที่ 2

เอกสรนั้เป็นเอกสรนั้ที่สงวนไว้ส้าหรั้งการใช้งานเพื่อกการศึกษาเท้านันั้ ไม่อนุญจตให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้าหน่งการค้าไม่ว้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อักทั้งห้ามิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสรนั้ทุกคร้งที่มีกรนำ้ไปใช้

ขารองสะพานความหนา 2 ชั้น



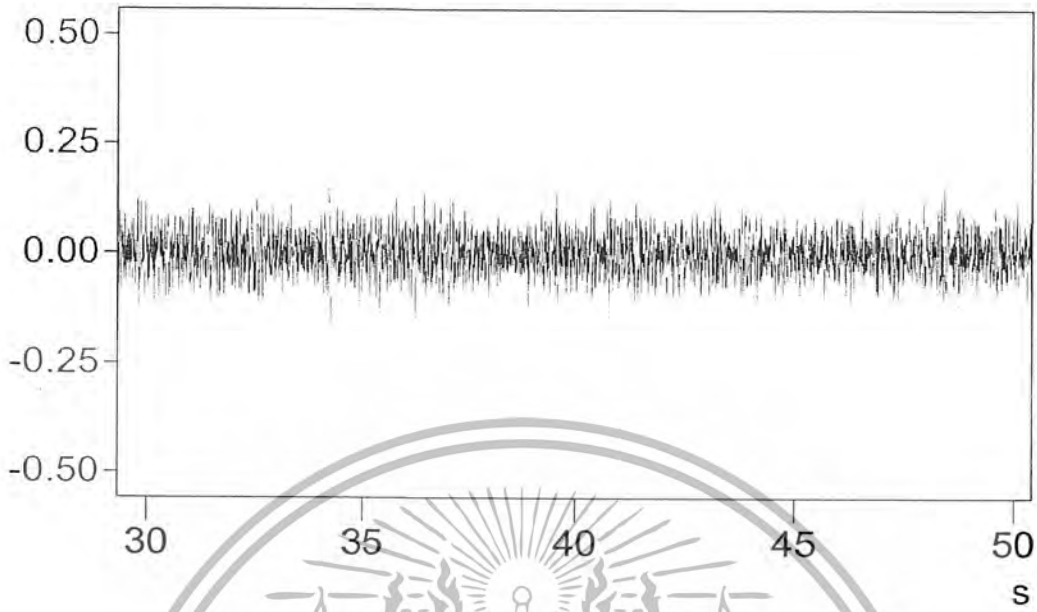
รูปที่ ๑.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



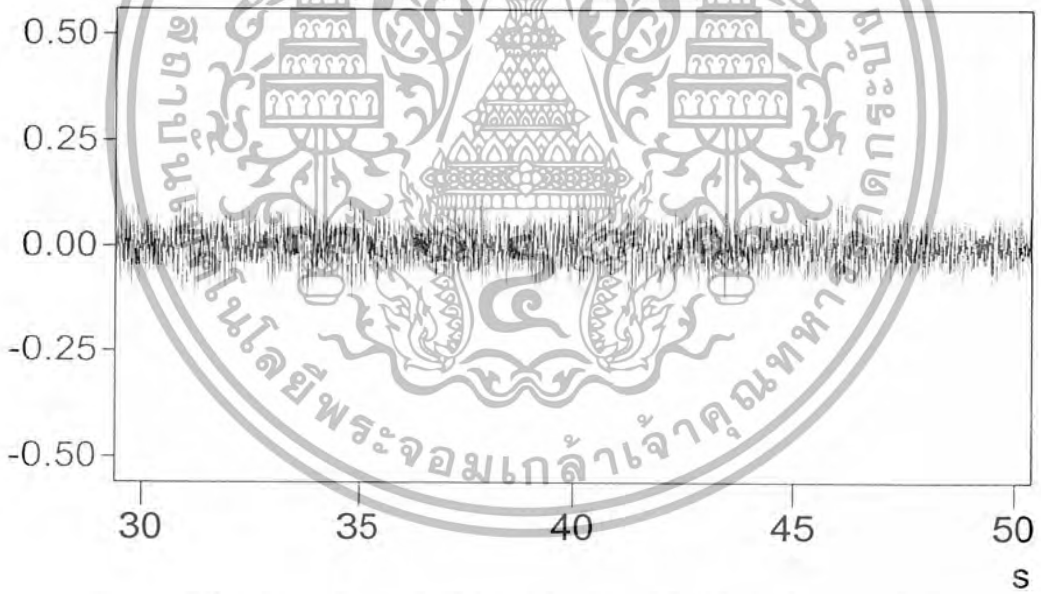
รูปที่ ๑.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยงรยงสะพานควมหนา 3 ชัน



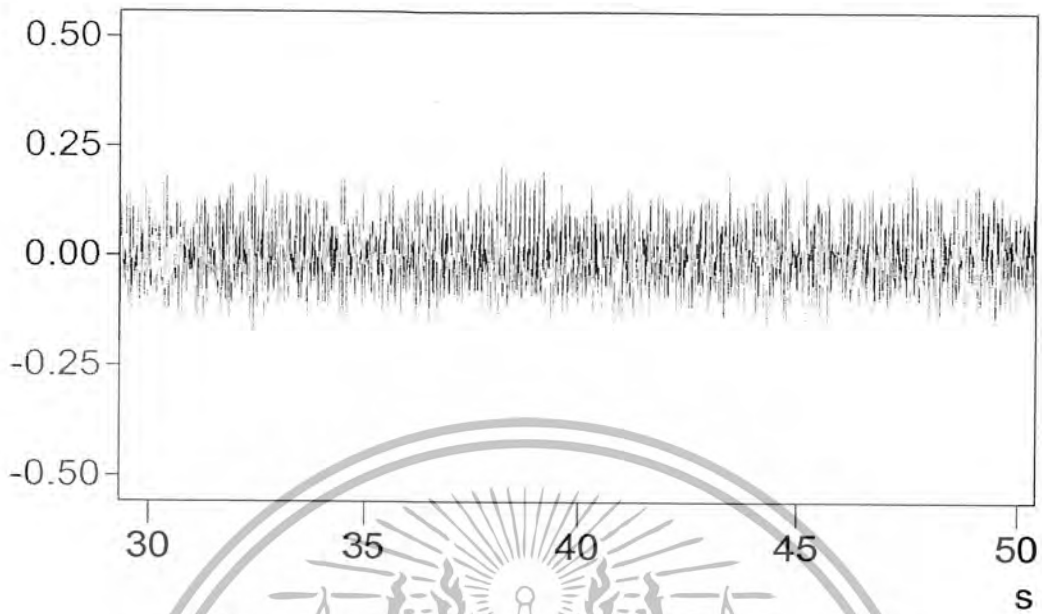
รูปที่ 19 แสดงควมสัมพันธ์ระหว่งการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



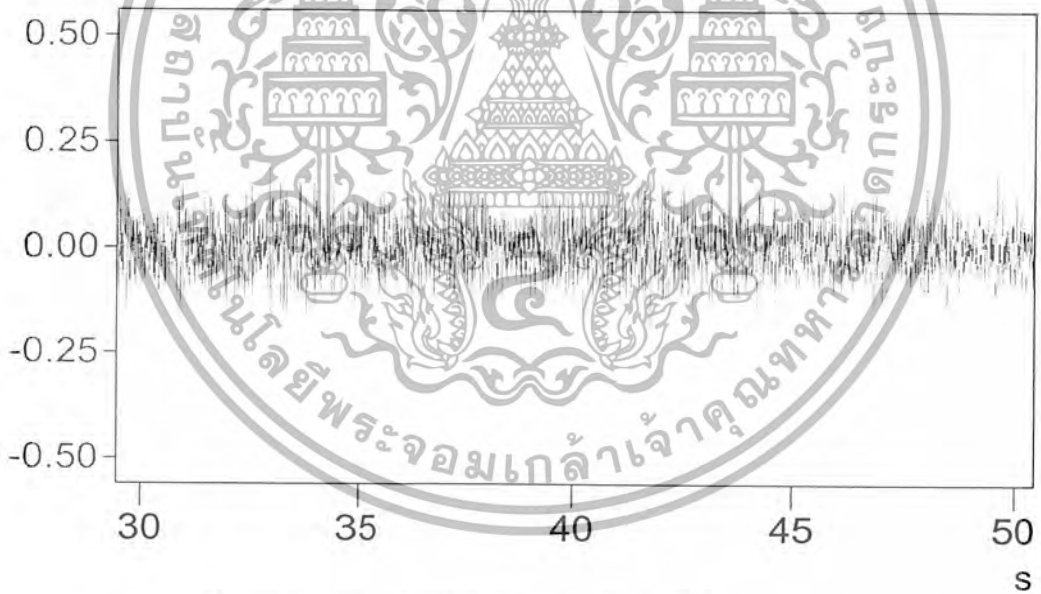
รูปที่ 20 แสดงควมสัมพันธ์ระหว่งการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขารองสะพานความหนา 1 ชั้นมี load torque 0.636 N-mm



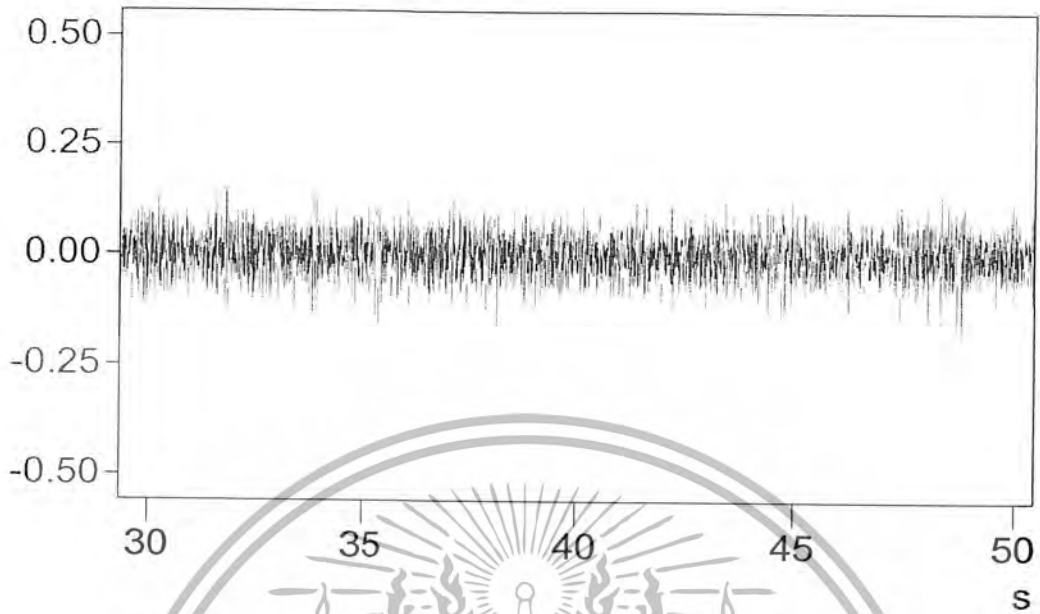
รูปที่ จ.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



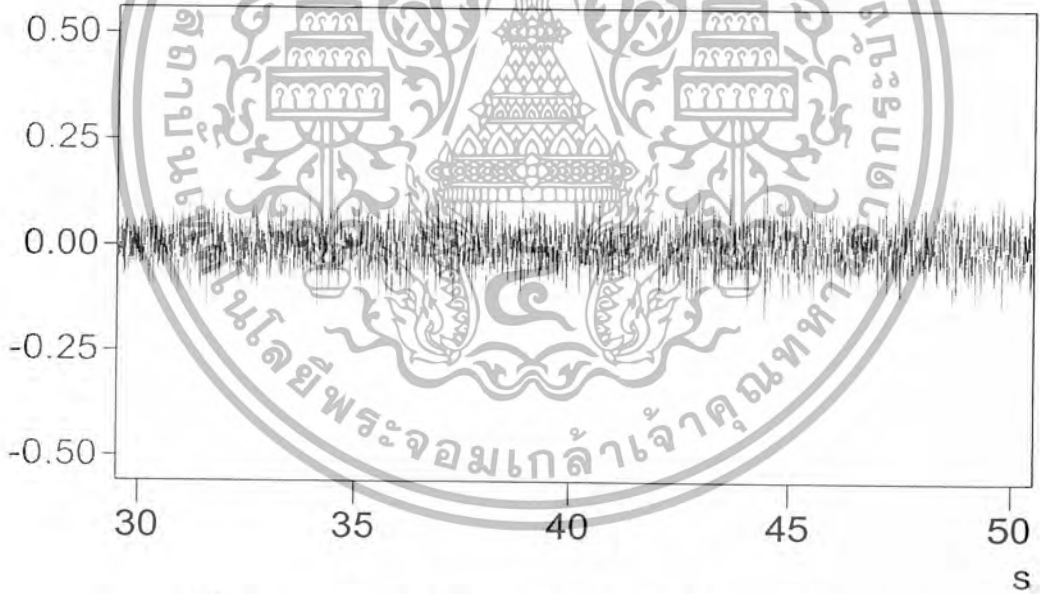
รูปที่ จ.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขารองสะพานความหนา 2 ชั้นมี load torque 0.636 N-mm



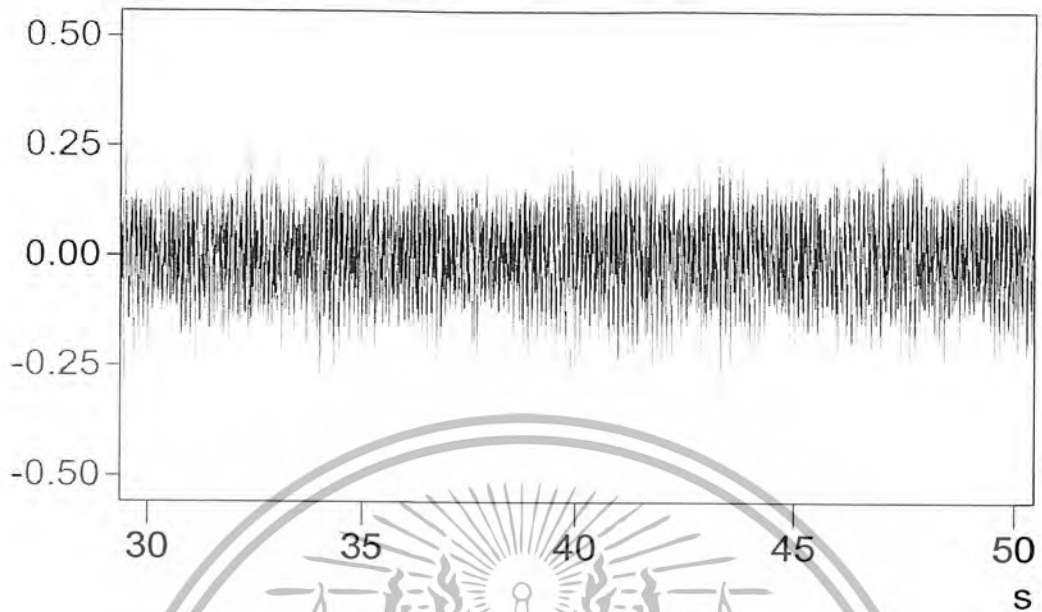
รูปที่ ง.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



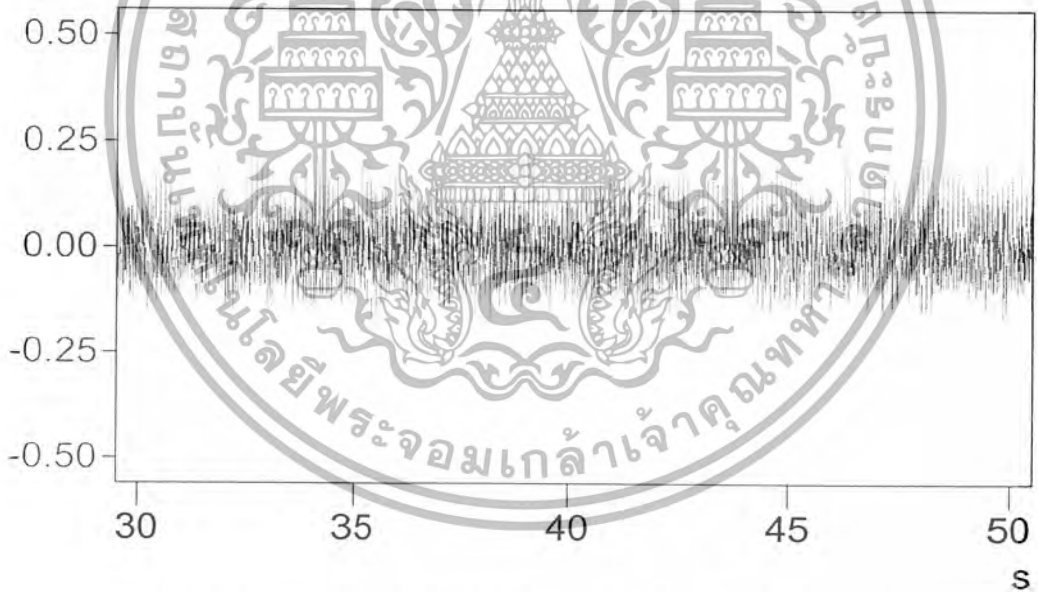
รูปที่ ง.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองสะพานความหนา 3 ชั้นมี load torque 0.636 N-mm



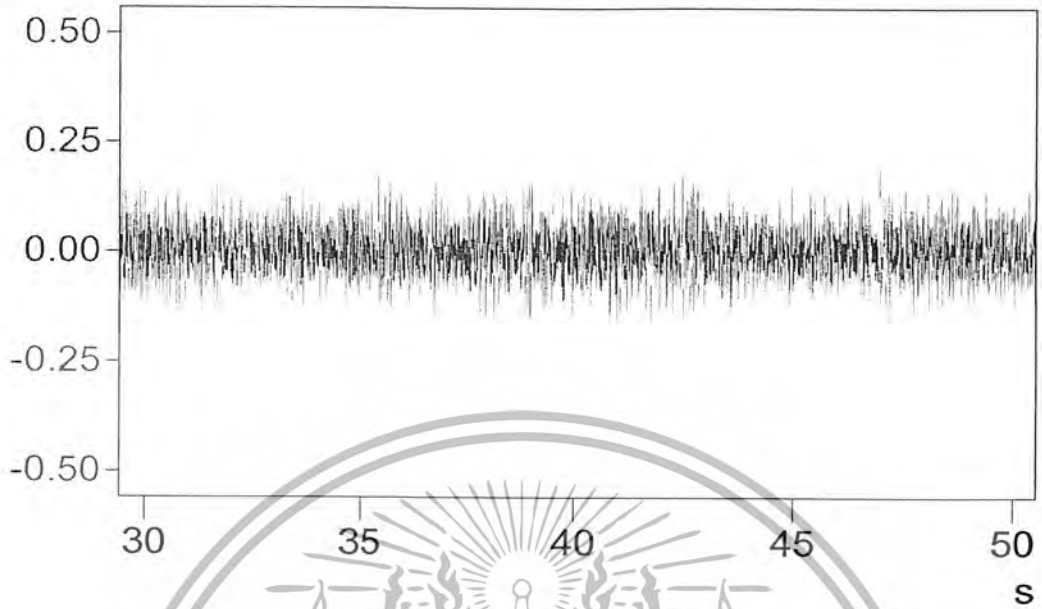
รูปที่ ๓.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



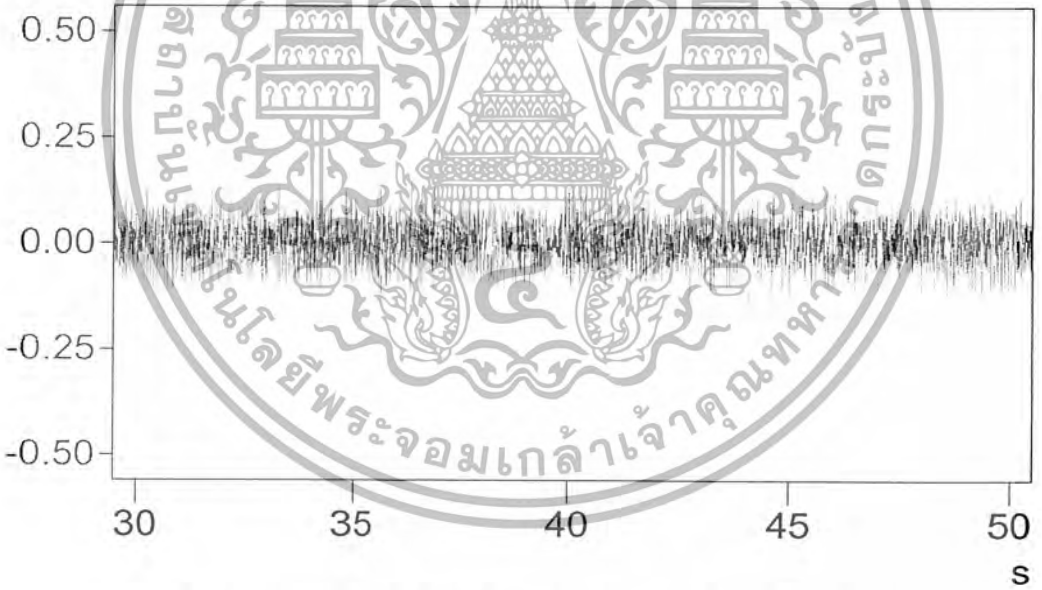
รูปที่ ๓.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 1 ชั้นมี load torque 0.636 N-mm



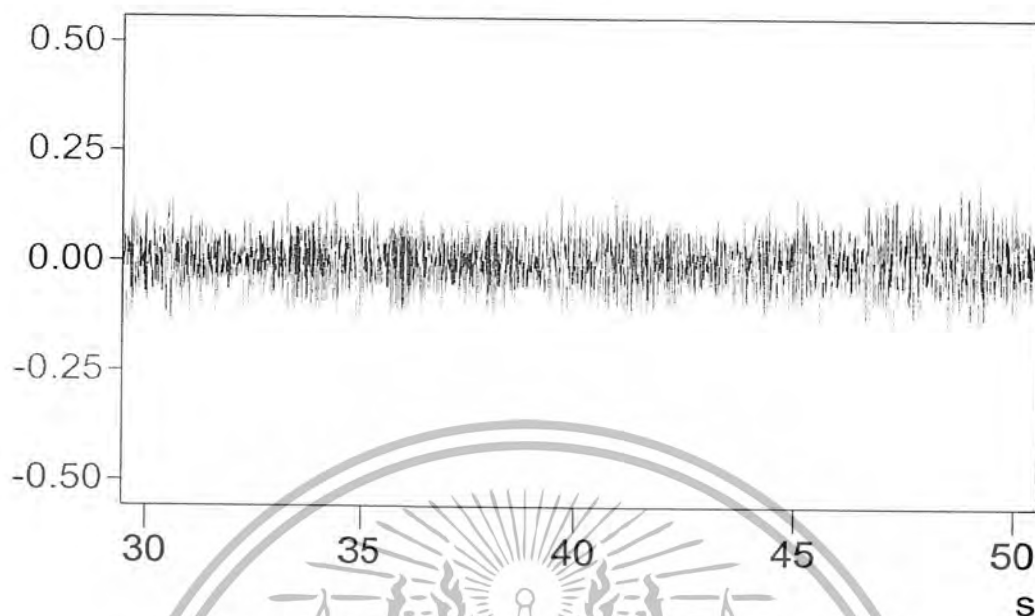
รูปที่ ๓.๒๗ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



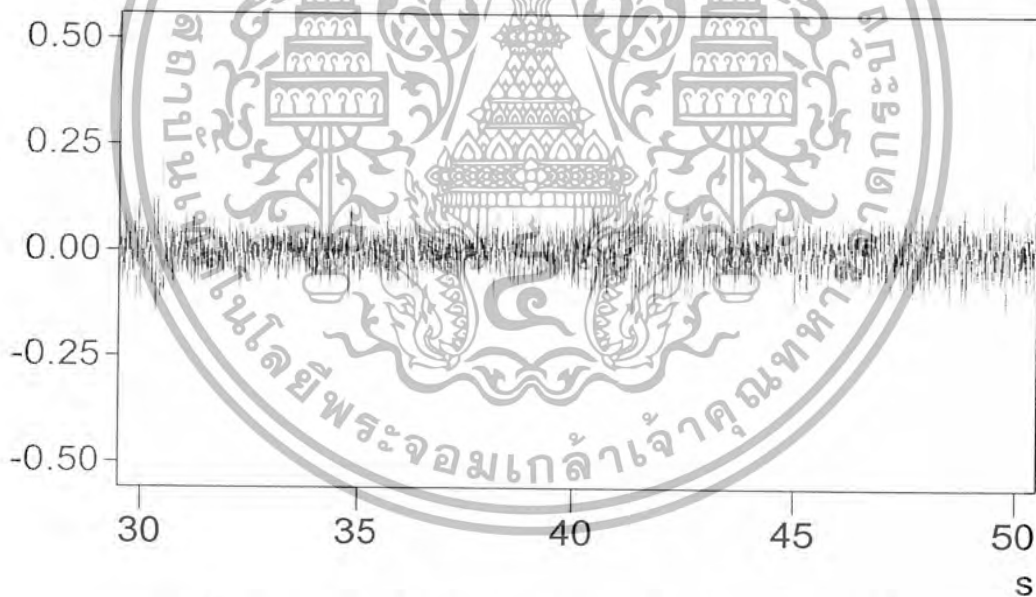
รูปที่ ๓.๒๘ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 2 ชั้นมี load torque 0.636 N-mm



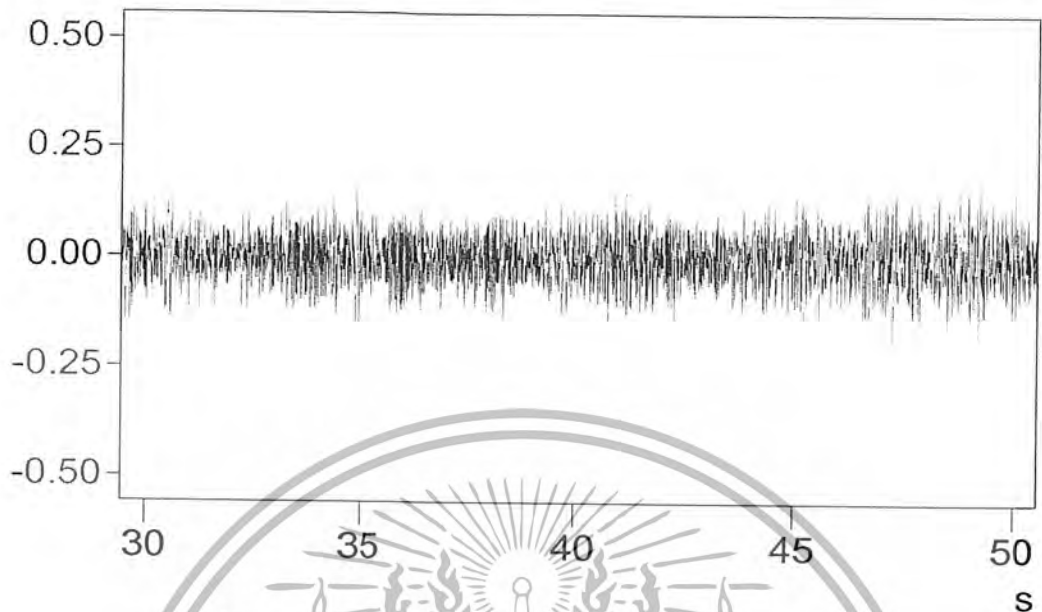
รูปที่ ๓.๒๙ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



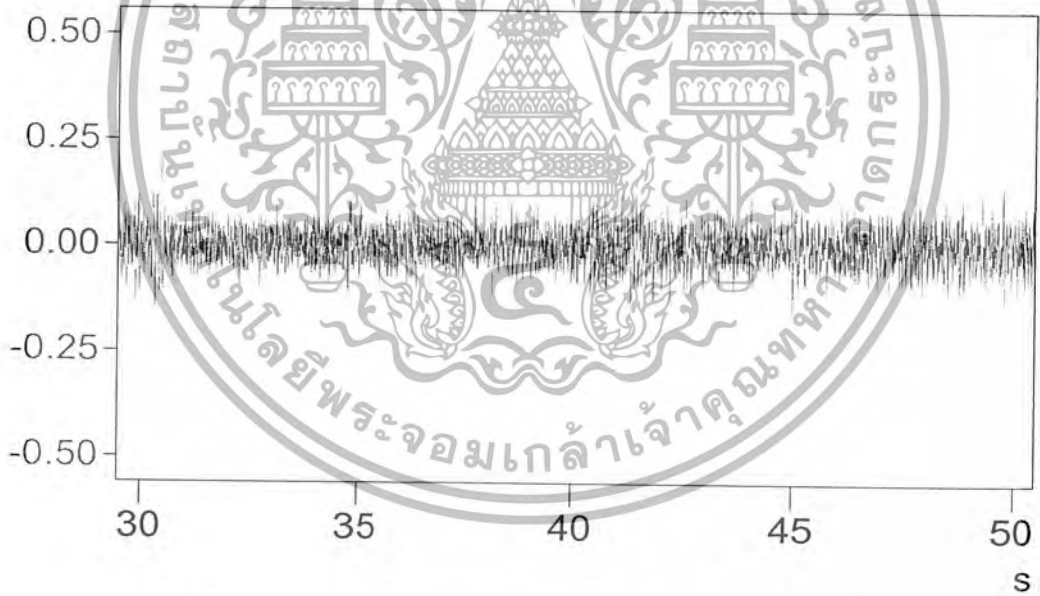
รูปที่ ๓.๓๐ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยารองแท่นเครื่องความหนา 3 ชั้นมี load torque 0.636 N-mm



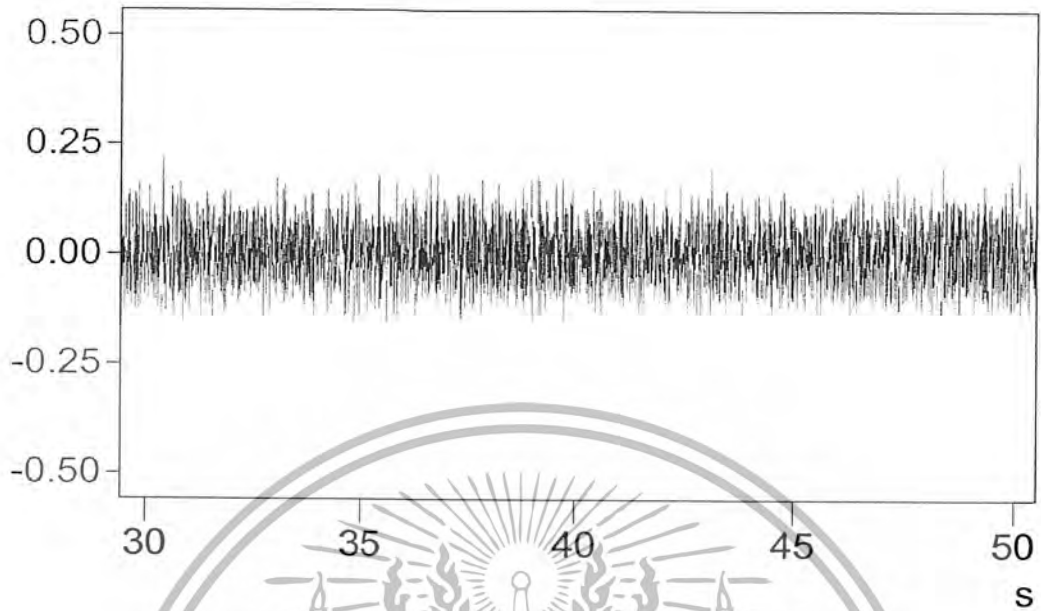
รูปที่ 3.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



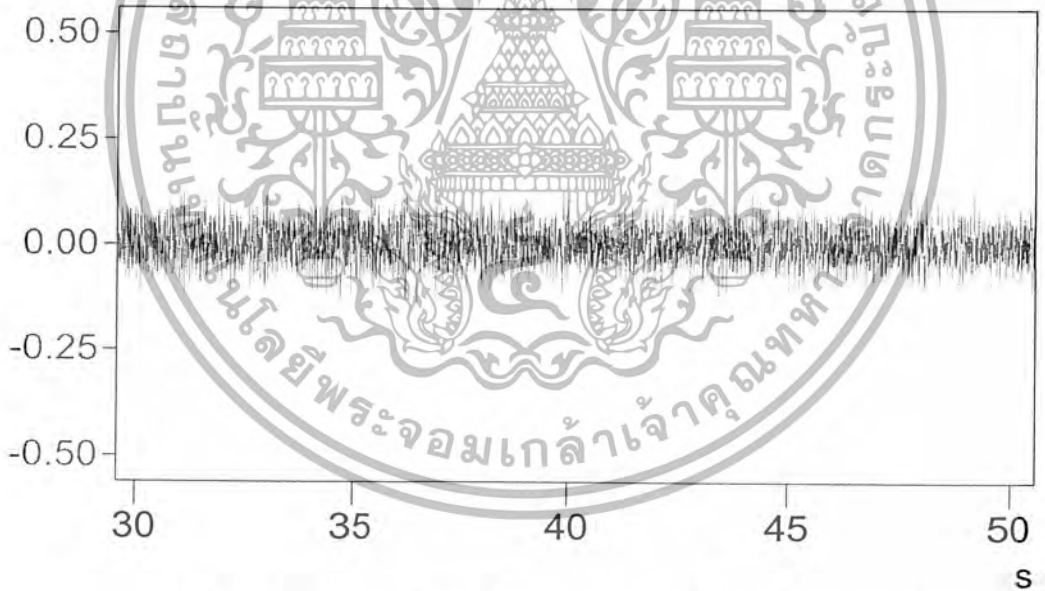
รูปที่ 3.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 1 ชั้นมี load torque 0.636 N-mm



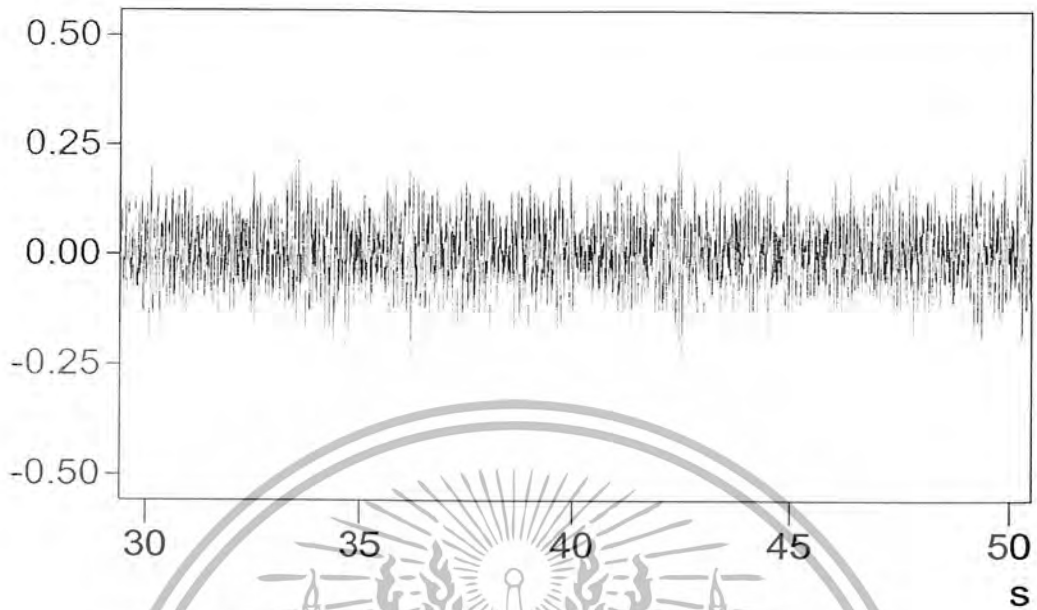
รูปที่ ง.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



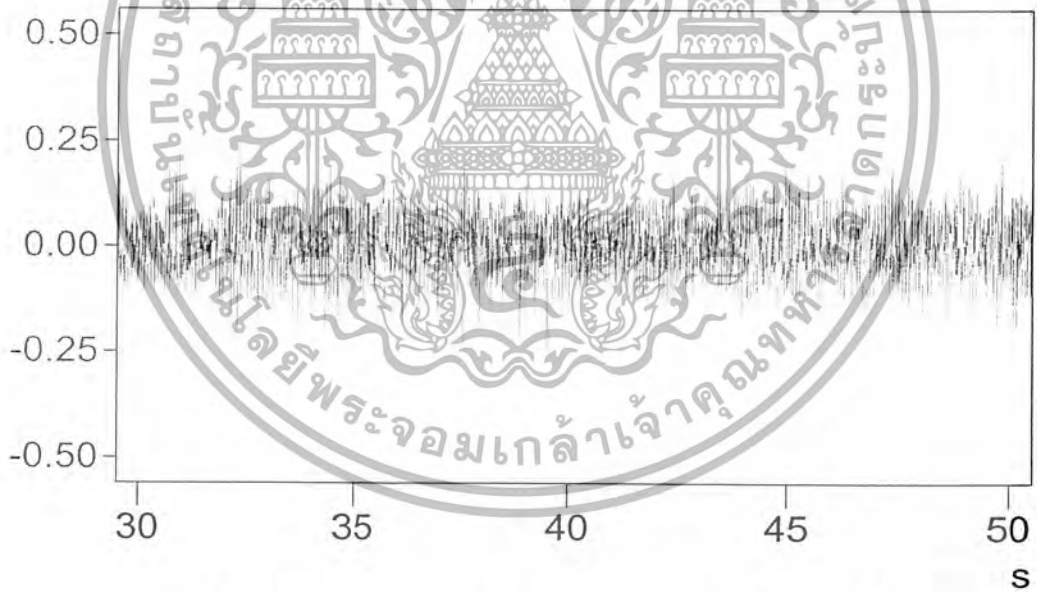
รูปที่ ง.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 2 ชั้นมี load torque 0.636 N-mm



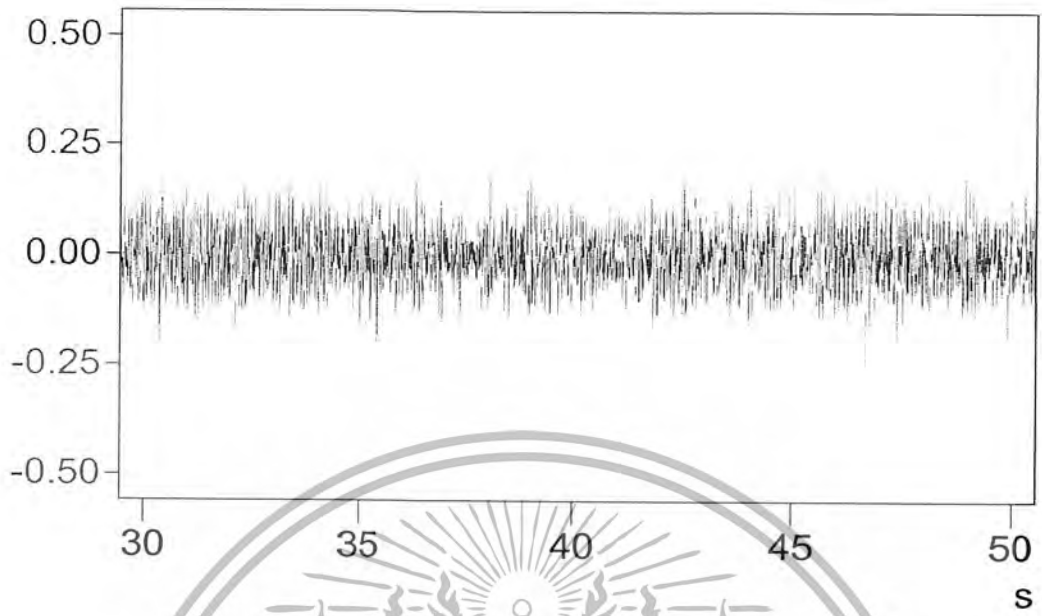
รูปที่ ง.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



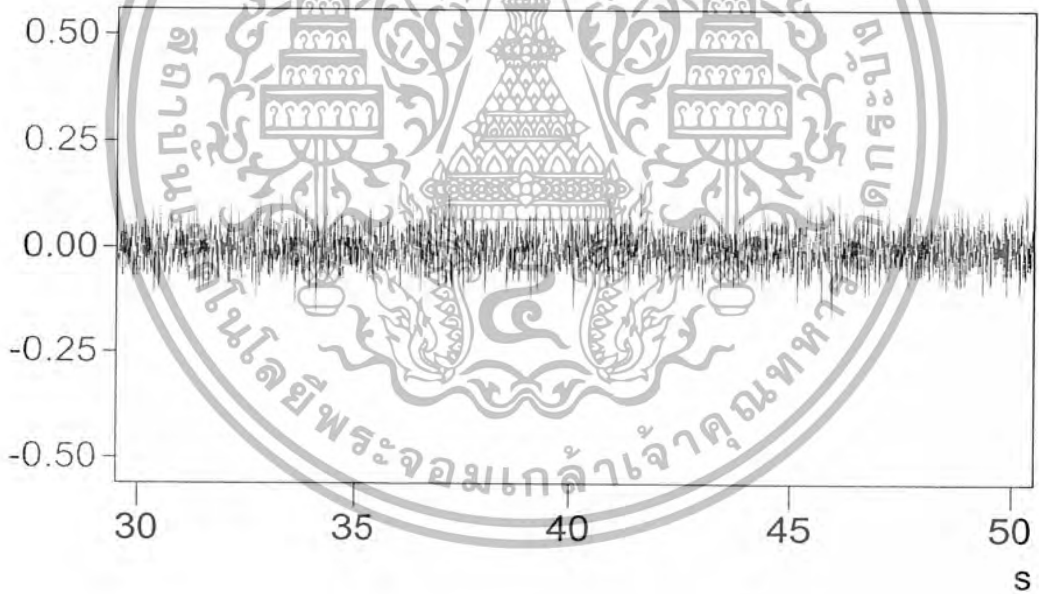
รูปที่ ง.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 3 ชั้นมี load torque 0.636 N-mm



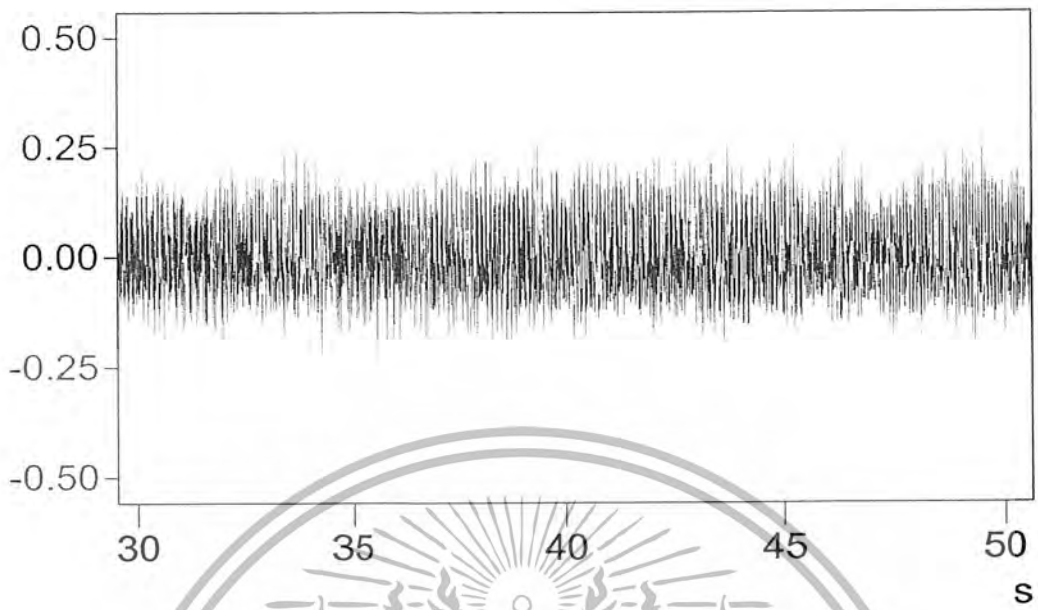
รูปที่ 3.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



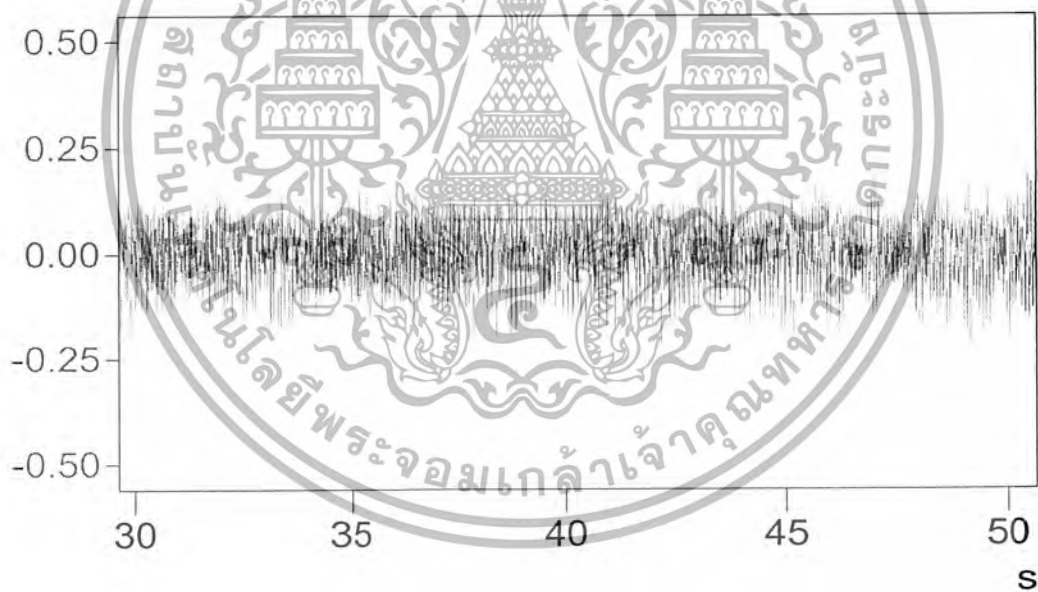
รูปที่ 3.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขงรอสะพานควมหนา 1 ชั้นมี load torque 3 N-mm



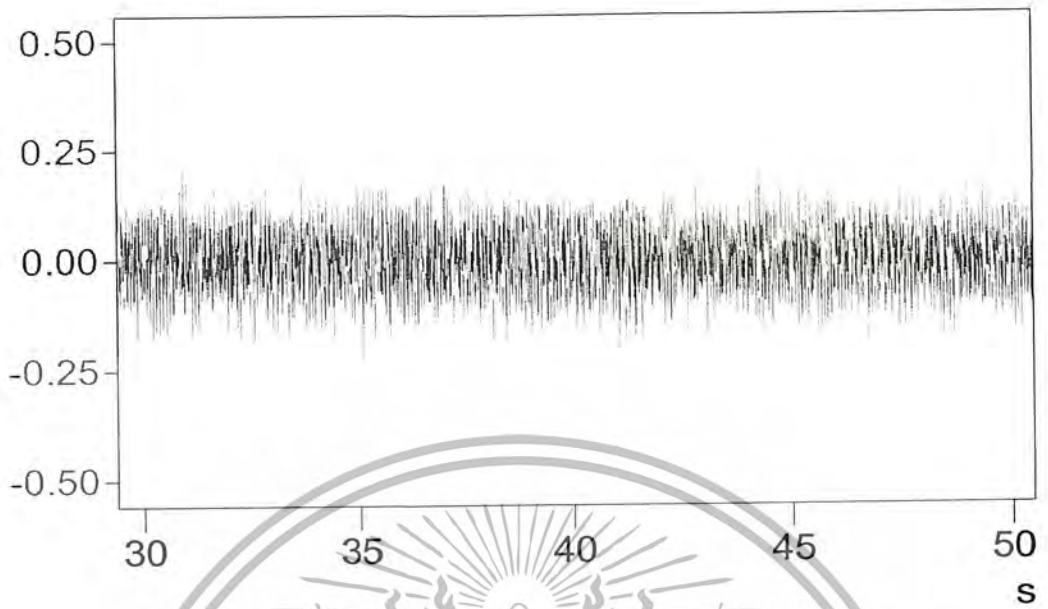
รูปที่ ง.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



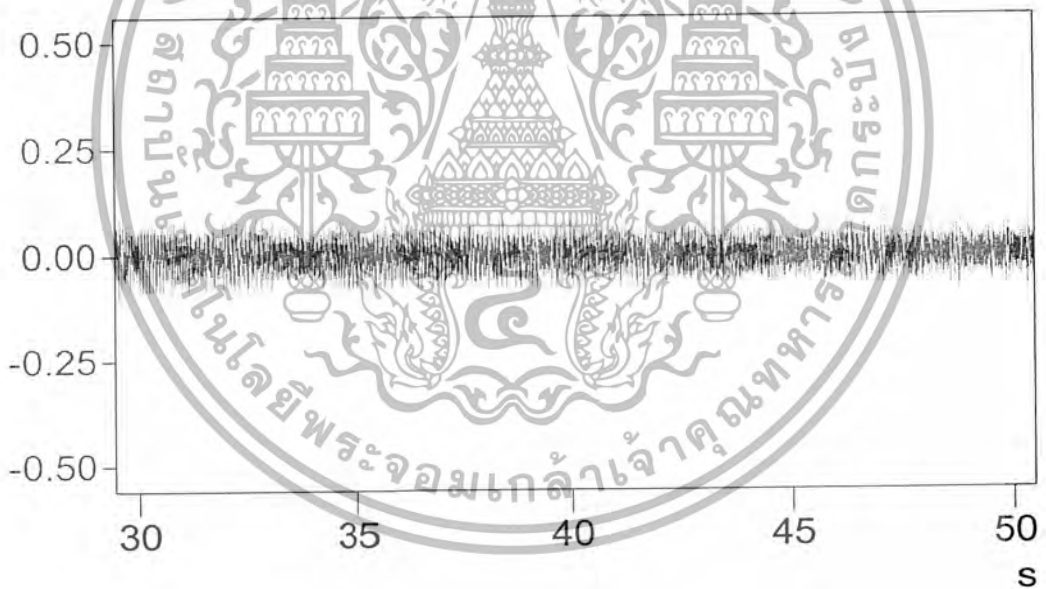
รูปที่ ง.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขารองสะพานความหนา 2 ชั้นมี load torque 3 N-mm



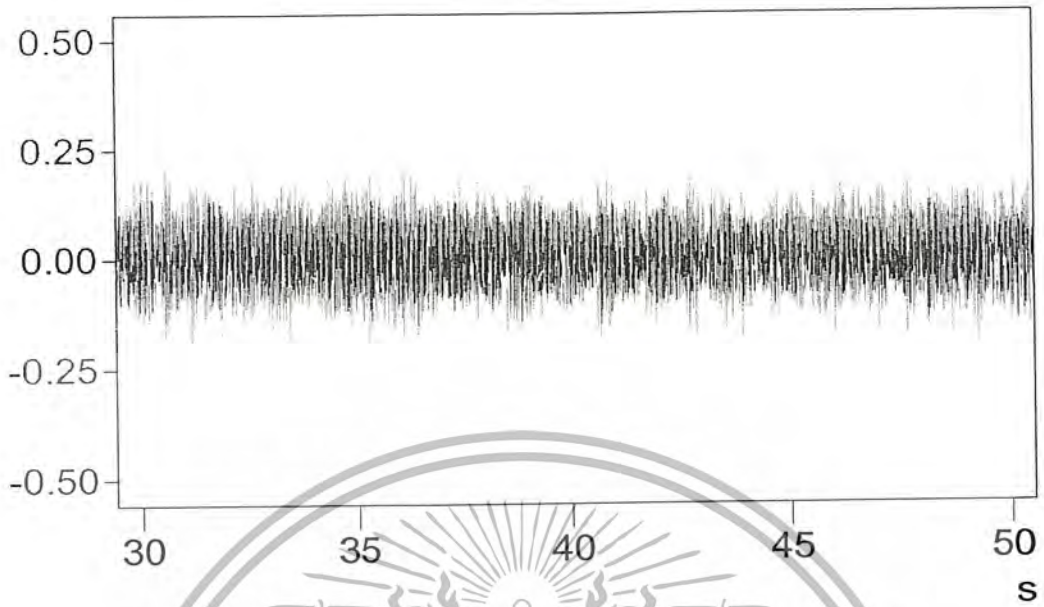
รูปที่ ๔.๑๑ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



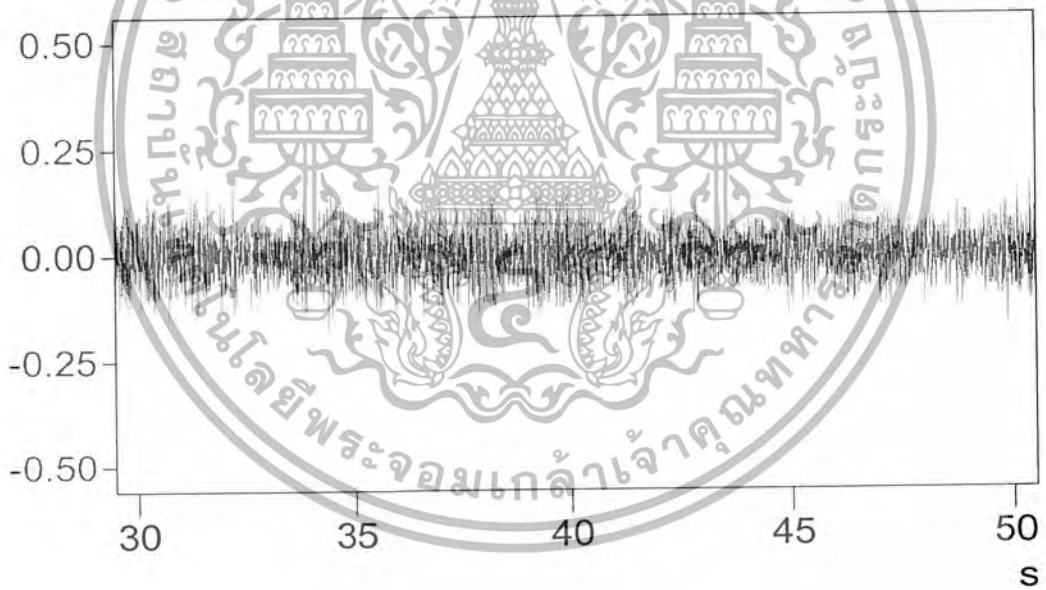
รูปที่ ๔.๑๒ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองสะพานความหนา 3 ชั้นมี load torque 3 N-mm



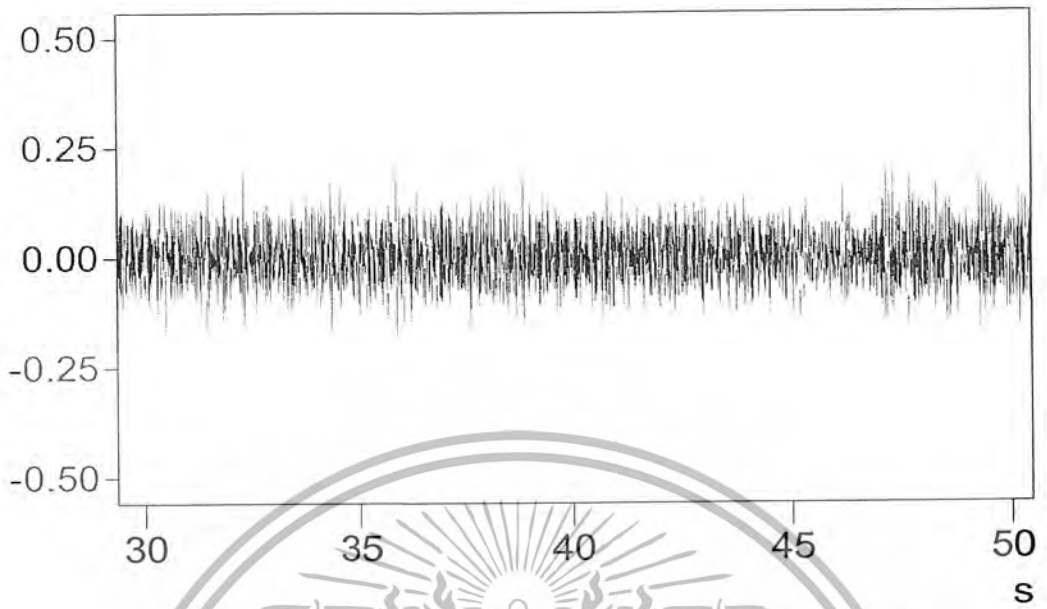
รูปที่ ๓.๔๓ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



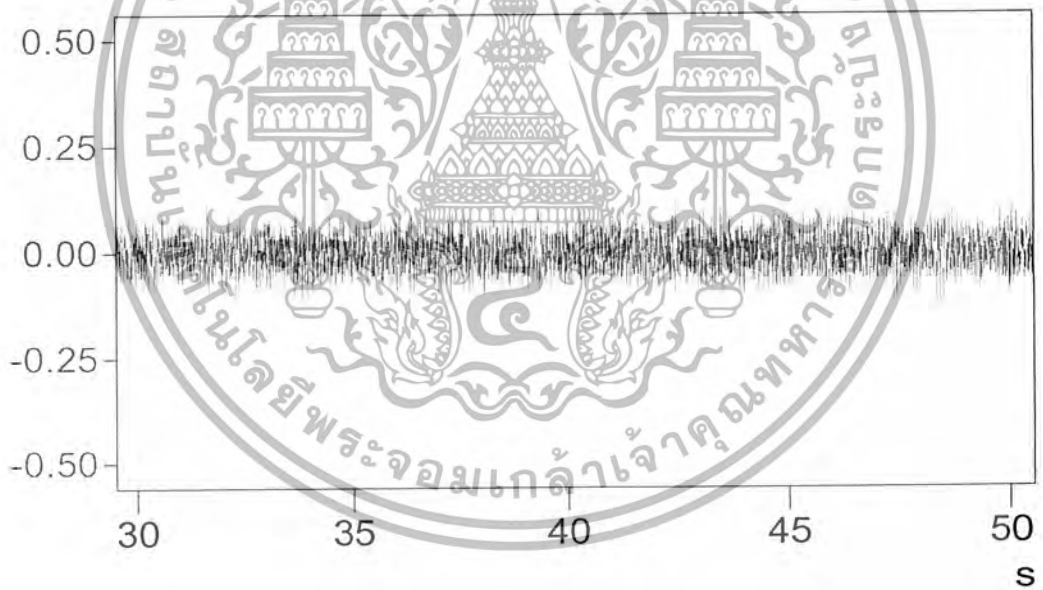
รูปที่ ๓.๔๔ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขารองแทนเครื่องความหนา 1 ชั้นมี load torque 3 N-mm



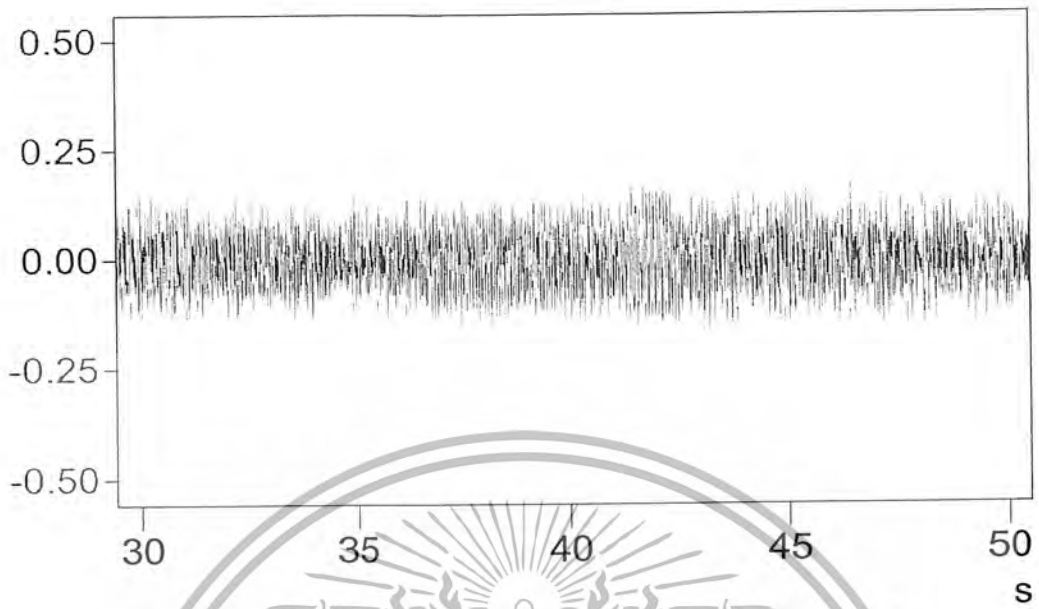
รูปที่ ๓.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ ๓.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 2 ชั้นมี load torque 3 N-mm



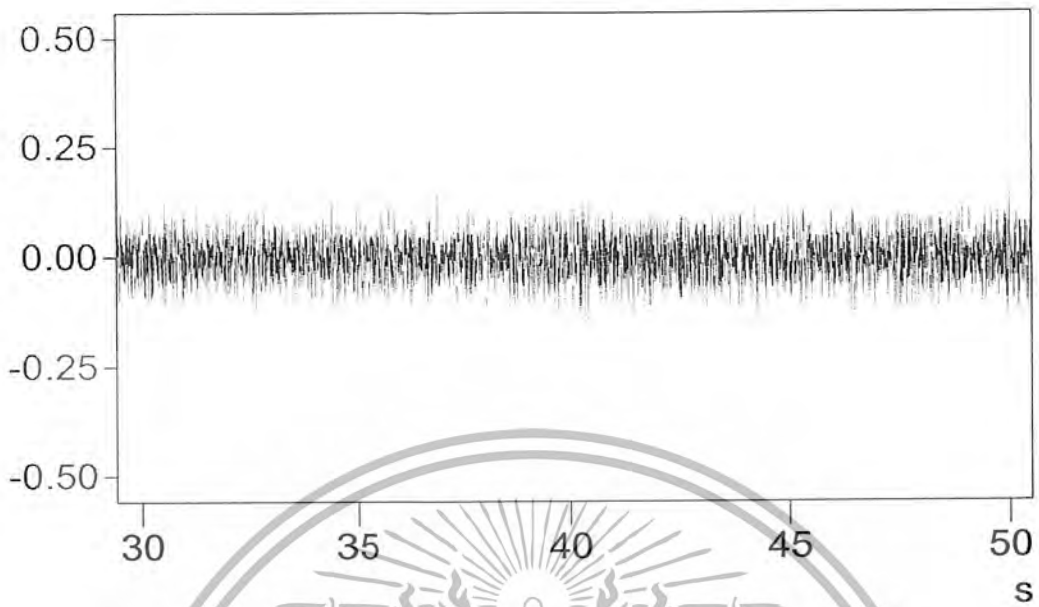
รูปที่ 3.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



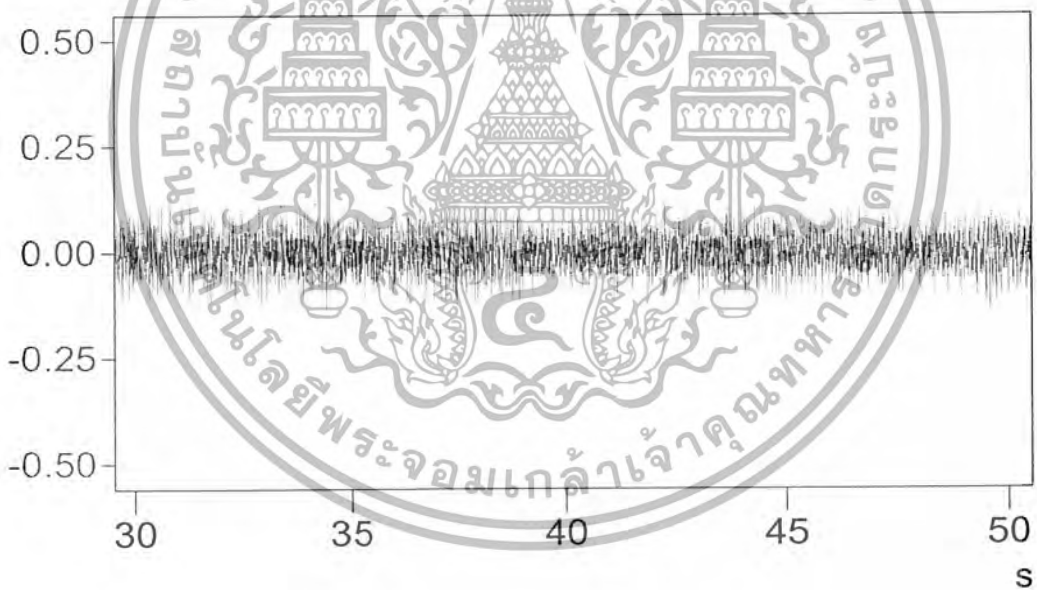
รูปที่ 3.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 3 ชั้นมี load torque 3 N-mm



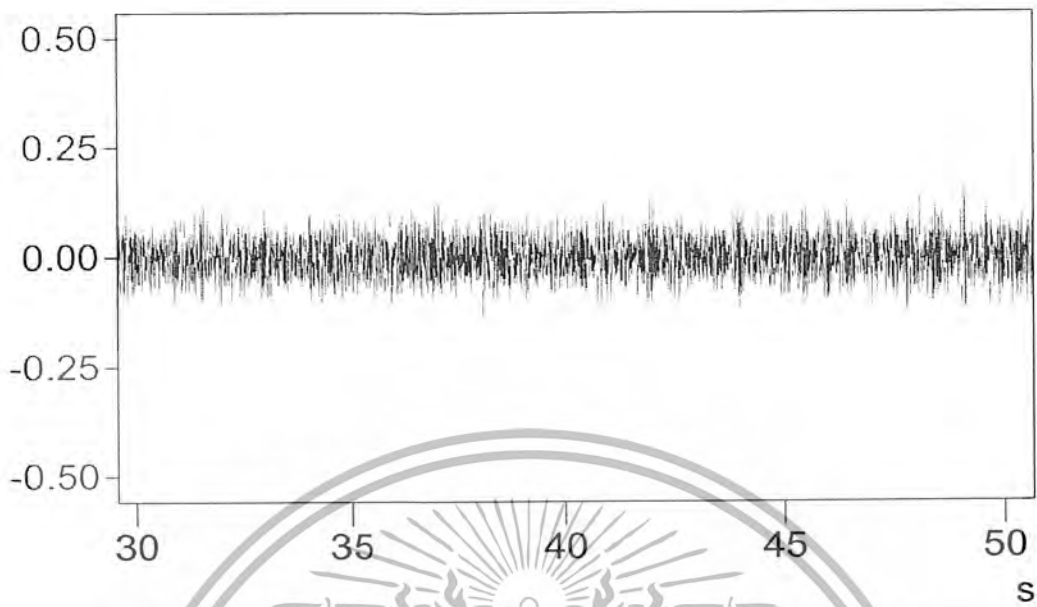
รูปที่ 3.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



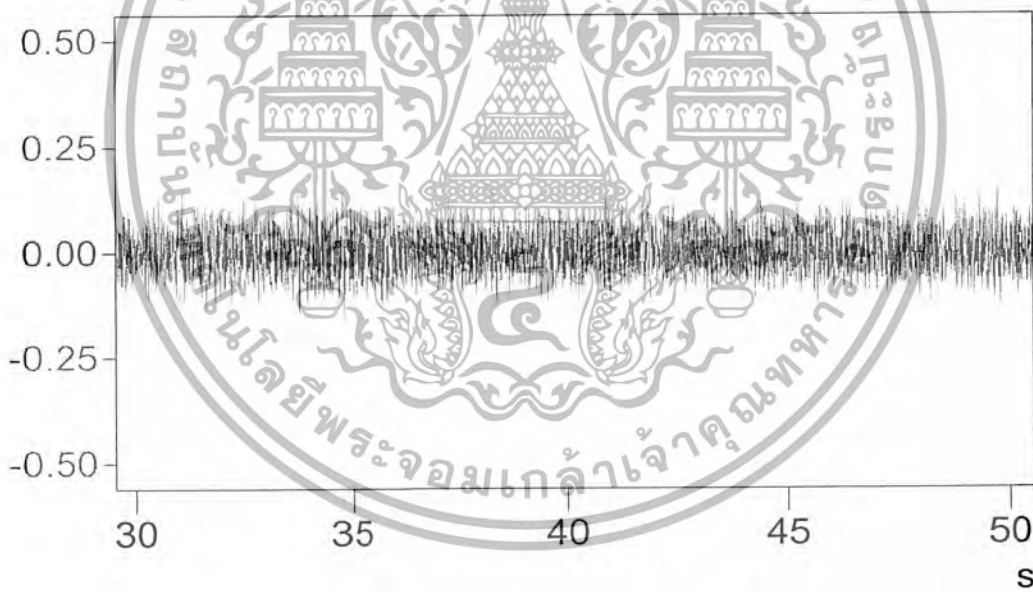
รูปที่ 3.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 1 ชั้นมี load torque 3 N-mm



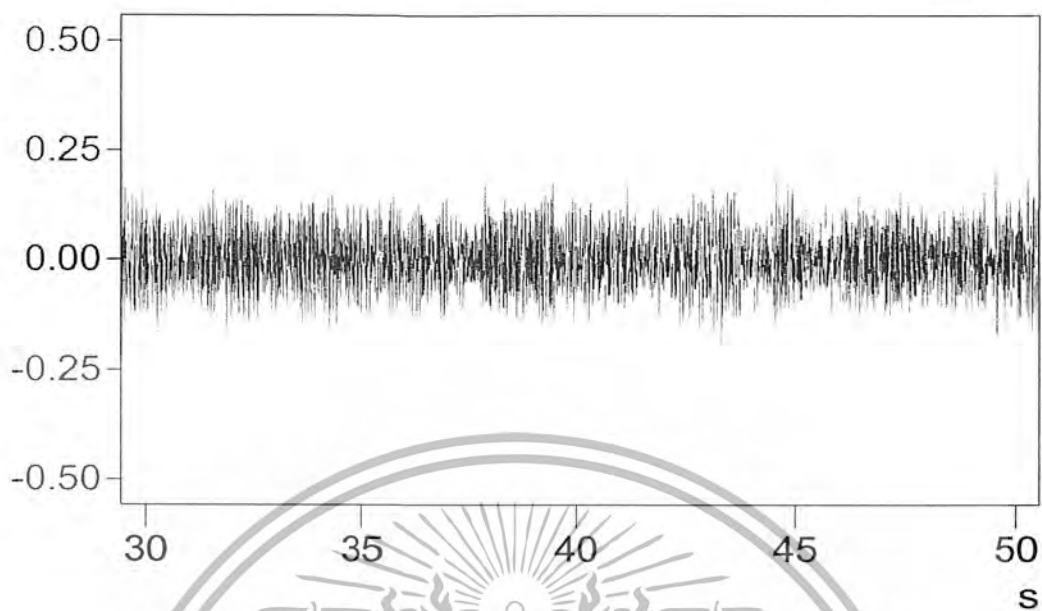
รูปที่ ง.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



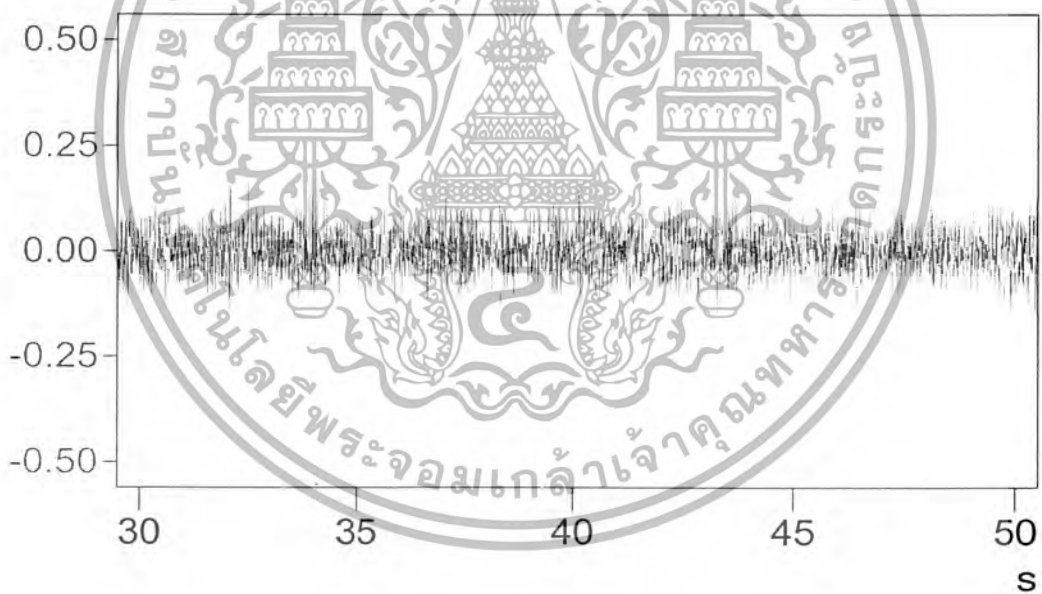
รูปที่ ง.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขางพองน้ำความหนา 2 ชั้นมี load torque 3 N-mm



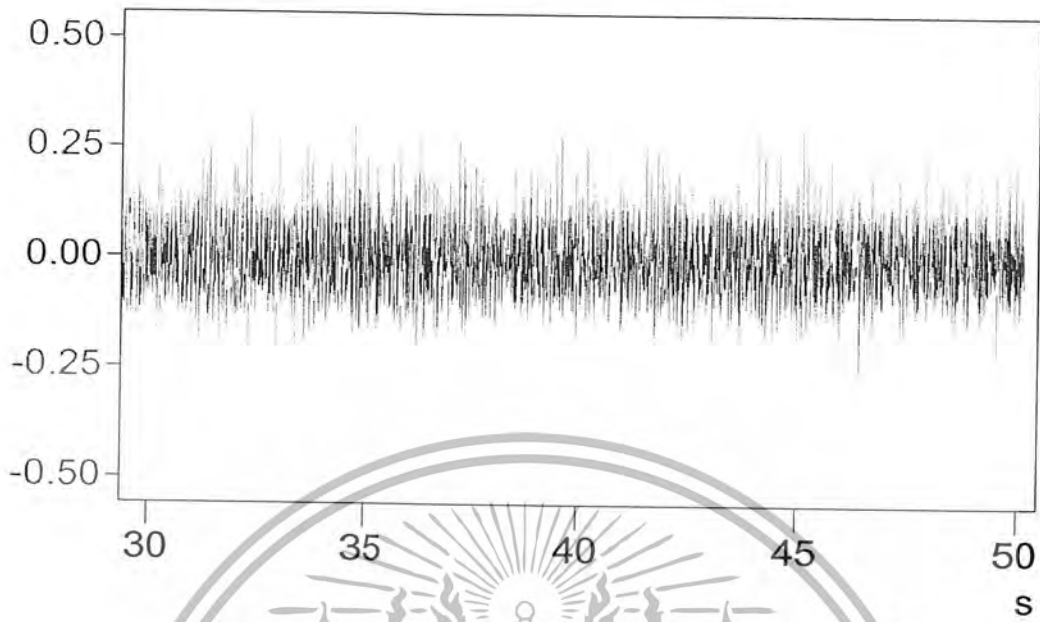
รูปที่ ๕.๕๓ แสดงความผันผวนระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



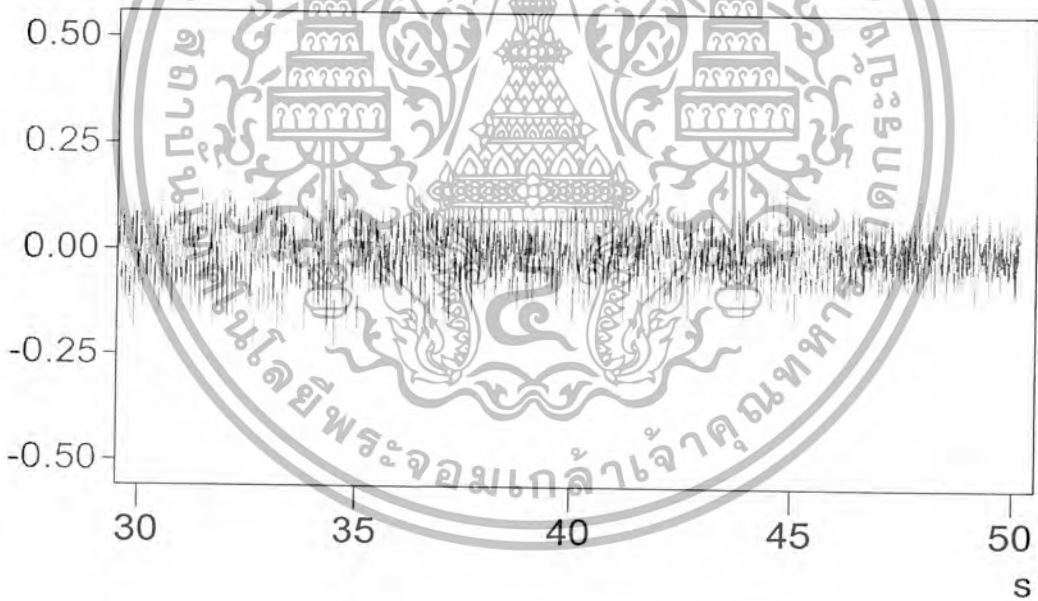
รูปที่ ๕.๕๔ แสดงความผันผวนระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 3 ชั้นมี load torque 3 N-mm



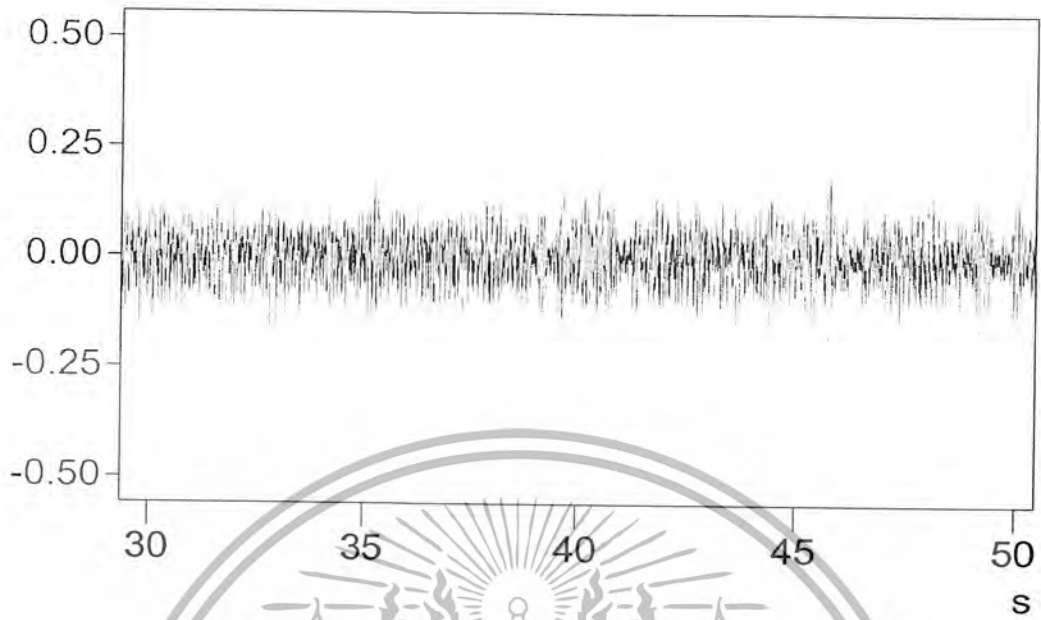
รูปที่ 3.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



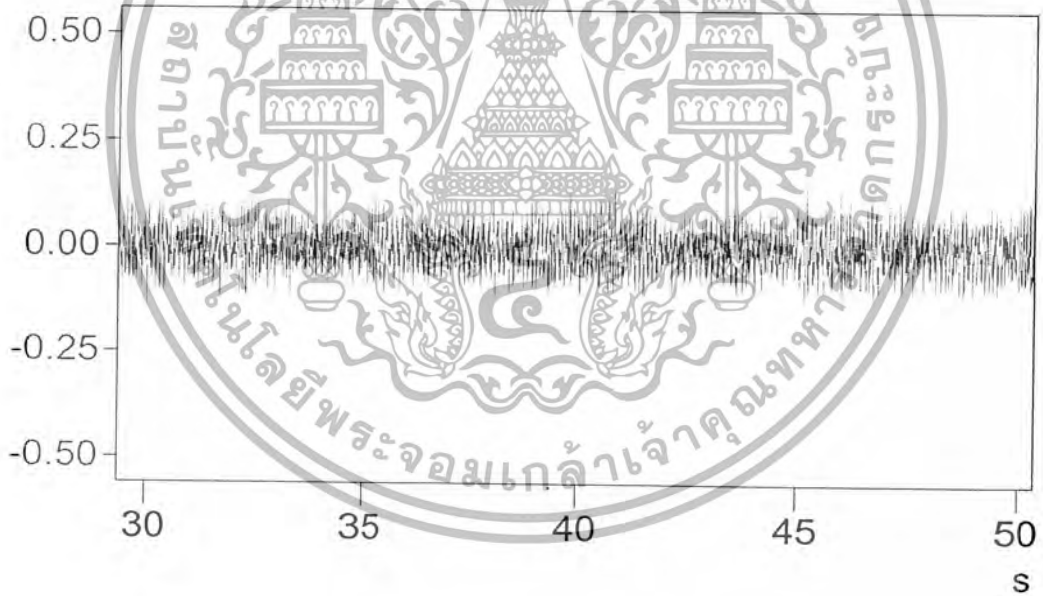
รูปที่ 3.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองสะพานความหนา 1 ซม. มวล 1000 กรัม



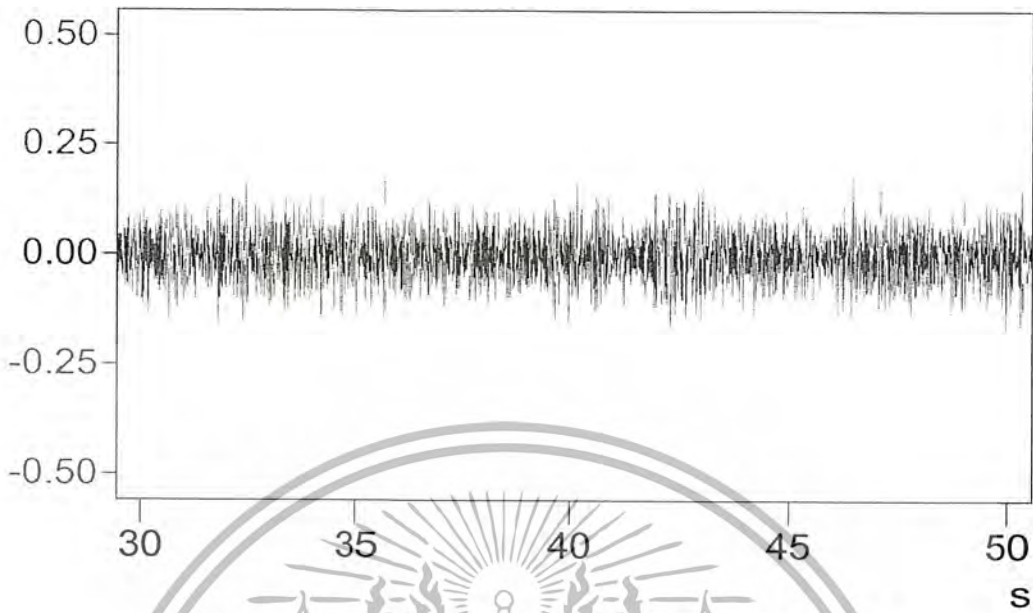
รูปที่ 3.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



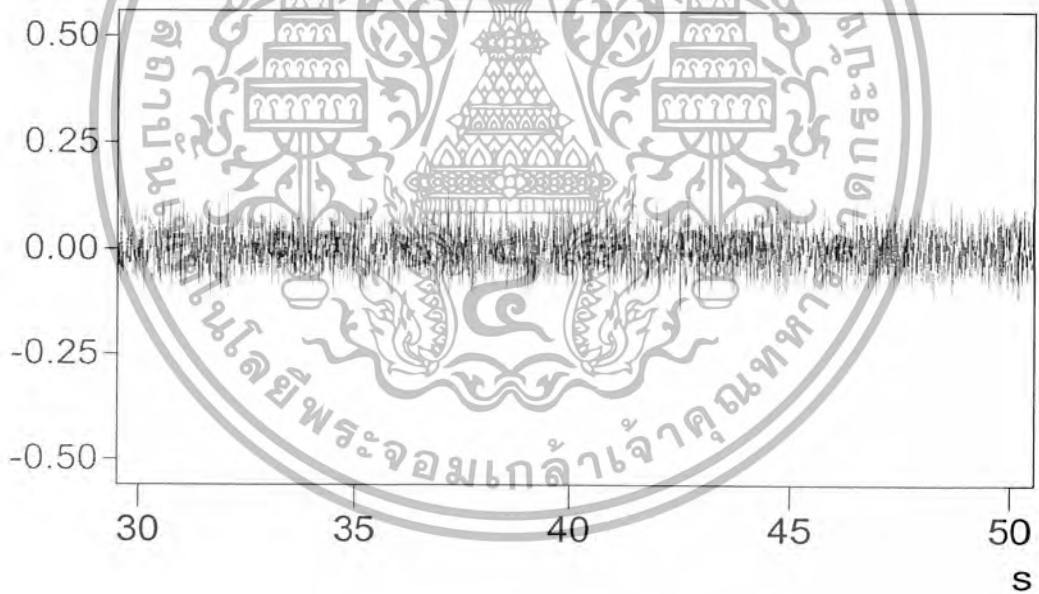
รูปที่ 3.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขารองสะพานความหนา 2 ชั้น มวล 1000 กรัม



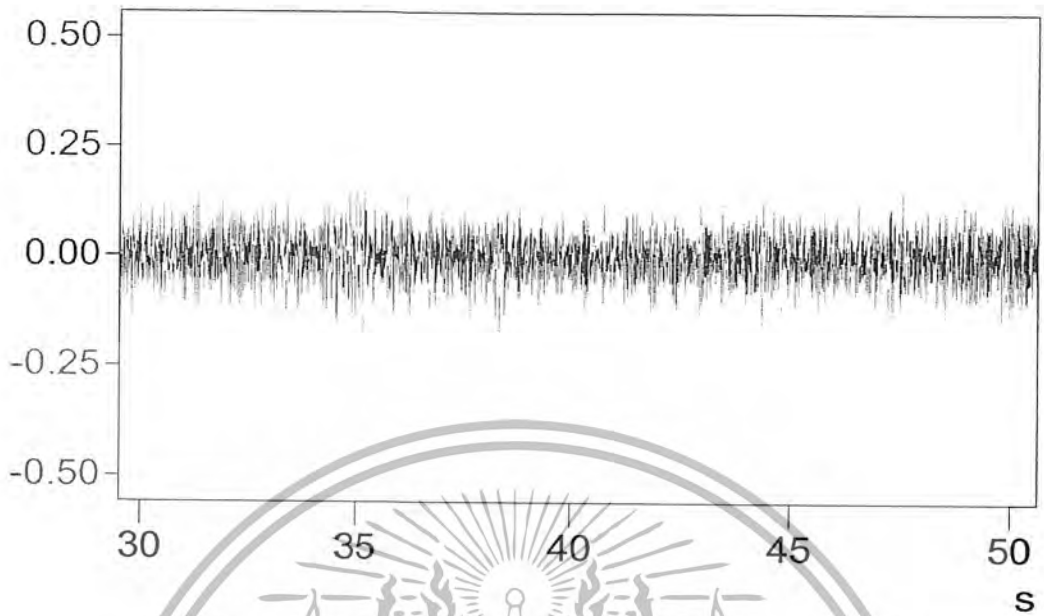
รูปที่ ๕.๕๙ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



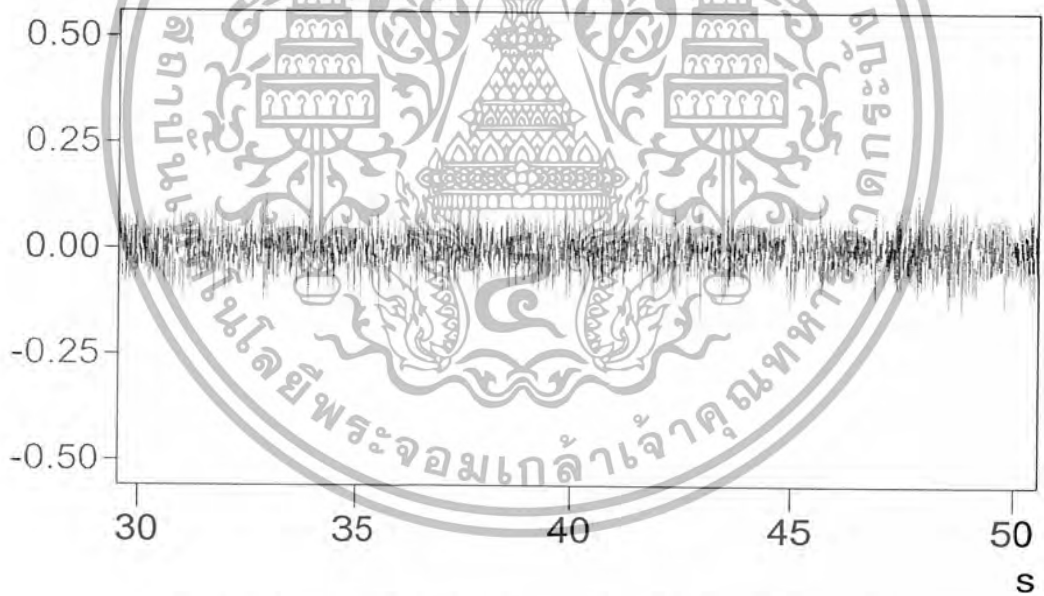
รูปที่ ๕.๖๐ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองสะพานความหนา 3 ชั้น มวล 1000 กรัม



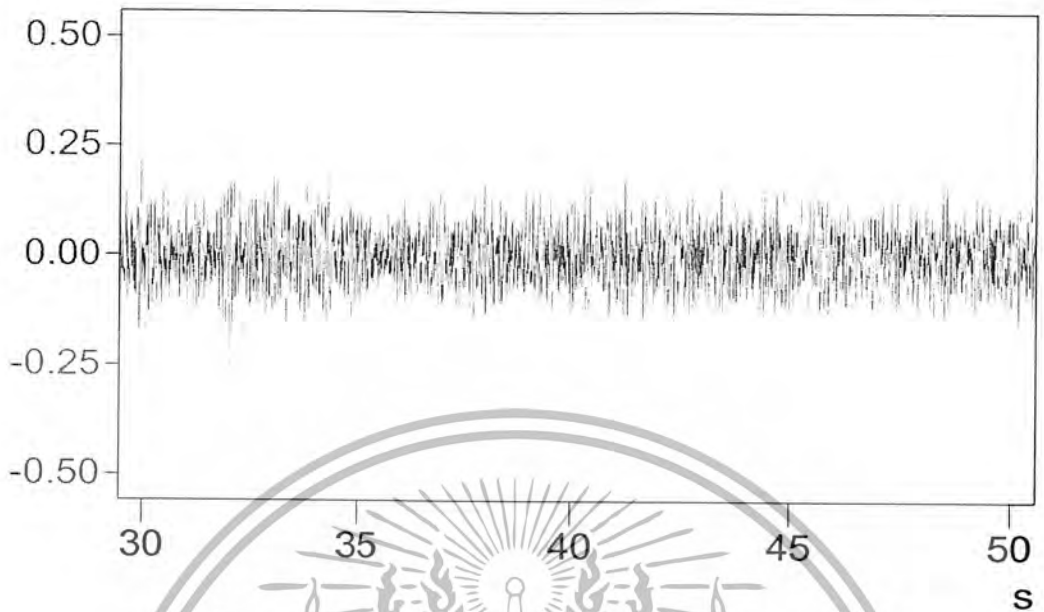
รูปที่ 3.61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



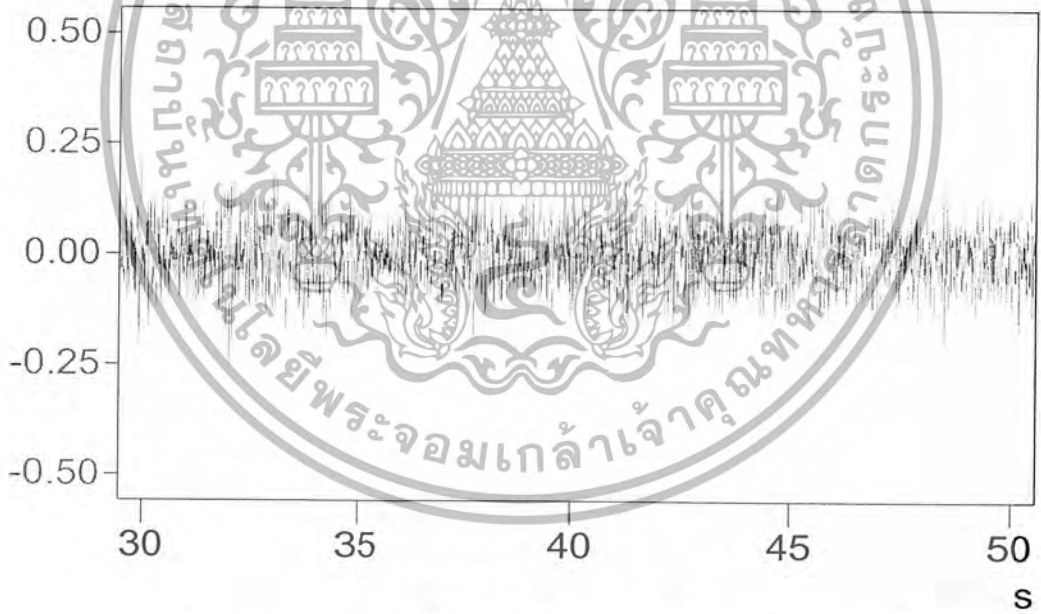
รูปที่ 3.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 1 ชั้น มวล 1000 กรัม



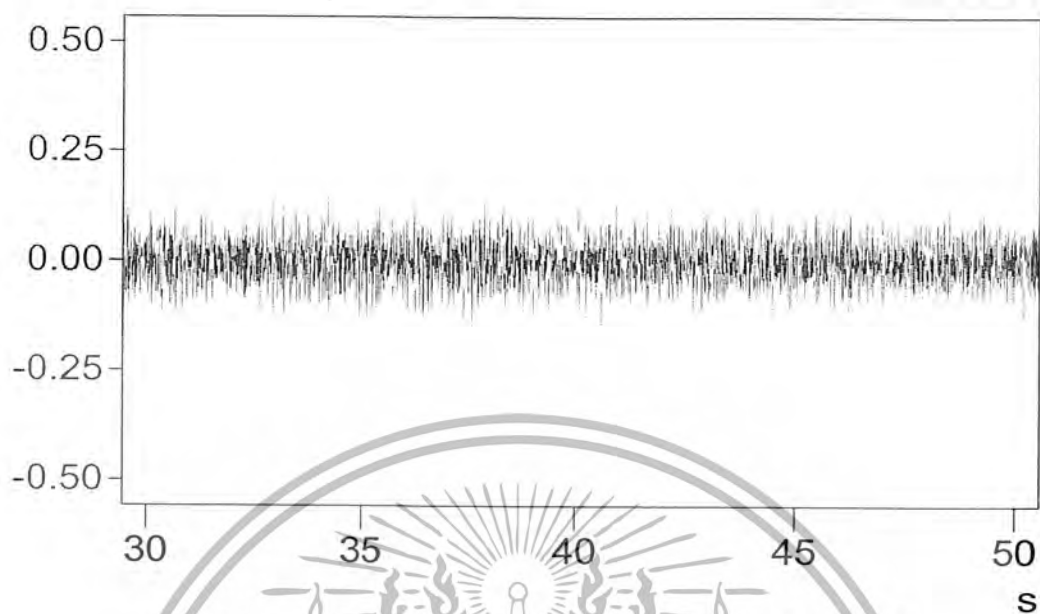
รูปที่ ง.63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



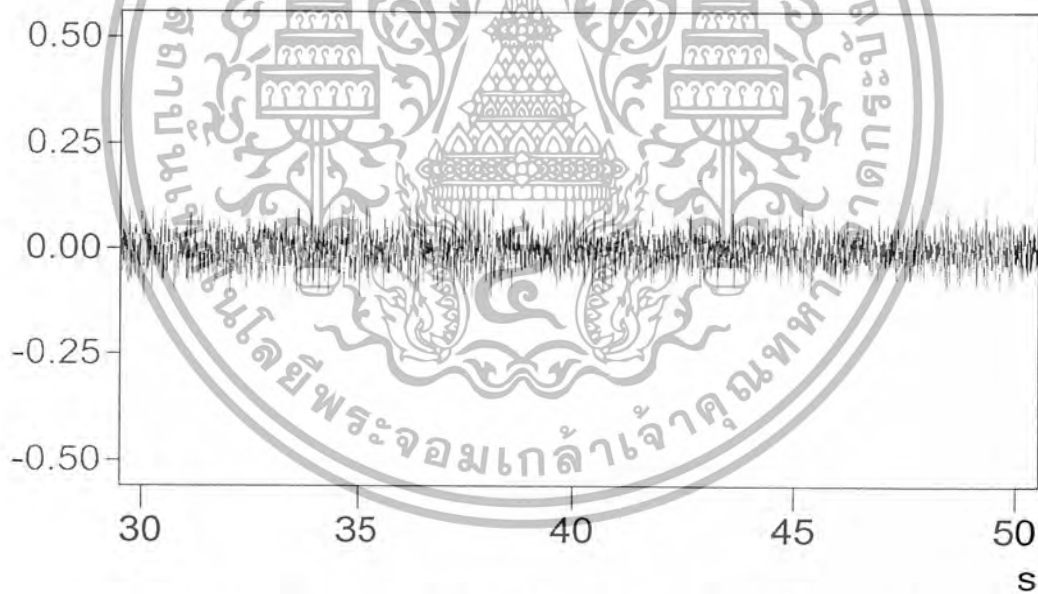
รูปที่ ง.64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 2 ชั้น มวล 1000 กรัม



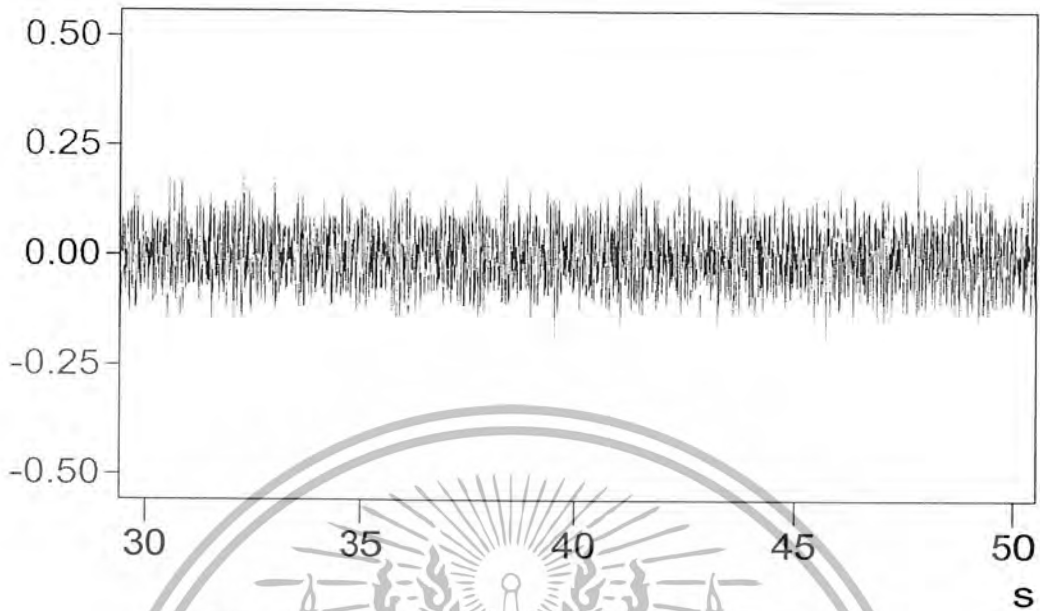
รูปที่ 3.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



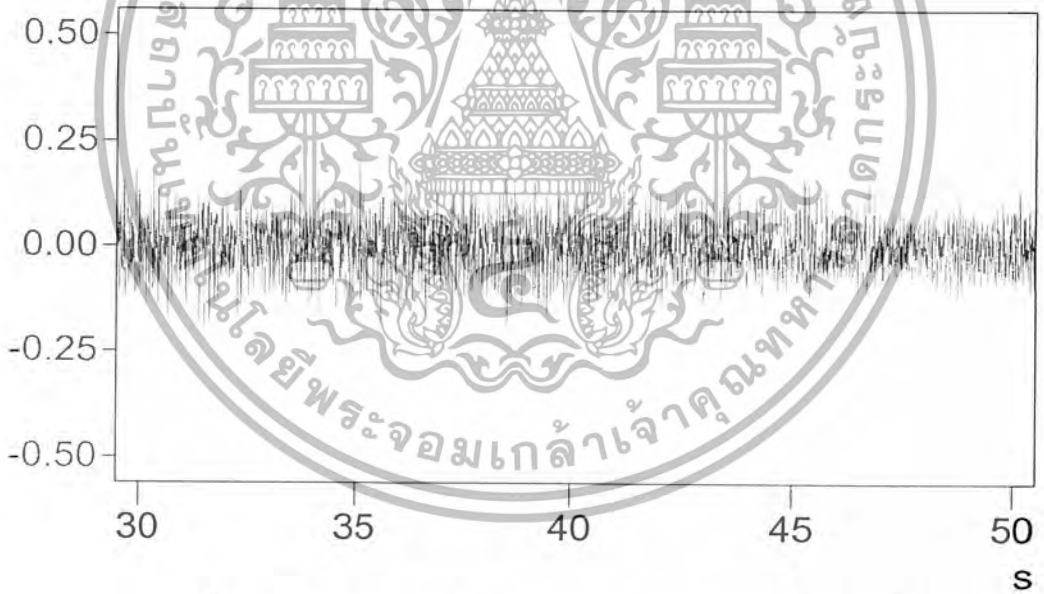
รูปที่ 3.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 3 ชั้น มวล 1000 กรัม



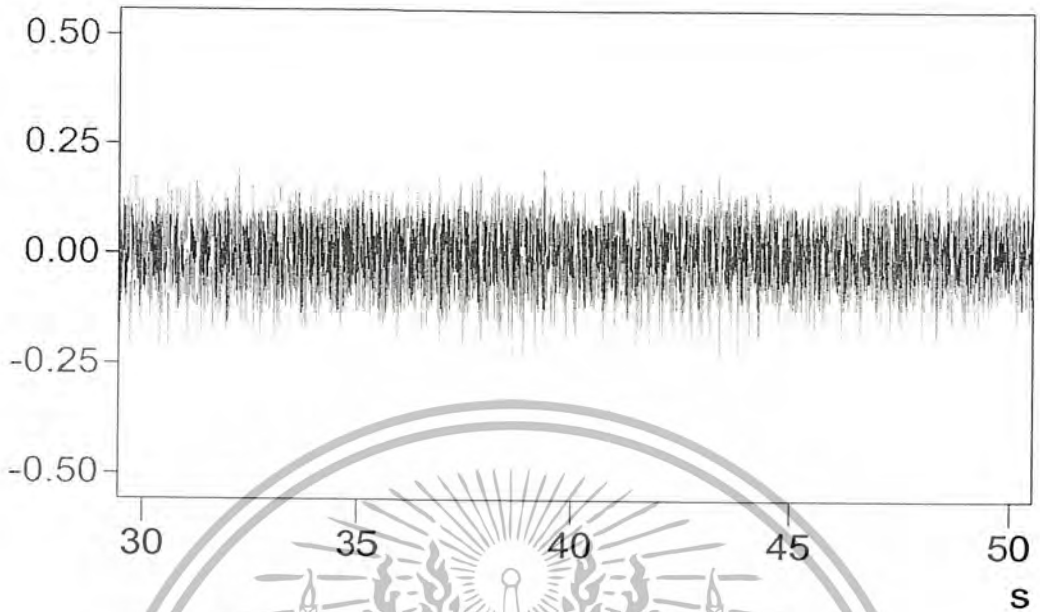
รูปที่ ๓.67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



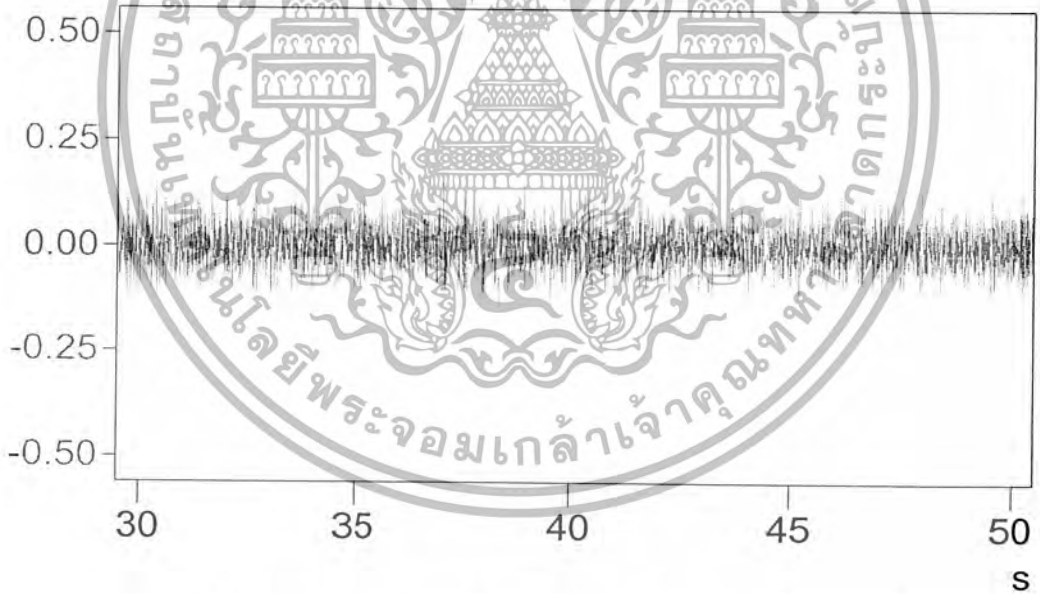
รูปที่ ๓.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 1 ชั้น มวล 1000 กรัม



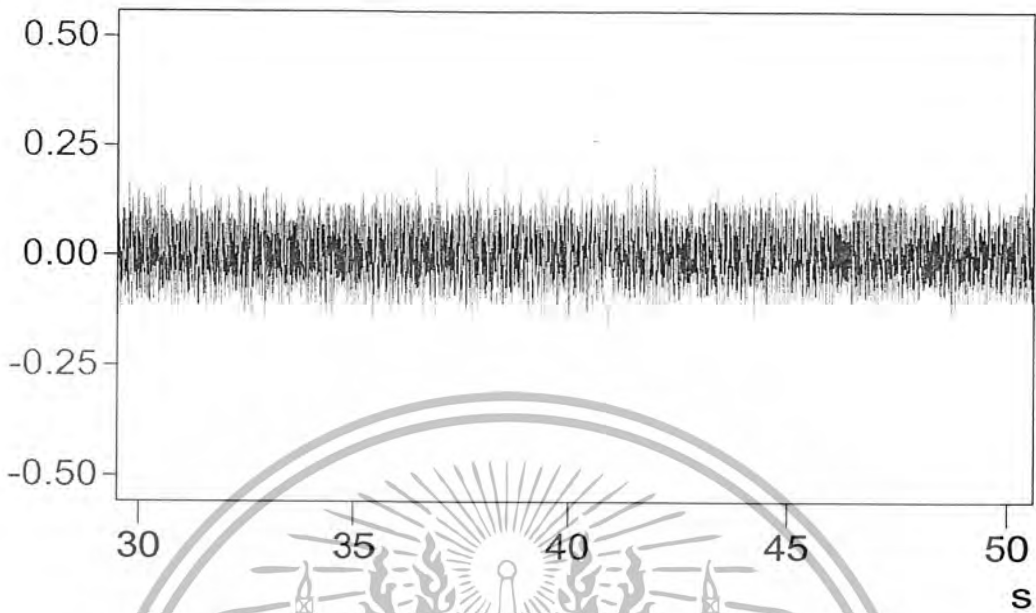
รูปที่ ๖.69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



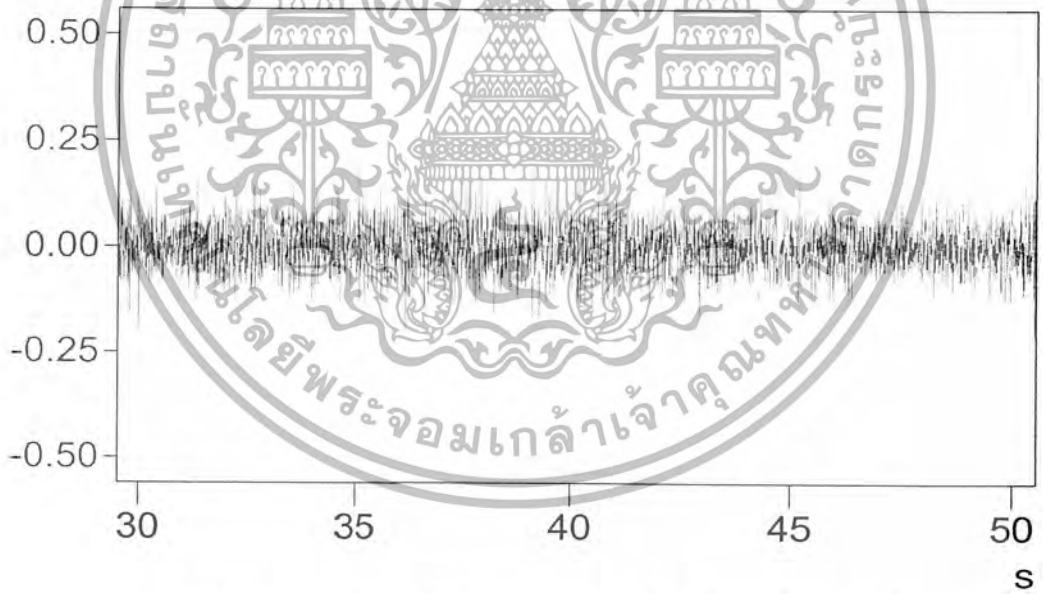
รูปที่ ๖.70 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 2 ชั้น มวล 1000 กรัม



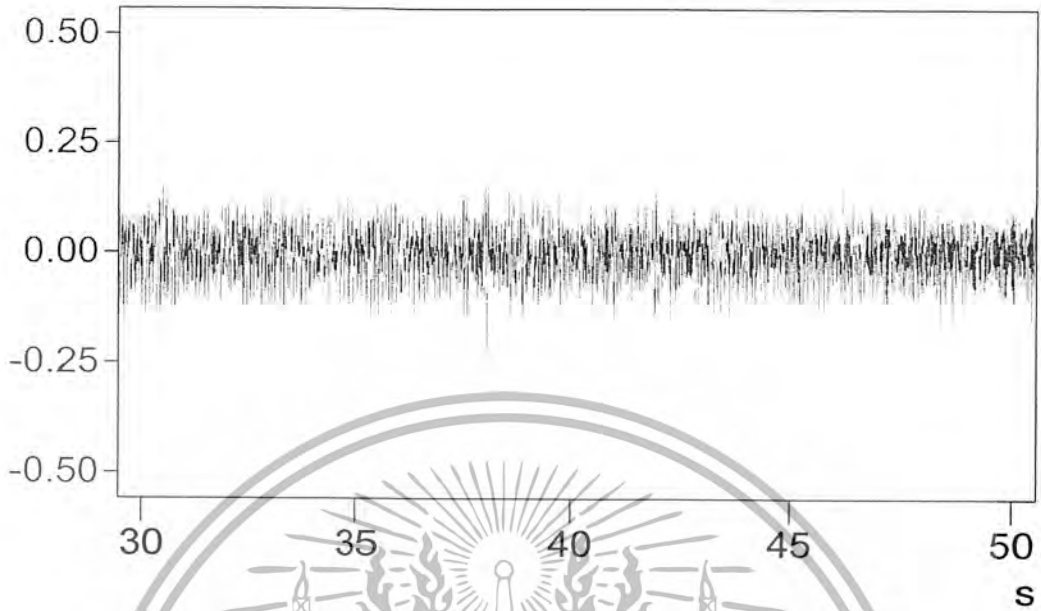
รูปที่ ง.71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



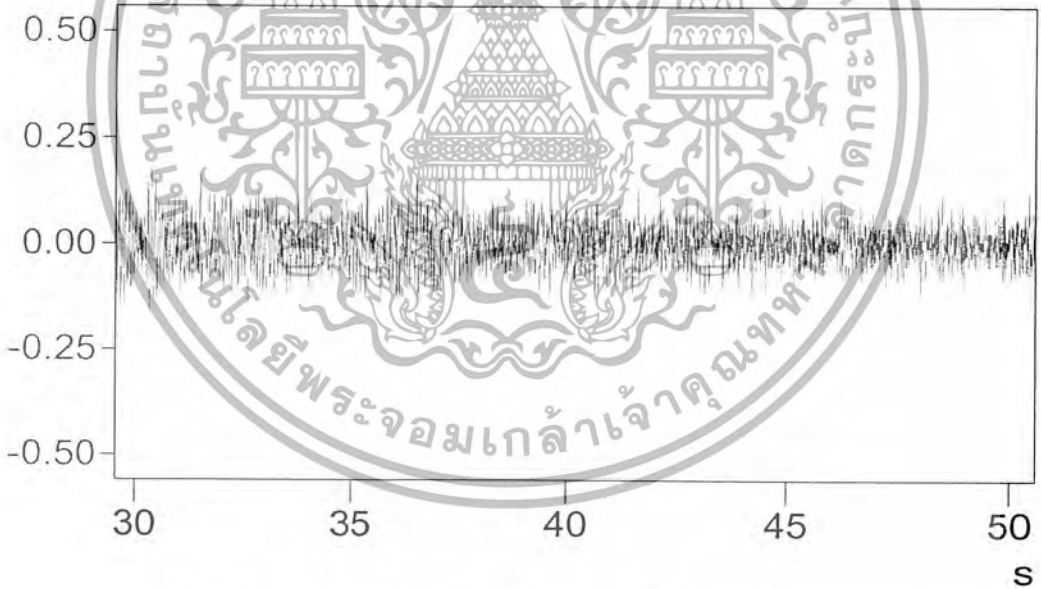
รูปที่ ง.72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 3 ชั้น มวล 1000 กรัม



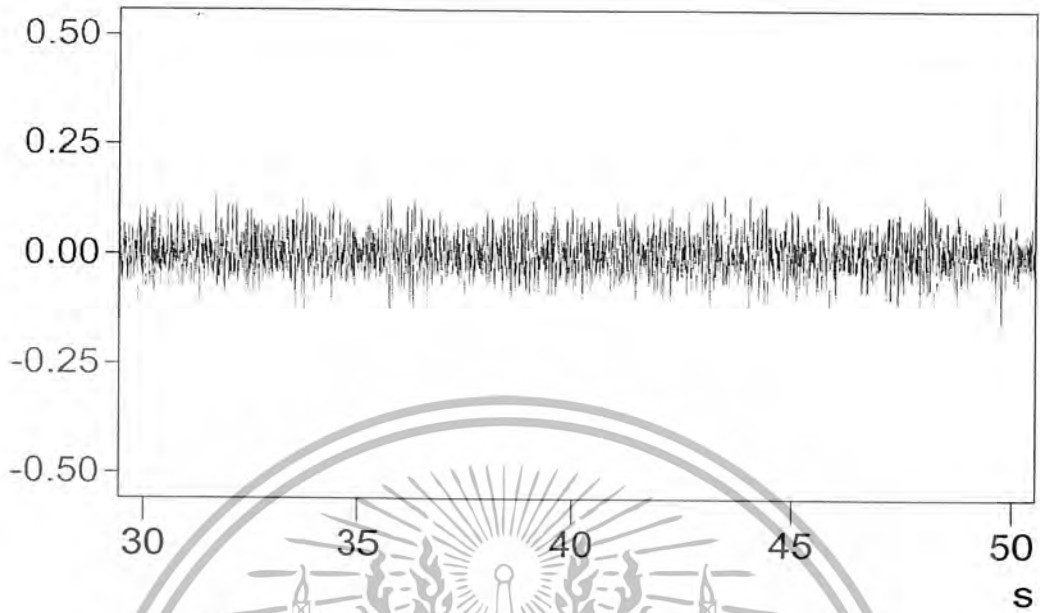
รูปที่ ง.73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



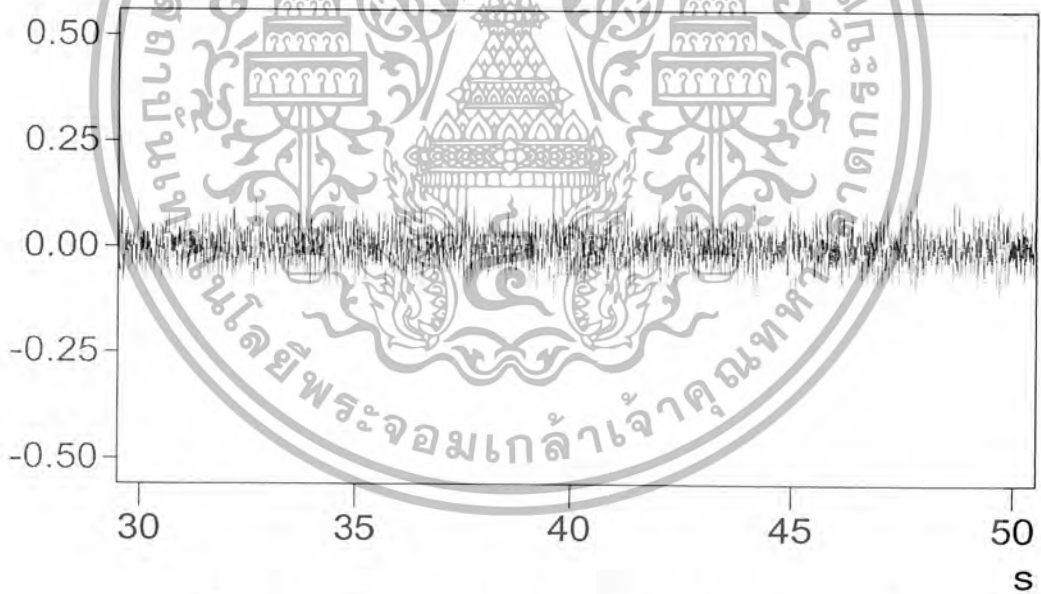
รูปที่ ง.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองสะพานความหนา 1 ชั้น มวล 1500 กรัม



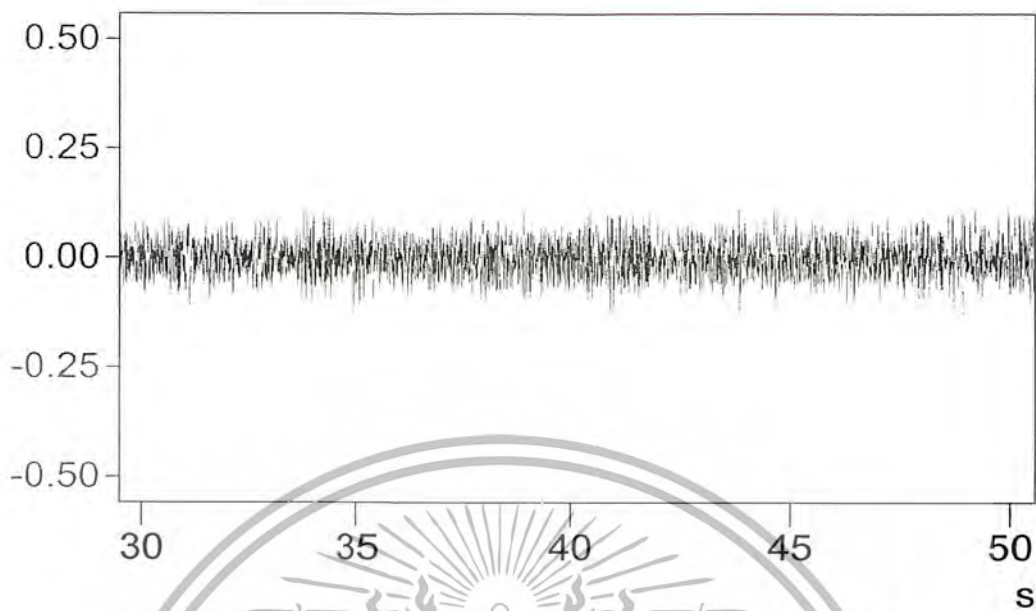
รูปที่ ๓.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



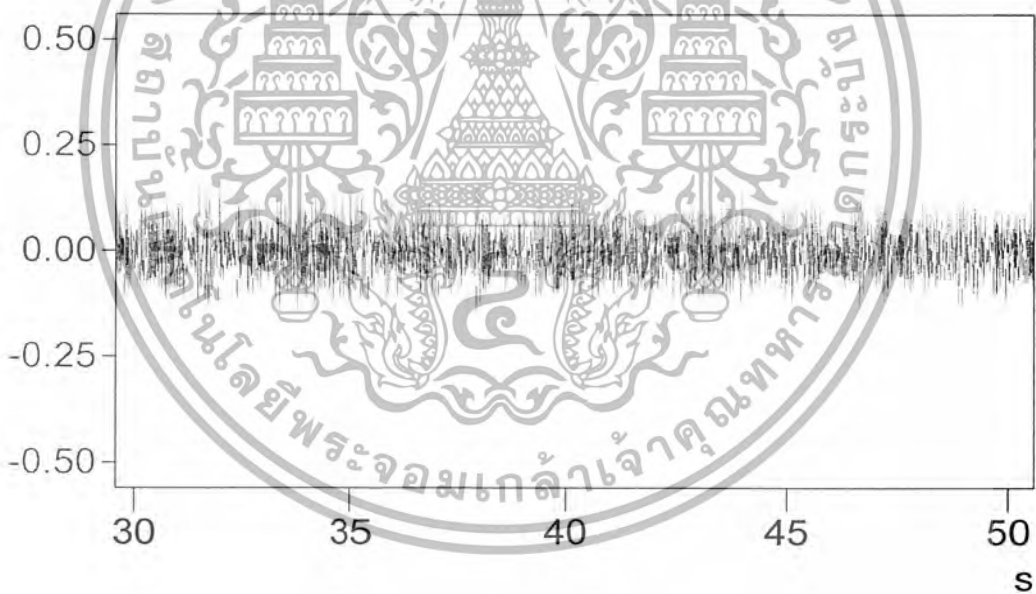
รูปที่ ๓.76 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองสะพานความหนา 2 ชั้น มวล 1500 กรัม



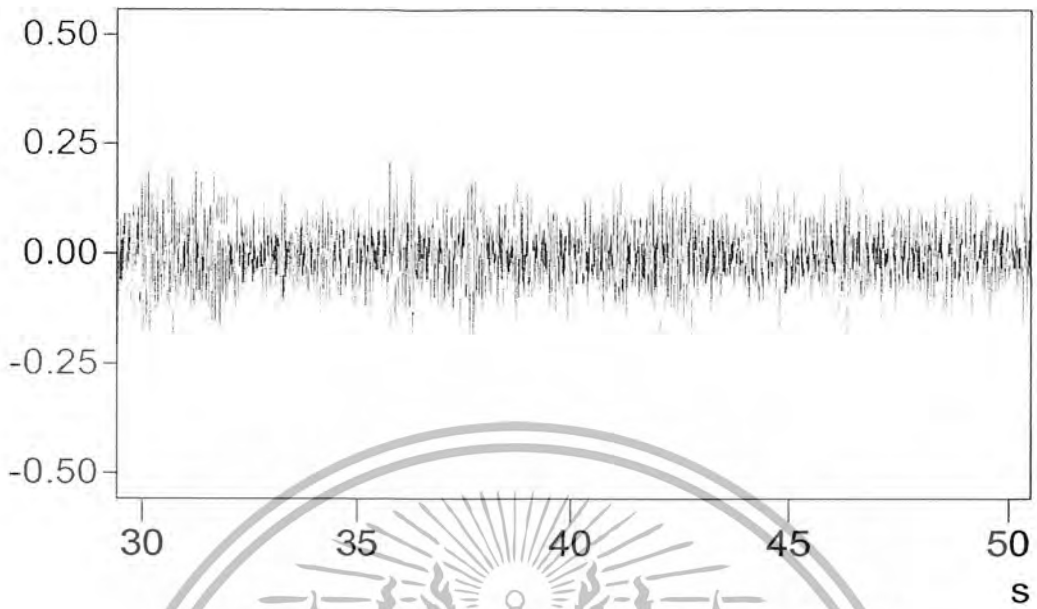
รูปที่ ง.77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



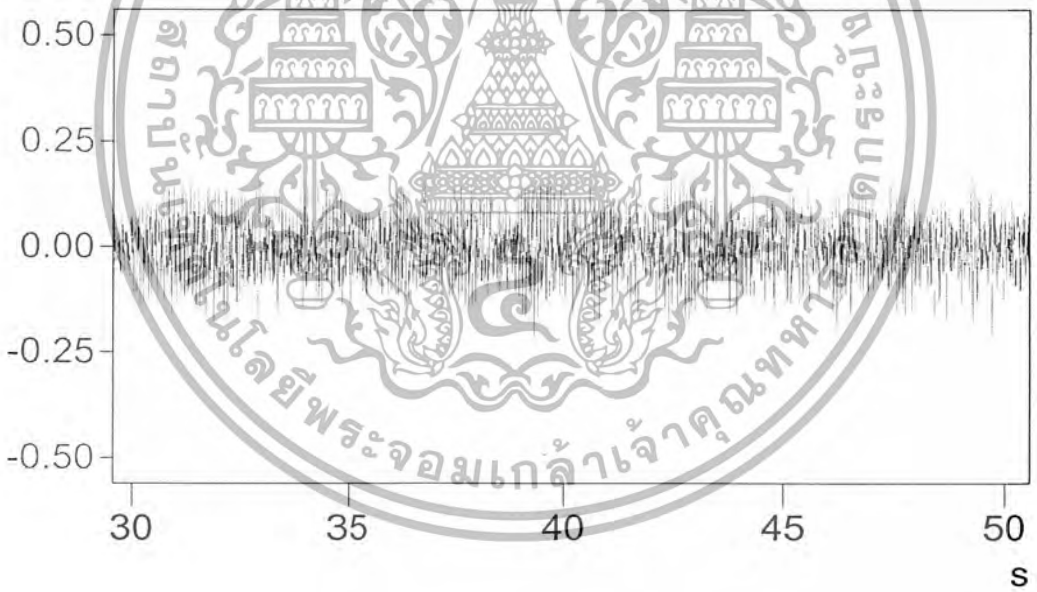
รูปที่ ง.78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองสะพานความหนา 3 ชั้น มวล 1500 กรัม



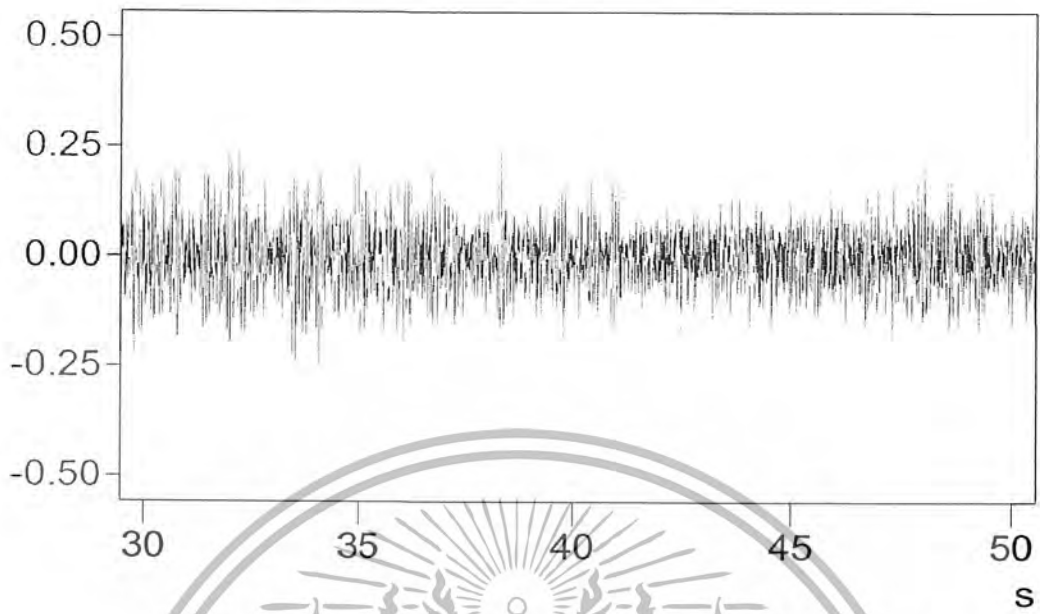
รูปที่ ง.79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



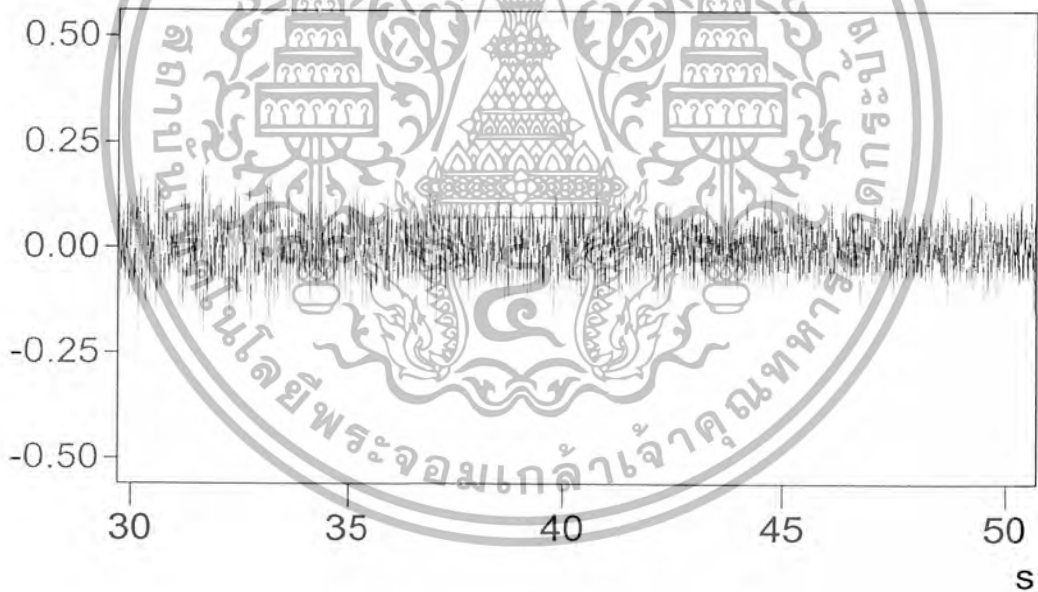
รูปที่ ง.80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 1 ชั้น มวล 1500 กรัม



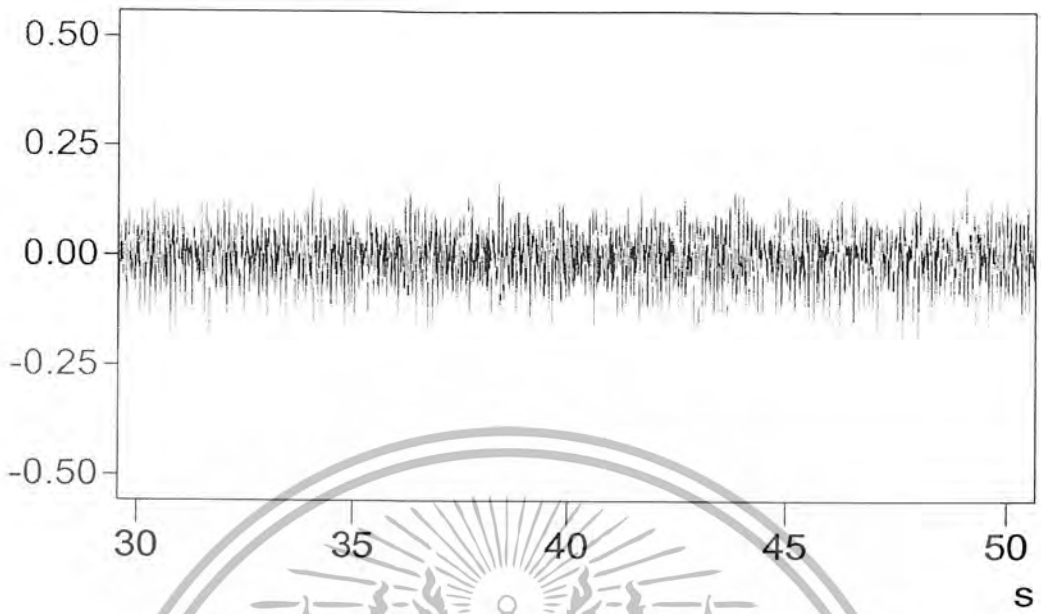
รูปที่ ๘.๘1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



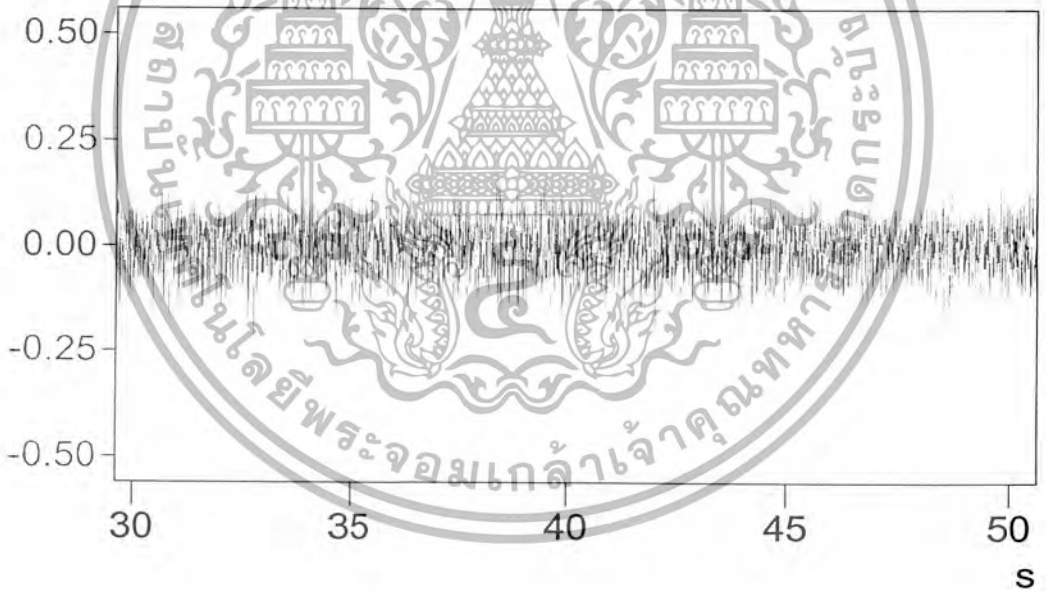
รูปที่ ๘.๘๒ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ ๒

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 2 ชั้น มวล 1500 กรัม



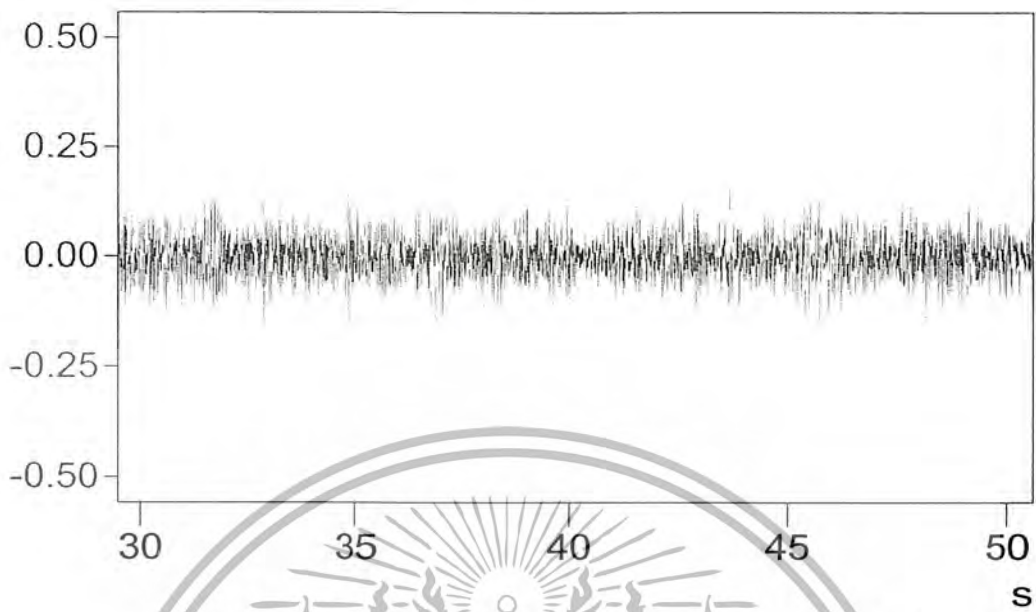
รูปที่ ๓.๘๓ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



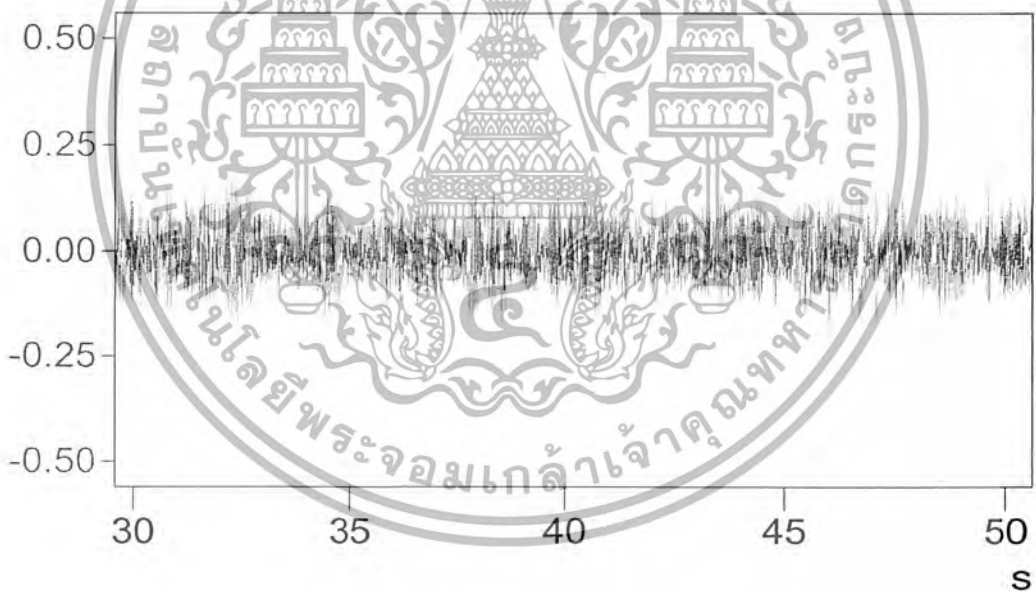
รูปที่ ๓.๘๔ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรองแท่นเครื่องความหนา 3 ชั้น มวล 1500 กรัม



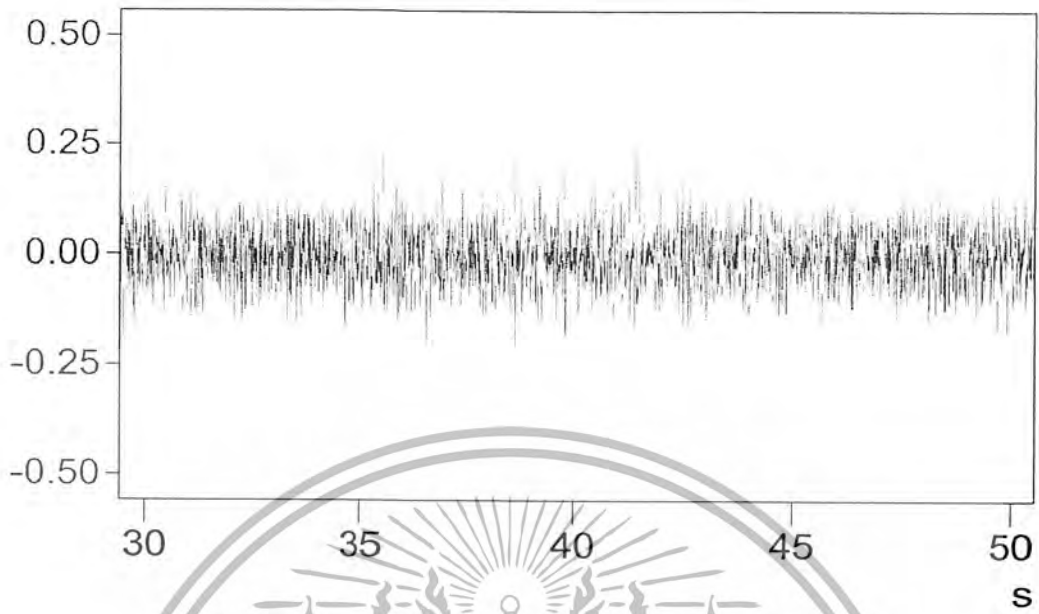
รูปที่ ง.85 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



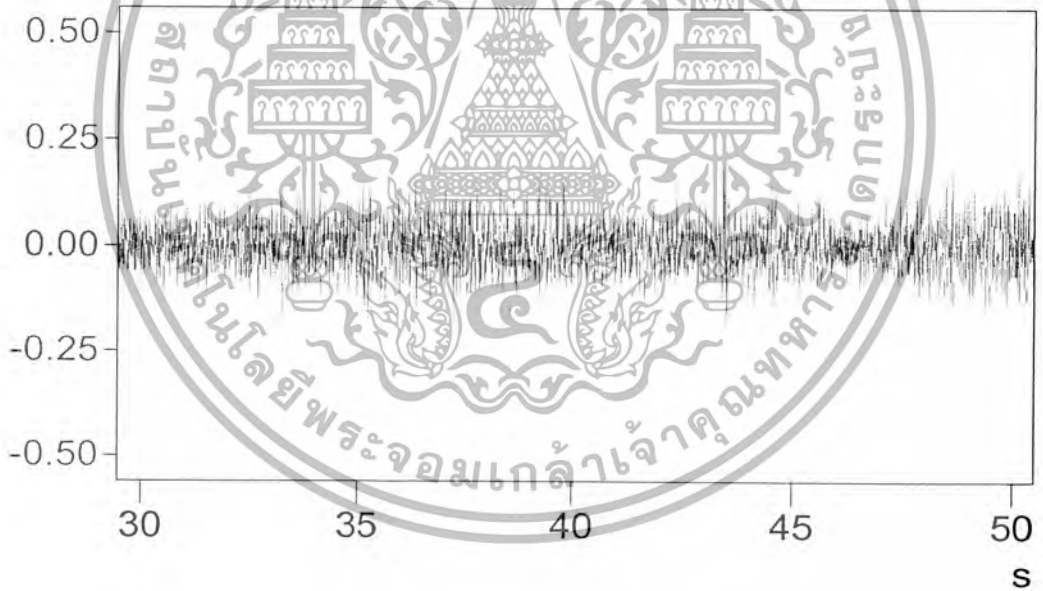
รูปที่ ง.86 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 1 ชั้น มวล 1500 กรัม



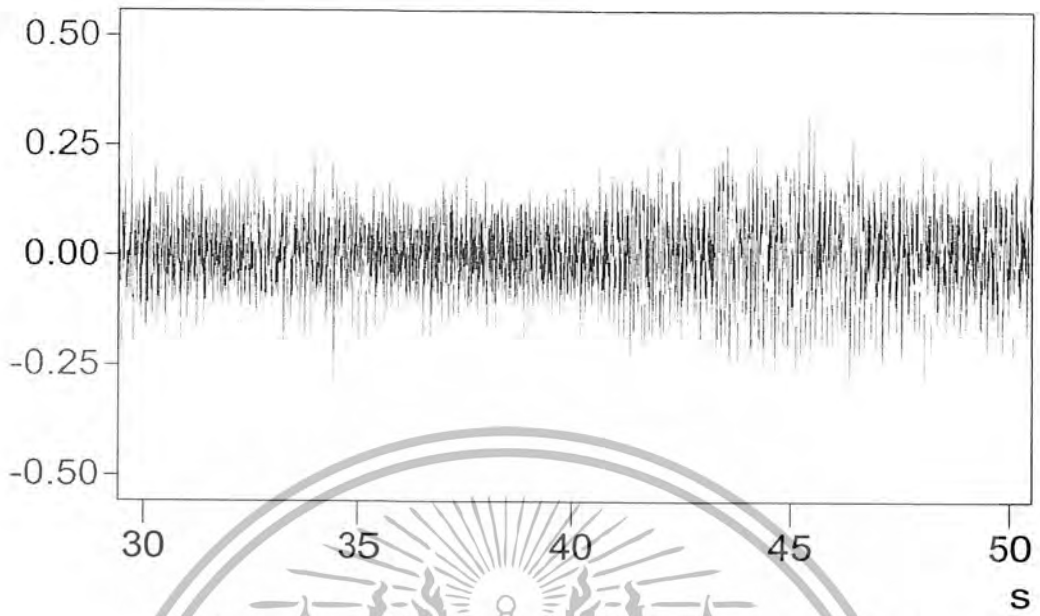
รูปที่ ๙.๘๗ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



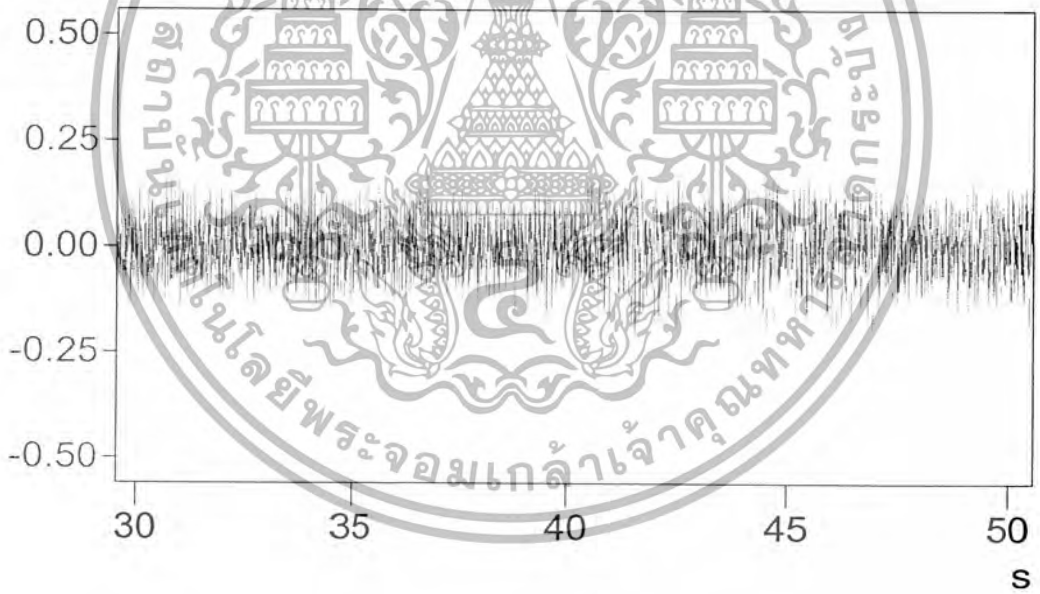
รูปที่ ๙.๘๘ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ ๒

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 2 ชั้น มวล 1500 กรัม



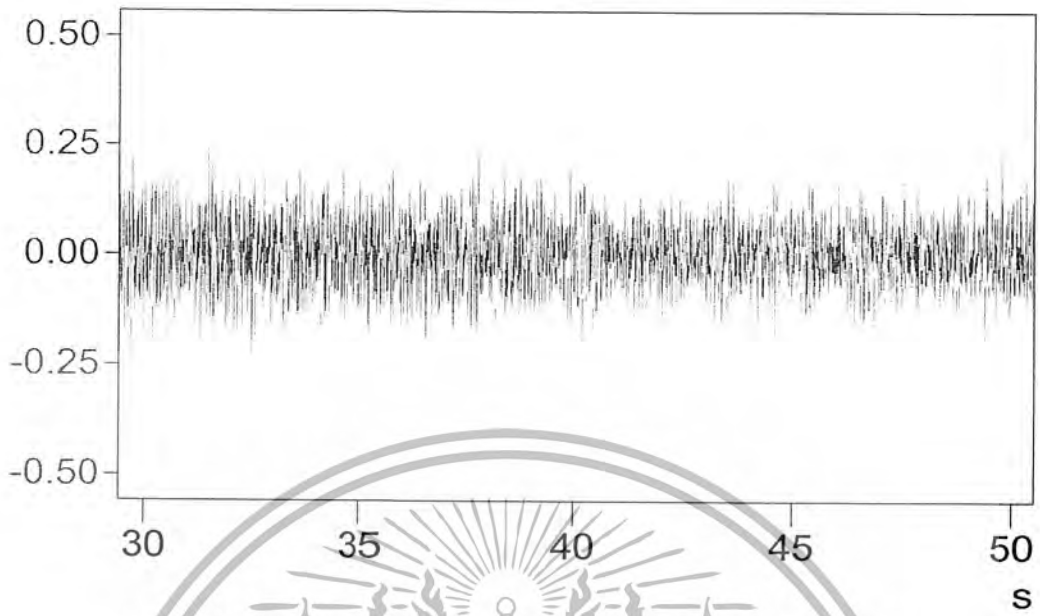
รูปที่ ๓.89 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



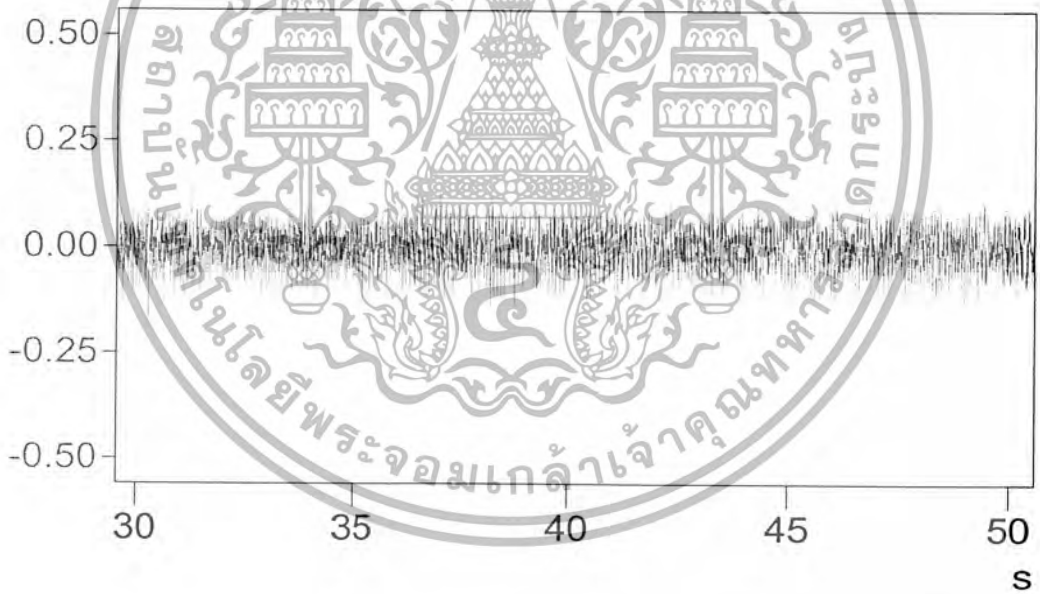
รูปที่ ๓.90 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพองน้ำความหนา 3 ชั้น มวล 1500 กรัม



รูปที่ ๑.๑1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ ๑.๑๒ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

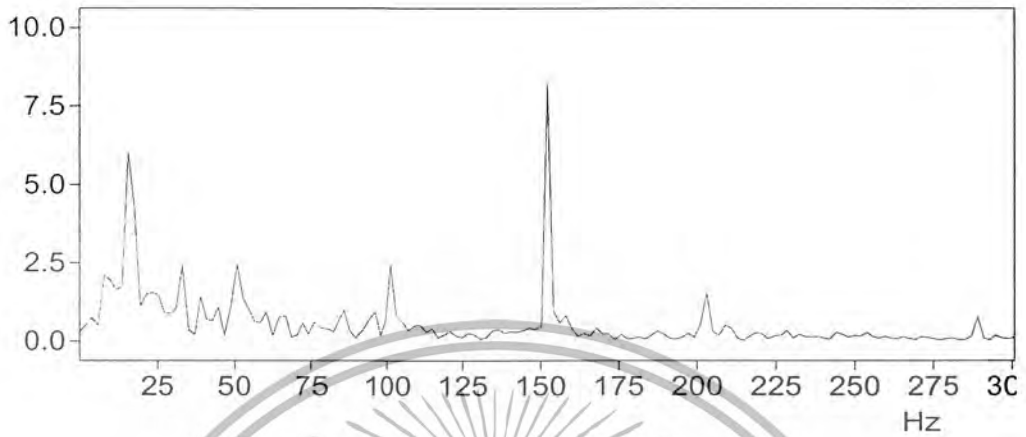
ภาคผนวก จ.

กราฟ Power Spectrum แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่  
กับความเร็ว

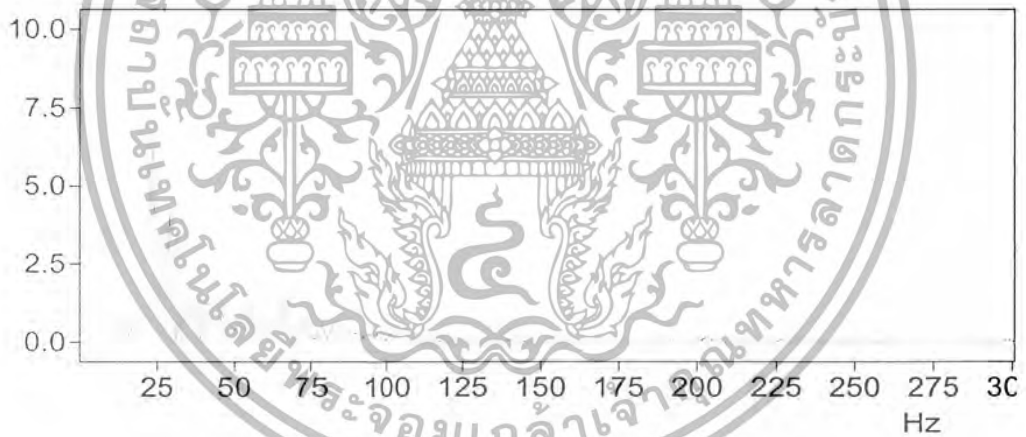


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบไม่มียางรอง



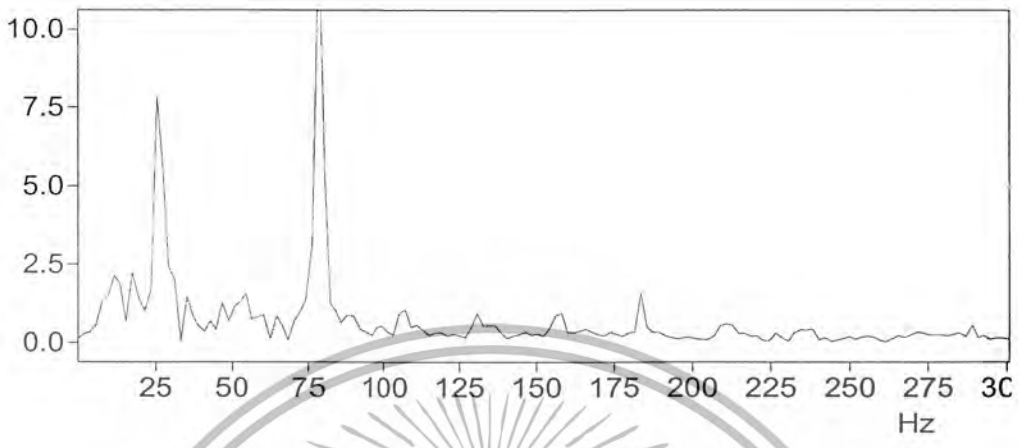
รูปที่ จ.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร่งที่ตำแหน่งที่ 1



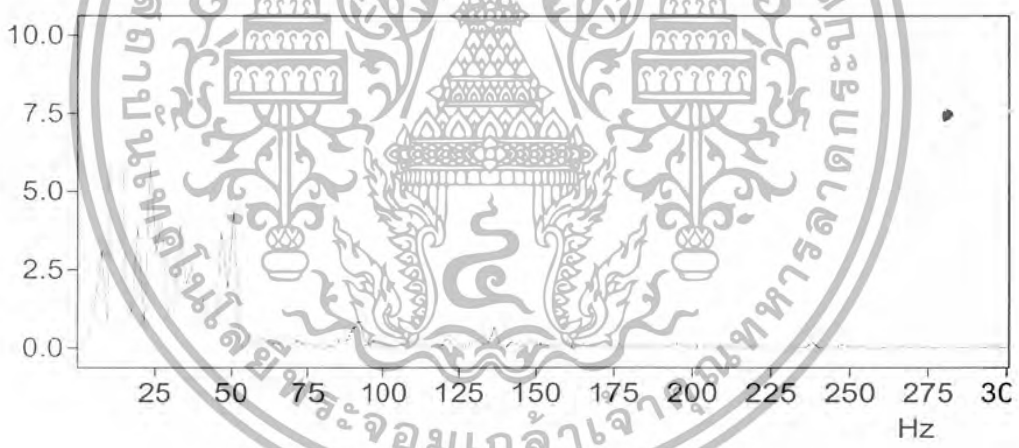
รูปที่ จ.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร่งที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบยางรองสะพาน 1 ชั้น



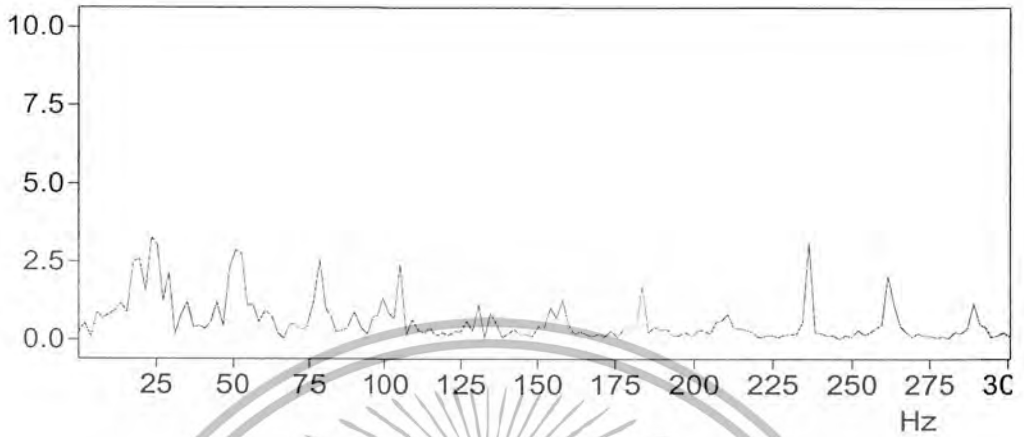
รูปที่ จ.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 1



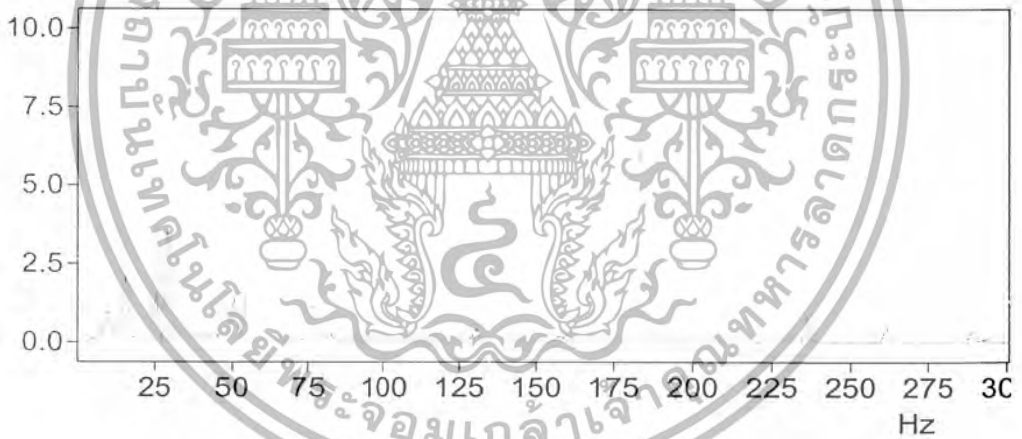
รูปที่ จ.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบขางรองสะพาน 2 ชั้น



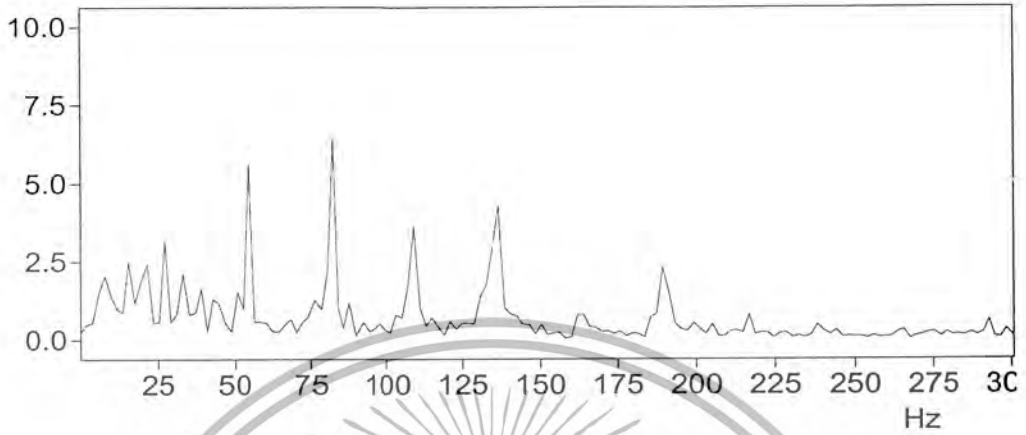
รูปที่ จ.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 1



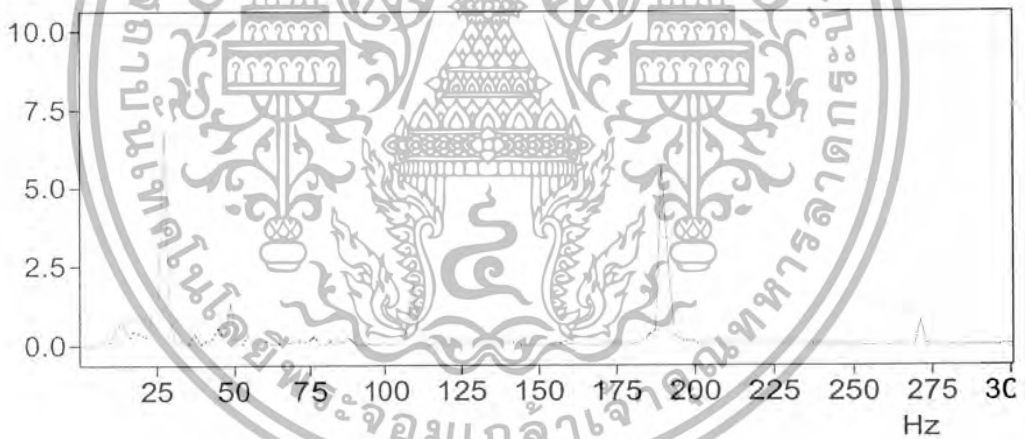
รูปที่ จ.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบขยงรองสะพาน 3 ชั้น



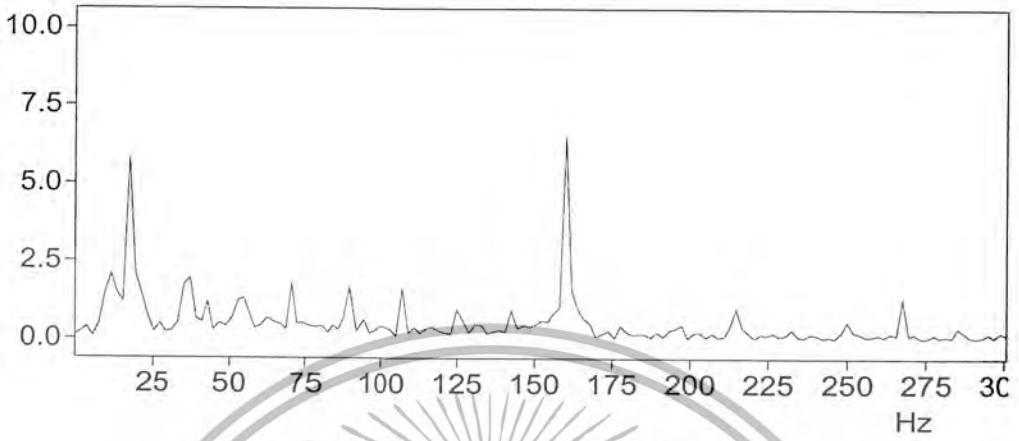
รูปที่ จ.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่1



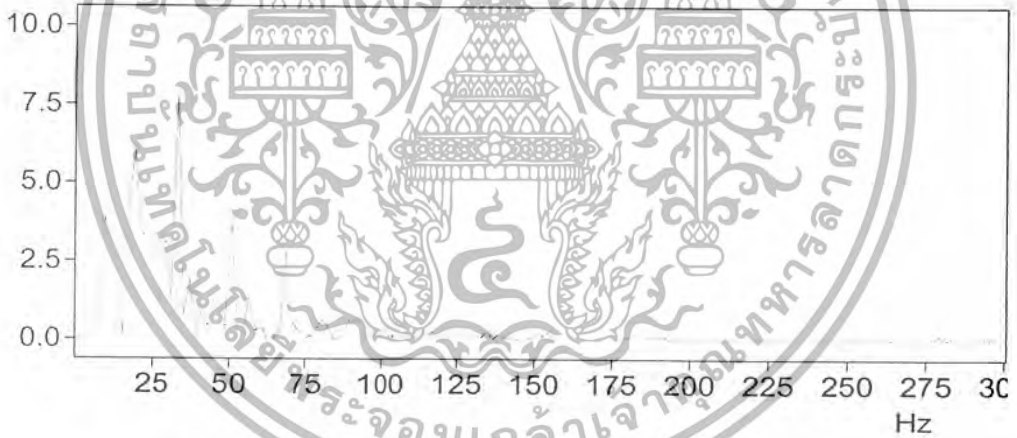
รูปที่ จ.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบขยารองแทนเครื่อง 1 ชั้น



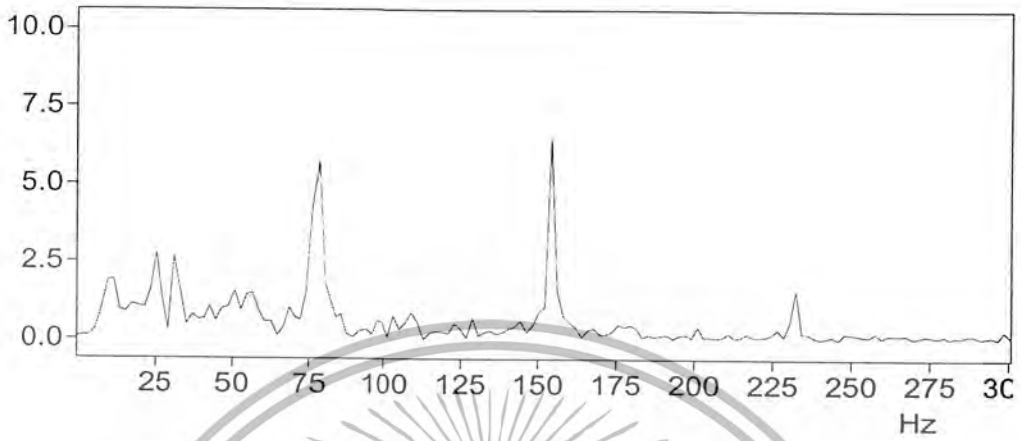
รูปที่ จ.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 1



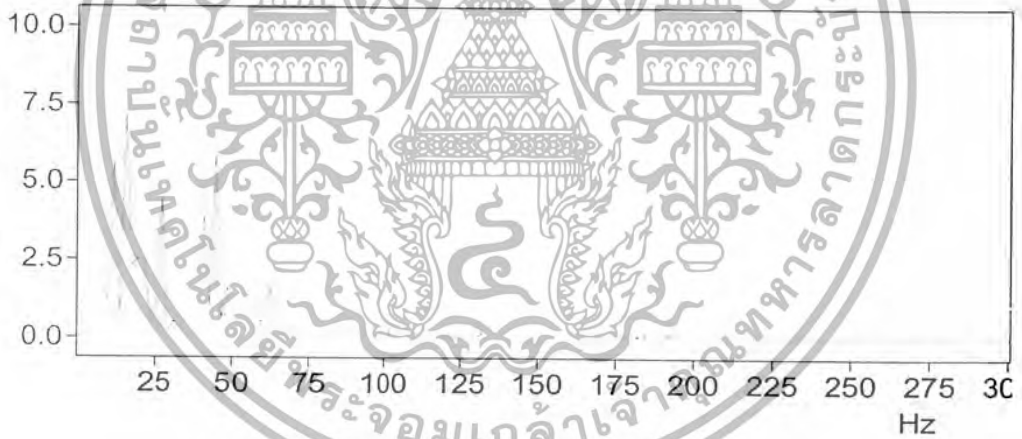
รูปที่ จ.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบขยงรองแท่นครื่อง 2 ชั้น



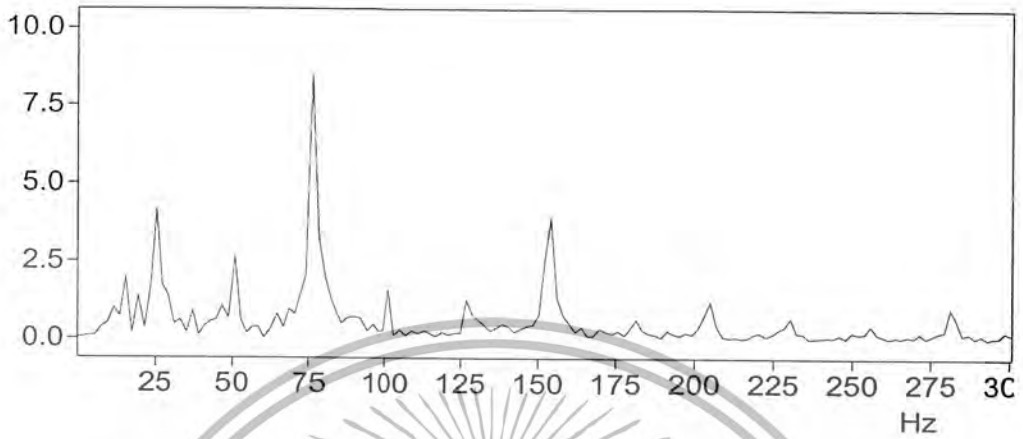
รูปที่ จ.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่1



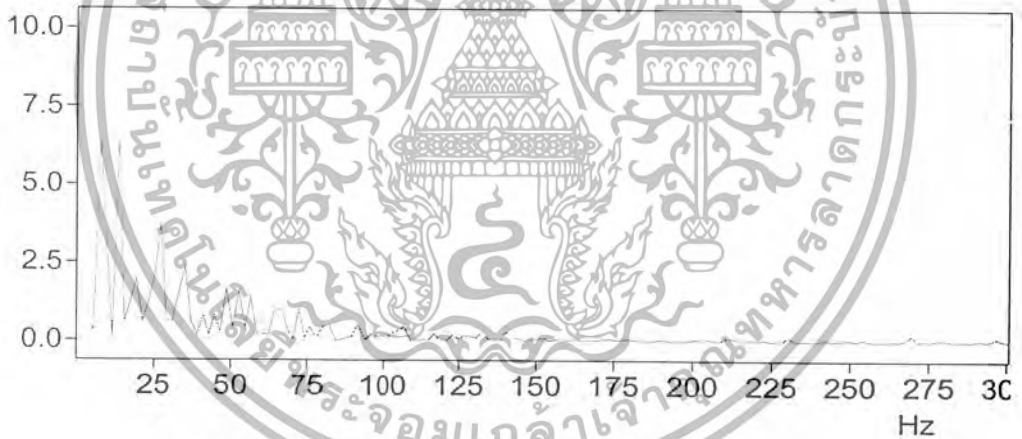
รูปที่ จ.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบขางรอนแท่นเครื่อง 3 ชั้น



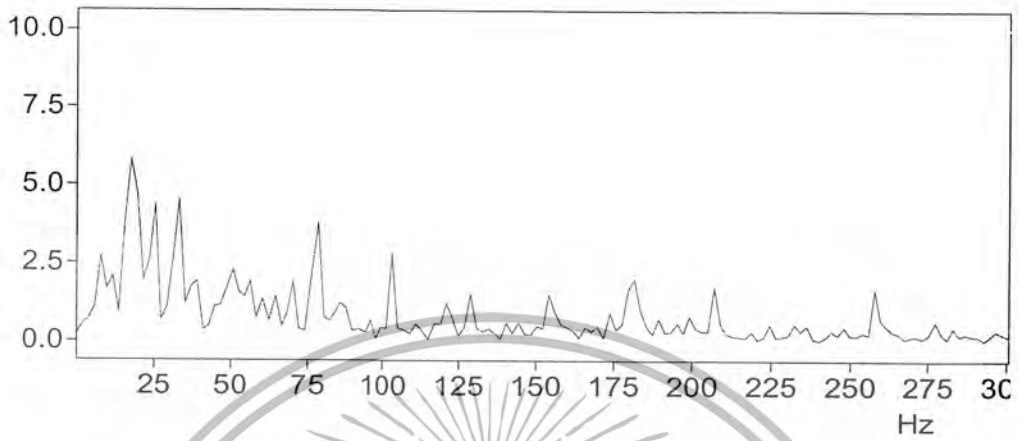
รูปที่ จ.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 1



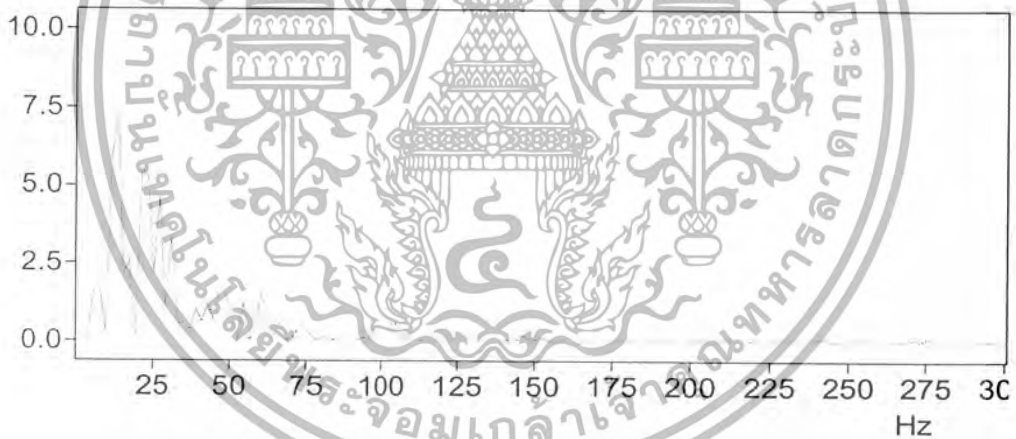
รูปที่ จ.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบยางพองน้ำ 1 ชั้น



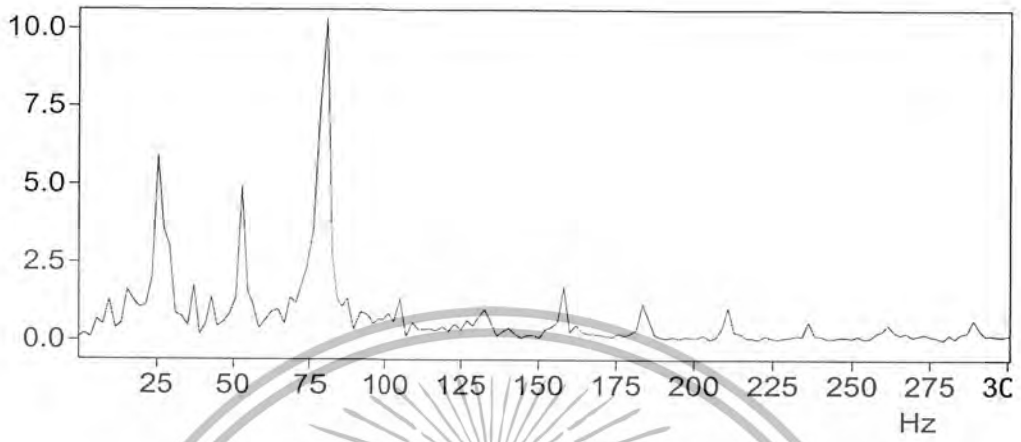
รูปที่ จ.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 1



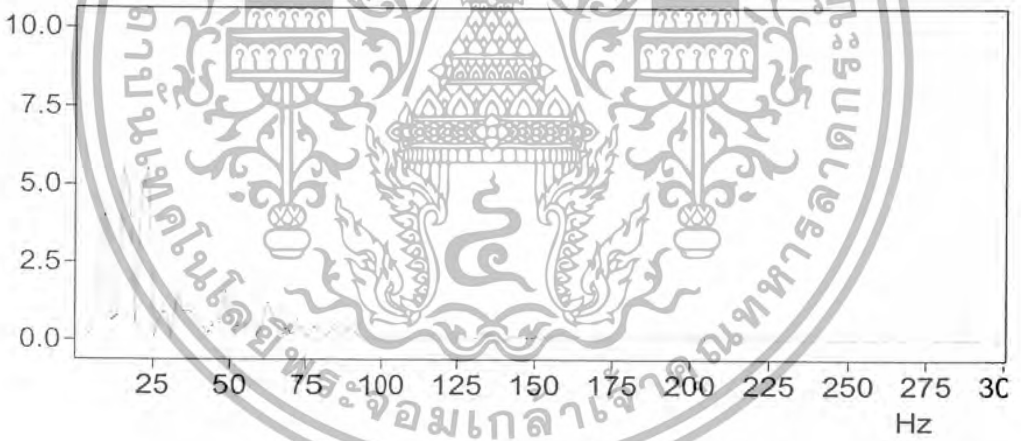
รูปที่ จ.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบยางพองน้ำ 2 ชั้น



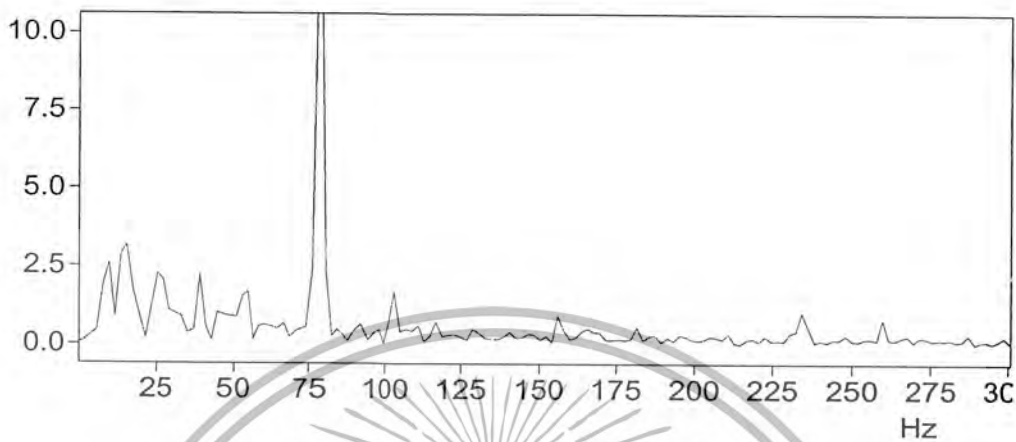
รูปที่ จ.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 1



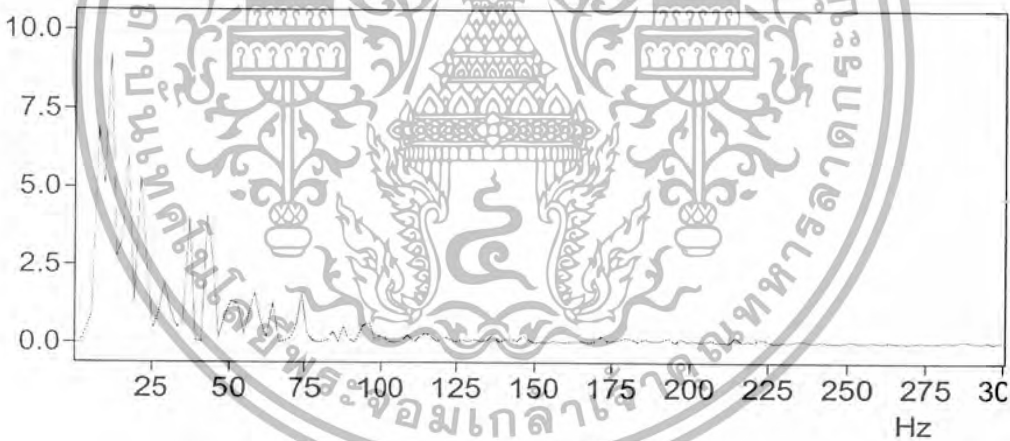
รูปที่ จ.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบยางพองน้ำ 3 ชั้น



รูปที่ จ.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ จ.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] William T Thomson & Marie Dillon Dahleh “Theory of Vibration with Applications “ Prentice-Hall International Inc. ,1993,pp.63-67
- [2] John M. Vance “ Rotordynamics Of Terbomachinery ” John Wiley & Sons.
- [3] ศ.ดร.วริทธิ์ อังภากรณ์ และ รศ.ชาญ ถนัดงาน, “การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1”, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), กรุงเทพฯ,พ.ศ.2541, หน้า 363-367
- [4] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, “ข้อมูลวิชาการยางพารา2545” , โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด , กรุงเทพฯ , พ.ศ.2545 , หน้า 85-101
- [5] มนตรี พิรุณเกษตร, “วิศวกรรมการสันสะเทือน” , บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), กรุงเทพฯ, พ.ศ.2542, หน้า 76-93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้