

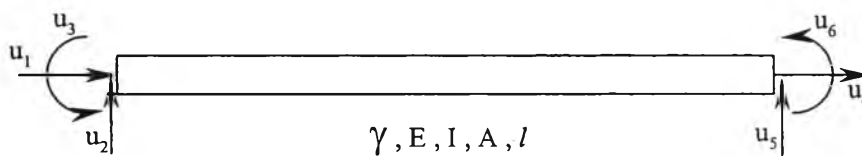
## รายการอ้างอิง

1. James, M.L., Smith, G. M., Wolford, J. C. and Whaley, P. W. Vibration of Mechanical and Structural System : with Microcomputer Application. HarperCollins College Publishers, 1993.
2. Thomson, W. T. Theory of Vibration with Applications. Prentice-Hall, Inc. 1993
3. Smith, B.T. Matrix Eigensystem Routines-EISPACK Guide. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin , 1976.
4. Kiureghian, A. D. Dynamic Responce of Light Equipment in Structure. University of California, Berkeley , 1981.
5. Reynolds, D. D. Engineering Principles of Acoustics : Noise and Vibration Control. Allyn and Bacon, Inc., 1981
6. Work, V. Machinery Vibration : Measurement and Analysis. McGraw-Hill, Inc., 1991
7. Vladimir, K. Dynamics in Engineering Structures. Butturworths London , 1973.
8. Anil, K. C. Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc., 1995.
9. Paz, M. Structural Dynamics : Theory and Computation. Van Nostrand Reinhold Company, Inc., 1985.
10. Neubert, V. H. Synthesis of Vibrating System. ASME., United Engineering Center, 1971.
11. Crawford, A. R. and Crawford, S. The Simplified Handbook of Vibration Analysis Vol. 1 : Introduction to Vibration Analysis Fundamentals. Computational Systems, Inc. 1992.
12. Crawford, A. R. and Crawford, S. The Simplified Handbook of Vibration Analysis Vol. 2 : Applied Vibration Analysis. Computational Systems, Inc. 1992.
13. Tuma, J. J. Handbook of Numerical Calculations in Engineering. McGraw-Hill Publishing Company, 1989.
14. ก่อเกียรติ บุญชูกุล และคณะ. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน : การเฝ้าตรวจและการจัดการดูแลรักษา. กรุงเทพฯ : เม็ดทรายพริ้นติ้ง , 2539.
15. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2537.

## ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก. : การหาเมตริกซ์มวลและเมตริกซ์ความแข็งแกร่งของเอลิเมนต์คานแบบออยเลอร์**

วิธีการที่ใช้ในการหาค่าเมตริกซ์ของระบบสมการที่จะใช้เป็นตัวแทนของระบบการสั่นสะเทือนของคานนี้ อาศัยการกำหนดฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) เพื่อหาฟังก์ชันการเคลื่อนตัวของแต่ละพิกัด จากนั้นนำไปหาพลังงานศักย์และพลังงานจลน์รวมของคาน แล้วนำค่าที่ได้ทั้งหมดแทนค่าลงในสมการของลากรางจ์ (Lagrange's Equation) ซึ่งในที่สุดจะได้เมตริกซ์มวล และเมตริกซ์ความแข็งแกร่งออกมา โดยคาน 1 เอลิเมนต์มีระดับขั้นความเสรี 6 ค่า แบ่งออกเป็น 2 ส่วนซึ่งสมมติให้เป็นอิสระต่อกัน ได้แก่ ส่วนการขจัดของพิกัดตามแนวแกน (Axial deformations) มีอยู่ 2 ค่า และส่วนการขจัดเนื่องจากการโก่งตัวของคาน (Bending deformations) มีอยู่ 4 ค่า คือการขจัดในแนวตั้ง 2 ค่า และการขจัดเนื่องจากการหมุนอีก 2 ค่า ดังรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 พิกัดการขจัดของคานแบบออยเลอร์ ใน 2 มิติ 1 เอลิเมนต์

**1.) การหาฟังก์ชันการเคลื่อนตัวของพิกัดตามแนวแกนของคาน ( $u_1$  และ  $u_4$ )**

ประมาณเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น  $\phi(x) = a + b \cdot x$  (ก-1)

เงื่อนไขขอบเขต

$$u(0,t) = u_1 \quad , \quad u(l,t) = u_4 \quad (ก-2)$$

ฟังก์ชันรูปร่าง

$$\begin{aligned} \phi_1(0) &= 1 & , & & \phi_1(l) &= 0 \\ \phi_4(0) &= 0 & , & & \phi_4(l) &= 1 \end{aligned} \quad (ก-3)$$

แทนค่าในสมการที่ (ก-1) ดังนั้น

$$\phi_1(x) = 1 - \frac{x}{l} \quad , \quad \phi_4(x) = \frac{x}{l} \quad (ก-4)$$

2.) การหาค่าฟังก์ชันการเคลื่อนตัวของพิกัดการโค้งตัวของคาน (  $u_2, u_3, u_5$  และ  $u_6$  )

ประมาณเป็นฟังก์ชันพหุนามดีกรี 3

$$\phi(x) = a + b.x + c.x^2 + d.x^3 \quad (ก-5)$$

เงื่อนไขขอบเขต

$$\begin{aligned} y(0,t) &= u_2 & , & & y(l,t) &= u_5 \\ \frac{\partial y}{\partial x}(0,t) &= u_3 & , & & \frac{\partial y}{\partial x}(l,t) &= u_6 \end{aligned} \quad (ก-6)$$

ฟังก์ชันรูปร่าง

$$\begin{aligned} \phi_2(0) &= 1 & \phi'_2(0) &= 0 & \phi_2(l) &= 0 & \phi'_2(l) &= 0 \\ \phi_3(0) &= 0 & \phi'_3(0) &= 1 & \phi_3(l) &= 0 & \phi'_3(l) &= 0 \\ \phi_5(0) &= 0 & \phi'_5(0) &= 0 & \phi_5(l) &= 1 & \phi'_5(l) &= 0 \\ \phi_6(0) &= 0 & \phi'_6(0) &= 0 & \phi_6(l) &= 0 & \phi'_6(l) &= 1 \end{aligned} \quad (ก-7)$$

แทนค่าในสมการที่ (ก-5) ดังนั้น

$$\begin{aligned} \phi_2(x) &= 1 - 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 & , & & \phi_3(x) &= x \left[ 1 - 2\left(\frac{x}{l}\right) + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \right] \\ \phi_5(x) &= 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 & , & & \phi_6(x) &= x \left[ \left(\frac{x}{l}\right)^2 - \left(\frac{x}{l}\right) \right] \end{aligned} \quad (ก-8)$$

ซึ่งฟังก์ชันการขจัดของคานจะอยู่ในรูป

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^6 \phi_i(x).u_i \quad (ก-9)$$

3.) สมการของลากรางจ์

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{u}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial u_i} + \frac{\partial U}{\partial u_i} = Q_i \quad , i = 1, 2, \dots, n \quad (ก-10)$$

โดยที่  $T$  คือ พลังงานจลน์รวม  $U$  คือพลังงานศักย์รวม  $Q$  คือแรงกระตุ้นจากภายนอก และ  $u$  คือฟังก์ชันการขจัดของคาน เทอมแรกทางซ้ายมือเทียบได้กับสมาชิกของเมตริกซ์มวล เทอมที่ 2 ทางด้านซ้ายมีค่าเป็นศูนย์ และเทอมสุดท้ายทางด้านซ้ายคือสมาชิกของเมตริกซ์ความแข็งแกร่ง ดังนี้

พลังงานจลน์ของเอลิเมนต์คานหาได้จาก

$$T = \frac{\gamma l}{2} \int_0^l [\dot{u}(x,t)]^2 dx \quad (ก-11)$$

เมื่อนำค่าเหล่านี้แทนลงในเทอมแรกทางซ้ายมือของสมการที่ (ก-10) แล้วจะได้

$$m_{ij} = \left[ \gamma \int_0^l \phi_i(x) \phi_j(x) dx \right] \ddot{u}_i \quad , \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (ก-12)$$

สมการที่ (ก-12) นี้เมื่อแทนค่าของ  $i$  และ  $j$  ตั้งแต่ 1 ถึง 6 จะได้สมาชิกของเมตริกซ์มวล  $m_{ij}$  โดยพิภพที่เกี่ยวเนื่องกันระหว่างการขจัดในแนวแกนและการขจัดของการโก่งมีค่าเป็นศูนย์ ได้แก่ สมาชิกในตำแหน่ง (1,2) (1,3) (1,5) (1,6) (4,2) (4,3) (4,5) และ (4,6) ซึ่งเมื่อสลับตำแหน่งก็เป็นจริงด้วย ซึ่งในที่สุดจะได้

$$[m]_e = \frac{\gamma l}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22.l & 0 & 54 & -13.l \\ 0 & 22.l & 4.l^2 & 0 & 13.l & -3.l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13.l & 0 & 156 & -22.l \\ 0 & -13.l & -3.l^2 & 0 & -22.l & 4.l^2 \end{bmatrix} \quad (ก-13)$$

พลังงานศักย์ของเอลิเมนต์คานหาได้จาก

$$U = \frac{E.A.l}{2} \int_0^l \left[ \frac{\partial u}{\partial x}(x,t) \right]^2 dx \quad \text{สำหรับการขจัดตามแนวแกน} \quad (ก-14)$$

$$U = \frac{E.I}{2} \int_0^l \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x,t) \right]^2 dx \quad \text{สำหรับการขจัดของการโก่ง} \quad (\text{ก-15})$$

เมื่อนำค่าเหล่านี้แทนลงในเทอมสุดท้ายทางซ้ายมือของสมการ (ก-10) จะได้

$$k_{ij} = E.A \int_0^l \phi'_i(x) \phi'_j(x) dx \quad , \quad i, j = 1, 4 \quad (\text{ก-16})$$

$$k_{ij} = E.I \int_0^l \phi''_i(x) \phi''_j(x) dx \quad , \quad i, j = 2, 3, 5, 6 \quad (\text{ก-17})$$

สมการที่ (ก-16) และสมการที่ (ก-17) นี้เมื่อแทนค่าฟังก์ชันรูปร่างตั้งแต่ 1 ถึง 6 แล้วจะได้สมาชิกทุกตัวของเมตริกซ์ความแข็งแรง โดยมิลักษณะเช่นเดียวกับเมตริกซ์มวล นั่นคือเทอมที่เกี่ยวข้องกันระหว่างการขจัดตามแนวแกนและการขจัดสำหรับการโก่งของคาน นั่นมีค่าเป็นศูนย์ในที่สุดแล้วจะได้เมตริกซ์ความแข็งแรง ดังนี้

$$[k]_e = \frac{E.I}{l^3} \begin{bmatrix} \frac{A.l^2}{I} & 0 & 0 & -\frac{A.l^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6.l & 0 & -12 & 6.l \\ 0 & 6.l & 4.l^2 & 0 & -6.l & 2.l^2 \\ -\frac{A.l^2}{I} & 0 & 0 & \frac{A.l^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6.l & 0 & 12 & -6.l \\ 0 & 6.l & 2.l^2 & 0 & -6.l & 4.l^2 \end{bmatrix} \quad (\text{ก-18})$$

## ภาคผนวก ข. : การหาค่าเฉพาะและเวกเตอร์เฉพาะของเมตริกซ์จริงแบบไม่สมมาตร

มีวิธีการอยู่หลายวิธีสำหรับหาค่าเฉพาะและเวกเตอร์เฉพาะของเมตริกซ์ แต่การที่จะเลือกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเมตริกซ์ ขนาดของเมตริกซ์และผลลัพธ์ที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ต้องการแก้ปัญหาค่าเฉพาะ และเวกเตอร์เฉพาะของเมตริกซ์จริง (สมาชิกทุกตัวเป็นจำนวนจริง) แบบไม่สมมาตร ขนาดค่อนข้างใหญ่ ( สำหรับ โปรแกรมที่วิเคราะห์ในบทที่ 7 เมตริกซ์มีขนาด  $117 \times 117$  ) สาเหตุที่ต้องใช้วิธีการนี้มีอยู่ 2 ประการ คือ ค่าเฉพาะของเมตริกซ์ไม่สมมาตรนั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของสมาชิกสูงมาก (การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการบวก ลบ คูณ หาร เมตริกซ์) และอีกประการหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงเมตริกซ์ทำให้การหาเวกเตอร์เฉพาะเกิดความผิดพลาดได้สูง วิธีการต่อไปนี้จะช่วยแก้ไขปัญหาล่าช้าได้ รายละเอียดเพิ่มเติม ดูจากรายการอ้างอิง [ 3 ]

นิยาม : สมมติให้เมตริกซ์  $[ A ]$  และ  $[ B ]$  มีมิติเท่ากัน  $n \times n$  มีค่า  $\lambda$  เป็นค่าเฉพาะของเมตริกซ์  $[ A ]$  และมี  $\{ X \}$  เป็นเวกเตอร์เฉพาะแล้ว การเสมือนของเมตริกซ์ (Similarity) คือ

$$[ B ] = [ Z ]^{-1} [ A ] [ Z ] \quad (ข-1)$$

ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ค่าเฉพาะของเมตริกซ์  $[ A ]$  จะมีค่าเท่ากับค่าเฉพาะของเมตริกซ์  $[ B ]$  ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จาก

$$\begin{aligned} \det \left| [ Z ]^{-1} [ A ] [ Z ] - \lambda [ I ] \right| &= \det \left| [ Z ]^{-1} ([ A ] - \lambda [ I ]) [ Z ] \right| \\ &= \det \left| [ A ] - \lambda [ I ] \right| \end{aligned} \quad (ข-2)$$

และในขณะเดียวกันเวกเตอร์เฉพาะของ  $[ A ]$  หาได้จากเวกเตอร์เฉพาะของ  $[ B ]$  คือ

$$\{ a \}_i = [ Z ] \{ b \}_i \quad (ข-3)$$

โดยที่  $[ I ]$  คือเมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix)  $\{ a \}_i$  และ  $\{ b \}_i$  คือเวกเตอร์เฉพาะของเมตริกซ์  $[ A ]$  และ  $[ B ]$  ตามลำดับ และการแปลงเสมือน (Similarity transformation) ได้แก่

$$[ Z ]^{-1} [ A ] [ Z ] = \text{Diag} [ \lambda_i ] \quad (ข-4)$$

หรือเป็นการแปลงเมตริกซ์  $[ A ]$  ให้กลายเป็นเมตริกซ์ทแยงมุม แล้วจะได้สมาชิกแต่ละตัวเป็นค่าเฉพาะ วิธีการที่กล่าวถึงนี้จะถูกนำมาใช้ในลำดับต่อไปเทียบเคียงกับโปรแกรมย่อย RG ดังนี้

### 1.) การสร้างสมมูลในเมตริกซ์ ( Subroutine BALANC )

ส่วนหนึ่งของค่าผิดพลาดในการหาค่าเงาจะง เกิดจากการกำหนดคตสนิยมในคอมพิวเตอร์มีค่าจำกัด (Rounding errors) เพราะคอมพิวเตอร์เก็บค่าของจำนวนด้วยเลขฐานสอง (สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่ว ๆ ไป) ดังนั้นเมตริกซ์ทั่วไปก่อนที่จะนำไปหาค่าเงาจะงและเวคเตอร์เงาจะงควรลดค่าผิดพลาดนี้ก่อน โดยอาศัยการเสมือนของเมตริกซ์ทำให้แต่ละแถว และหลักมีค่าเปรียบเทียบอยู่ในระดับเดียวกัน ดังนั้นจึงควรที่จะใช้วิธีการนี้กับทุก ๆ เมตริกซ์ก่อนที่จะนำไปหาค่าเงาจะงเสมอ

$$[B] = [D]^{-1}[A][D] \quad (\text{ข-5})$$

เมตริกซ์  $[D]$  เป็นเมตริกซ์ทแยงมุมซึ่งสมาชิกแต่ละตัวในแนวทแยงมุมต้องเป็นค่าของเลขฐานหลักที่ใช้กับคอมพิวเตอร์รุ่นนั้น ๆ (โดยทั่วไป RADIX = 2 แต่สำหรับเครื่อง MAINFRAME ต้องใช้ RADIX = 16) ยกกำลังใด ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงค่าผิดพลาดจากการกำหนดตัวเลขในคอมพิวเตอร์ และเมตริกซ์  $[B]$  ที่ได้เป็นเมตริกซ์ที่สมมูลแล้ว โดยเทียบจากผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของสมาชิกทุกตัว ในแต่ละแถวหรือแต่ละหลักให้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้

กำหนดให้

$$[A] = \begin{bmatrix} 2615 & -2615 & 0 & 0 \\ -656.371 & 1477 & -656.371 & -164.3093 \\ 0 & -2615 & 2615 & 0 \\ 0 & -1635 & 0 & 5481 \end{bmatrix}$$

ผลการคำนวณหลังจากทำการสมมูลแล้วจะได้

$$[B] = \begin{bmatrix} 2615 & -1307.5 & 0 & 0 \\ -1312.742 & 1477 & -1312.742 & -656.372 \\ 0 & -1307.5 & 2615 & 0 \\ 0 & -408.75 & 0 & 5481 \end{bmatrix}$$



เมตริกซ์ทแยงมุม  $[D]$  ที่ใช้ในการแปลงค่า ต้องเก็บค่าไว้ที่ตัวแปร SCALE ( N ) ในโปรแกรมเพื่อใช้ในการหาเวกเตอร์เงาจะงย้อนกลับในโปรแกรมย่อย BALBAK และในตัวอย่างนี้มีค่าเป็น

$$[D] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

## 2.) การแปลงค่าจากเมตริกซ์ทั่วไปเป็นเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบน ( Upper Hessenberg form )

จากเมตริกซ์ที่สมมูลแล้วแปลงเป็นเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบน เพื่อให้สามารถหาค่าเงาจะง และเวกเตอร์เงาจะงได้โดยง่าย โปรแกรมย่อย ELMHES ทำการแปลงเมตริกซ์ทั่วไปเป็นเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบน ใช้วิธีการของแฮสโฮลเดอร์ (Householder Method) โดยที่ถ้าเมตริกซ์ที่นำมาใช้เป็นเมตริกซ์สมมาตรแล้ว ผลจากการแปลงด้วยวิธีการนี้จะให้เมตริกซ์ทแยงมุมแบบ 3 แนว (Tridiagonal matrix) แทน วิธีการนี้เริ่มต้นจากการกำหนด  $\{w\} \in R^n$  โดยที่  $\{w\}^T \cdot \{w\} = 1$  และมีเมตริกซ์  $[P]$  ขนาด  $n \times n$  เรียกว่า การแปลงแฮสโฮลเดอร์ (Householder transformation) ซึ่งหาได้จาก

$$[P] = [I] - 2\{w\}\{w\}^T \quad (\text{ข-6})$$

ถ้าเมตริกซ์  $[P]$  เป็นไปตามเงื่อนไขนี้แล้วพบว่า  $[P]$  จะเป็นเมตริกซ์สมมาตร และเมตริกซ์ออร์โธโกนัลด้วย นั่นคือ  $[P] = [P]^{-1} = [P]^T$  สำหรับรูปแบบของเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบนจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x \\ 0 & x & x & x & x \\ 0 & 0 & x & x & x \\ 0 & 0 & 0 & x & x \end{bmatrix}$$

นั่นคือ เป็นเมตริกซ์ซึ่งสมาชิกที่อยู่ต่ำกว่าแนวได้แนวทแยงมุมแนวที่ 1 ต้องมีค่าเป็นศูนย์  
ทุกตัว ดังนั้นการแปลงเริ่มต้นจากการให้ผลของการแปลงเป็น

$$[B^{(2)}] = [P^{(1)}][B][P^{(1)}] \quad (\text{ข-7})$$

มีคุณสมบัติคือ  $a_{j1}^{(2)} = 0$  สำหรับ  $j = 3, 4, \dots, n$  และกำหนดให้  $a_{11}^{(2)} = a_{11}$   
( $w_1 = 0$ ) เมื่อรวมกับเงื่อนไข  $\{w\}^T \{w\} = 1$  จะได้เงื่อนไข  $n$  สมการ  $n$  ตัวแปร ซึ่งสามารถหาค่า  
ได้ ในขั้นแรกต้องการ  $[P^{(1)}]$  ซึ่งมีคุณสมบัติ

$$[P^{(1)}] = [I] - 2\{w\}\{w\}^T \quad (\text{ข-8})$$

โดยที่

$$\alpha = -(\text{sign } a_{21}) \left( \sum_{j=2}^n a_{j1}^2 \right)^{1/2}, \quad r = \left( \frac{1}{2}\alpha^2 - \frac{1}{2}a_{21}\alpha \right)^{1/2}$$

$$w_1 = 0, \quad w_2 = \frac{a_{21} - \alpha}{2r}, \quad w_j = \frac{a_{j1}}{2r} \quad \text{สำหรับ } j = 3, 4, \dots, n$$

และเมื่อทำหลักที่ 1 เสร็จแล้วให้ใช้วิธีการเดียวกันนี้กับหลักต่อ ๆ ไปทั้งหมด ทีละหลัก

โดยที่

$$[B^{(k+1)}] = [P^{(k)}][B^{(k)}][P^{(k)}] \quad (\text{ข-9})$$

โดยที่

$$\alpha = -(\text{sign } a_{k+1,k}^{(k)}) \left( \sum_{j=k+1}^n (a_{jk}^{(k)})^2 \right)^{1/2}, \quad r = \left( \frac{1}{2}\alpha^2 - \frac{1}{2}\alpha a_{k+1,k}^{(k)} \right)^{1/2}$$

$$w_1^{(k)} = w_2^{(k)} = \dots = w_k^{(k)} = 0, \quad w_{k+1}^{(k)} = \frac{a_{k+1,k}^{(k)} - \alpha}{2r}$$

$$w_j^{(k)} = \frac{a_{jk}^{(k)}}{2r} \text{ สำหรับ } j = k+2, k+3, \dots, n \text{ และ}$$

$$[P^{(k)}] = [I] - 2 \left\{ w^{(k)} \right\} \left\{ w^{(k)} \right\}^T$$

ทำตามขั้นตอนเหล่านี้จนครบ  $n-2$  ครั้ง ในที่สุดจะได้เมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบน จาก

$$[B^{(n-1)}] = [P^{(n-2)}] [P^{(n-3)}] \dots [P^{(1)}] [B] [P^{(1)}] \dots [P^{(n-3)}] [P^{(n-2)}] \quad (\text{ข-10})$$

จากตัวอย่างของเมตริกซ์ ในตอนต้นเมื่อแปลงเป็นเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบนแล้ว จะ  
ได้

$$[B^{(2)}] = \begin{bmatrix} 2615 & -1307.5 & 0 & 0 \\ -1312.7 & 1477 & -1517.9 & -656.37 \\ 0 & -1307.5 & 2615 & 0 \\ 0 & 0 & 895.97 & 5481 \end{bmatrix}$$

ในลำดับต่อไปต้องนำเมตริกซ์ที่ลดรูปแล้วนี้ไปหาค่าเจาะจง

### 3.) การหาค่าเจาะจงของเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบน โดยวิธีคิว-อาร์ ( the QR method )

สาเหตุที่เลือกใช้วิธีการนี้เพราะมีเสถียรภาพสูง ป้องกันค่าผิดพลาดจากการแทนค่าตัวเลขในคอมพิวเตอร์ (Rounding error) วิธีการคือค้นหาว่าในเมตริกซ์มี ตำแหน่งใดบ้างที่สมาชิกในแนวได้แนวทแยงมุมแนวที่ 1 มีค่าเป็นศูนย์บ้างไหมเนื่องจากในพิกัดเหล่านี้สามารถแยกออกไปหาค่าเจาะจงได้เลย แต่ถ้าไม่มีให้นำเมตริกซ์ทั้งหมดมาหาค่าเจาะจง ดังนี้

เริ่มต้นจากกำหนดชุดของเมตริกซ์  $[E] = [E(1)], [E(2)], [E(3)], \dots$  โดยที่

$$[E^{(i)}] = [Q^{(i)}] [R^{(i)}] \text{ และ } [E^{(i+1)}] = [R^{(i)}] [Q^{(i)}] \quad (\text{ข-11})$$

โดยที่  $[Q^{(i)}]$  เป็นเมตริกซ์ออร์โธโกนัล และ  $[R^{(i)}]$  เป็นเมตริกซ์สามเหลี่ยมด้านบน เป้าหมายของวิธีการนี้คือพยายามลดรูปเมตริกซ์นี้ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์กลุ่มเหนือเส้นทแยงมุม (Upper - block - triangular matrix) ซึ่งสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมหรือในกลุ่ม ต่างก็เป็นค่าเจาะจงของเมตริกซ์ ซึ่งมีรูปแบบ

$$\begin{bmatrix} D & x & x & x & x & x & x \\ 0 & D & x & x & x & x & x \\ 0 & 0 & D & D & x & x & x \\ 0 & 0 & D & D & x & x & x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D & D & x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D & D & x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D \end{bmatrix}$$

ในการหาค่าเมตริกซ์  $[Q]$  และเมตริกซ์  $[R]$  นั้นต้องทำความรู้จักกับเมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix)  $[P]$  ก่อนซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเมตริกซ์ออร์โธโกนัล ซึ่งมีสมาชิกแตกต่างจากเมตริกซ์เอกลักษณ์ทั้งหมด 4 ตัว คือ

$$p_{ii} = p_{jj} = \cos \theta \text{ และ } p_{ij} = -p_{ji} = \sin \theta \quad (\text{ข-12})$$

สำหรับบางค่าของ  $\theta$  และบางค่าของ  $i \neq j$

ซึ่งพบว่าผลคูณของเมตริกซ์  $[E][P]$  แตกต่างจากเมตริกซ์  $[E]$  เฉพาะหลักที่  $i$  และ  $j$  ในขณะที่ผลคูณของเมตริกซ์  $[P][E]$  แตกต่างจากเมตริกซ์  $[E]$  เฉพาะแถวที่  $i$  และ  $j$  สำหรับ  $i \neq j$  แล้วสามารถเลือกมุม  $\theta$  ที่ทำให้สมาชิกในแถวที่  $i$  หลักที่  $j$  ของผลคูณเมตริกซ์  $[P][E]$  มีค่าเป็นศูนย์ เริ่มต้นโดยการแยกเมตริกซ์  $[E^{(1)}] = [Q^{(1)}][R^{(1)}]$  โดยใช้เมตริกซ์การหมุนทั้งหมด  $n-1$  ตัวเพื่อสร้างเมตริกซ์  $[R^{(1)}]$  ดังนี้

$$[R^{(1)}] = [P_n][P_{n-1}] \dots [P_2][E^{(1)}] \quad (\text{ข-13})$$

โดยเริ่มต้นจากเมตริกซ์การหมุน  $[P_2]$  ซึ่งทำให้  $[P_2][E^{(1)}]$  มีค่าเป็นศูนย์ในตำแหน่งที่ (2,1) แล้วทำตามขั้นตอนนี้ไปเรื่อย ๆ โดยเลือกเมตริกซ์  $[P]$  ที่เหมาะสม เพื่อให้เมตริกซ์  $[E]$

ในที่สุดกลายเป็นเมตริกซ์สามเหลี่ยมด้านบน จะได้เมตริกซ์  $[R]$  และสำหรับเมตริกซ์  $[Q]$  หาได้จาก

$$[Q^{(1)}] = [P_2]^T [P_3]^T \dots [P_n]^T \quad (\text{ข-14})$$

ในที่สุดจะได้  $[E^{(2)}] = [R^{(1)}][Q^{(1)}]$  เป็นเมตริกซ์เฮสเซนเบิร์กด้านบน ที่สมาชิกได้แนวเส้นทแยงมุมมีขนาดน้อยกว่าสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุม ทำตามวิธีการเช่นนี้ไปจนได้  $[E^{(3)}]$   $[E^{(4)}]$  ... ไปเรื่อย ๆ ซึ่งขนาดของสมาชิกได้แนวเส้นทแยงมุมจะลดลงไปจนถึงว่าเป็นศูนย์ได้ในที่สุด และเมื่อได้ค่าเงาเงจจากสมาชิกในแนวทแยงมุมแล้วนำกลับไปแทนค่าหาเวกเตอร์เงาเงจ แล้วแทนค่าย้อนกลับไปจนกว่าจะได้เวกเตอร์เงาเงจของเมตริกซ์  $[B]$  ในที่สุด รายละเอียดเพิ่มเติมติดตามได้จากรายการอ้างอิง [ 2 ]

จากเมตริกซ์ตัวอย่างในที่สุดจะได้ค่าเงาเงจเป็น 75.58 2615 3925 5572 และได้เวกเตอร์เงาเงจ

$$v_1 = \begin{Bmatrix} 0.575 \\ 0.558 \\ 0.575 \\ 0.169 \end{Bmatrix}, \quad v_2 = \begin{Bmatrix} 0.707 \\ 0 \\ -0.707 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad v_3 = \begin{Bmatrix} 0.629 \\ -0.315 \\ 0.629 \\ -0.331 \end{Bmatrix}, \quad v_4 = \begin{Bmatrix} 0.049 \\ -0.056 \\ 0.049 \\ 0.996 \end{Bmatrix}$$

ภาคผนวก ค : ตารางคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิศวกรรม หน่วยเอสไอ ( SI units )

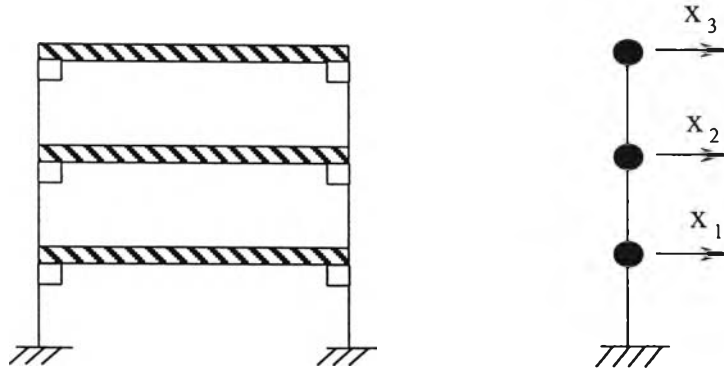
Material	Density , kg/m <sup>3</sup>	Ultimate strength			Yield strength <sup>3</sup>		Modulus of elasticity , GPa	Modulus of rigidity , GPa
		Tension , MPa	Compression, MPa	Shear , MPa	Tension , Mpa	Shear , Mpa		
STEEL :								
Structural ( ASTM-A36 )	7860	400	-	-	250	145	200	79
High-strength-low-alloy ASTM-A242	7860	480	-	-	345	210	200	79
Quenched and tempered alloy ASTM-A514	7860	825	-	-	690	380	200	79
Stainless, (302)								
Cold-rolled	7920	860	-	-	520	-	190	73
Annealed	7920	620	-	-	275	152	190	73
CAST IRON:								
Gray, 4.5% C, ASTM A-48	7200	170	650	240	-	-	70	28
Malleable, ASTM A-47	7300	340	620	330	230	-	165	64
ALLUMINIUM:								
Alloy 2014-T6 ( 4.4% Cu )	2800	480	-	290	410	220	72	27
Alloy 6061-T6 ( 1% Mg )	2710	290	-	185	255	140	69	26
YELLOW BRASS ( 65% Cu, 35% Zn ) :								
Cold-rolled	8470	540	-	300	435	250	105	39
Annealed	8470	330	-	220	105	65	105	39
PHOSPHOR BRONZE :								
Cold-rolled (510)	8860	560	-	-	520	275	110	41
Spring temper (524)	8780	840	-	-	-	-	110	-
MAGNESIUM ALLOY ( 8.5% Al )								
	1800	380	-	165	275	-	45	-
TITANIUM ALLOY ( 6% Al, 4% V )								
	4460	900	-	-	825	-	114	-
MONEL ALLOY 400 ( Ni-Cu ) :								
Cold-worked	8830	675	-	-	580	345	180	-
Annealed	8830	550	-	-	220	125	180	-
TIMBER, air dry : <sup>4</sup>								
Douglas fir	525	-	50	7.5	-	-	12.5	-
Southern pine	610	-	50	9.2	-	-	11	-
CONCRETE :								
Medium strength	2320	-	28	-	-	-	25	-
High strength	2320	-	40	-	-	-	30	-
Nylon, molded	1100	55	-	-	-	-	2	-
Polystyrene	1050	48	90	55	-	-	3	-
Neoprene	1250	24	-	-	-	-	-	-
Granite	2770	20	240	35	-	-	70	-
Glass, 98% silica	2190	-	50	-	-	-	65	28

1 Properties of metal vary widely as a result of variations in composition, heat treatment , and mechanical working. 3. Offset of 0.2 percent.

2. For ductile metals the compression strength is generally assumed to be equal to the tension strength. 4. Timber properties are for loading parallel to grain.

ภาคผนวก ง.

การคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างอาคารจำลอง แบบอาคารรับแรงเฉือน



รูปที่ ง-1 แบบจำลองอาคารรับแรงเฉือนของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้นทั่ว ๆ ไป

แบบจำลองของอาคารรับแรงเฉือนนั้น ถือว่าส่วนประกอบต่าง ๆ ของพื้นรวมเป็นมวลเพียงก้อนเดียว และมีการสันนิษฐานทางด้านข้างเนื่องจากกำหนดเงื่อนไขว่ามุมระหว่างเสากับส่วนพื้นของอาคารสมมติให้เป็นมุมฉากตลอด และอัตราการหดตัวในทิศตามแนวแกนของเสามีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ ง-1 ซึ่งเป็นการสันนิษฐานของอาคาร 3 ชั้นในลักษณะเดียวกันกับแบบจำลองของอาคารที่ใช้ในการคำนวณวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM ในบทที่ 7 ดังนั้นจึงมีระดับชั้นความเสรีเพียง 3 เท่านั้น (เนื่องจากมีเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวนอนของแต่ละชั้น) ในที่นี้จะแสดงวิธีการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติทั้ง 3 โหมดของแบบจำลองในรูป เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากวิธีการ FEM ในบทที่ 7

จากแบบจำลองของอาคารในรูปที่ ง-1 นี้ เริ่มต้นการคำนวณโดยการกำหนดความสัมพันธ์ของเมตริกซ์มวลและเมตริกซ์ความแข็งเกร็งของแบบจำลองก่อน ดังนี้

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \quad [K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

สำหรับมวลในแต่ละชั้นของอาคารคำนวณได้โดยรวมน้ำหนักของคานและพื้นคอนกรีตแต่ละชั้นเข้าด้วยกัน ดังนั้น  $m_1 = m_2 = m_3 = 696.4 + 464.4 = 7424$  กิโลกรัม

สำหรับค่าความแข็งเกร็งโดยประมาณแบบมี 1 ระดับชั้นความเสรีสำหรับกรณีนี้หาได้จาก

$$k = \frac{12EI}{l^3} = \frac{12 \times 25 \times 10^9 \times 0.00135}{4^3} \times 2 = 1.266 \times 10^7 \text{ นิวตันต่อเมตร จาก}$$

ข้อมูลเหล่านี้นำไปสร้างเมตริกซ์มวลและเมตริกซ์ความแข็งเกร็งได้เป็น

$$[M] = \begin{bmatrix} 7424 & 0 & 0 \\ 0 & 7424 & 0 \\ 0 & 0 & 7424 \end{bmatrix}, [K] = 10^4 \begin{bmatrix} 2532 & -1266 & 0 \\ -1266 & 2532 & -1266 \\ 0 & -1266 & 1266 \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์เหล่านี้เมื่อนำมาประกอบกันจะได้สมการการสั่นสะเทือนแบบอิสระของแบบจำลองในรูป ง-1 ดังนี้

$$[M] \{\ddot{X}\} + [K] \{X\} = \{0\} \quad (\text{ง-1})$$

สมการที่ (ง-1) นี้สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดเซฟได้โดยการสมมติคำตอบในเป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิกแล้วแทนค่าลงไป ในที่สุดจะได้สมการใหม่ คือ

$$([K] - \omega^2 [M]) \{X\} = \{0\} \text{ หรือ } ([A] - \lambda [I]) \{X\} = \{0\} \quad (\text{ง-2})$$

เมื่อ  $[A] = [M]^{-1} [K]$  และ  $\lambda = 1/\omega^2$  เรียกว่าค่าเจาะจงของระบบ

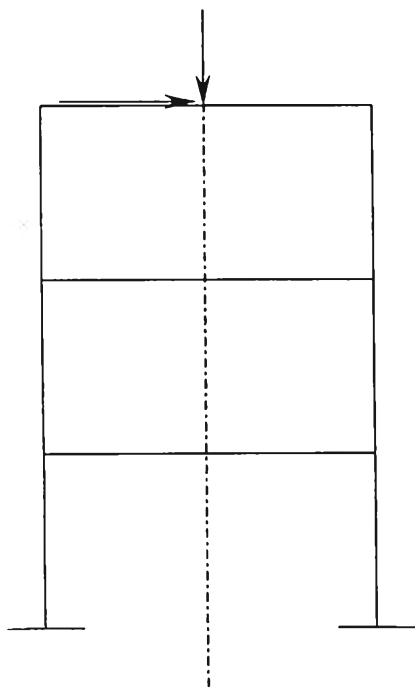
จากนั้นหาค่าเจาะจง (Eigenvalues) และเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvectors) ของระบบด้วยวิธีการแทนค่าแบบวนรอบ (Iterative method) ในที่สุดจะได้ค่าความถี่ธรรมชาติ และโหมดเซฟดังต่อไปนี้  $\omega_1 = 18.378$   $\omega_2 = 51.494$  และ  $\omega_3 = 74.41$  เรเดียนต่อวินาที ซึ่งโหมดเซฟ ๓ ความถี่ต่าง ๆ มีค่าดังนี้

$$\{X\}_1 = \begin{Bmatrix} 0.328 \\ 0.591 \\ 0.737 \end{Bmatrix} \quad \{X\}_2 = \begin{Bmatrix} 0.737 \\ 0.328 \\ -0.591 \end{Bmatrix} \quad \text{และ} \quad \{X\}_3 = \begin{Bmatrix} -0.591 \\ 0.737 \\ -0.328 \end{Bmatrix}$$



## ภาคผนวก จ. : การเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยวิธีการสโลป-ดีเฟลคชันกับโปรแกรม TFRAME

ในส่วนนี้จะแสดงการคำนวณการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคารด้วยวิธีการ สโลป-ดีเฟลคชัน (Slope-deflection method) โดยจะยกตัวโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น (จากในรายการอ้างอิงที่ [ 7 ]) ขึ้นมาเพื่อทำการคำนวณหาผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างโดยใช้วิธีการสโลป-ดีเฟลคชัน เมื่อติดตั้งเครื่องจักรแบบหมุน มีความถี่ 10 รอบต่อวินาที มีมวลเยื้องศูนย์กลางขนาด 2.53 กิโลกรัม และมีรัศมีของมวลเยื้องศูนย์กลาง เป็น 1 เมตร ทำการติดตั้งโดยตรงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นที่ 3 แล้วนำปัญหาดังกล่าวนี้ไปคำนวณอีกครั้งด้วยโปรแกรม TFRAME เพื่อนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติในแนวนอนและแนวตั้ง และเปรียบเทียบผลตอบสนองสูงสุดของอาคารในแนวนอนและแนวตั้ง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุลด้วย รูปแสดงขนาดของโครงสร้างที่ใช้ในการคำนวณมีลักษณะดังนี้



$$I_{01} = I_{12} = I_{23} = 6 \text{ เมตร}$$

$$I_{11'} = I_{22'} = I_{33'} = 5 \text{ เมตร}$$

$$I_{01} = I_{12} = I_{23} = 1 \times 10^{-4} \text{ เมตร}^4$$

$$I_{11'} = I_{22'} = I_{33'} = 2 \times 10^{-4} \text{ เมตร}^4$$

$$\gamma_{01} = \gamma_{12} = \gamma_{23} = 204 \text{ กิโลกรัมต่อเมตร}$$

$$\gamma_{11'} = \gamma_{22'} = \gamma_{33'} = 510 \text{ กิโลกรัมต่อเมตร}$$

$$E (\text{ของเหล็ก}) = 210 \times 10^9 \text{ นิวตันต่อตารางเมตร}$$

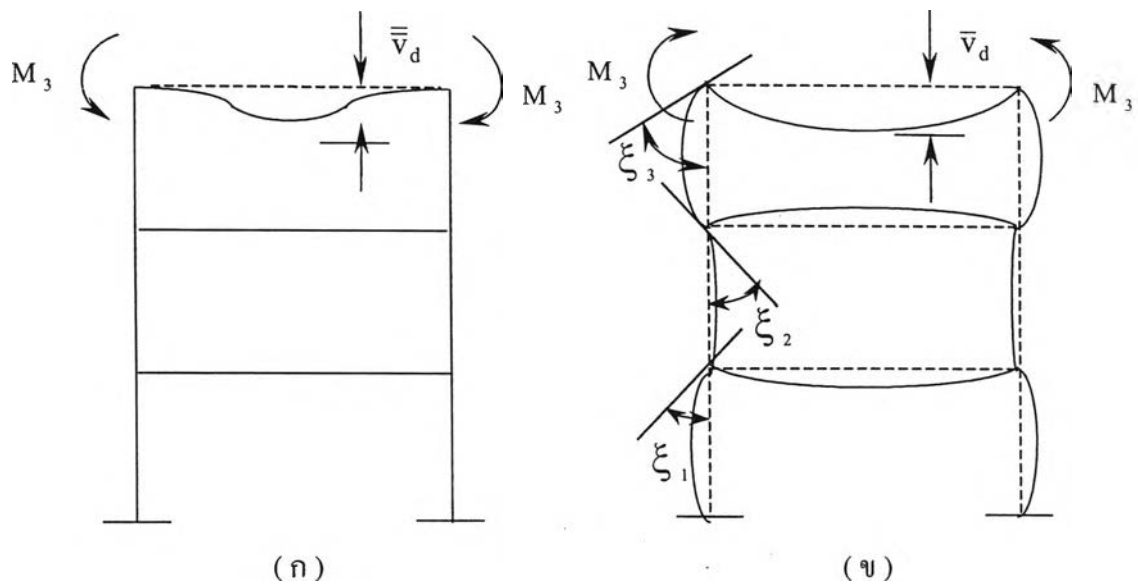
$$P = m r \omega^2 = 2.53 \times 1.0 \times 62.8^2 = 1000 \text{ นิวตัน}$$

รูปที่ จ-1 โครงสร้างตัวอย่างที่ใช้ในการคำนวณ

โดยที่  $l$  คือความยาวของเอลิเมนต์  $I$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ของเอลิเมนต์  $\gamma$  คือมวลต่อหน่วยความยาวของเอลิเมนต์  $E$  คือค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น และ  $P$  เป็นแรงเหวี่ยงจากมวลเยื้องศูนย์กลาง

**สมมติฐาน :** กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของเสาและคานาใหญ่มากจนถือได้ว่าไม่มีการสั่นสะเทือนในทิศทางตามแนวยาว (Longitudinal vibration) และถือว่าน้ำหนักของเครื่องจักรที่ติดตั้งมีค่าน้อยมาก

### 1.) การสั่นสะเทือนแบบสมมาตรของโครงสร้างอาคาร



รูปที่ ๒-๒ การประมาณรูปร่างของโครงสร้างจากการสั่นบังคับแบบสมมาตร

โดยอาศัยหลักการรวมกัน (Principle of superposition) แบ่งผลลัพธ์ของแรงกระทำในแนวดิ่งนี้ออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งประกอบด้วยแรงภายนอก  $P$  และโมเมนต์ที่จุด 3 และ 3' ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อพิภักต์อื่นที่เหลือนับรูปที่ 2 (ก) ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งมีเฉพาะโมเมนต์ในทิศตรงกันข้ามกับรูปแรกดังรูปที่ 2 (ข) ดังนั้นผลตอบสนองสูงสุดของพิภักต์ในแนวดิ่ง หาได้จากผลรวมของผลตอบสนองสูงสุดในรูป (ก) และ (ข) สมการของโมเมนต์หาได้จาก

$$M_3 = \frac{Pl_2}{4} \frac{F_3(\lambda_2/2)}{F_6(\lambda_2/2)} = M_3' \quad (๒-1)$$

เนื่องจากถือว่าการสั่นสะเทือนตามแนวแกนของเอลิเมนต์มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นที่จุดต่อแต่ละจุดจึงกำหนดให้มีการขจัดเป็นศูนย์ ทำให้มีตัวไม่ทราบค่าเพียงแค่การหมุนของแต่ละชั้นเท่านั้น สมการของปัญหาได้จากเงื่อนไขสมดุลสำหรับ 3 ตัวแปร ดังในตารางที่ ๒-1

$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	P
$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	= $a_{10}$
$a_{12}$	$a_{22}$	$a_{23}$	= $a_{20}$
$a_{13}$	$a_{23}$	$a_{33}$	= $a_{30}$

ตารางที่ จ-1 สัญลักษณ์ของสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในสมการ

และค่าของสัมประสิทธิ์หาได้จาก

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \frac{2.E.J_1}{l_1} F_2(\lambda_1) + \frac{E.J_2}{l_2} [F_2(\lambda_2) - F_1(\lambda_2)] = a_{22} \\
 a_{12} &= \frac{E.J_1}{l_1} F_1(\lambda_1) = a_{23} \\
 a_{13} &= 0 \\
 a_{33} &= \frac{E.J_1}{l_1} F_2(\lambda_1) + \frac{E.J_2}{l_2} [F_2(\lambda_2) - F_1(\lambda_2)] \\
 a_{10} &= a_{20} = 0 \quad \text{และ} \quad a_{30} = M_3
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\lambda_1 = 6 \left( \frac{0.0204 \times \omega^2}{21 \times 10^6 \times 1 \times 10^{-4}} \right)^{1/4} = 0.334 \omega^{1/2} = 2.654$$

$$\lambda_2 = 5 \left( \frac{0.0510 \times \omega^2}{21 \times 10^6 \times 2 \times 10^{-4}} \right)^{1/4} = 0.296 \omega^{1/2} = 2.339$$

และฟังก์ชันสัมพัทธ์  $F(\lambda)$  หาได้จากตารางในภาคผนวก ดังนี้

$$\begin{aligned}
 F_1(\lambda_1) &= 2.397 & , & & F_2(\lambda_1) &= 3.483 \\
 F_1(\lambda_2) &= 2.229 & , & & F_2(\lambda_2) &= 3.699 \\
 F_3(\lambda_2/2) &= 6.058 & , & & F_6(\lambda_2/2) &= 11.30
 \end{aligned}$$

นำไปแทนค่าในตารางสัมประสิทธิ์

$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	P
3675	840	0	= 0
840	3675	840	= 0
0	840	2455	= 0.670

ตารางที่ จ-2 ค่าของสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในสมการ

เมื่อแก้สมการจะได้ขนาดของการหมุน

$$\xi_1 = 0.1636 \times 10^{-4} \quad , \quad \xi_2 = -0.716 \times 10^{-4} \quad , \quad \xi_3 = 2.97 \times 10^{-4}$$

โดยอาศัยทฤษฎีรีซิโพรคอล (Reciprocal theorem) จะได้สมการ

$$-\frac{P.l_2}{4} \frac{F_3(\lambda_2/2)}{F_6(\lambda_2/2)} 2.\xi_3 + P.\bar{v}_d = 0 \quad (จ-2)$$

ดังนั้น ผลตอบสนองสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นที่ 3 ในแนวตั้งคือ

$$v_d = \bar{v}_d + \bar{\bar{v}}_d = \frac{P.l_2^3}{16.E.J_2 \times F_6(\lambda_2/2)} + \frac{l_2}{2} \frac{F_3(\lambda_2/2)}{F_6(\lambda_2/2)} \xi_3 \quad (จ-3)$$

แทนค่าจากขนาดโครงสร้างตัวอย่าง จะได้ขนาดของการขจัดสูงสุด มีหน่วยเป็นเมตร

$$\begin{aligned} v_d &= \frac{5^3}{16 \times 21 \times 10^6 \times 2 \times 10^{-4} \times 11.30} + \frac{5}{2} \cdot \frac{6.06}{11.30} \cdot 2.97 \times 10^{-4} \\ &= 5.63 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

ถ้าหากว่าค่าในตารางที่ 1 แรง P ตั้งไว้เป็นศูนย์ทั้งคอลัมน์ แล้วหาดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ แทนค่าเท่ากับศูนย์เพื่อจะหาค่าความถี่ธรรมชาติ ดังนี้

$$\Delta = a_{11}.a_{22}.a_{33} + 2.a_{12}.a_{23}.a_{13} - a_{22}.a_{13}^2 - a_{11}.a_{23}^2 - a_{33}.a_{12}^2 \quad (\text{จ-4})$$

เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดลงในสมการที่ (จ-4) แล้วแทนค่า  $\Delta = 0$  แก้สมการได้

$$\omega_1 = 103.703 \text{ rad./sec} \quad \omega_2 = 126.246 \text{ rad./sec.} \quad \omega_3 = 155.437 \text{ rad./sec.}$$

ค่าที่ได้นี้เป็นค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนตามแนวตั้ง (เทียบได้กับค่าที่คำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ TFRAME ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 4 ถึง 6)

## 2.) การสั่นสะเทือนแบบไม่สมมาตรของโครงสร้างอาคาร

สำหรับการสั่นแบบสมมาตรมีตัวแปรทั้งหมด 6 ค่า 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือการหมุน 3 ค่าคือ  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  และ  $\xi_3$  อีกกลุ่มหนึ่งได้แก่การขจัดในแนวนอนของแต่ละชั้นมี 3 ค่าคือ  $u_1$ ,  $u_2$  และ  $u_3$  ซึ่งสามารถกำหนดสัญลักษณ์ได้ดังในตารางต่อไปนี้

$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	P
$a_{11}$	$a_{12}$	0	0	$a_{15}$	0	= 0
$a_{12}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{24}$	0	$a_{26}$	= 0
0	$a_{23}$	$a_{33}$	0	$a_{35}$	$a_{36}$	= 0
0	$a_{24}$	0	$a_{44}$	$a_{45}$	0	= 0
$a_{15}$	0	$a_{35}$	$a_{45}$	$a_{55}$	$a_{56}$	= 0
0	$a_{26}$	$a_{36}$	0	$a_{56}$	$a_{66}$	= P / 2

ตารางที่ จ-3 สัญลักษณ์แทนสัมประสิทธิ์ของการสั่นสะเทือนไม่สมมาตรแบบบังคับ

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการได้ดังนี้

$$a_{11} = \frac{2.E.J_1}{l_1} F_2(\lambda_1) + \frac{E.J_2}{l_2} [F_1(\lambda_2) + F_2(\lambda_2)] = a_{22}$$

$$a_{12} = \frac{E.J_1}{l_1} F_1(\lambda_1) = a_{23}$$

$$\begin{aligned}
 a_{15} &= -\frac{E.J_1}{l_1^2} F_3(\lambda_1) = -a_{24} = a_{26} = -a_{35} \\
 a_{33} &= \frac{E.J_1}{l_1} F_2(\lambda_1) + \frac{E.J_2}{l_2} [F_1(\lambda_2) + F_2(\lambda_2)] \\
 a_{36} &= \frac{E.J_1}{l_1^2} F_4(\lambda_1) \\
 a_{44} &= \frac{2.E.J_1}{l_1^3} F_6(\lambda_1) - \frac{E.J_2}{l_2^3} \cdot \frac{\lambda_2^4}{2} = a_{55} \\
 a_{45} &= \frac{E.J_1}{l_1^3} F_5(\lambda_1) = a_{56} \\
 a_{66} &= \frac{E.J_1}{l_1^3} F_6(\lambda_1) - \frac{E.J_2}{l_2^3} \cdot \frac{\lambda_2^4}{2}
 \end{aligned}$$

สมการ 3 สมการแรกในตารางที่ 3 ได้จากสมการสมดุลของโมเมนต์ ในขณะที่อีก 3 สมการถัดมาได้จากสมดุลของแรงในแนวนอน ใช้ค่าเดียวกันกับการคำนวณการสั้นสะเทือนในแนวตั้งแบบสมมาตรแบบบังคับ และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัวได้ดังนี้

$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	P
7420	840	0	0	-451	0	= 0
840	7420	840	451	0	-451	= 0
0	840	6200	0	451	-186	= 0
0	451	0	-648	-187.5	0	= 0
-451	0	451	-187.5	-648	-187.5	= 0
0	-451	-186	0	-187.5	-576	= 0.50

ตารางที่ จ-4 ค่าแทนสัมประสิทธิ์ของการสั้นสะเทือนไม่สมมาตรแบบบังคับ

นำไปแก้สมการในที่สุดจะได้ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างในแนวนอนของชั้นที่ 3 มีค่าเป็น  $-9.00 \times 10^{-4}$  เมตร และเช่นเดียวจากค่าสัมประสิทธิ์ในสมการเมื่อแทนค่าแรงภายนอกที่

กระทำเป็นศูนย์ แล้วหาค่าดีเทอร์มิแนนต์โดยเทียบให้เท่ากับศูนย์ จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นแบบไม่สมมาตร ดังนี้

$$\omega_1 = 8.41 \text{ rad./sec} \quad \omega_2 = 25.8 \text{ rad./sec.} \quad \omega_3 = 42.4 \text{ rad./sec.}$$

ค่าที่ได้จากการคำนวณนี้เป็นค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นในแนวนอน (เทียบได้กับการสั่นใน 3 โหมดแรกที่คำนวณจากโปรแกรม TFRAME โหมดที่ 1 ถึง 3)

### 3.) การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างโปรแกรม TFRAME กับวิธีการสโลป-ดีเฟลคชัน

ป้อนข้อมูลจากปัญหาข้างต้นเพื่อทำการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ TFRAME แล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่คำนวณด้วยวิธีการสโลป-ดีเฟลคชันซึ่งข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบกันนี้ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติ 6 โหมดแรก และผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นที่ 3 หรือตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องจักร ทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง ผลการเปรียบเทียบมีดังตารางต่อไปนี้

วิธีการ คำนวณ	ความถี่ธรรมชาติ						ผลตอบสนองสูงสุด	
	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\omega_6$	$U_d, \text{max.}$	$V_d, \text{max.}$
TFRAME	8.37	25.84	42.45	103.74	125.47	147.07	$5.93 \times 10^{-4}$	$9.32 \times 10^{-4}$
SLOPE DF.	8.41	25.80	42.40	103.70	126.25	155.44	$5.63 \times 10^{-4}$	$9.00 \times 10^{-4}$
% DIFF.	0.50	0.16	0.12	0.04	0.62	5.53	5.11	3.50

ตารางที่ จ-5 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรม TFRAME และวิธีการสโลป-ดีเฟลคชัน

ผลการเปรียบเทียบจากตารางที่ จ-5 แสดงให้เห็นว่าการคำนวณการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคารด้วยวิธีการ FEM มีผลการคำนวณออกมาใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยวิธีการสโลป-ดีเฟลคชัน ดังนั้นสรุปได้ว่าวิธีการ FEM จะให้ผลการคำนวณออกมาใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยวิธีการอื่น ๆ และข้อดีของวิธีการ FEM เหนือวิธีการอื่น ได้แก่ สามารถใช้คำนวณแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก ๆ และไม่สมมาตรได้ นอกจากนี้ถ้ามีโปรแกรมอยู่แล้วการคำนวณในครั้งต่อ ๆ ไปจะทำได้สะดวกกว่าวิธีการอื่น ๆ มาก ส่วนข้อเสียของวิธีการนี้คือในเบื้องต้นจะต้องศึกษาถึงวิธีการพื้นฐานก่อนและในการป้อนข้อมูลแต่ละครั้งจะต้องแบ่งโครงสร้างออกเป็นหลาย ๆ ส่วนแล้วมากำหนดคุณสมบัติย่อย ๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งมีจำนวนค่อนข้างมาก เป็นต้น

## ภาคผนวก ฉ : เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน

### THE MICROLOG DATA COLLECTORS (MDC) model CMVA 10

MDC ผลิตโดยบริษัท SKF Condition Monitoring Inc. เป็นเครื่องมือที่มีขนาดค่อนข้างเล็กพกพาได้ และสามารถบันทึกรายละเอียดของเครื่องจักรที่วัดข้อมูลได้อย่างหายบ ำ โดยสามารถวัดข้อมูลทั่ว ๆ ไปได้ ดังต่อไปนี้

- การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร (Machinery vibration)
- วัดอุณหภูมิ (Temperature measurement)

หน้าจอที่ใช้ในการแสดงผลข้อมูลเป็นแบบ LCD (Liquid crystal display) ซึ่งมีการแสดงผลทั้ง 2 หน้าต่าง คือ หน้าต่างสเปกตรัมแบบเฟฟเฟฟที (FFT : Fast Fourier Transform) และหน้าต่างแบบโดเมนเวลา (Time domain) โดยทั่วไปแล้วสำหรับ MDC นี้จะปิดเครื่องโดยอัตโนมัติเมื่อไม่มีการใช้งานนานเกิน 5 นาที ยกเว้นเมื่อใช้กับฟังก์ชัน Analyzer /Transfer/Battery/Temperature และ Reports มีสัญลักษณ์เฉพาะที่อาจจะแสดงขึ้นบนหน้าจอ ในขณะที่ใช้งานอยู่ แต่ละตัวมีความหมายดังต่อไปนี้

**OV** เตือนว่าขนาดของสัญญาณที่ได้รับเกินจากค่าที่กำหนด

**BT** เตือนว่าแบตเตอรี่กำลังจะหมด

**TP** เตือนว่าอุณหภูมิที่วัดมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนด



บอกสถานะของปุ่มที่กด ว่าใช้สัญลักษณ์ตัวบนแทน

#### 1.) อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับ MDC ( บางส่วน ) มีดังนี้

- 1.1 อุปกรณ์รับข้อมูล (Input devices)
- 1.2 อุปกรณ์สนับสนุนการทำงาน (Support module)
- 1.3 แบตเตอรี่ (Battery pack)
- 1.4 ซอฟต์แวร์ PRISM<sup>4</sup> for Windows

#### 1.1 อุปกรณ์รับข้อมูล (Input devices)

ได้แก่ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บบันทึกข้อมูลในการวัด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้



ก. สำหรับวัดการสั่นสะเทือน (Vibration measurements) ได้แก่

- Handheld probe
- Magnetic probe
- Permanently mounted sensors
- Installed monitoring system

ข. สำหรับการวัดอุณหภูมิ (Temperature measurements)

- Non-contact infrared sensors
- Contact probe

## 1.2 อุปกรณ์สนับสนุนการทำงาน (Support modules)

ได้แก่อุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่ชาร์ตแบตเตอรี่ และเชื่อมโยงระหว่าง MDC และคอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์ PRISM<sup>4</sup> ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์ สำหรับอุปกรณ์สนับสนุนการทำงานจริง ๆ แล้วมีให้เลือกอยู่หลายตัวแต่ในที่นี้ใช้รุ่น CMVA 6112 ข้อดีของรุ่นนี้คือสามารถชาร์ตแบตเตอรี่แบบเร็ว (Fast charge) ได้ 2 ก้อนพร้อม ๆ กัน และบนอุปกรณ์นี้จะมีหลอด LED 2 หลอด แสดงสถานะการชาร์ตของแบตเตอรี่ใน CMVA 6112 กับใน MDC

## 1.3 แบตเตอรี่ (Battery packs)

ตัวที่ใช้ยูนีนี้เป็นรุ่น CMVA 50230-1 NiMH ซึ่งมีข้อดีคือ สำหรับแบตเตอรี่ที่ยังใช้งานไม่หมด สามารถที่จะนำไปชาร์ตต่อได้ โดยไม่ต้องปล่อยประจุออกก่อน (deep discharging) และใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 8 ชั่วโมงในการชาร์ต สำหรับการเปลี่ยนแบตเตอรี่ภายใน MDC จะมีแบตเตอรี่สำรองไว้ให้ ซึ่งใช้งานได้นานประมาณ 3 นาที

## 1.4 ซอฟต์แวร์ PRISM<sup>4</sup> for WINDOWS

เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล และแสดงผลข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถที่จะดึงข้อมูลจาก MDC มาวิเคราะห์ และในขณะเดียวกันสามารถสร้างโปรแกรมการบำรุงรักษาในโรงงานแยกตามเครื่องจักรแต่ละตัว แล้วนำแผนการทำงานทั้งหมดใส่กลับเข้าไปใน MDC เพื่อกำหนดแผนการวัดล่วงหน้าได้

## 2.) การตั้งค่ามาตรฐานในการวัดการสั่นสะเทือนด้วย MDC

เครื่องจักรในที่นี้ หมายถึงเครื่องจักรกลแบบหมุน ได้แก่ พัดลม บีบ คอมเพรสเซอร์ มอเตอร์ และเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งในการที่จะวัดการสั่นสะเทือนจากเครื่องจักรเหล่านี้ จำเป็นต้องมีค่ามาตรฐานเริ่มต้นในการวัดก่อน โดยทั่วไปเครื่องจักรเหล่านี้มักจะมีค่าการทำงานอยู่ในช่วง 600 ถึง 10000 รอบต่อนาที และเครื่องจักรกลแบบหมุนนี้มักจะประกอบด้วย ส่วนประกอบที่มีการหมุน แบ่งออกได้ดังนี้

- เพลา (Shaft)
- คัปปลิง (Coupling)
- แบริ่ง (Bearing)
- ชุดเฟืองส่งกำลัง (Gearboxes)

สำหรับเครื่องจักรบางประเภท ได้แก่ เครื่องจักรที่มีความเร็วรอบสูงมาก ๆ หรือต่ำมาก ๆ และเครื่องจักรที่มีการทำงานเป็นแบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมา เป็นต้นนั้นต้องอาศัยรายละเอียดเพิ่มเติมในการตั้งค่ามาตรฐานในการวัด

### 2.1 มาตรฐานในการวัดความเร็ว ( Velocity measurement )

โดยทั่วไปใช้สำหรับเครื่องจักรซึ่งมีส่วนประกอบที่ทำงานแบบหมุน มีความถี่ค่อนข้างต่ำ เช่นปัญหาการไม่สมดุล (Imbalance) การเยื้องแนวแกน (Misalignment) การหลุดหลวม (Looseness) และปัญหาเพลาโก่งงอ (Shaft bow) เป็นต้น การตั้งค่ามาตรฐานในการวัด ให้ดูรายละเอียดจากแผนภูมิในคู่มือการใช้เครื่องหน้า App - 13 และในการตั้งค่าให้เริ่มต้นจาก Utilities Menu ส่วนในมาตรฐานอื่น ๆ ให้ยึดการตั้งค่าจากมาตรฐานในการวัดความเร็วก่อน แล้วเปลี่ยนแปลงเฉพาะข้อบกพร่องในแต่ละกรณี

### 2.2 มาตรฐานในการวัดความเร่ง ( Acceleration measurement )

โดยทั่วไปใช้สำหรับเครื่องจักรซึ่งมีส่วนประกอบทำงานแบบหมุนซึ่งมีความถี่สูงกว่าในกรณี 2.1 ได้แก่ กรณีที่มีความถี่สูงกว่า 10000 รอบต่อนาที ปัญหาข้อบกพร่องของตลับลูกปืนแบบชิ้นส่วนกลิ้ง (Rolling element bearing) และปัญหาการขบกันของชุดเฟือง (Gear meshing) เป็นต้น ข้อแตกต่างบางประการที่แก้ไขจากมาตรฐานในข้อที่ 2.1 มีดังนี้

**Type:** Acceleration

**Lines:** 800

**Low Freq Cutoff:** 2 Hz

**Start Freq:** 0

**Maximum Freq:**

สำหรับเพลลาและคัปปลิง นั้น ค่า **Maximum Freq.** ควรตั้งไว้ประมาณ 5-6 เท่าของความเร็วรอบการหมุน

สำหรับแบร์ริง ค่า **Maximum Freq.** ควรตั้งค่าดังต่อไปนี้ เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในแบร์ริง

Shaft Speed	Maximum Freq.
$\leq 1200 \text{ RPM}$	1 kHz
1200 - 2400 RPM	2 kHz
2400 - 3600 RPM	5 kHz
$> 3600 \text{ RPM}$	10 kHz

สำหรับเฟือง โดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดปัญหาที่ความถี่สูงถึงระดับความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 กับแถบความถี่ทางด้านข้าง (Side-bands) ฮาร์โมนิกที่ 3 และถ้าหากสนใจแถบความถี่ทางด้านข้าง ให้เปลี่ยนค่าของความละเอียดเป็น 1600 lines แทน ค่าแนะนำสำหรับ **Maximum Freq.** ในการวัดได้แก่

$$4 \times \text{จำนวนฟันเฟือง} \times \text{ความเร็วรอบของเพลลา} + 10\%$$

### 2.3 มาตรฐานในการวัดแบบกรอบความเร่ง (Envelope acceleration measurement)

เป็นการวัดขยายปัญหาการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำ ในเครื่องจักรที่มีส่วนประกอบหมุนด้วยความเร็วสูง และวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะซ้ำกันเป็นช่วง ๆ สามารถตรวจสอบปัญหาข้อบกพร่องของตลับลูกปืนแบบชิ้นส่วนกลิ้ง และปัญหาการขบกันของชุดเฟือง ในสภาวะก่อนที่จะเกิดการเสียหายได้ ข้อแตกต่างบางประการที่แก้ไขจากมาตรฐานในข้อที่ 2.1 มีดังนี้

**Lines:** 800

**Type:** ENV Acc

**Number of Averages:** 1

**Detection:** Pk to Pk

**Low Freq Cutoff:** 0 or 0.5 % of full scale

การเลือก **Type:** ENV Acc จะทำให้ในกรอบมีหัวข้อเพิ่มเติมขึ้นมา ได้แก่ **ENV Filter** ซึ่งสามารถตั้งค่าตามมาตรฐานที่แนะนำ โดยเลือกจากค่าความถี่ของเบร้งซึ่งมีค่าไม่เกินจากค่ากำหนด ดังต่อไปนี้

<b>10 Hz</b>	เลือกแถบความถี่ที่ 1	[ 5 Hz - 100 Hz ]
<b>100 Hz</b>	เลือกแถบความถี่ที่ 2	[ 50 Hz - 1 kHz ]
<b>1000 Hz</b>	เลือกแถบความถี่ที่ 3	[ 500 Hz - 10 kHz ]
<b>10000 Hz</b>	เลือกแถบความถี่ที่ 4	[ 5 kHz - 40 kHz ]

#### 2.4 มาตรฐานในการวัดแบบการขจัด ( Displacement measurements )

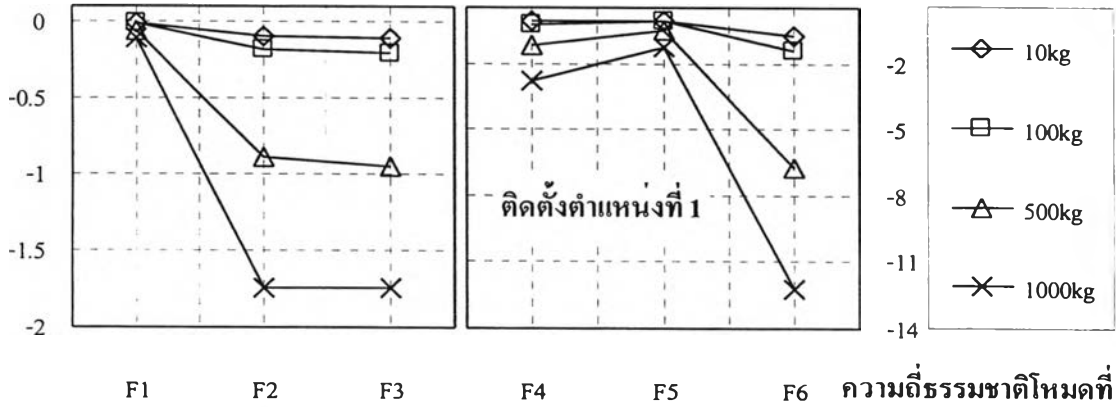
โดยทั่วไปใช้ในการวัดระยะสัมผัสระหว่าง 2 พื้นผิว ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ส่วนประกอบของเครื่องจักร ซึ่งมีการทำงานแบบหมุน มีน้ำหนักรวมเมื่อเทียบกับน้ำหนักของกรอบหรือโครงที่ห่อหุ้มอยู่ ดังนั้นแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากตัวหมุนนี้จะถ่ายทอดอยู่เฉพาะระหว่างพื้นผิวของเพลากับเบร้งเท่านั้น และควรจะใช้หัววัดการสั่นสะเทือนแบบ Eddy probe เพียงอย่างเดียว การวัดด้วยมาตรฐานดังกล่าวนี้ที่เห็นได้ชัดมักจะใช้กับเบร้งแบบฟิล์ม (Journal bearings - Sleeve bearings) ข้อแตกต่างบางประการที่แก้ไขจากมาตรฐานในข้อที่ 2.1 มีดังนี้

**Type:** Displacement ( Eddy probes )

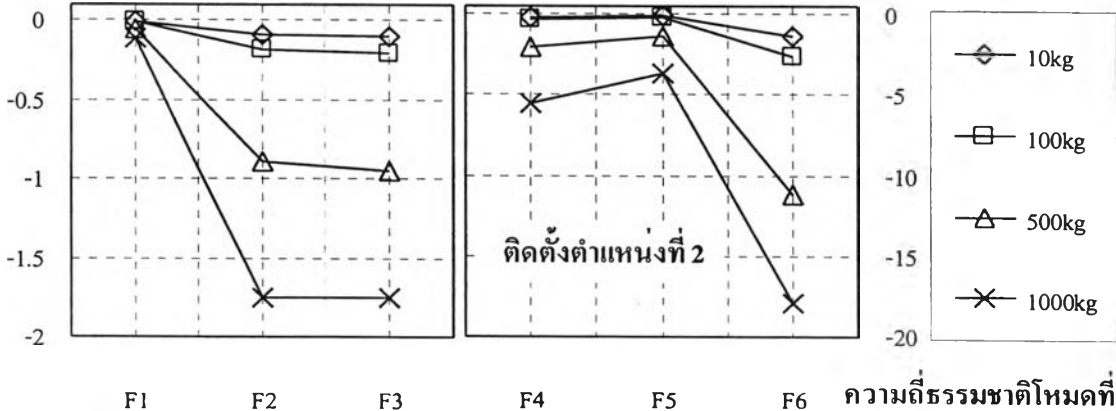
**Detection:** Pk to Pk

**ภาคผนวก ข : กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรม TFRAME**

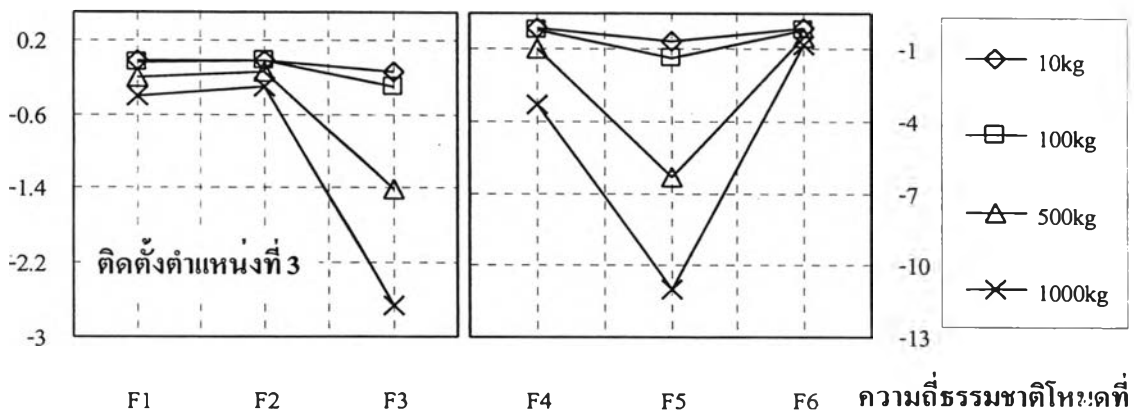
ผลต่างของความถี่ธรรมชาติหลังติดตั้ง-ก่อนติดตั้ง ( เรเดียนต่อวินาที)



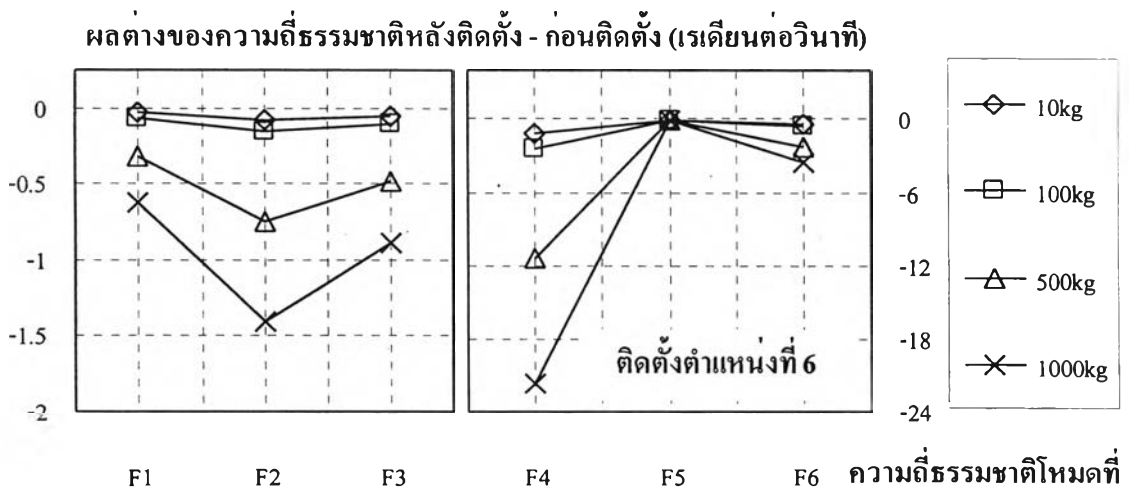
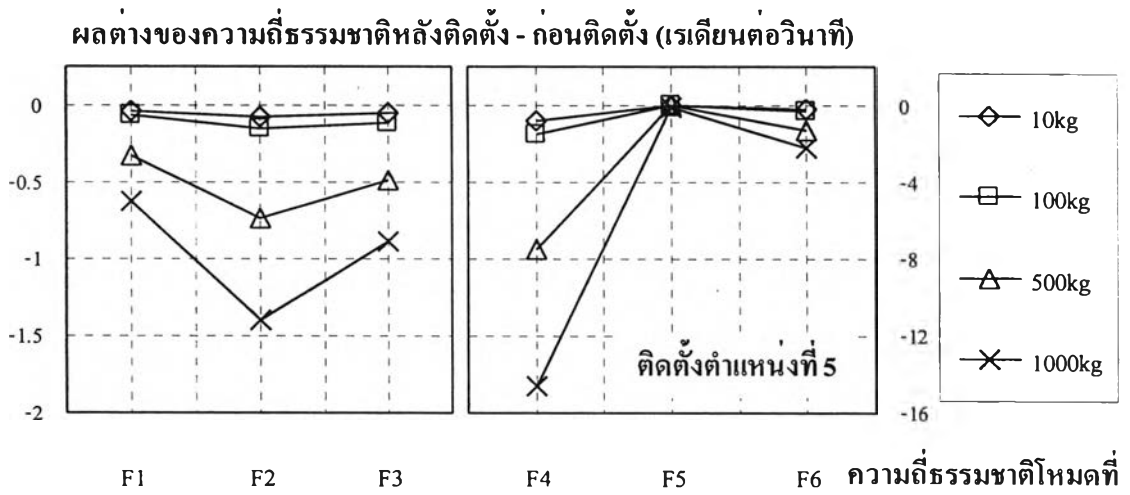
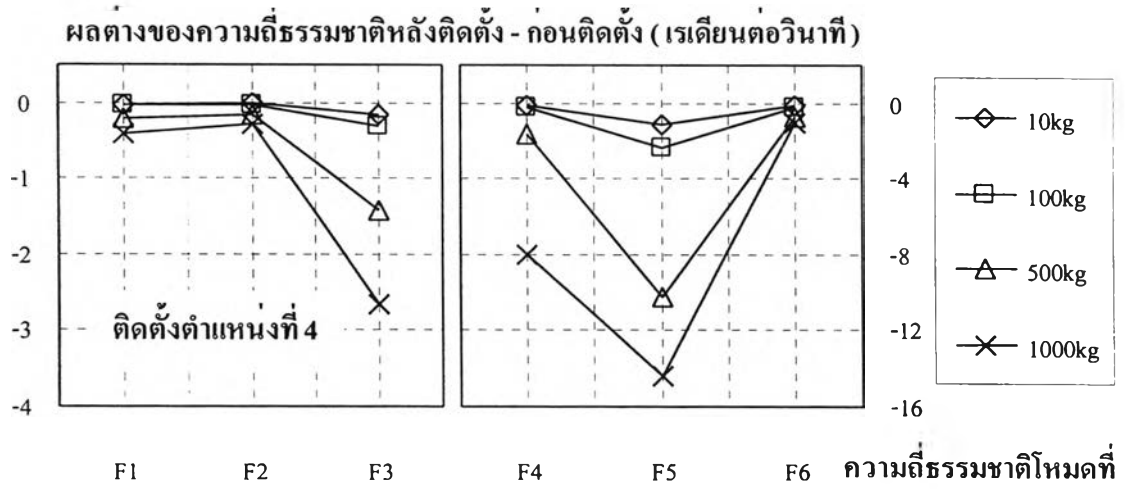
ผลต่างของความถี่ธรรมชาติหลังติดตั้ง - ก่อนติดตั้ง (เรเดียนต่อวินาที)



ผลต่างของความถี่ธรรมชาติหลังติดตั้ง - ก่อนติดตั้ง (เรเดียนต่อวินาที)

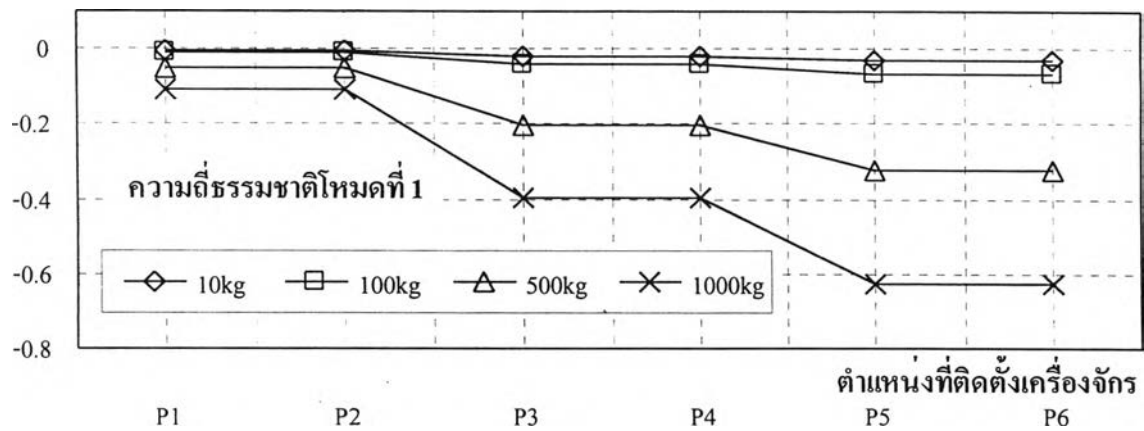


รูปที่ ข-1 ผลต่างค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารก่อน-หลังติดตั้งเครื่องจักรโดยตรง ตำแหน่งคงที่

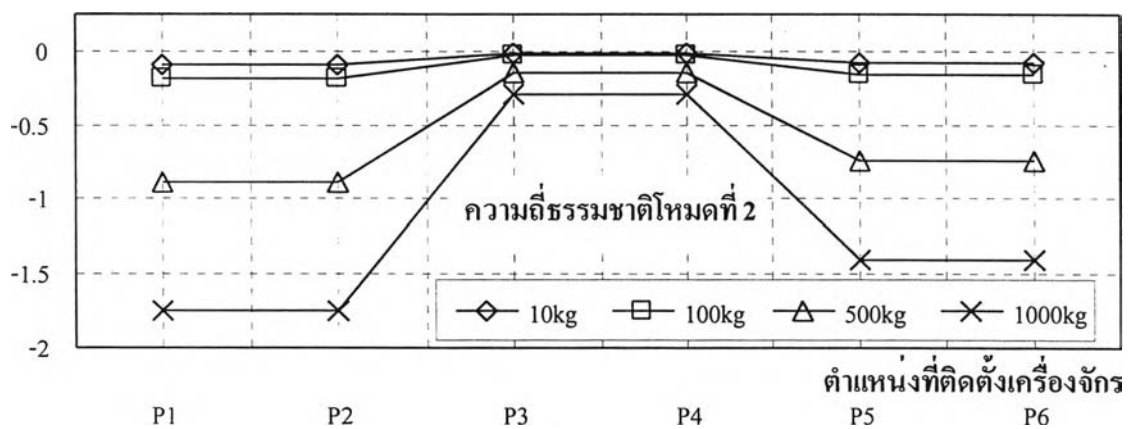


รูปที่ ข-1(ต่อ) ผลต่างค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารก่อน-หลังติดตั้งเครื่องจักรโดยตรง ตำแหน่งคงที่

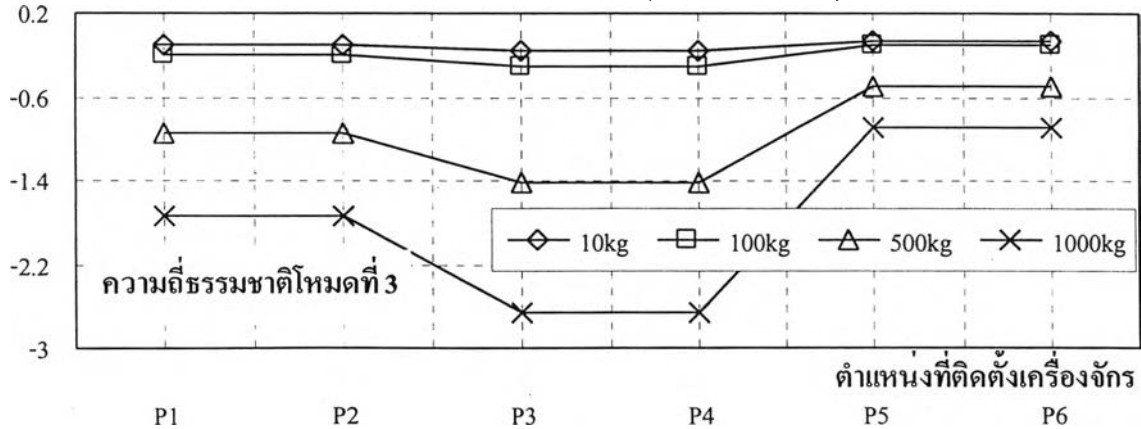
ผลต่างของความถี่ธรรมชาติหลังติดตั้ง - ก่อนติดตั้ง (เรเดียนต่อวินาที)



ผลต่างของความถี่ธรรมชาติหลังติดตั้ง - ก่อนติดตั้ง (เรเดียนต่อวินาที)

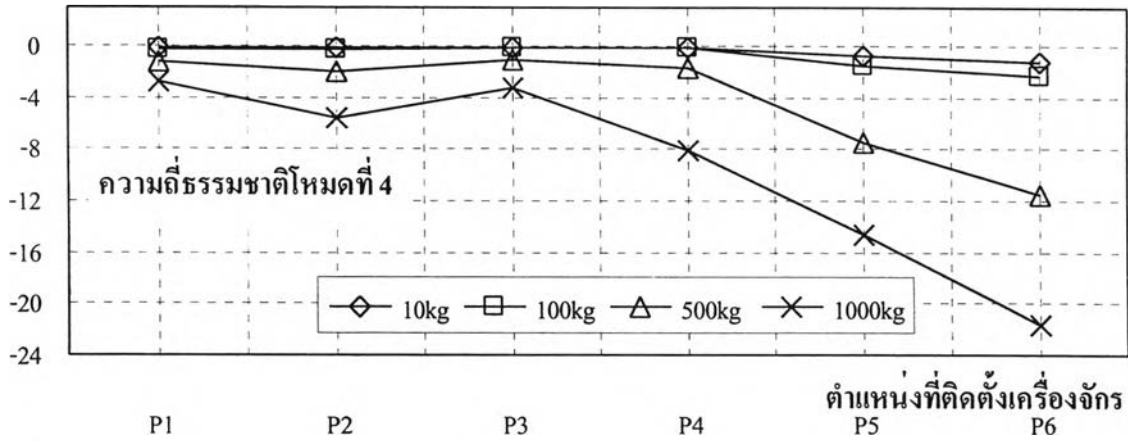


ผลต่างของความถี่ธรรมชาติหลังติดตั้ง - ก่อนติดตั้ง (เรเดียนต่อวินาที)

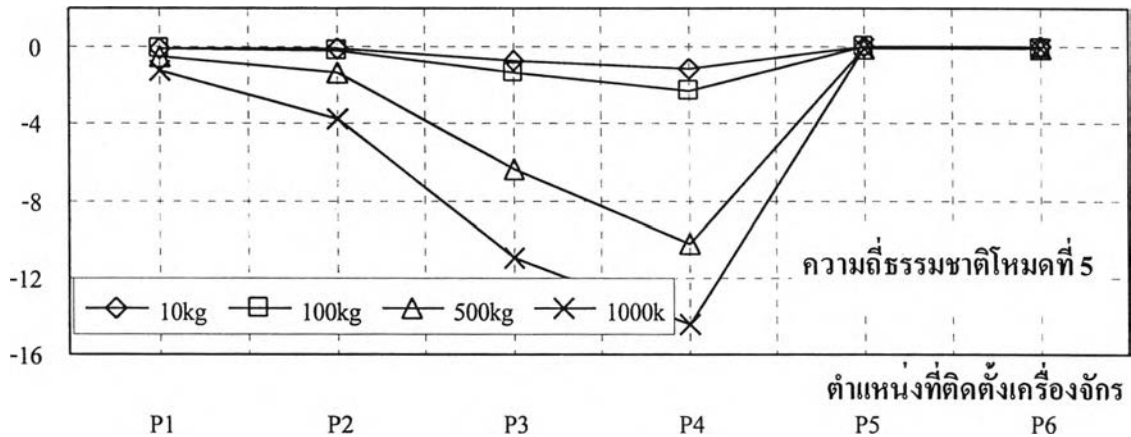


รูปที่ ข-2 ผลต่างค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารก่อน-หลังติดตั้งเครื่องจักร โดยตรง ความถี่คงที่

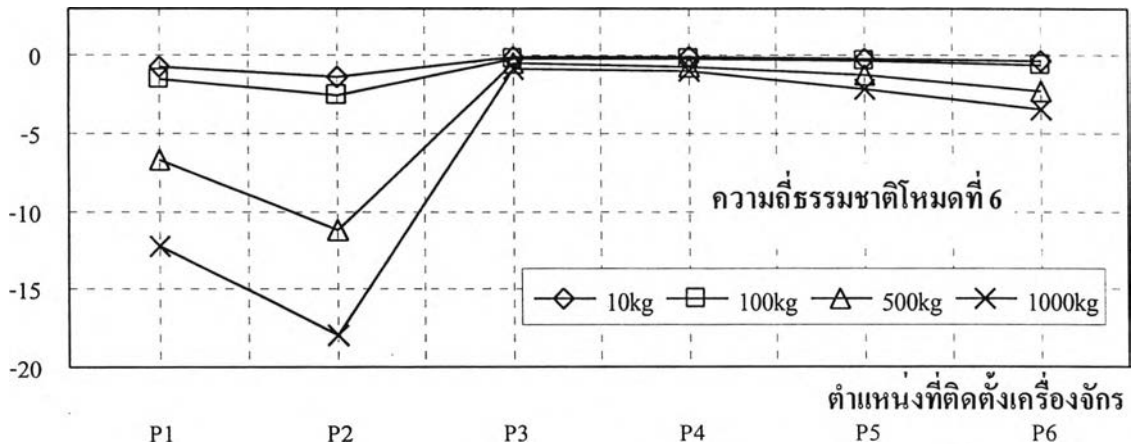
ผลต่างของความถี่ธรรมชาติหลังติดตั้ง - ก่อนติดตั้ง (เรเดียนต่อวินาที)



ผลต่างของความถี่ธรรมชาติหลังติดตั้ง - ก่อนติดตั้ง (เรเดียนต่อวินาที)

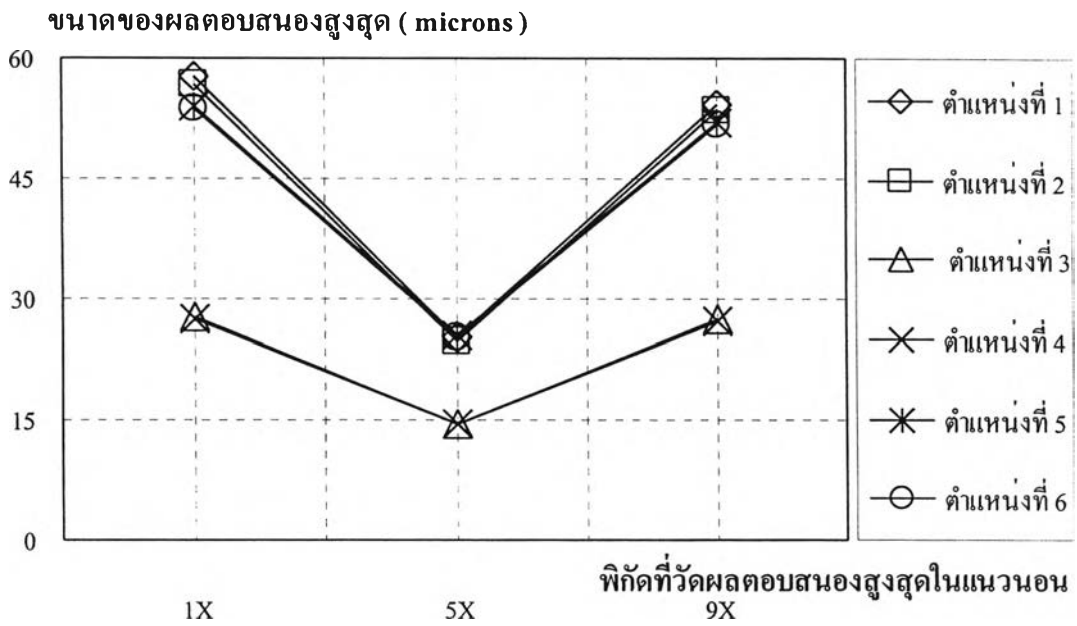


ผลต่างของความถี่ธรรมชาติหลังติดตั้ง - ก่อนติดตั้ง (เรเดียนต่อวินาที)

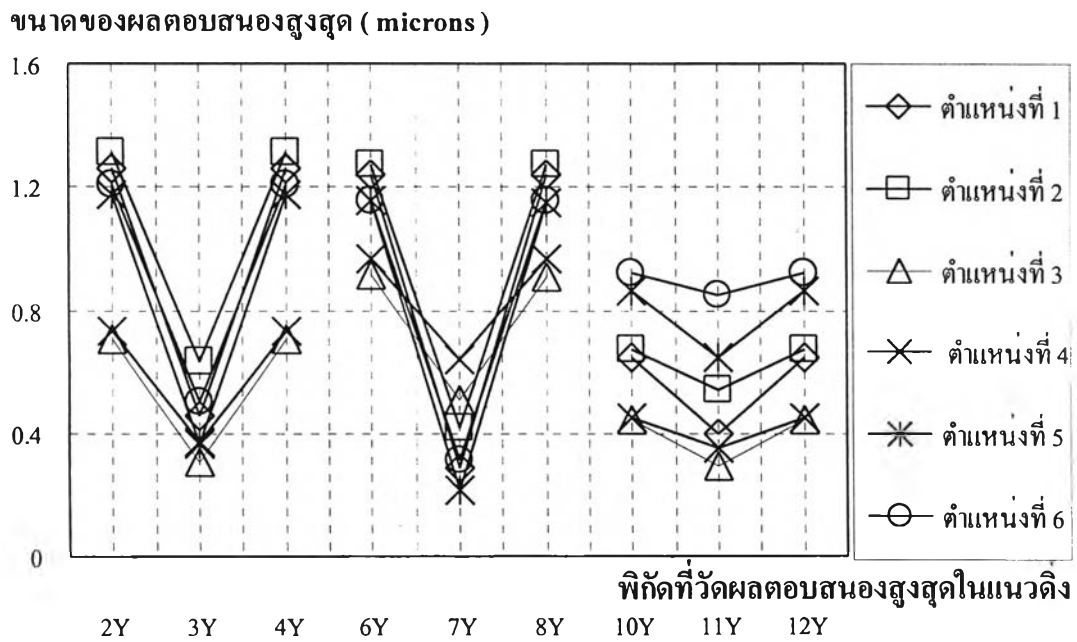


รูปที่ ข-2(ต่อ) ผลต่างค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารก่อน-หลังติดตั้งเครื่องจักร โดยตรง ความถี่คงที่





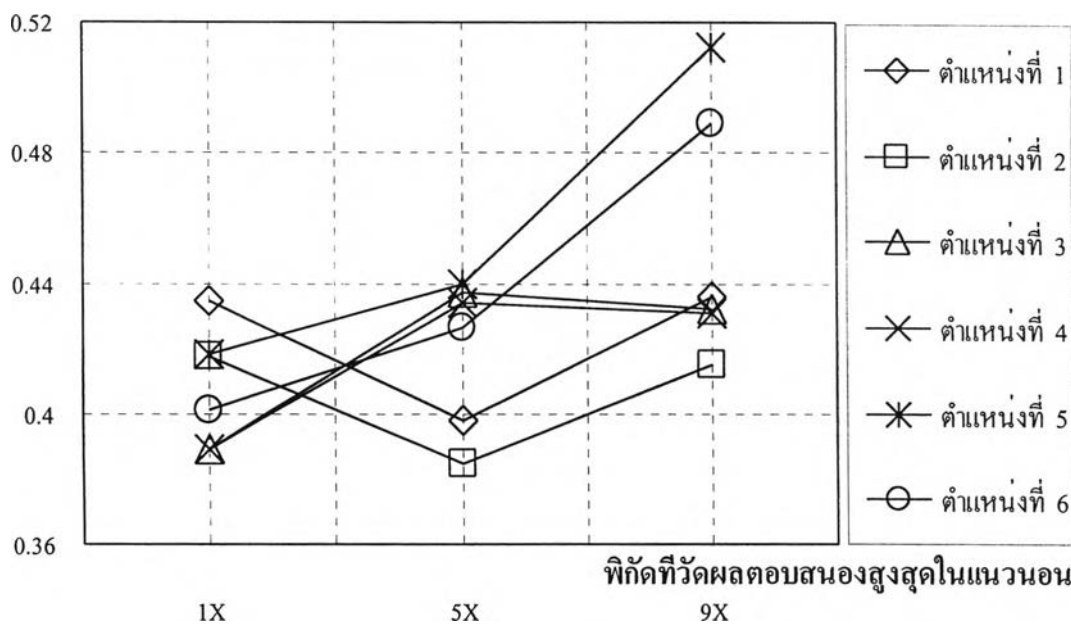
( ก.) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารในแนวนอน เมื่อรับภาระ  $100 \sin 50 t$



( ข.) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารในแนวดิ่ง เมื่อรับภาระ  $100 \sin 50 t$

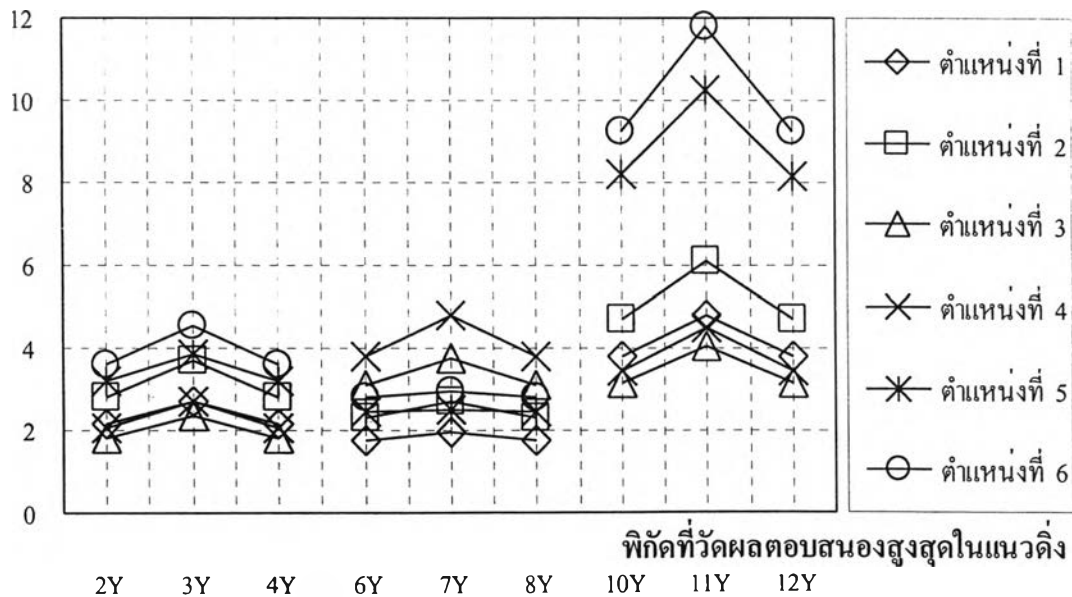
รูปที่ ข-3 ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารเมื่อติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุล ในตำแหน่งต่าง ๆ โดยตรง

ขนาดของผลตอบสนองสูงสุด ( microns )



( ก.) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารในแนวนอน เมื่อรับภาระ  $100 \sin 200 t$

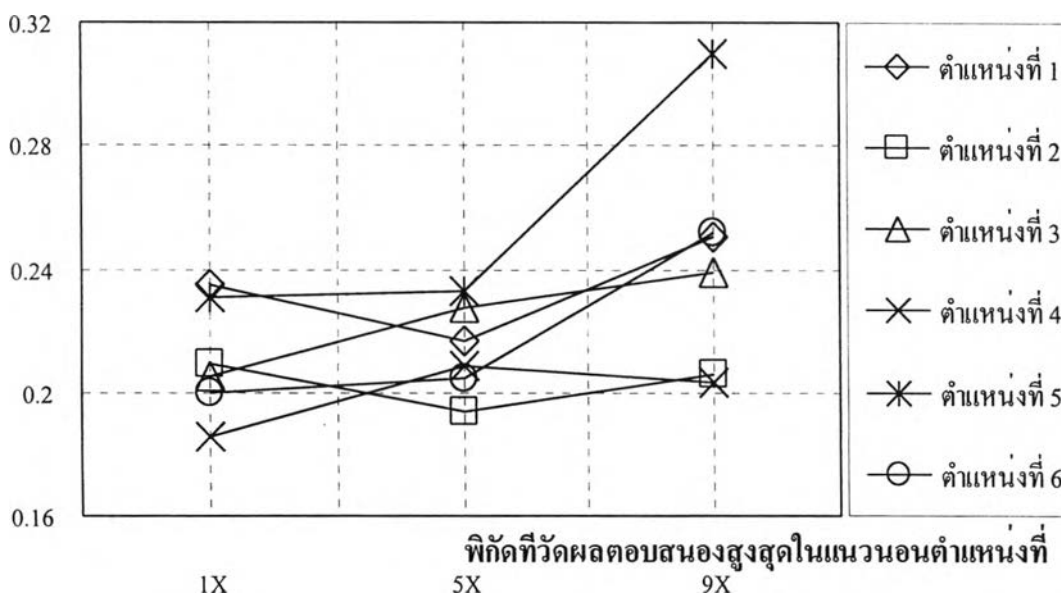
ขนาดของผลตอบสนองสูงสุด ( microns )



( ง.) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารในแนวดิ่ง เมื่อรับภาระ  $100 \sin 200 t$

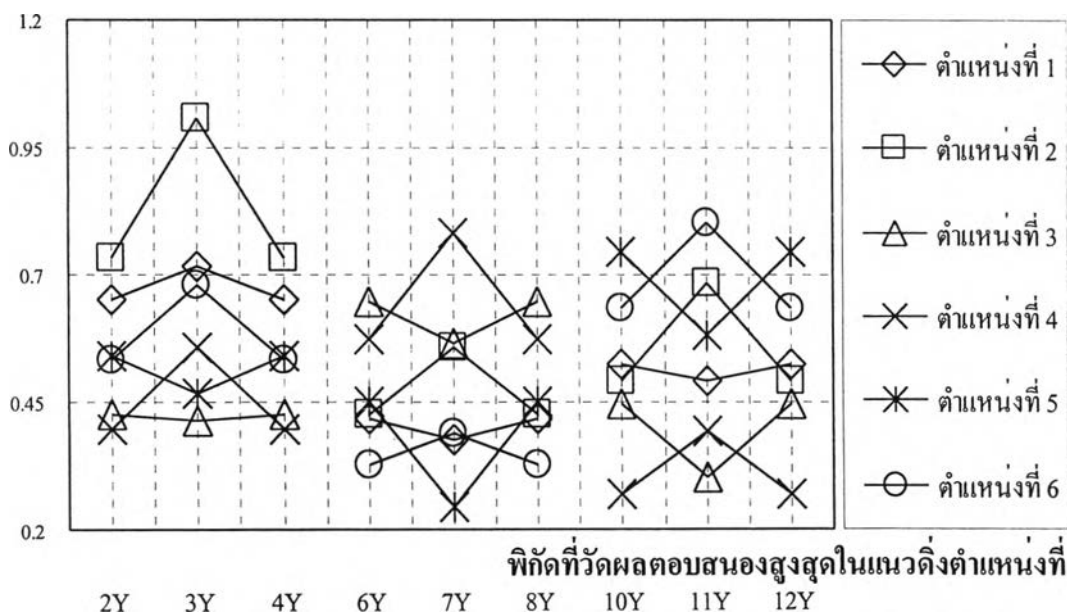
รูปที่ ข-3 (ต่อ) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารเมื่อติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุล ในตำแหน่งต่าง ๆ โดยตรง

ขนาดของผลตอบสนองสูงสุด ( microns )



( จ.) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารในแนวนอน เมื่อรับภาระ 100 sin 300 t

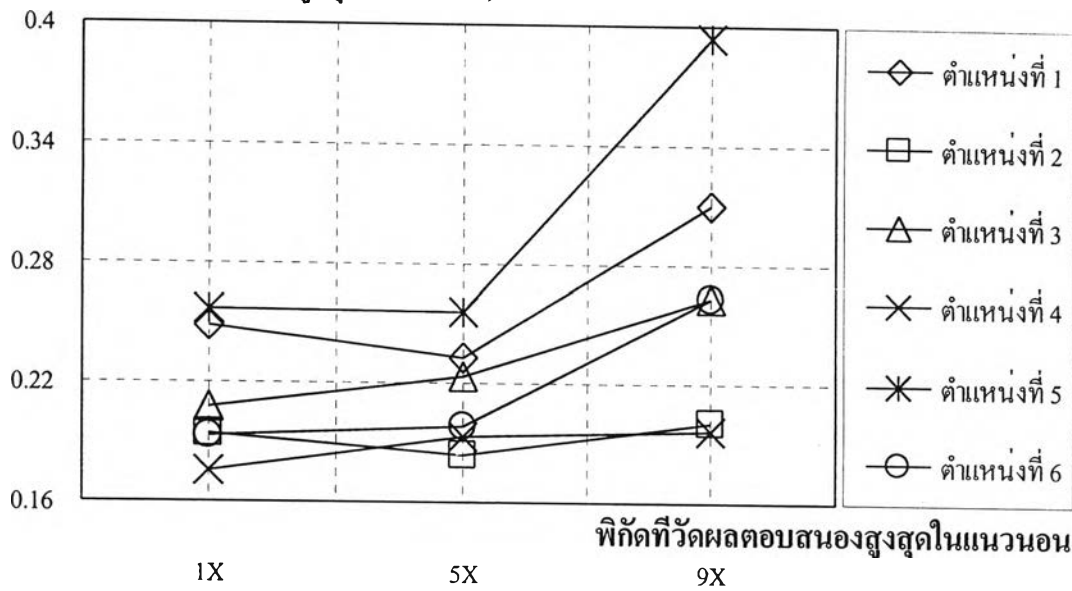
ขนาดของผลตอบสนองสูงสุด ( microns )



( ฉ.) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารในแนวตั้ง เมื่อรับภาระ 100 sin 300 t

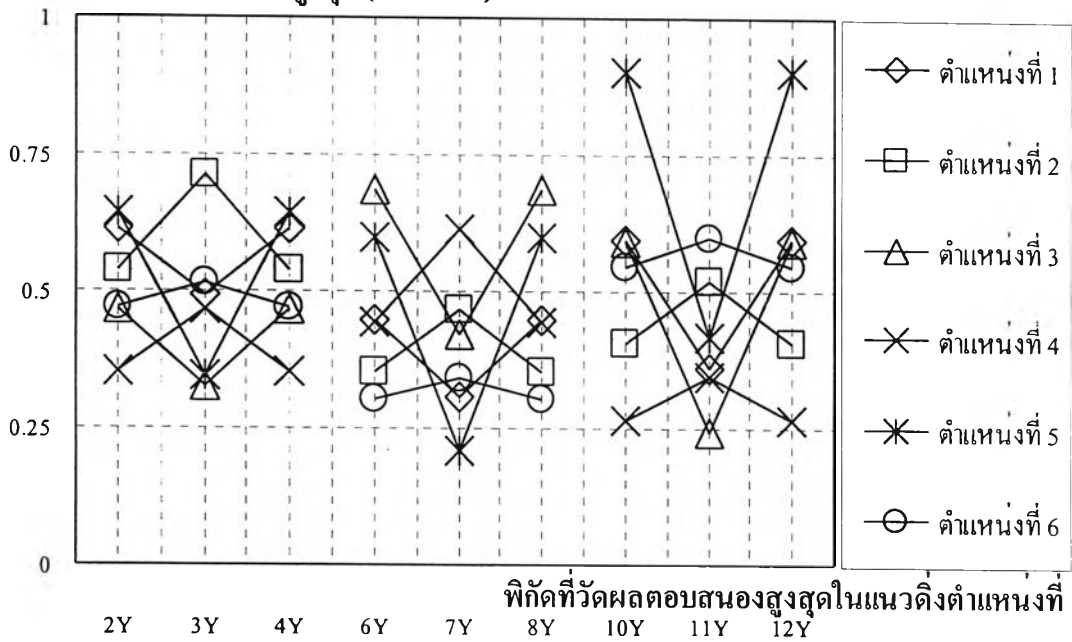
รูปที่ ข-3 (ต่อ) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารเมื่อติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุล ในตำแหน่งต่าง ๆ โดยตรง

ขนาดของผลตอบสนองสูงสุด ( microns )



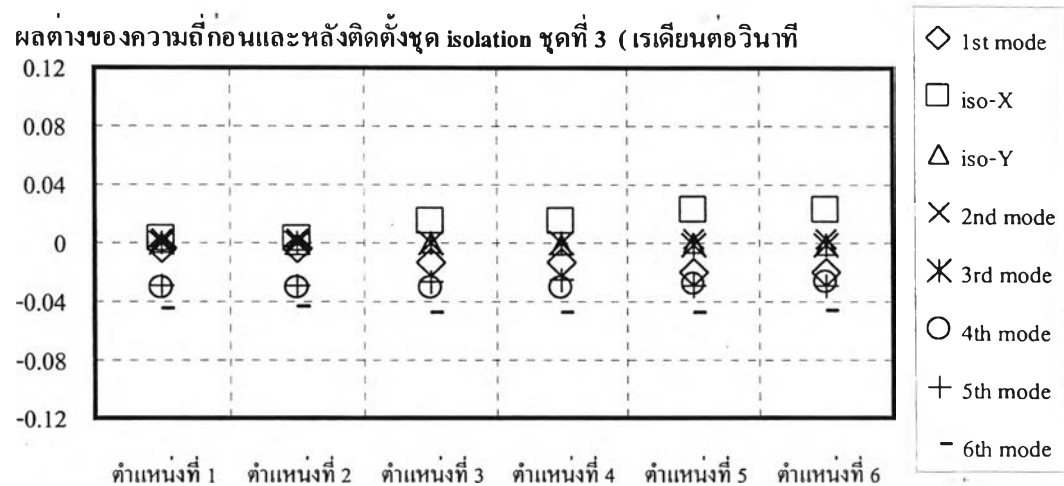
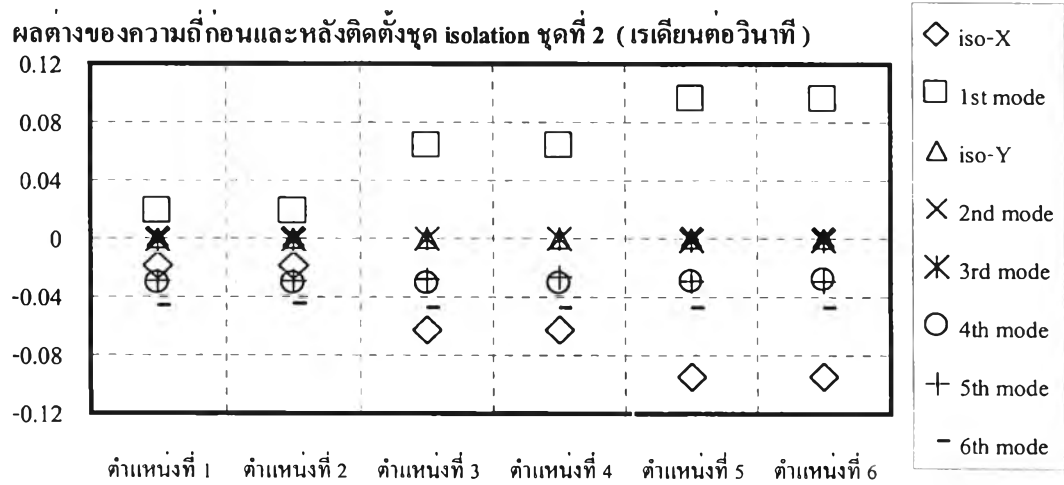
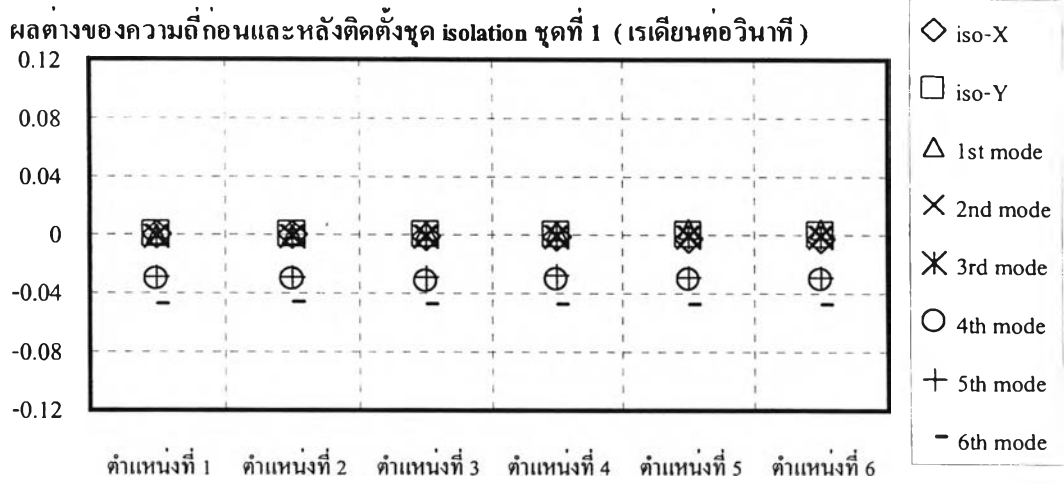
( ข. ) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารในแนวนอน เมื่อรับภาระ  $100 \sin 350 t$

ขนาดของผลตอบสนองสูงสุด ( microns )

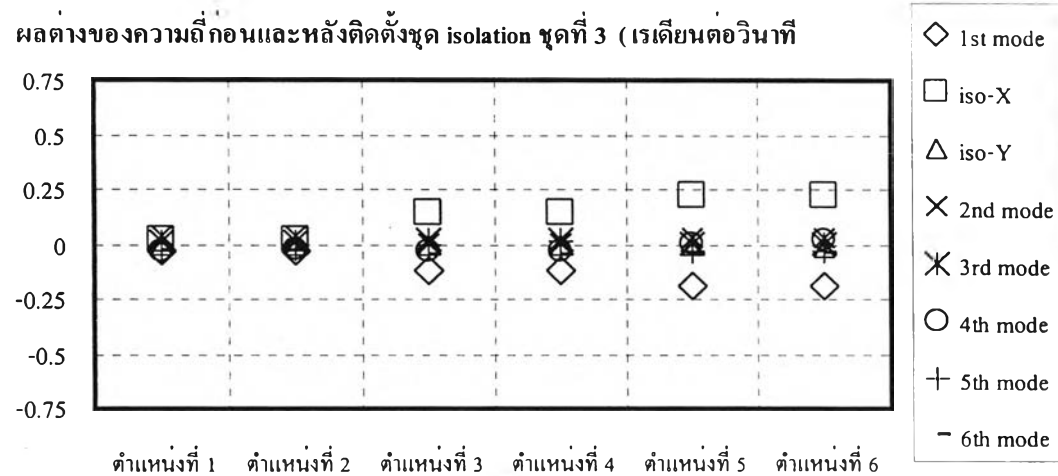
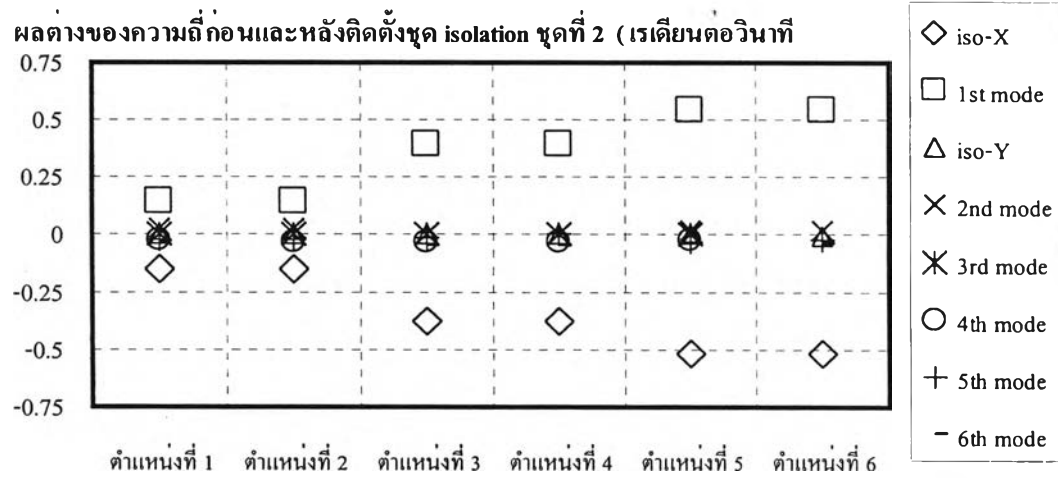
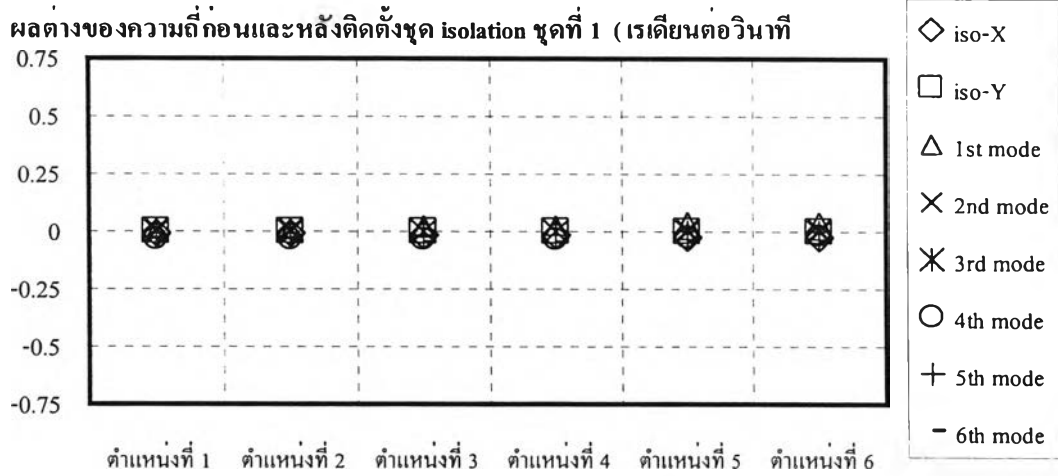


( ข. ) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารในแนวดิ่ง เมื่อรับภาระ  $100 \sin 350 t$

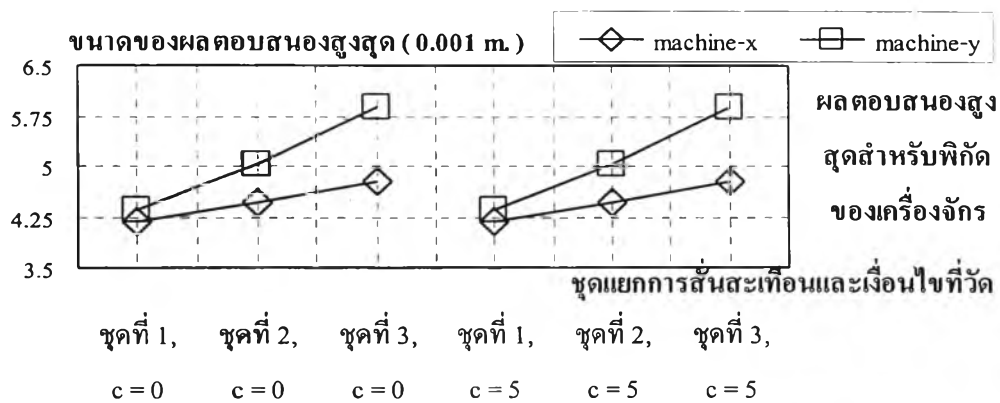
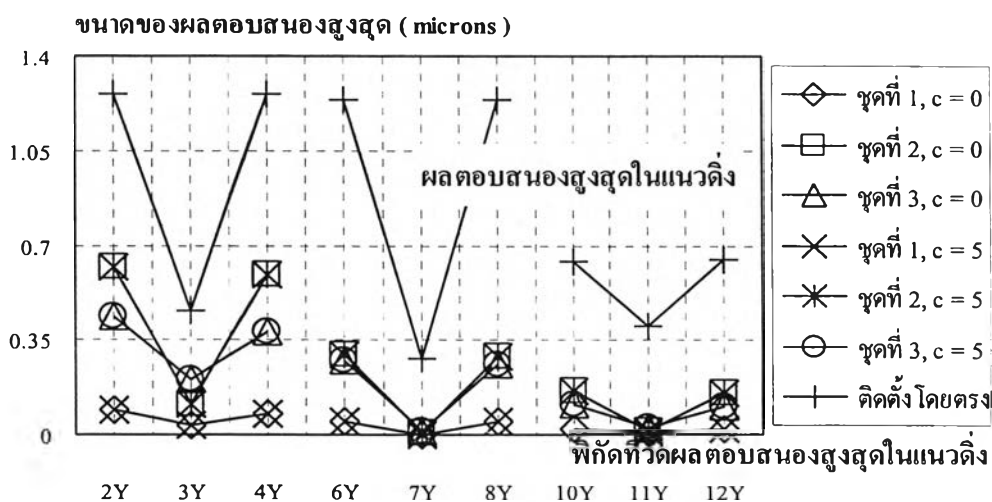
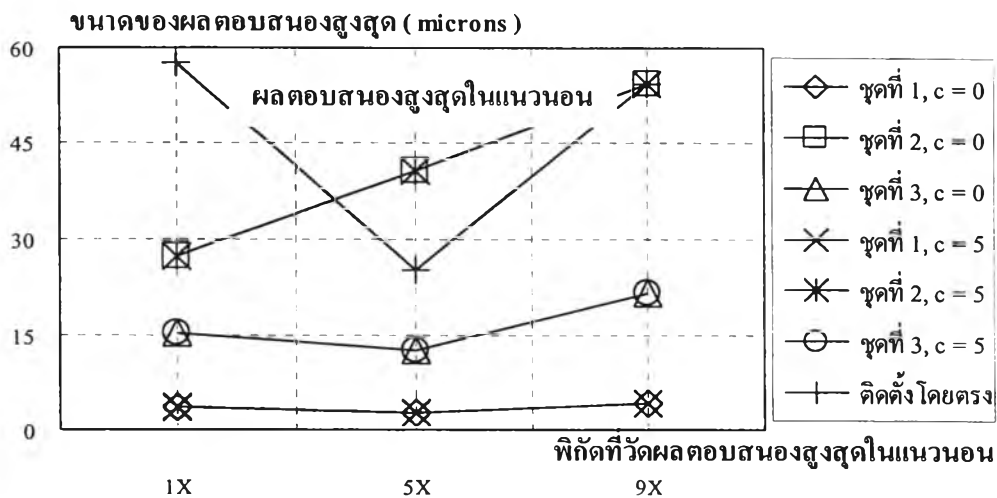
รูปที่ ข-3 (ต่อ) ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารเมื่อติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุล ในตำแหน่งต่าง ๆ โดยตรง



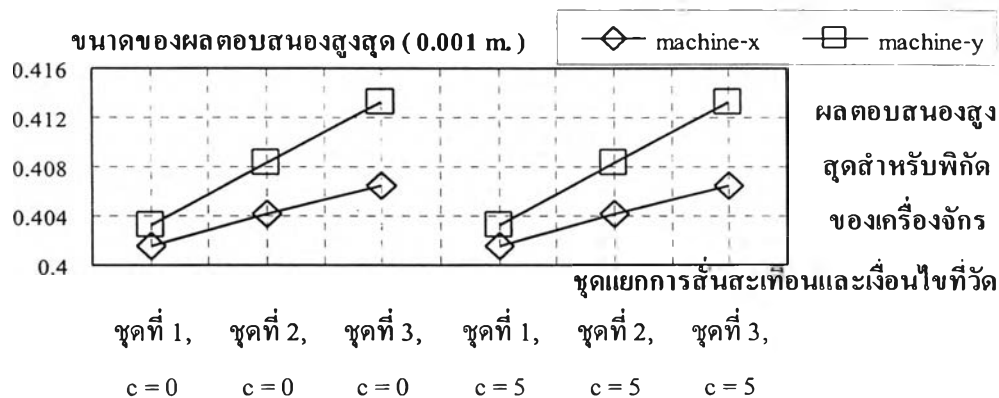
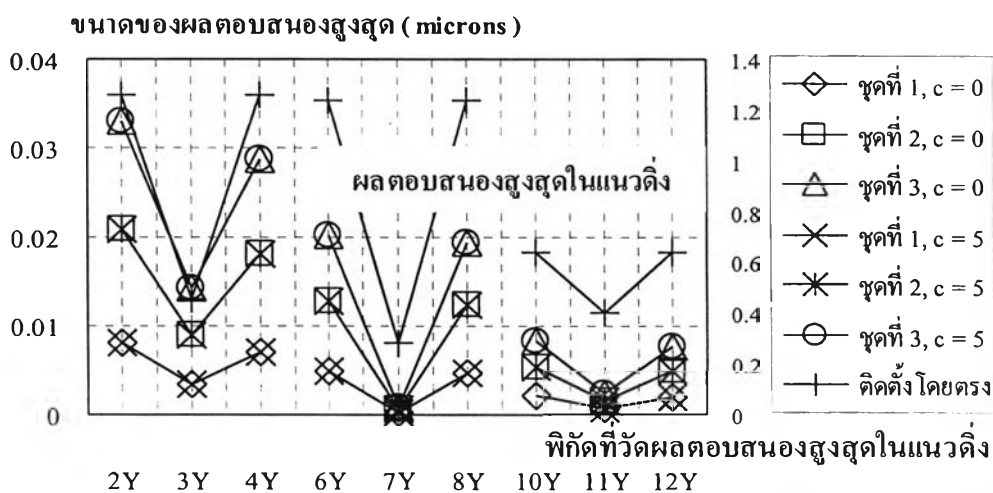
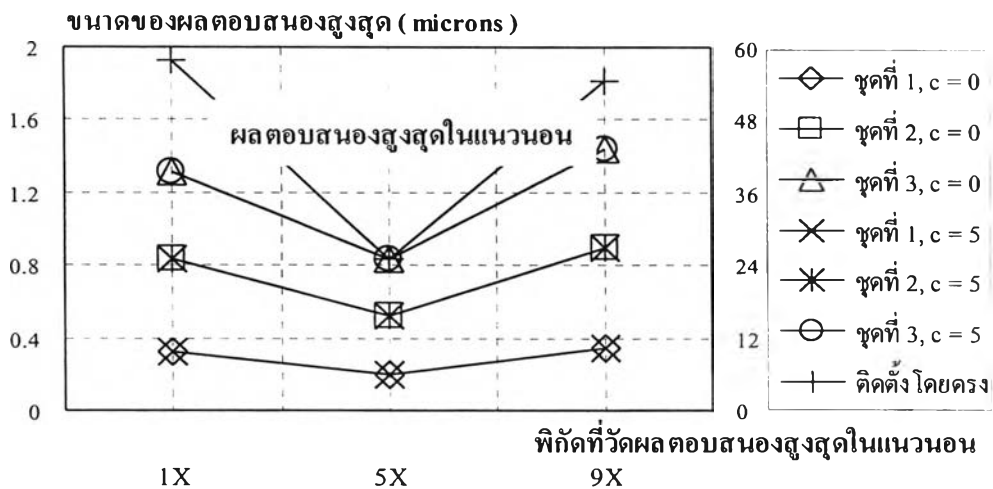
รูปที่ ข-4 ผลต่างของความถี่ก่อนและหลังติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนซึ่งมีมวล 10 กิโลกรัม



รูปที่ ข-5 ผลต่างของความถี่ก่อนและหลังติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนซึ่งมีมวล 100 กิโลกรัม

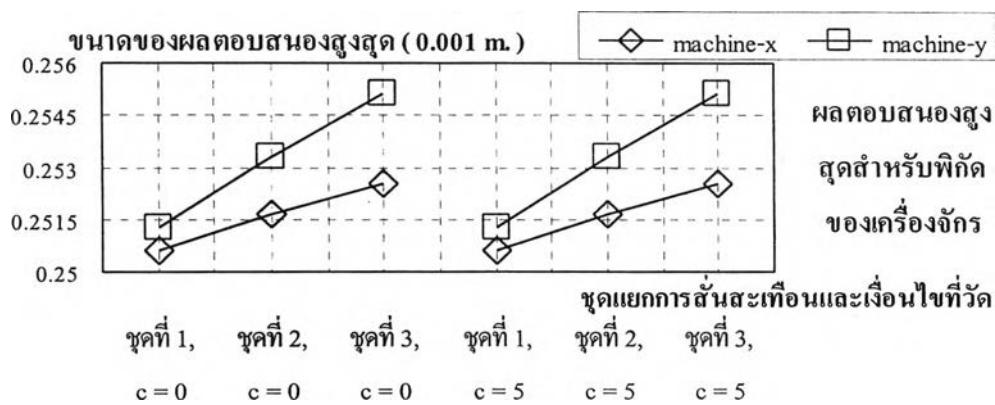
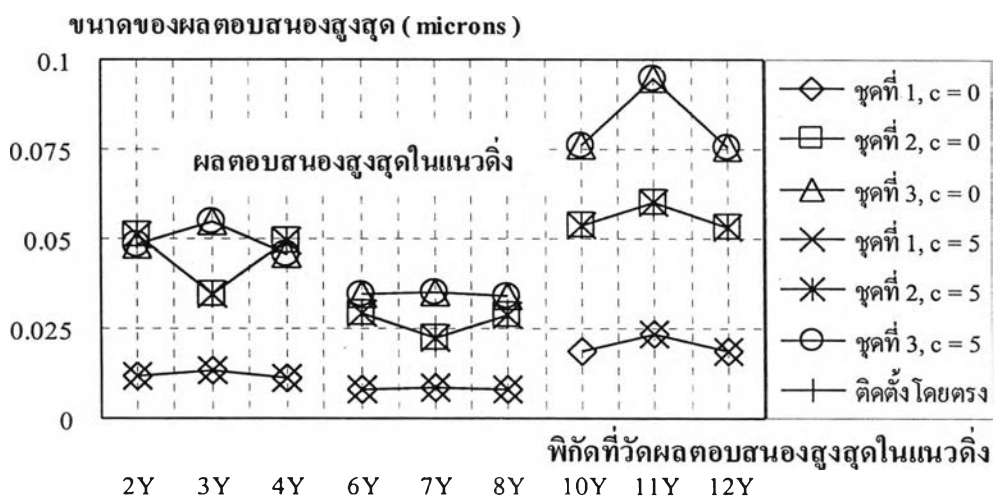
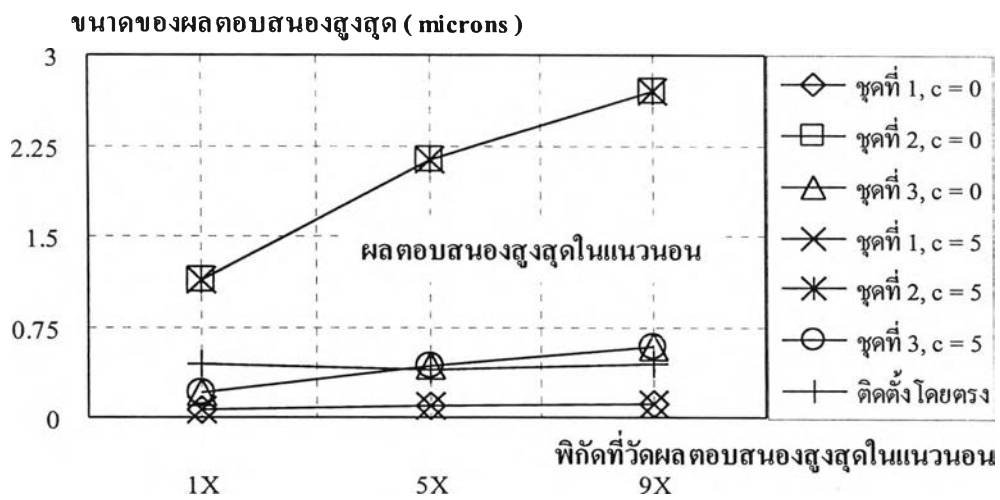


รูปที่ ข-6.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 1 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรง ไม่สมดุล  $100 \sin 50t$

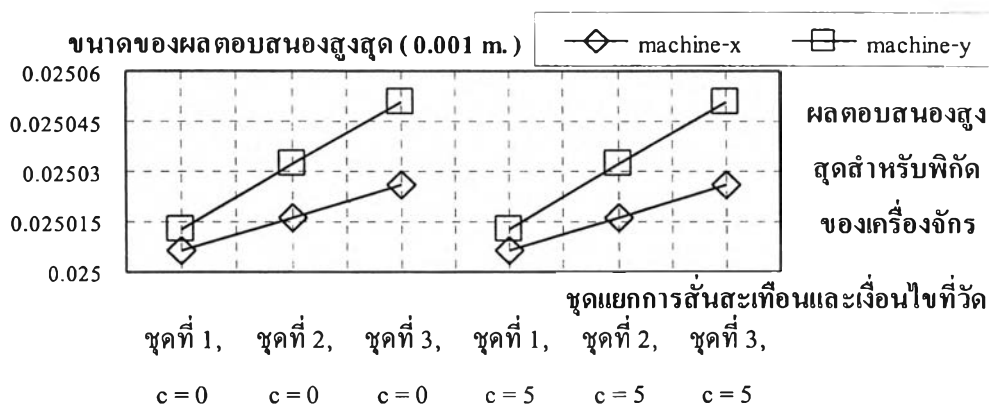
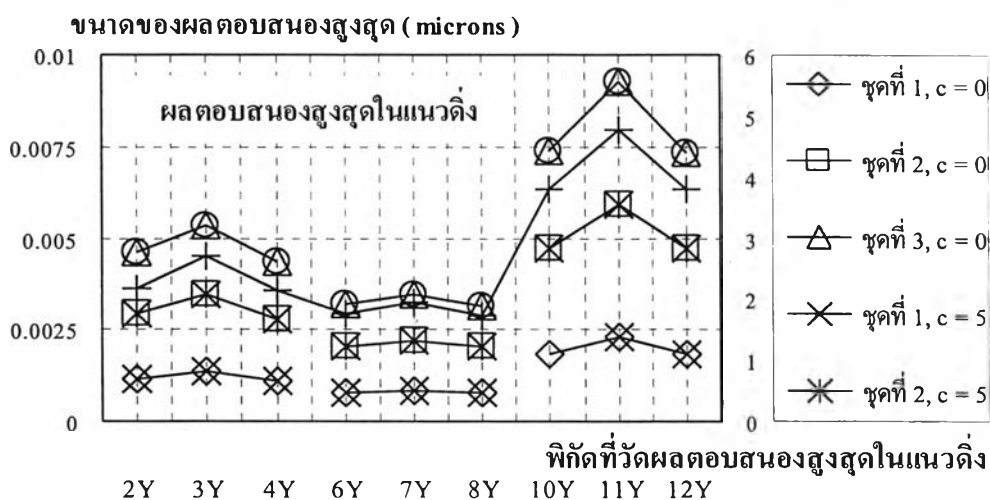
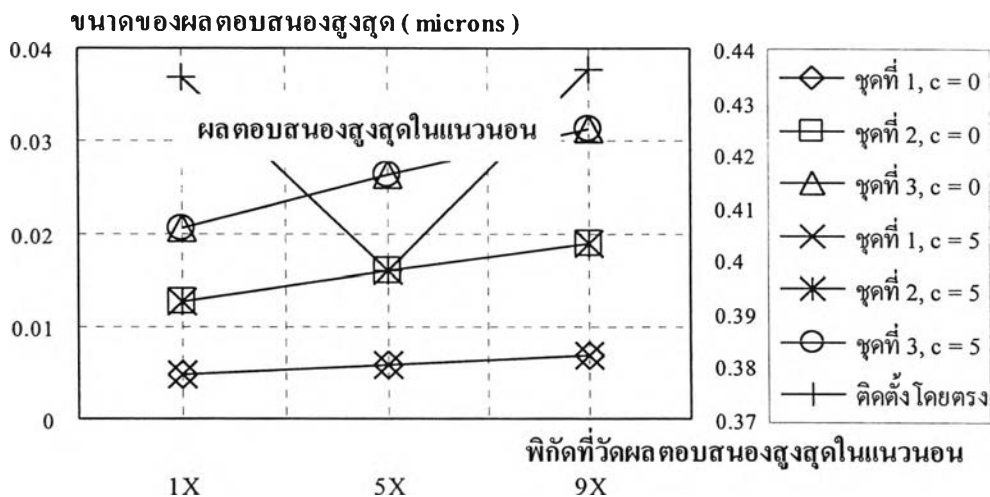


รูปที่ ข-6.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 1 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$

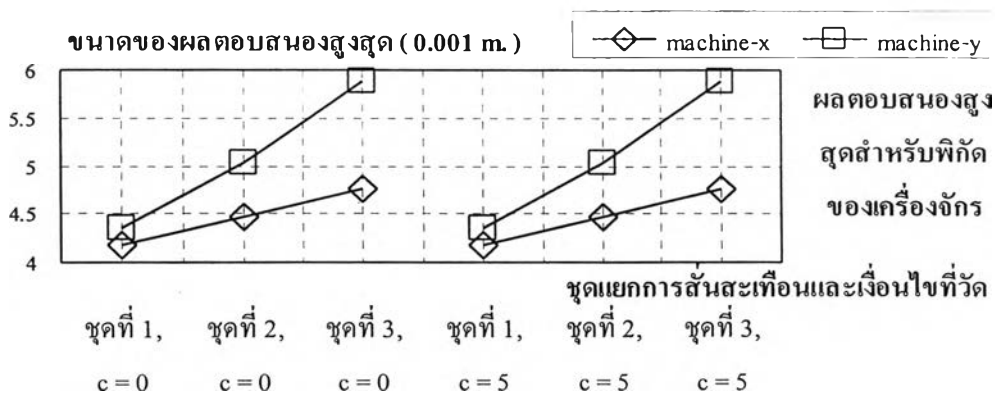
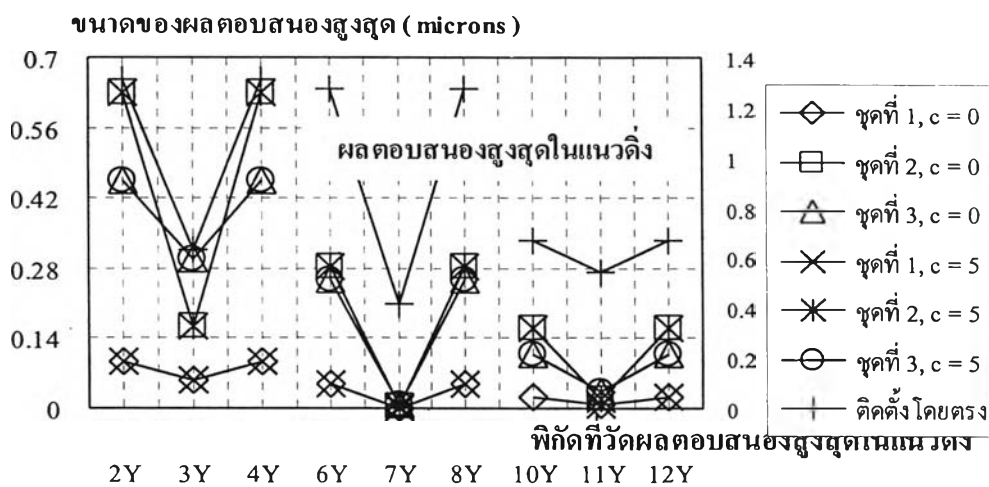
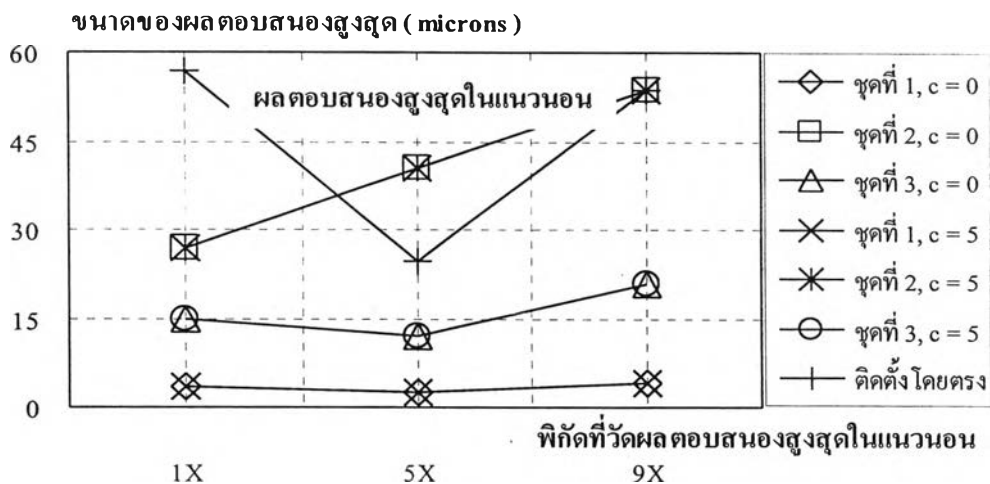




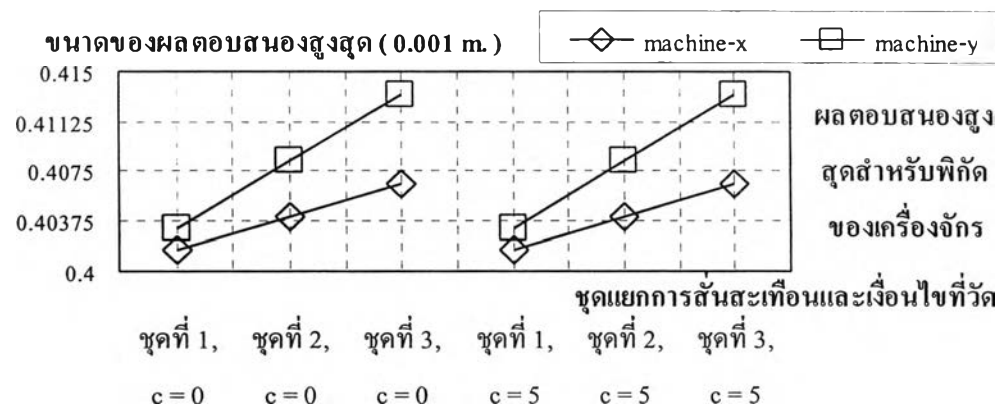
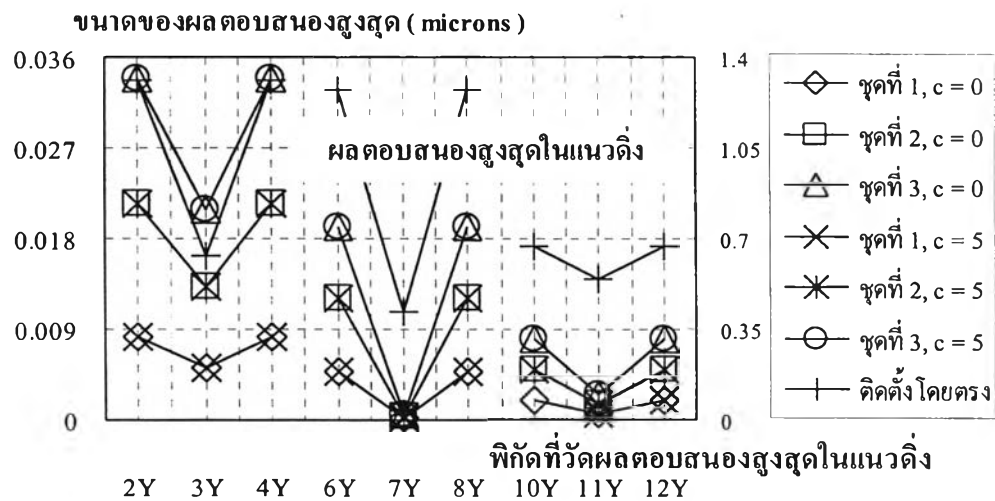
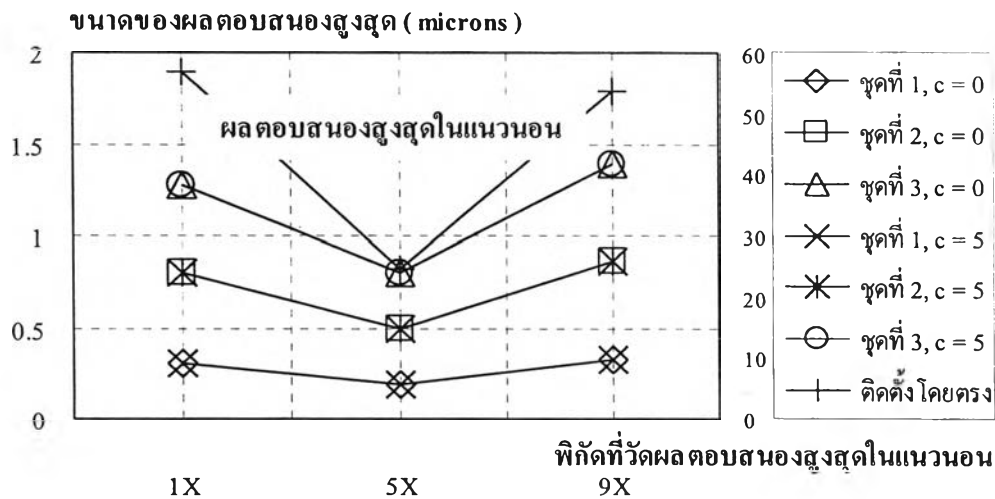
รูปที่ ข-6.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 1 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$



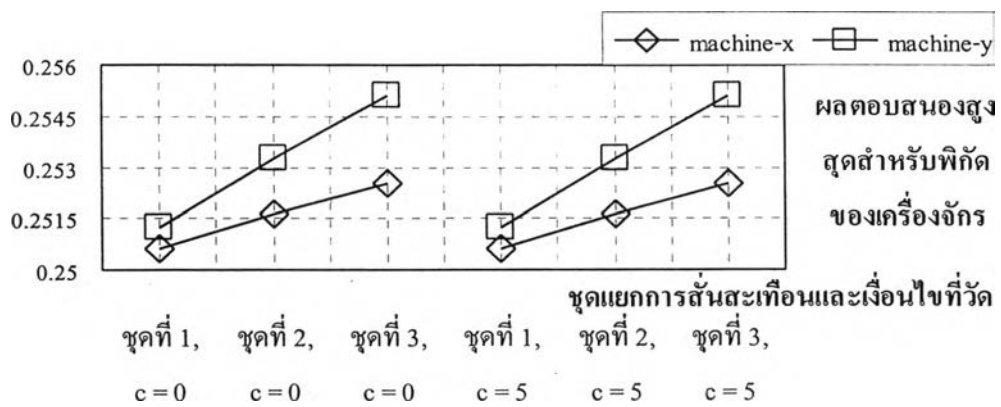
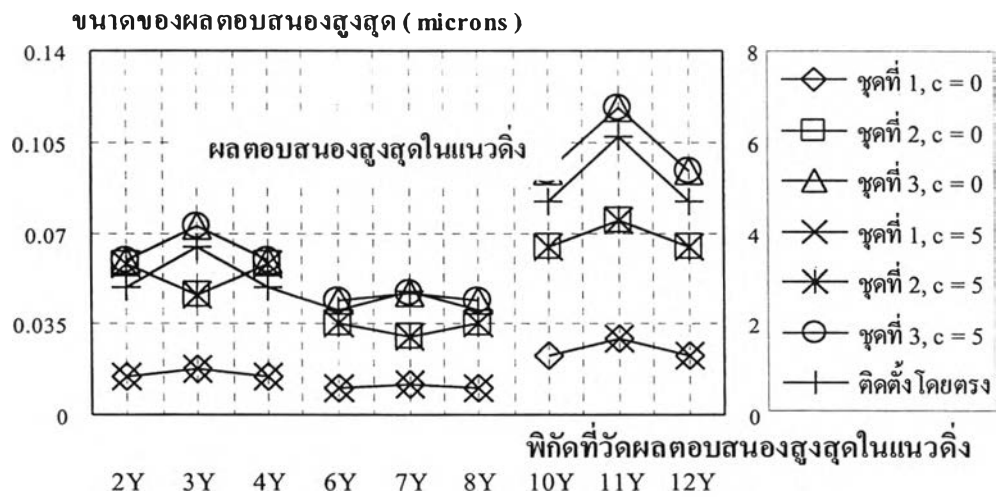
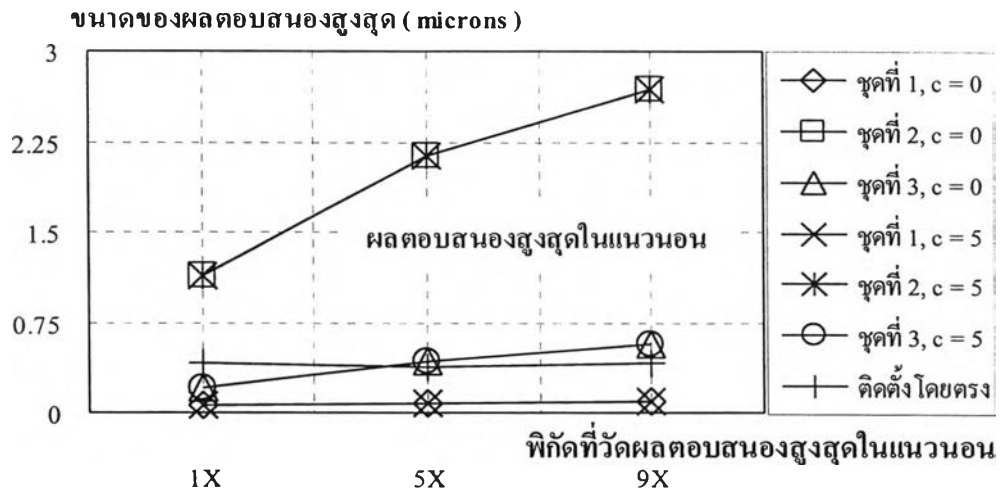
รูปที่ ข-6.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 2 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$



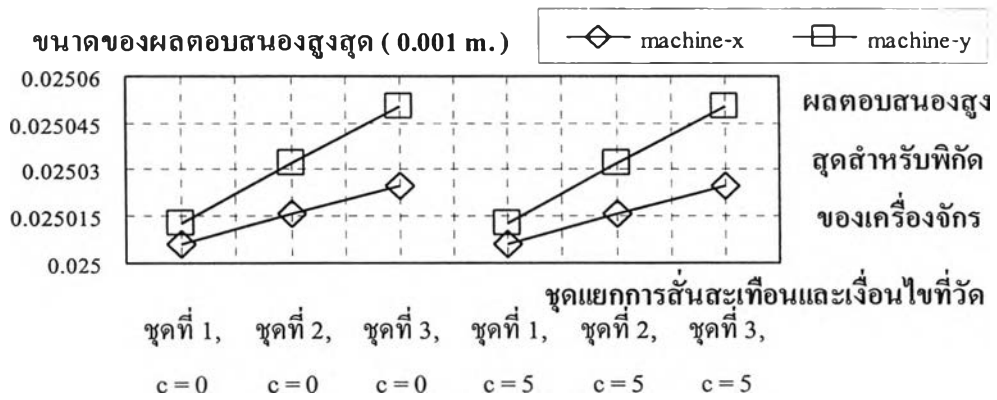
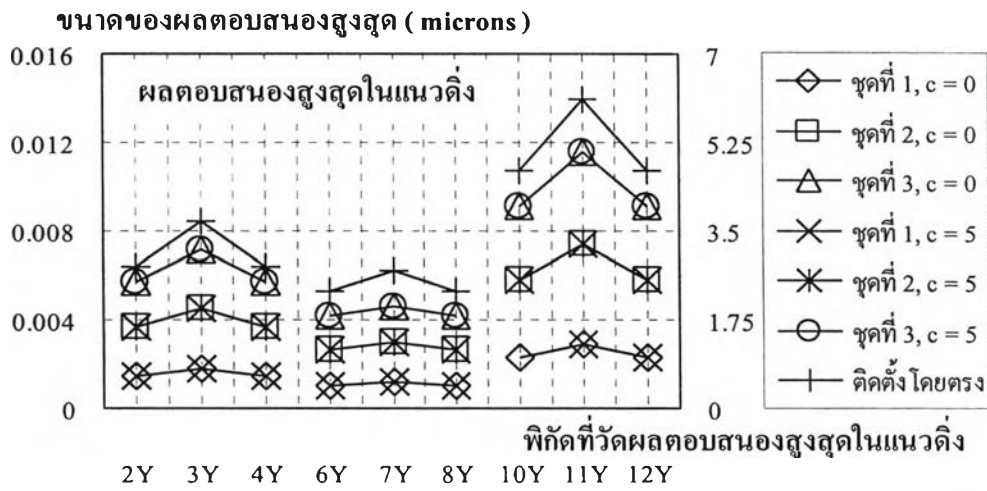
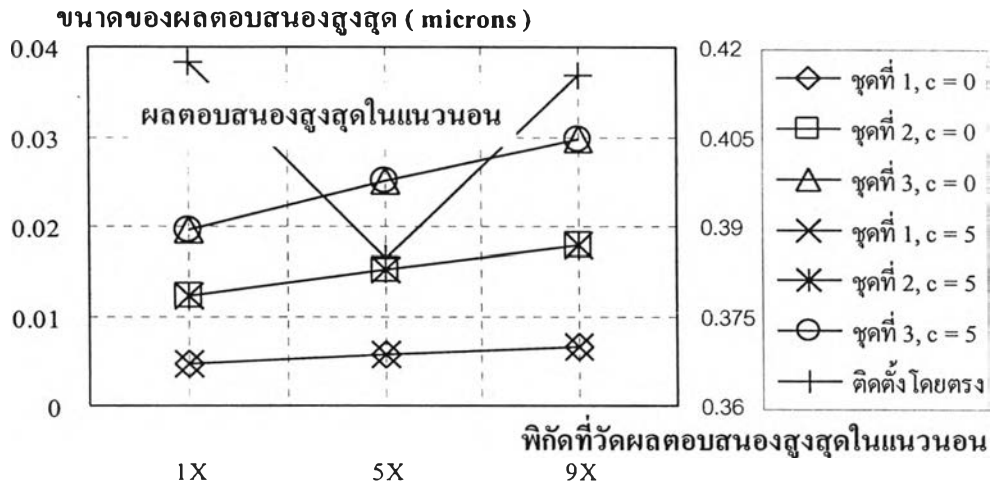
รูปที่ ข-7.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 2 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$



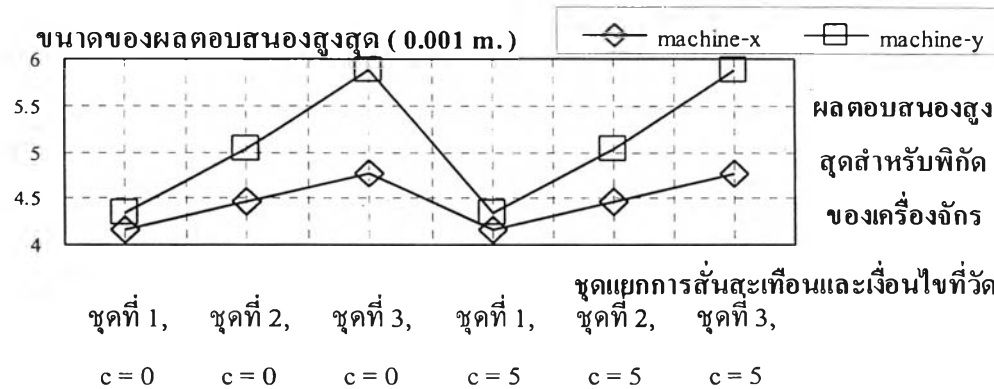
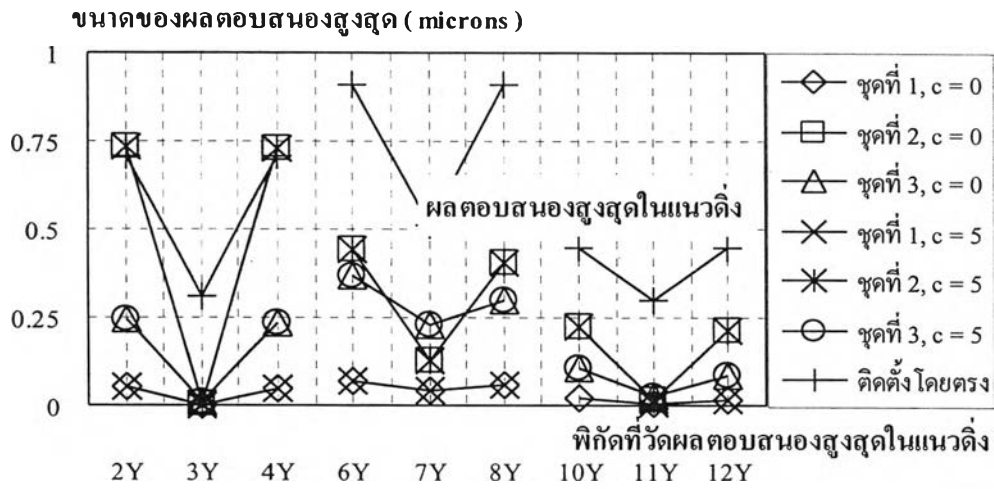
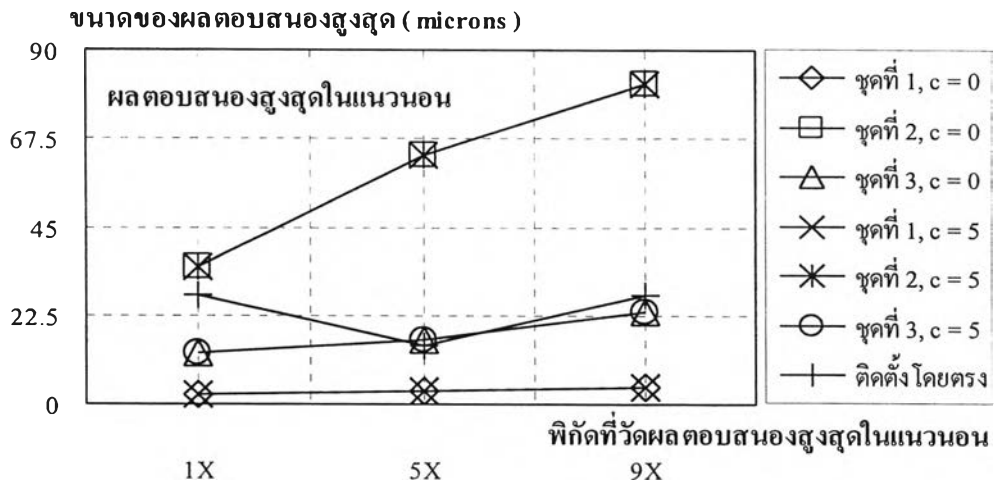
รูปที่ ๗-7.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั้นสะเทือนตำแหน่งที่ 2 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$



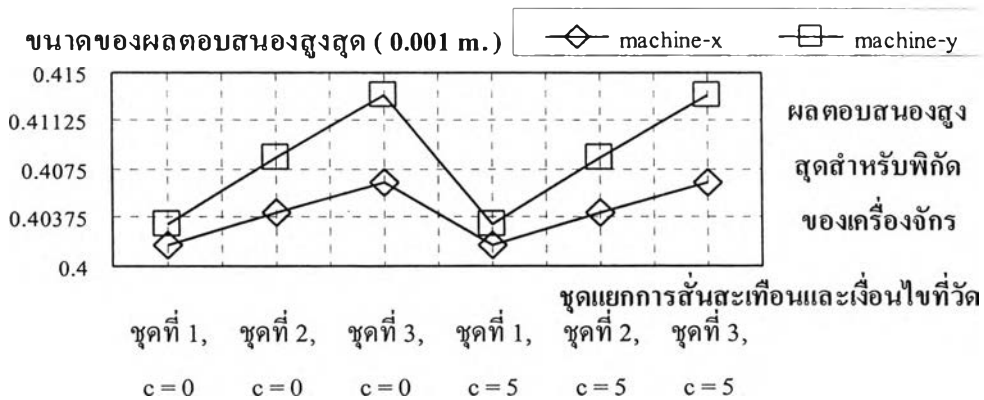
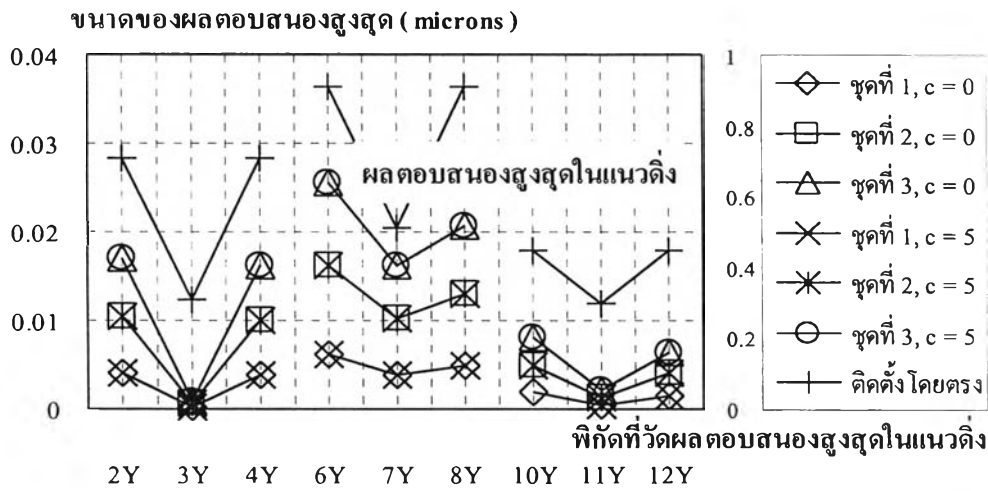
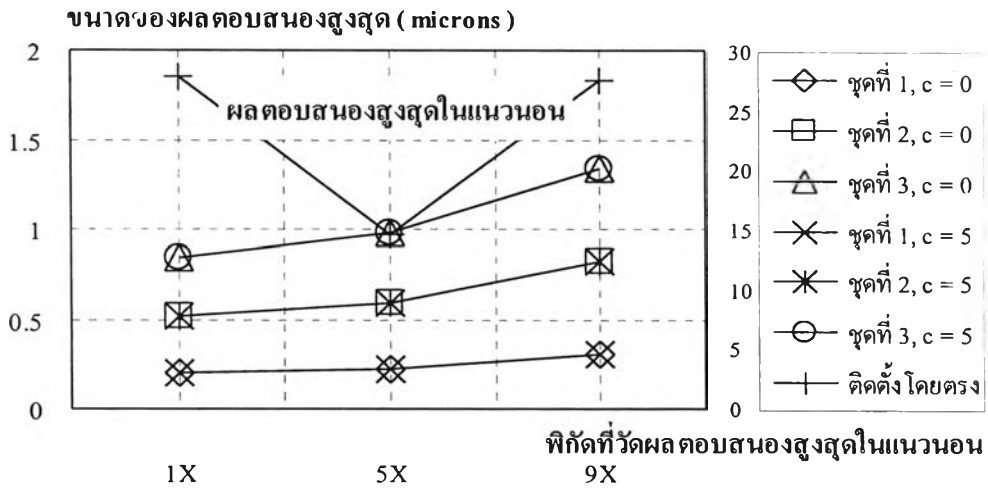
รูปที่ ข-7.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 2 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$



รูปที่ ๗-7.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 2 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$

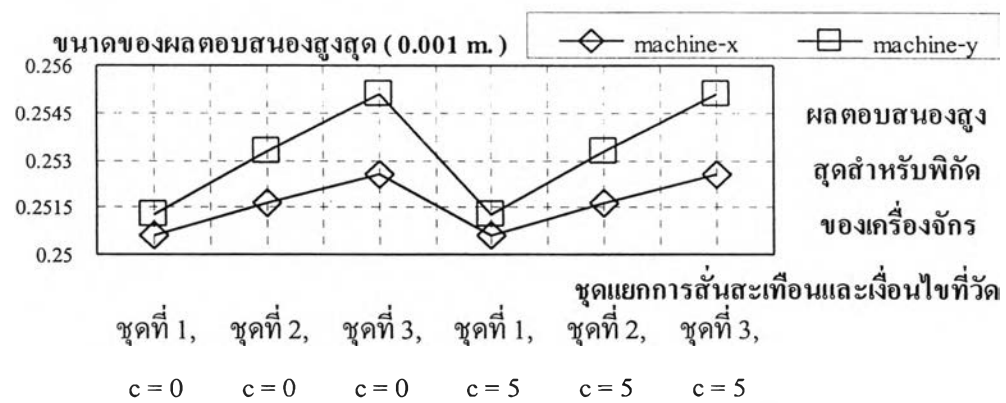
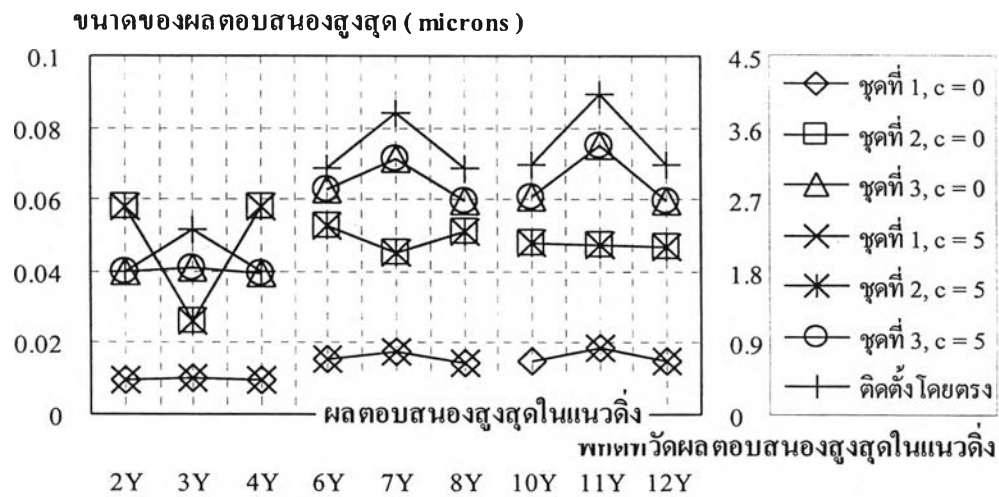
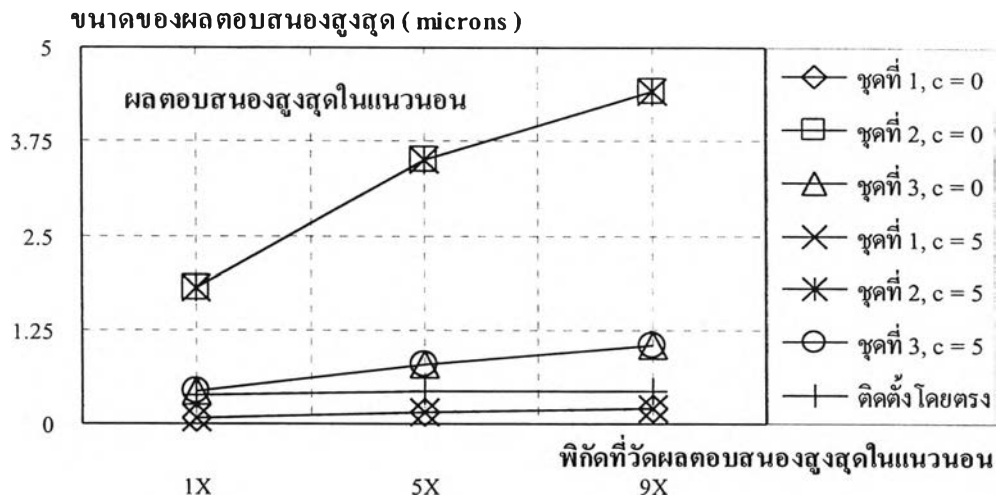


รูปที่ ข-8.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 3 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$

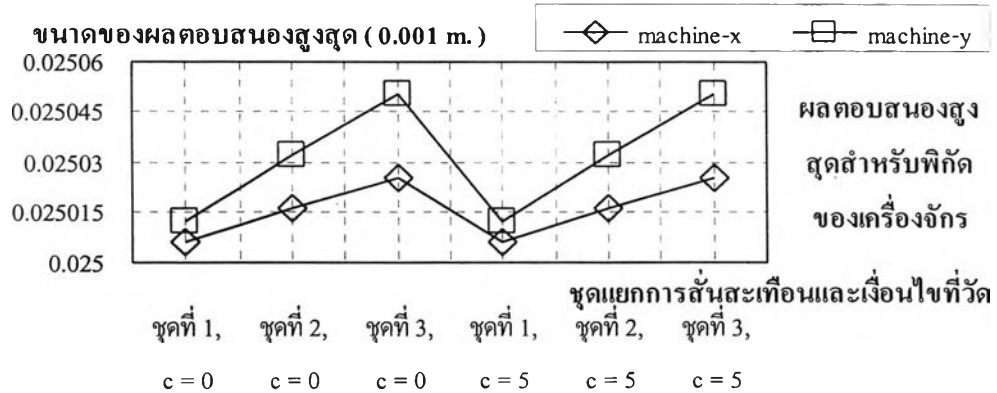
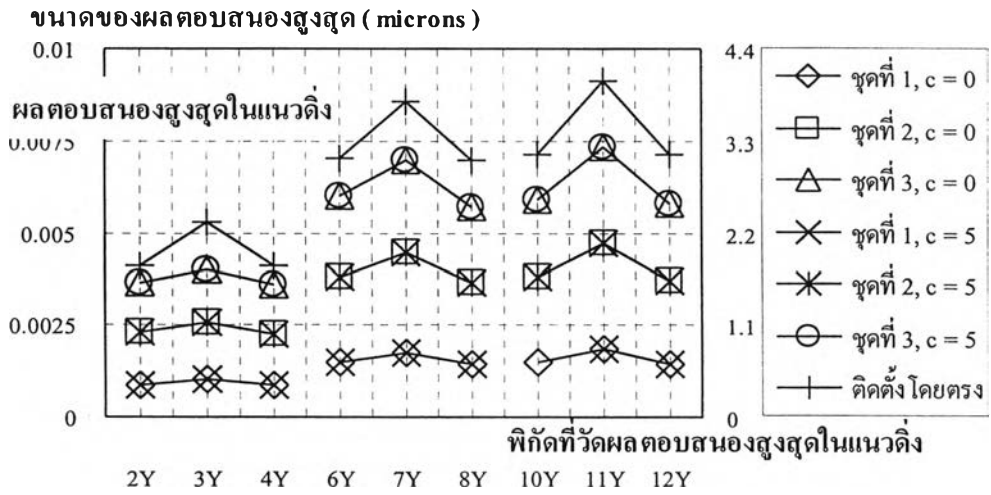
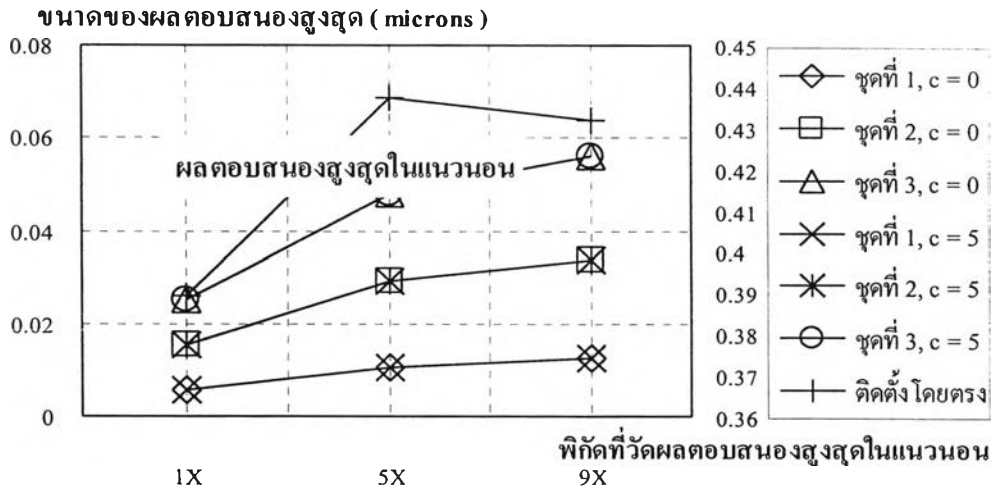


รูปที่ ๗-8.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 3 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$

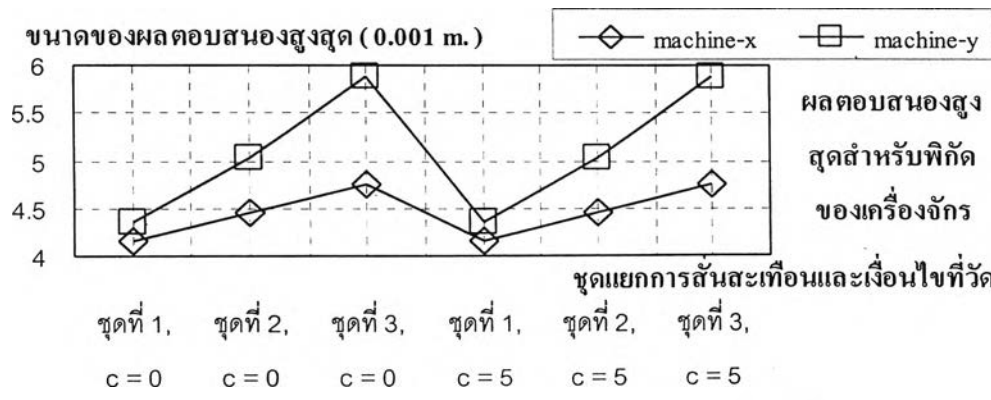
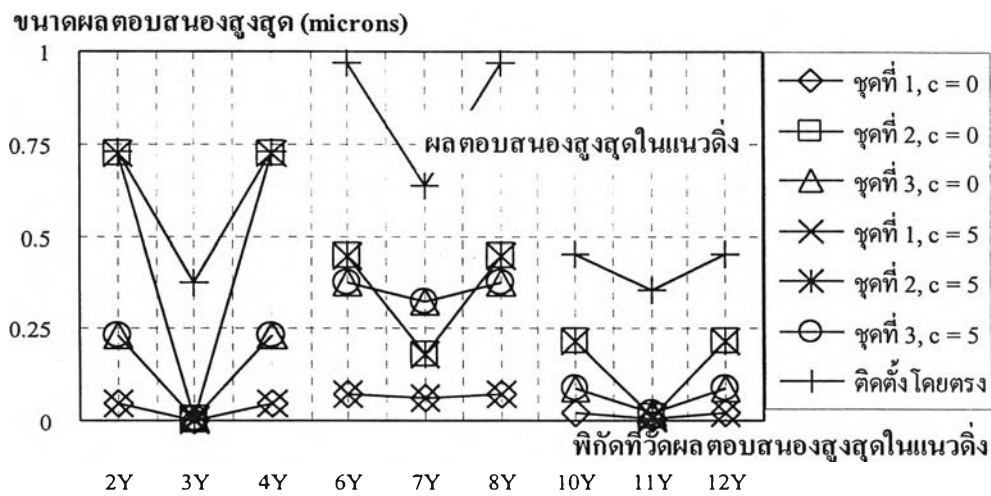
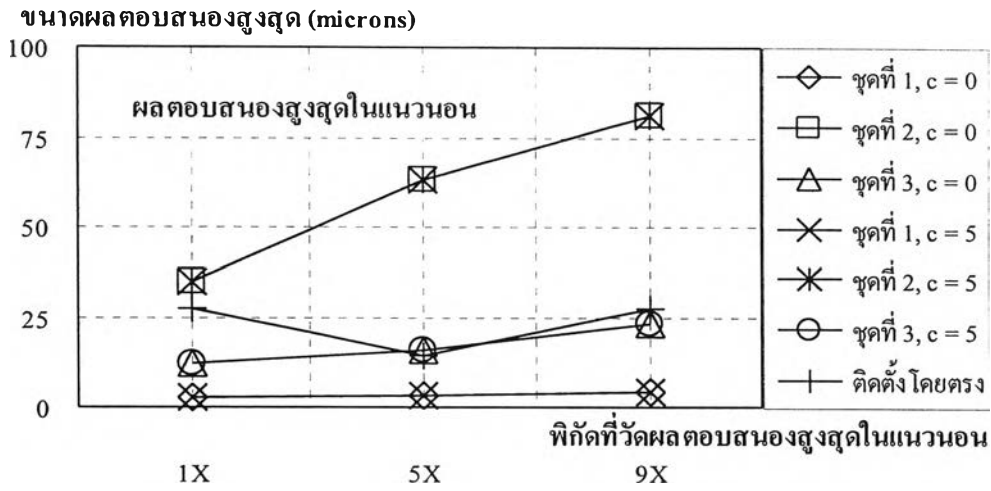




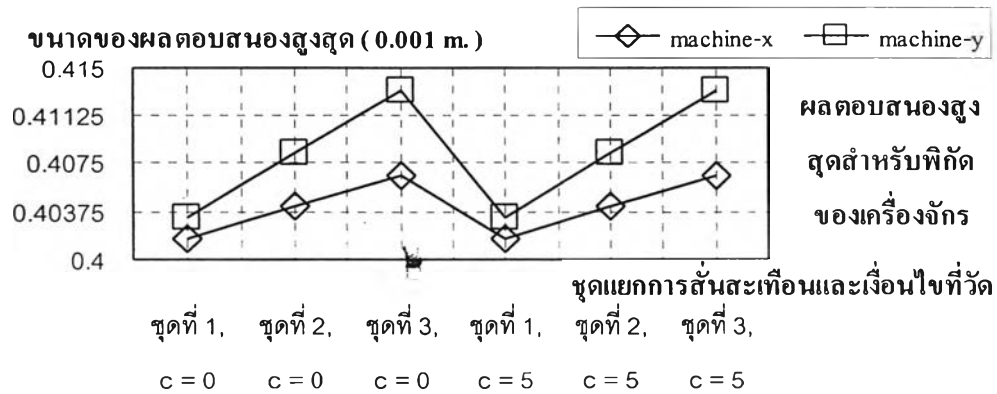
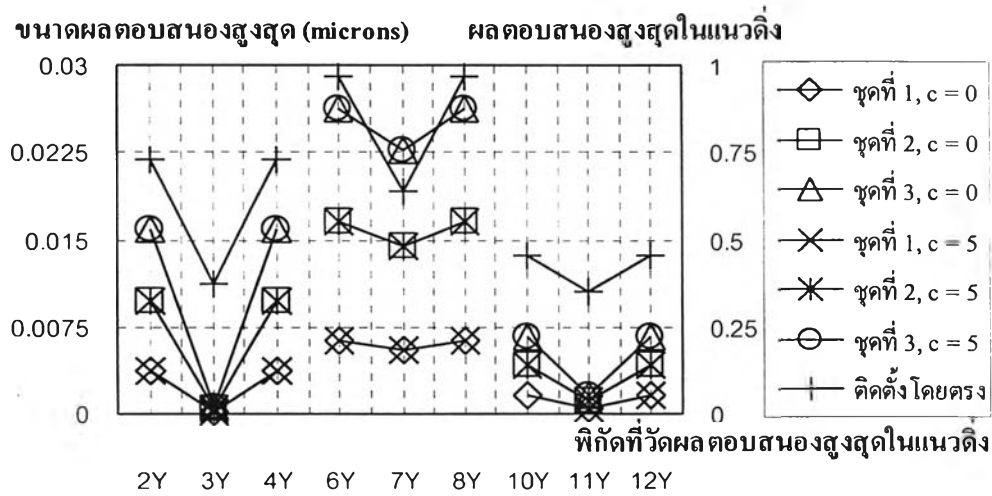
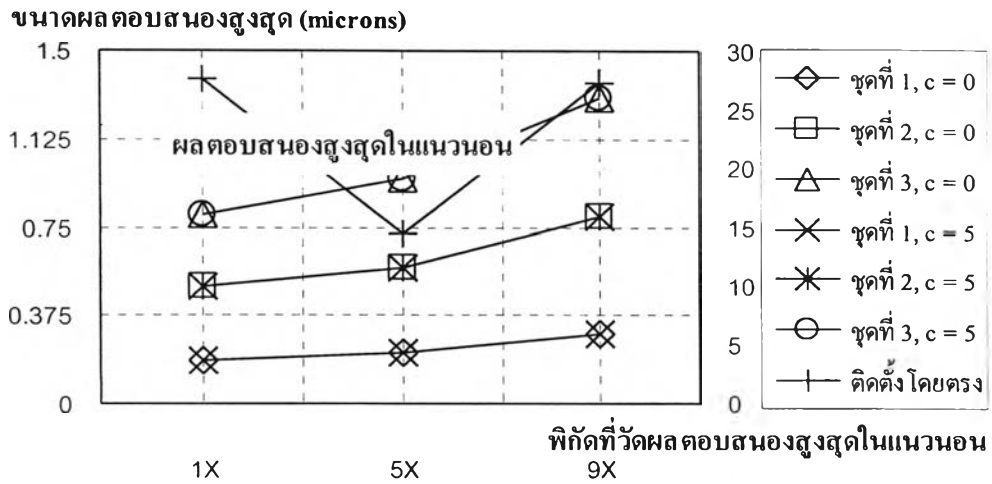
รูปที่ ข-8.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 3 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$



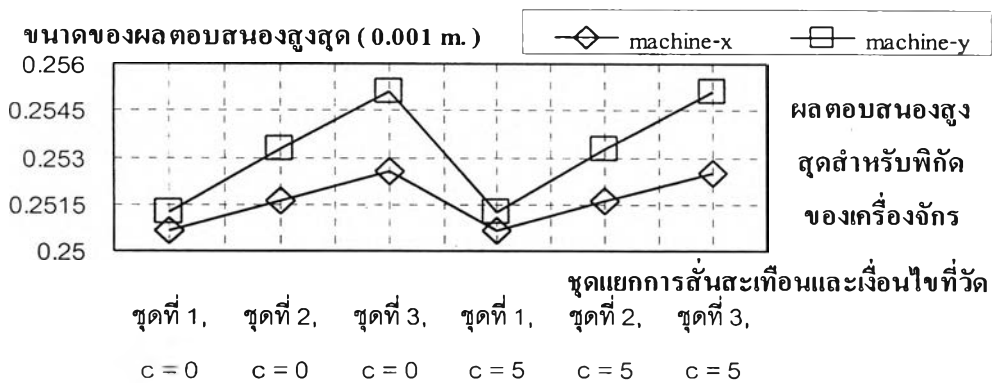
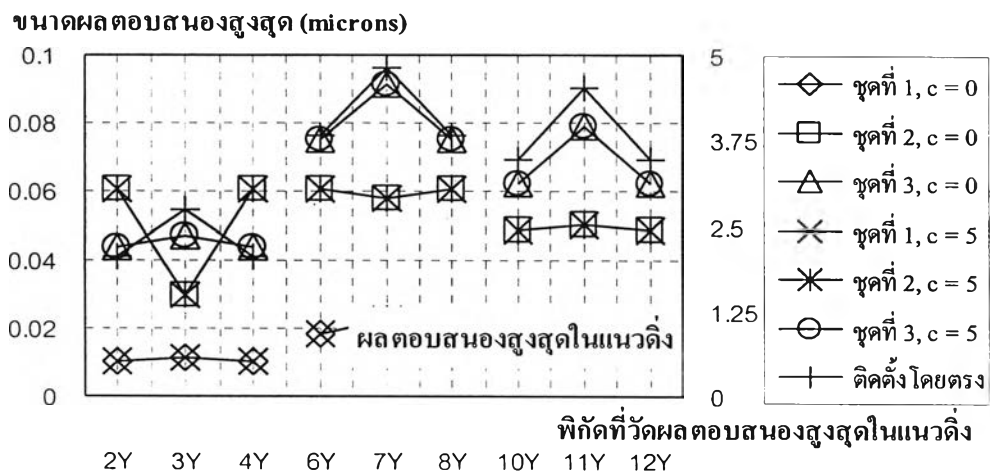
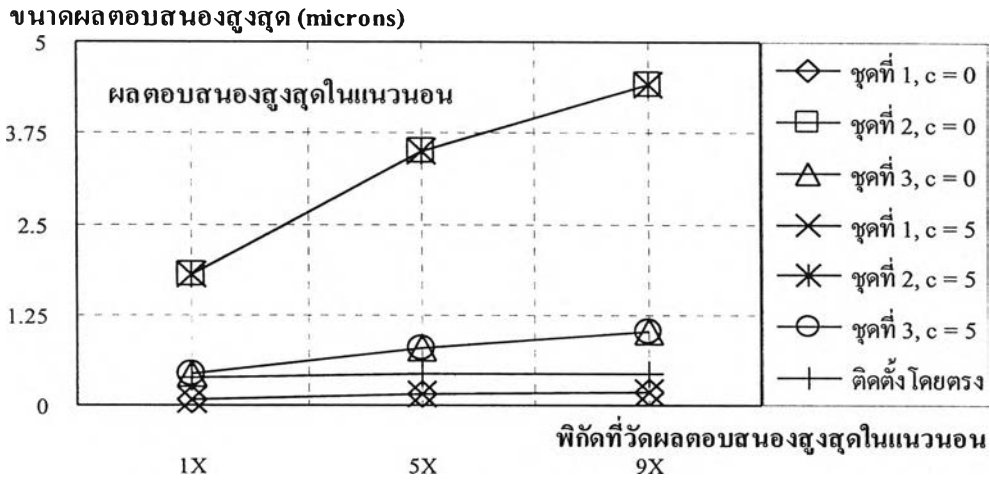
รูปที่ ข-8.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 3 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$



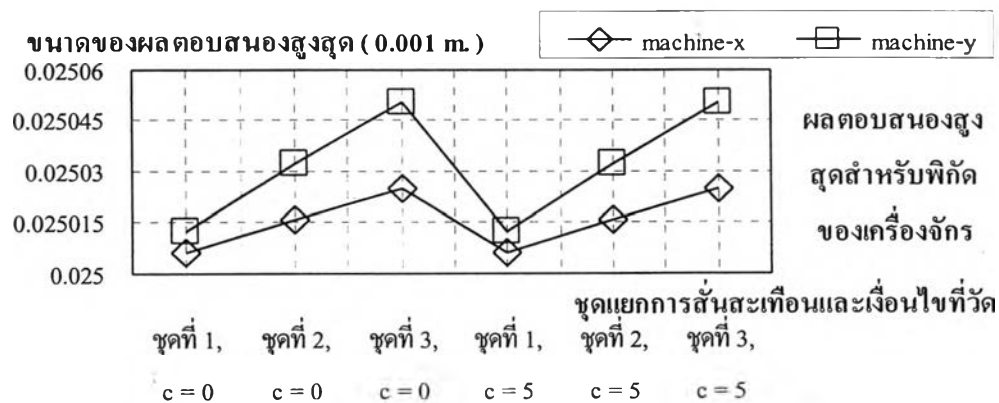
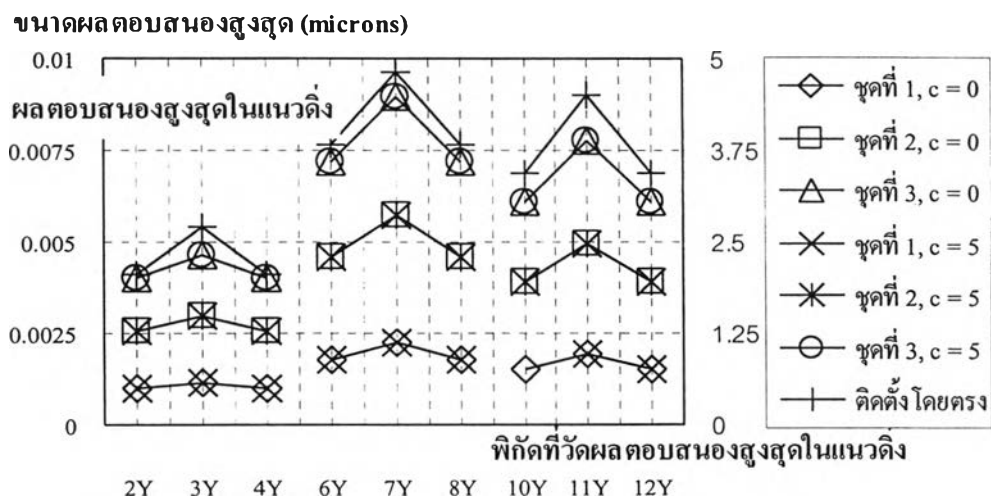
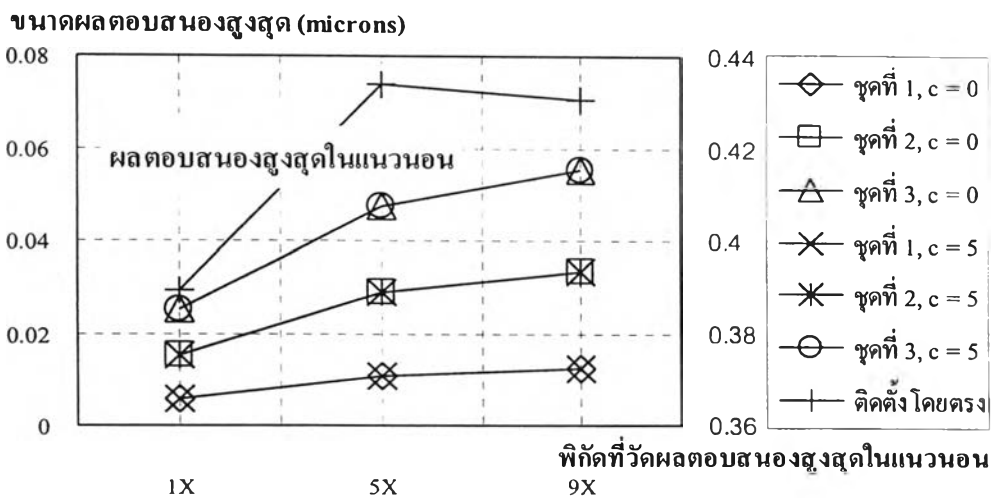
รูปที่ ๙-9.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 4 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$



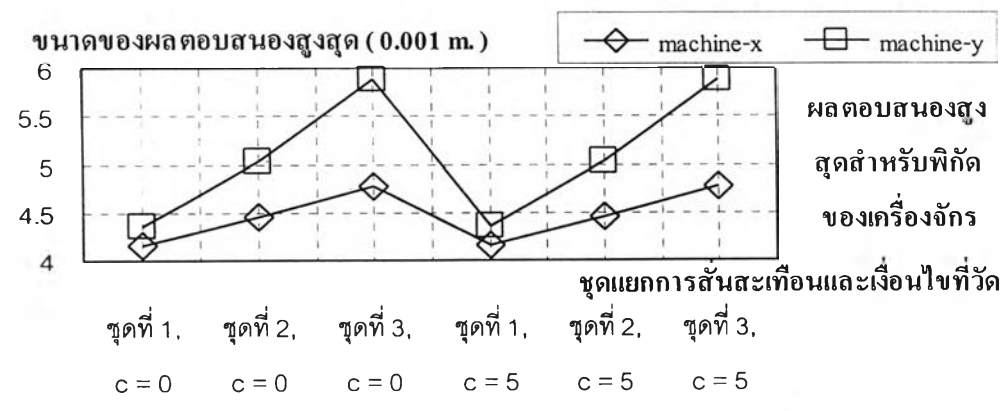
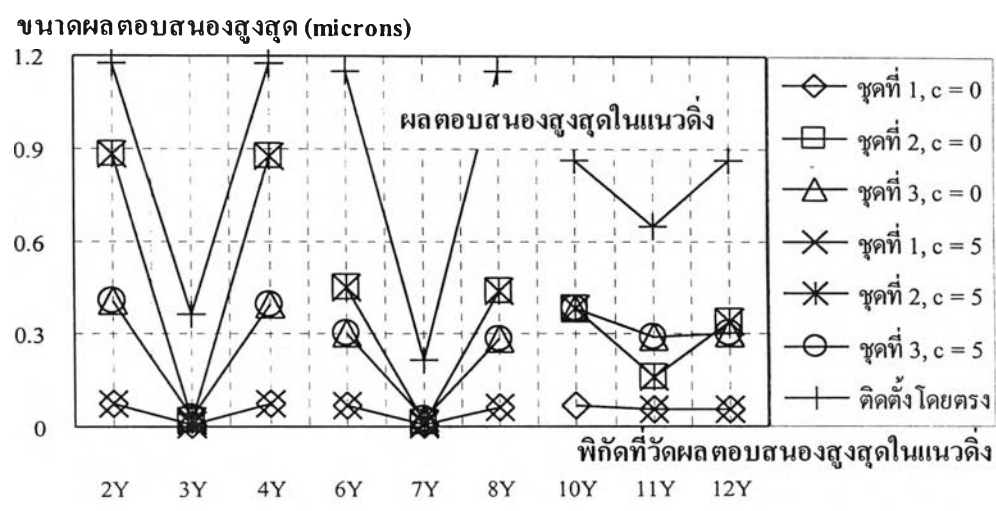
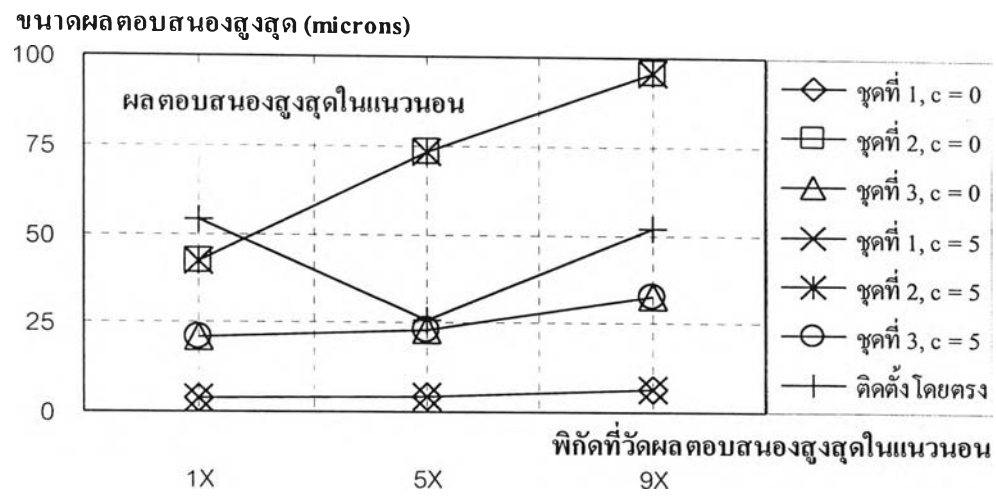
รูปที่ ข-9.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 4 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$



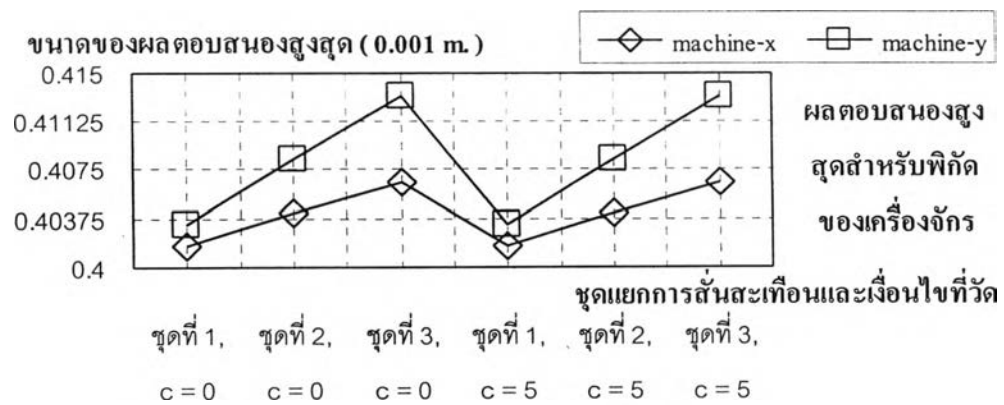
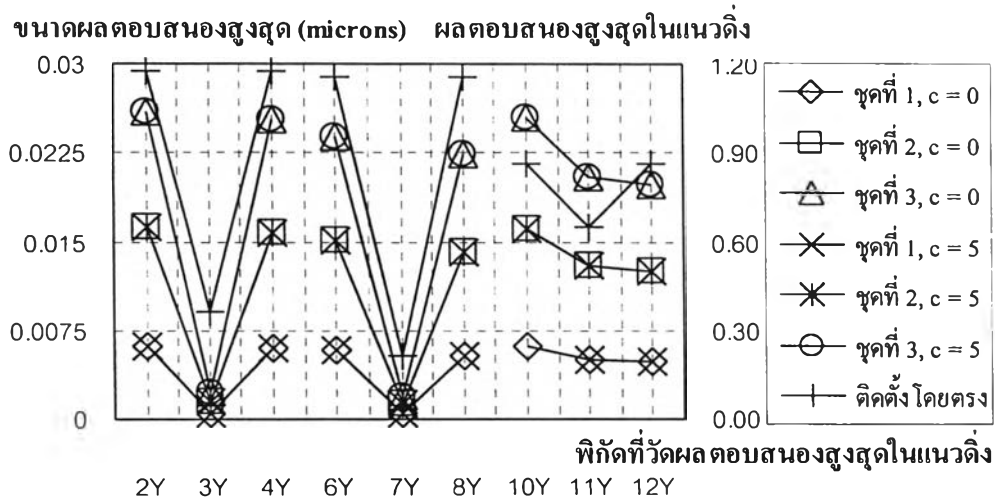
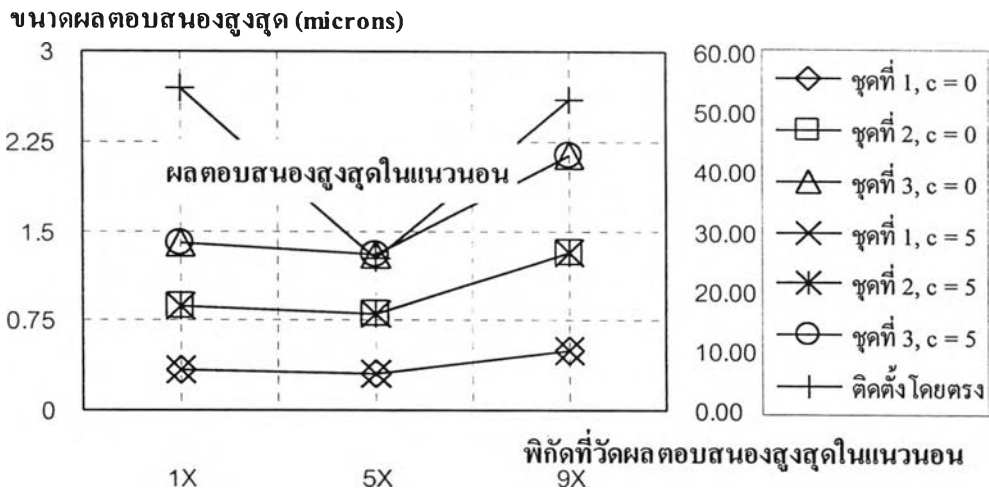
รูปที่ ข-9.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 4 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$



รูปที่ ข-9.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 4 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$

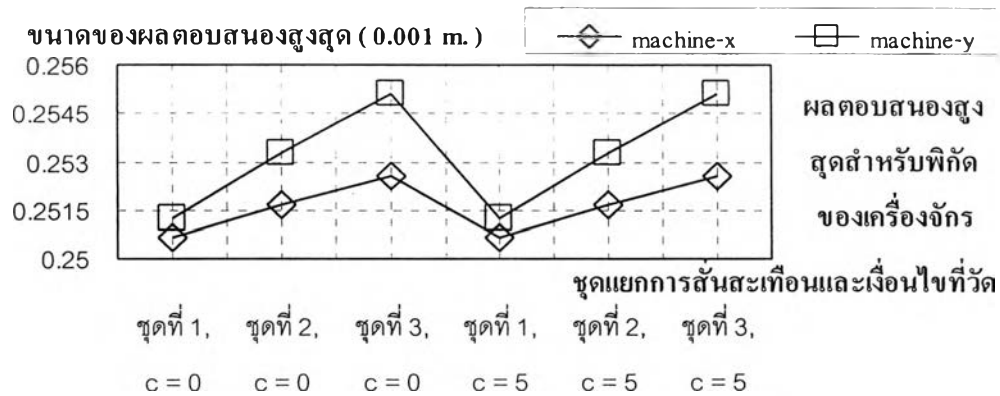
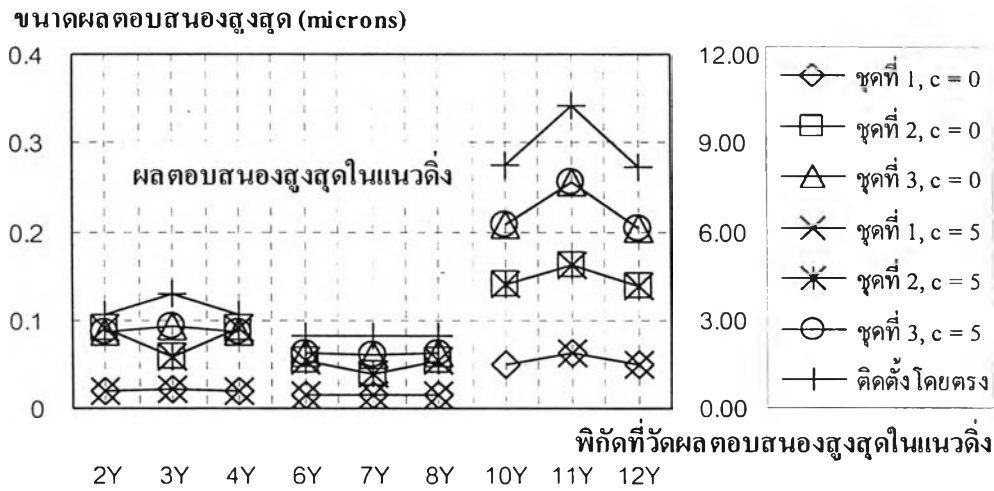
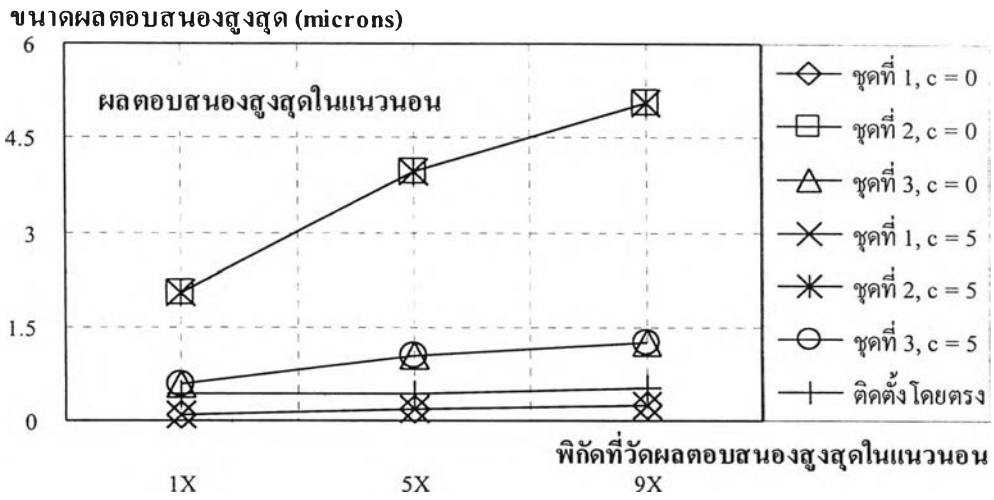


รูปที่ ข-10.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 5 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$

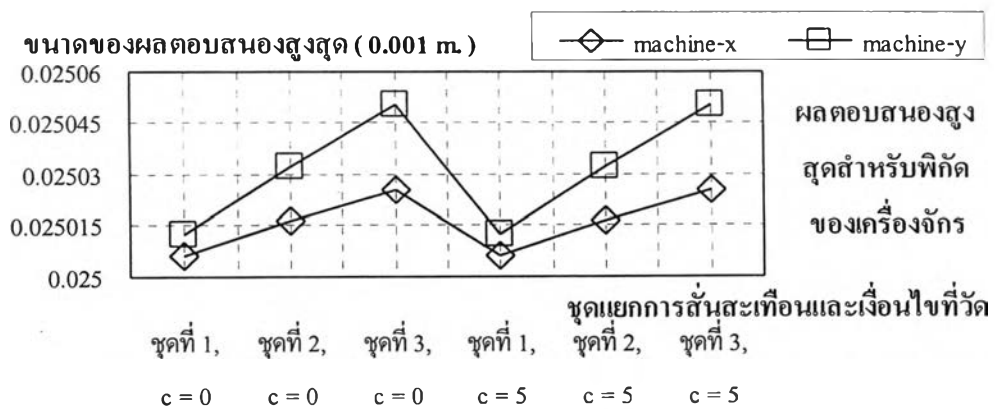
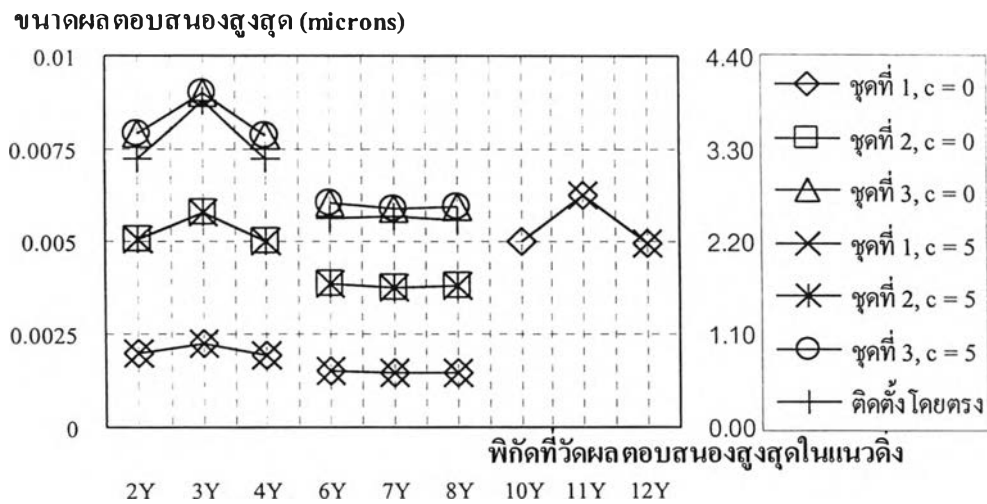
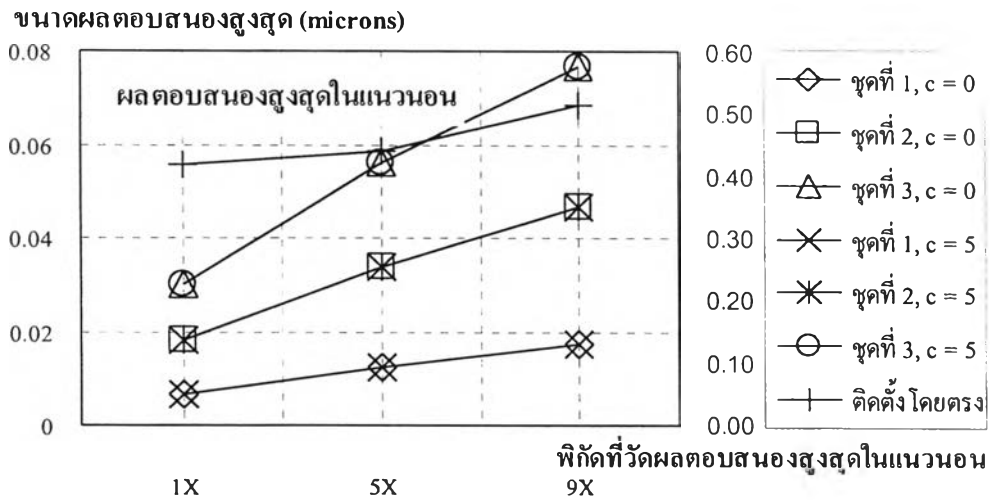


รูปที่ ข-10.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 5 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$



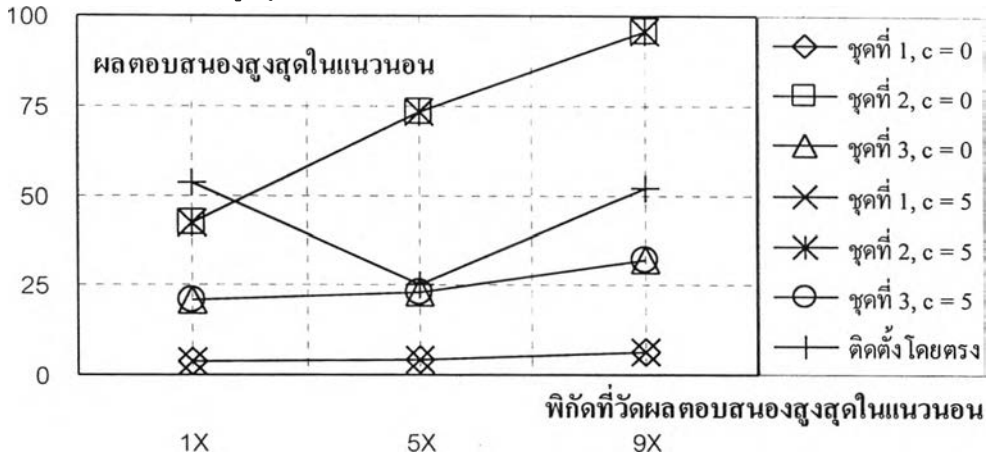


รูปที่ ข-10.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 5 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$

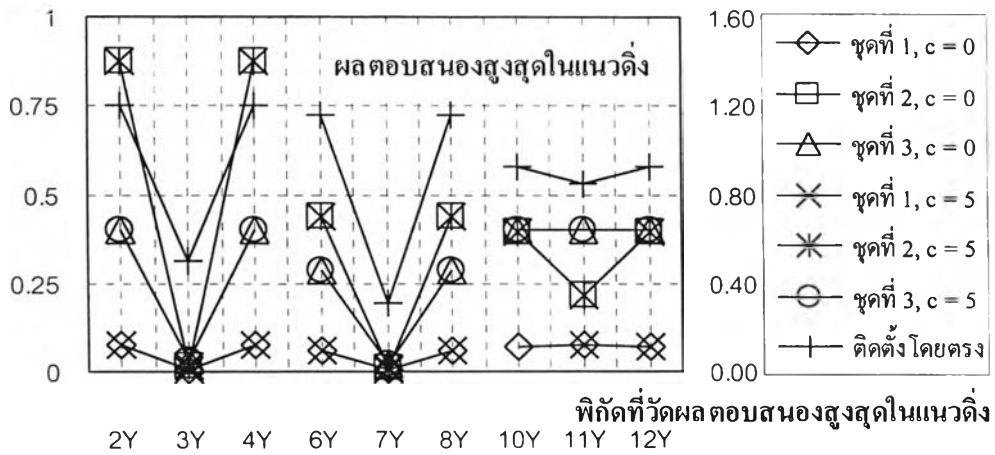


รูปที่ ข-10.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 5 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$

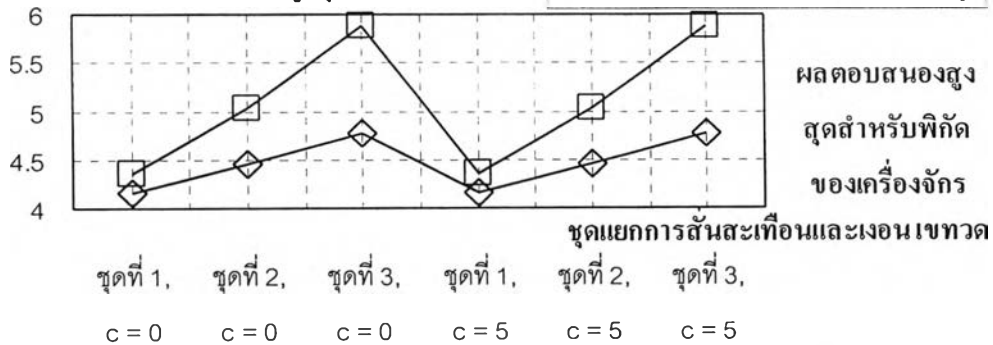
ขนาดผลตอบสนองสูงสุด (microns)



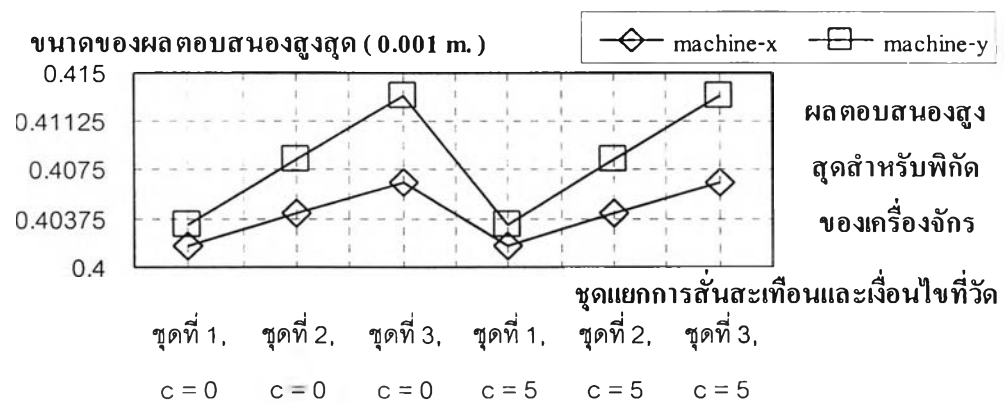
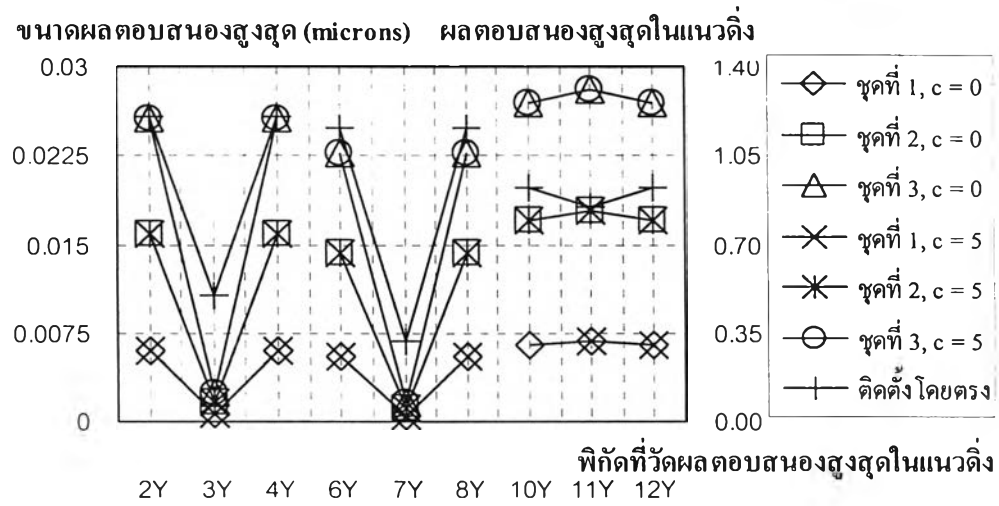
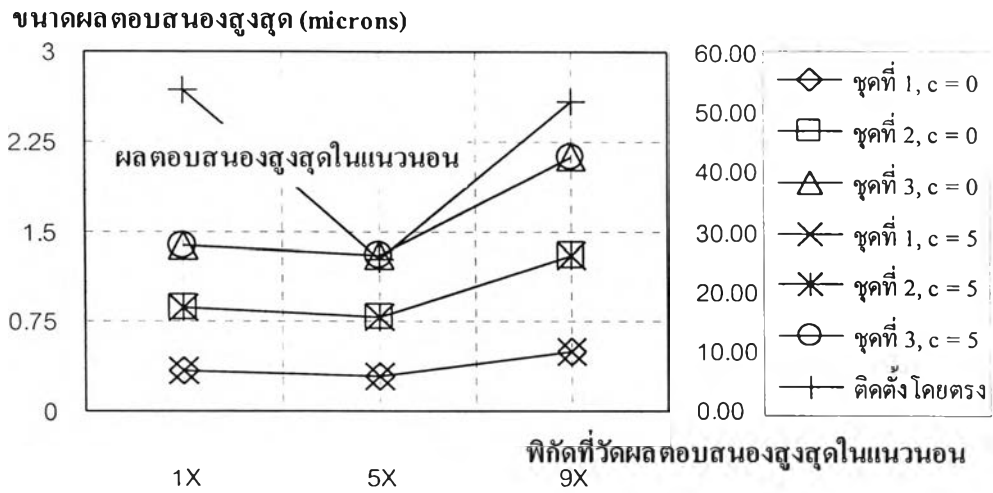
ขนาดผลตอบสนองสูงสุด (microns)



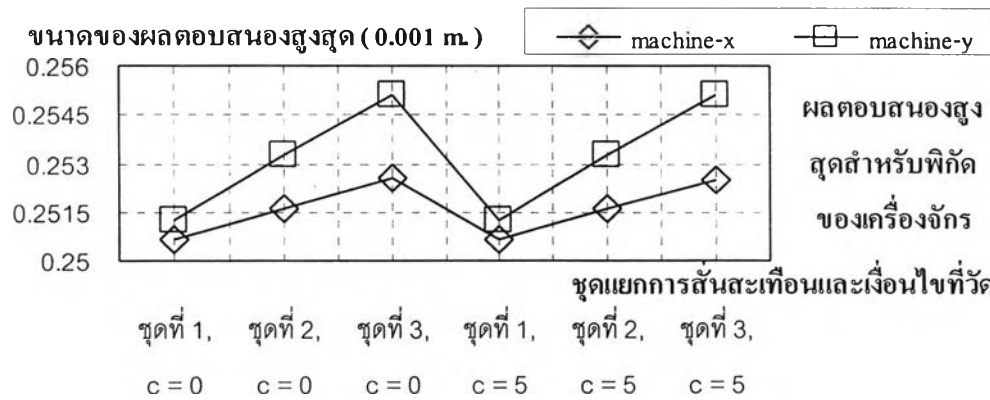
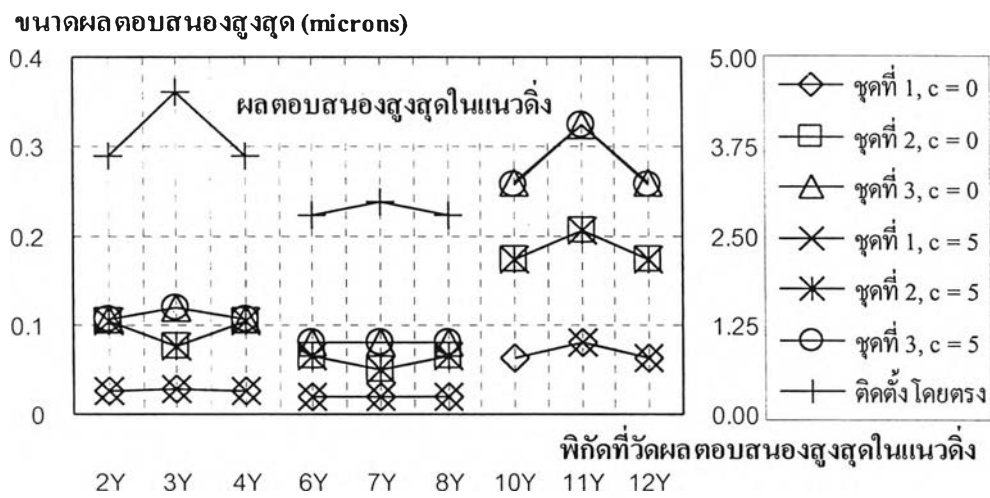
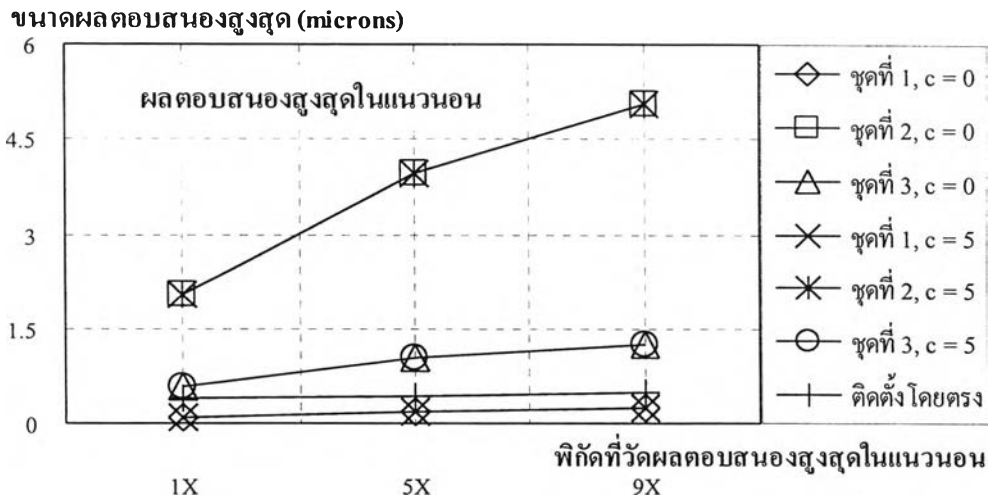
ขนาดของผลตอบสนองสูงสุด (0.001 m.)



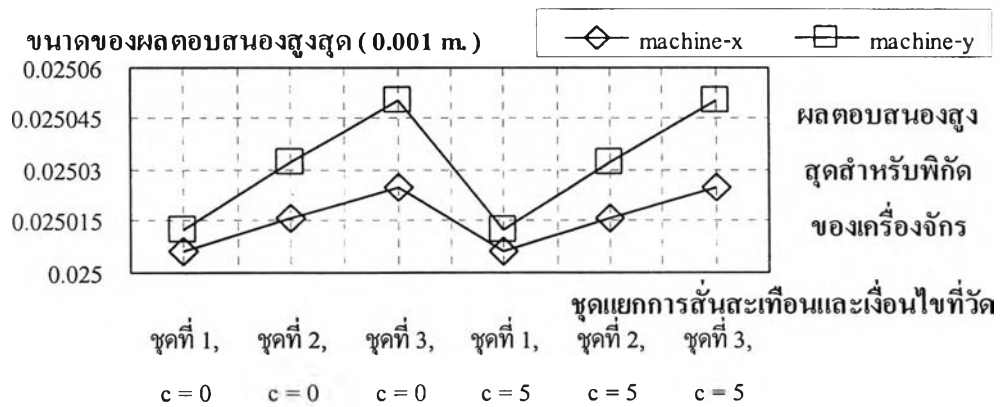
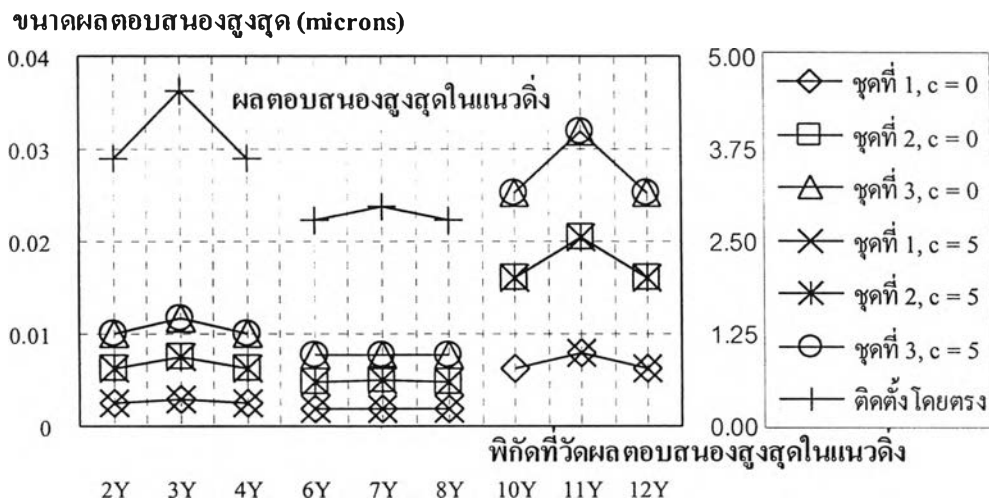
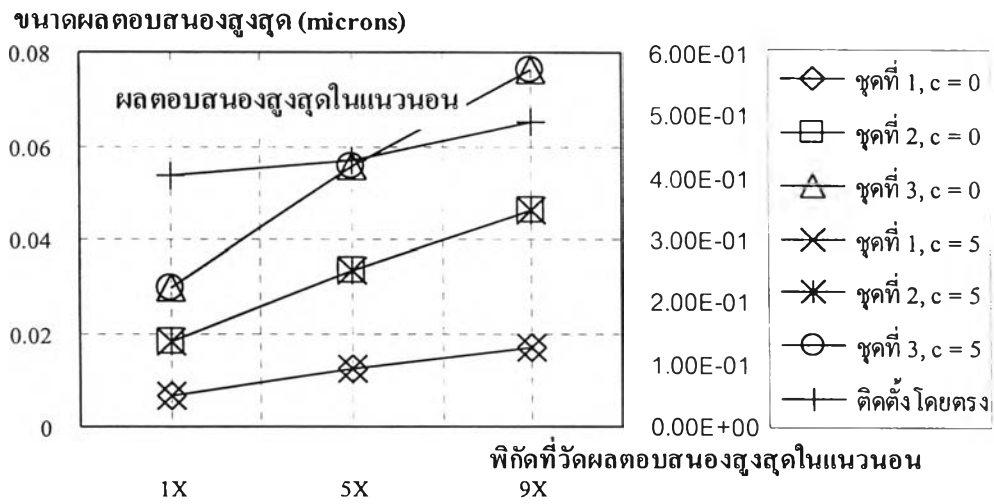
รูปที่ ข-11.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 6 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$



รูปที่ ข-11.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 6 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 50t$



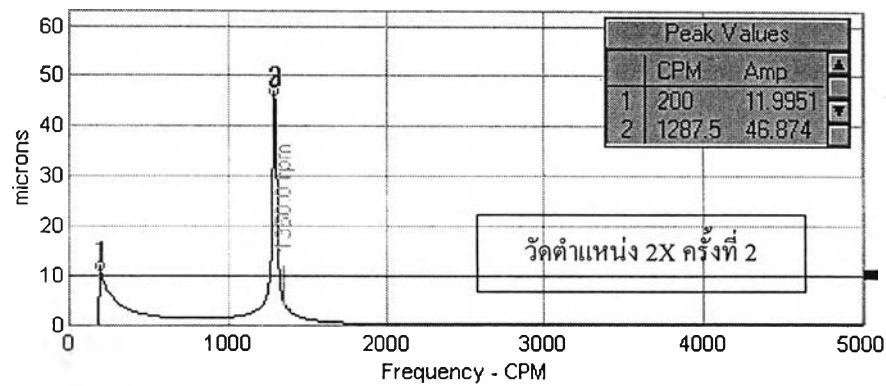
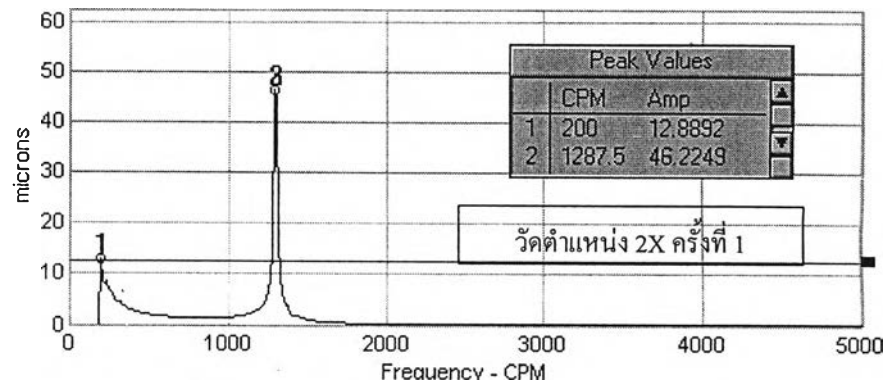
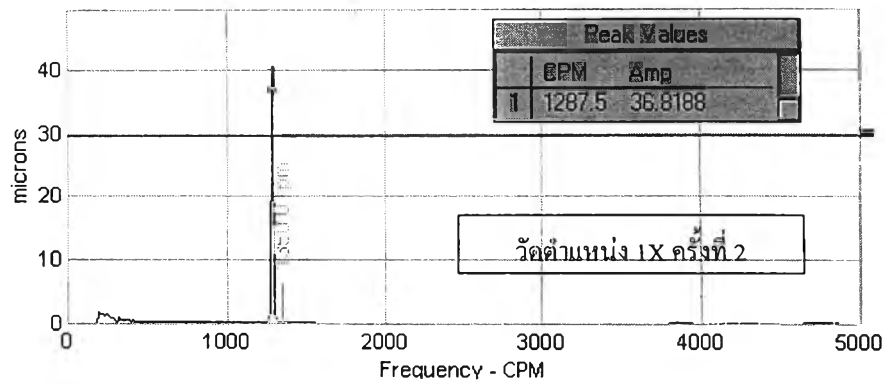
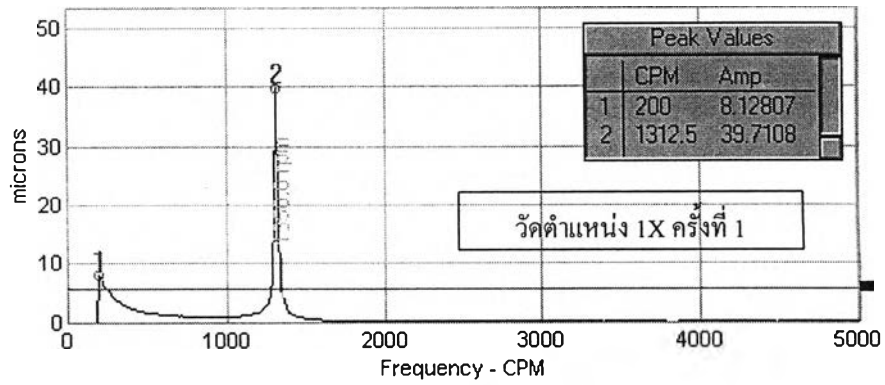
รูปที่ ข-11.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 6 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$



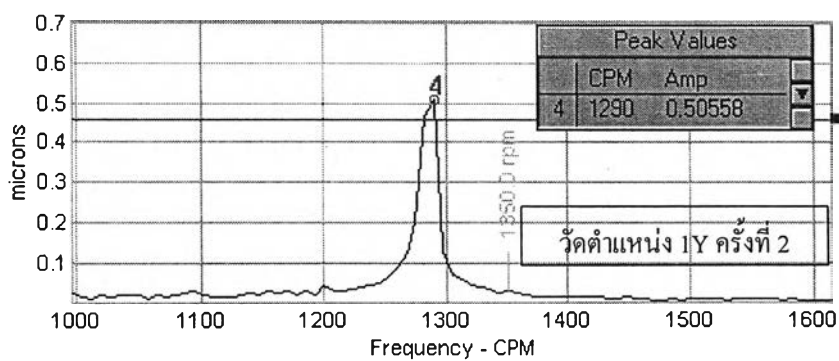
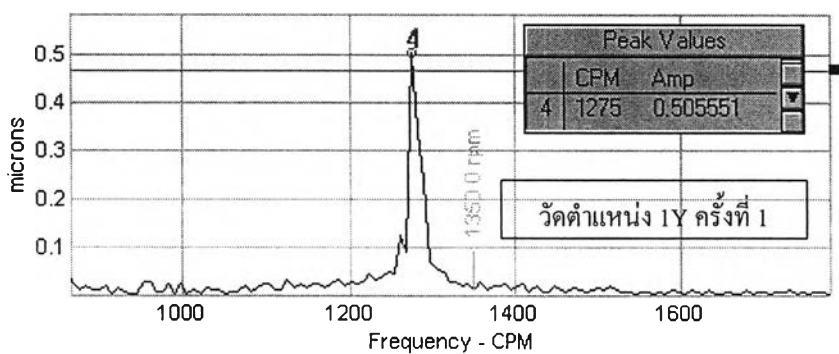
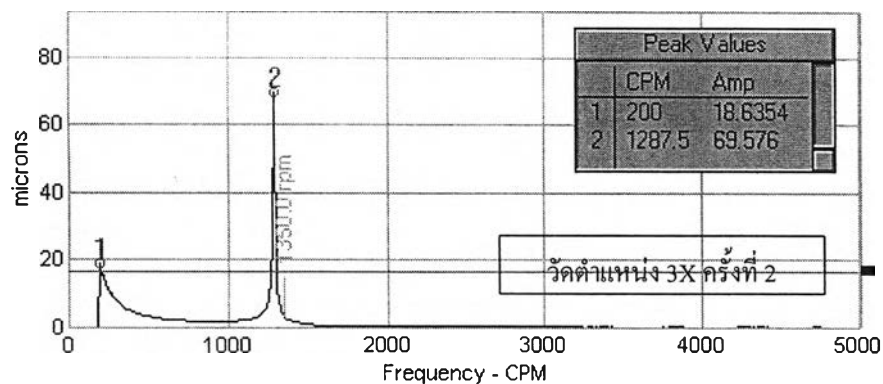
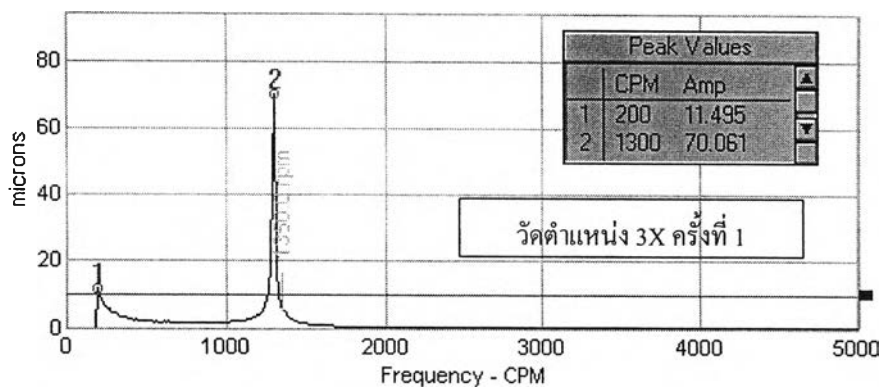
รูปที่ ข-11.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนตำแหน่งที่ 6 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล  $100 \sin 200t$

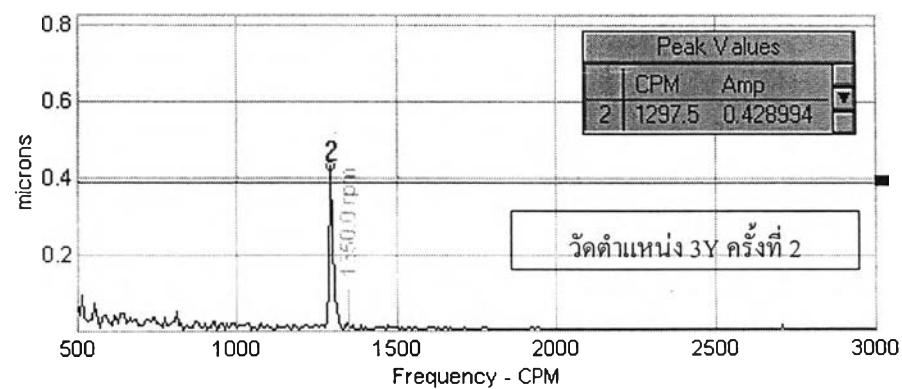
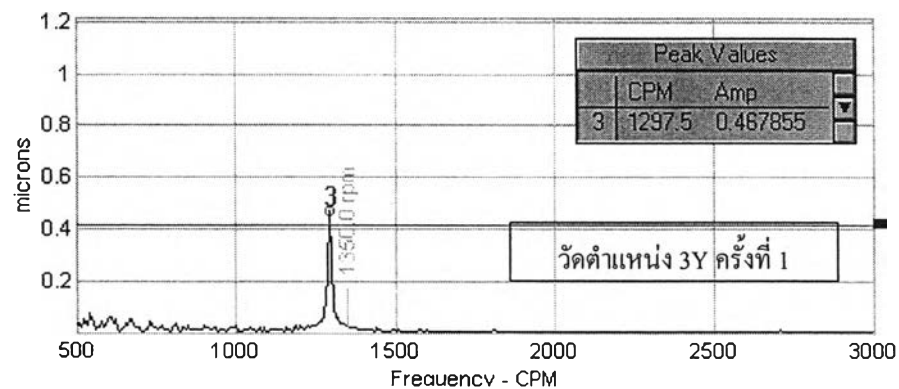
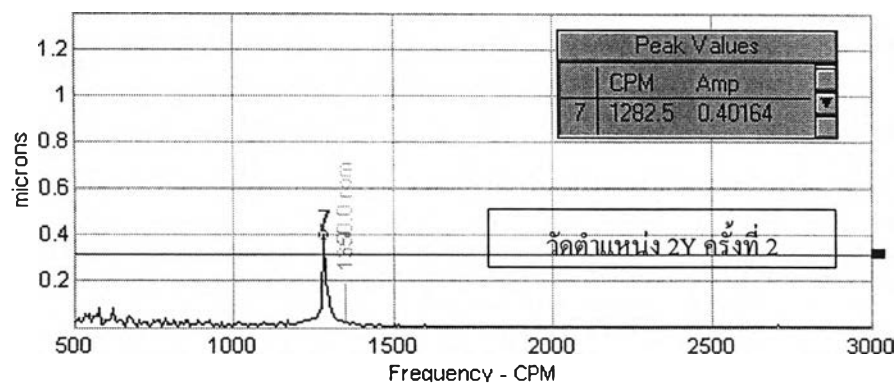
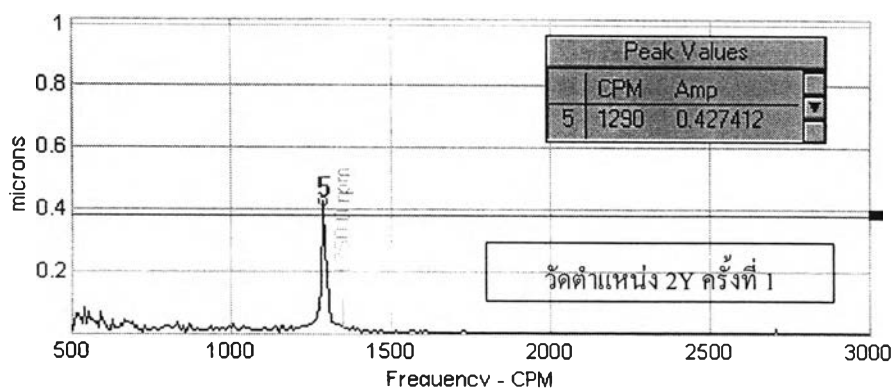
ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

2.) ผลตอบสนองสูงสุดเมื่อติดตั้งเครื่องจักรในโครงสร้างโดยตรง

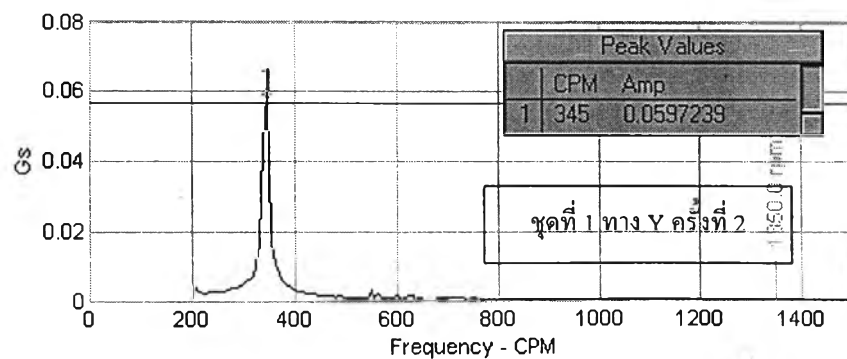
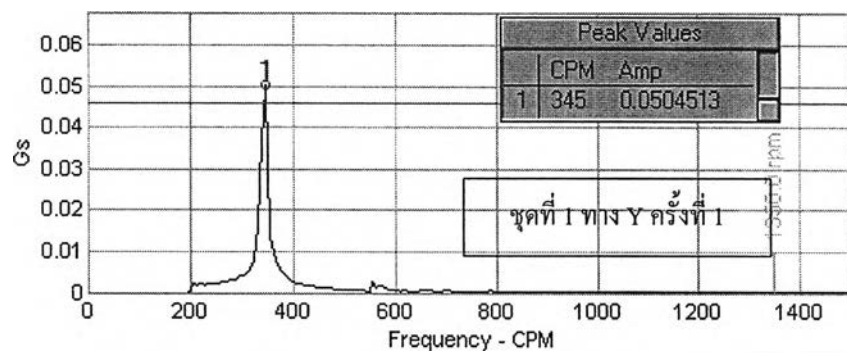
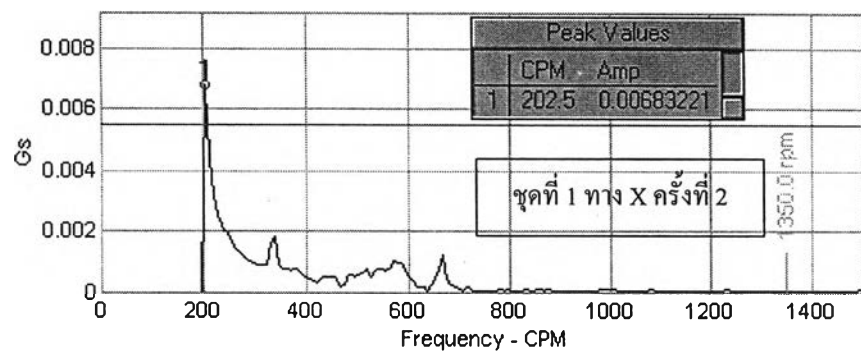
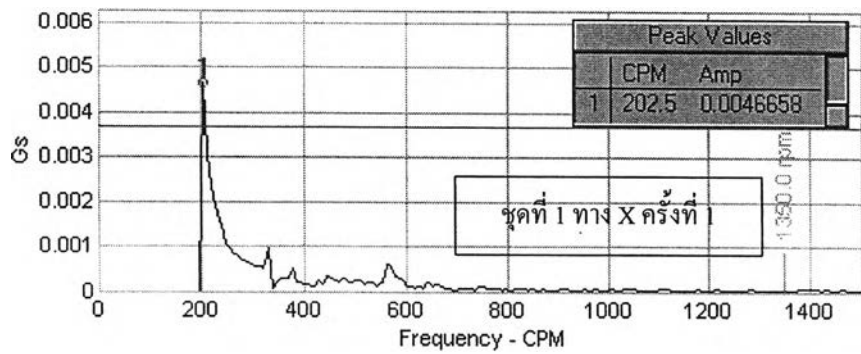


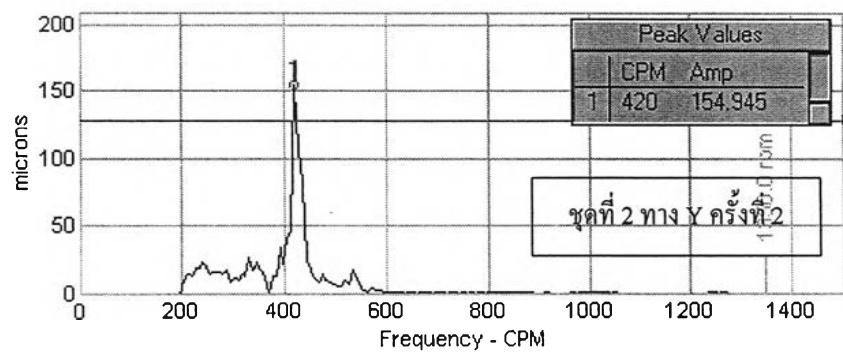
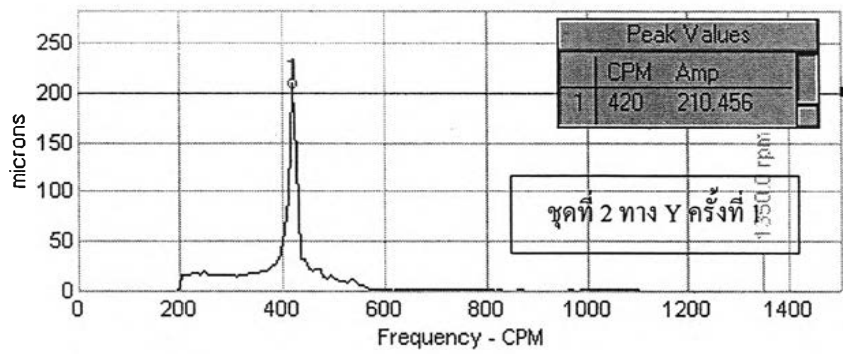
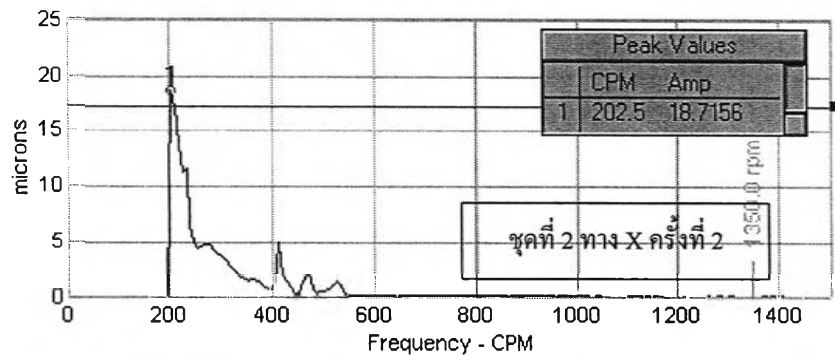
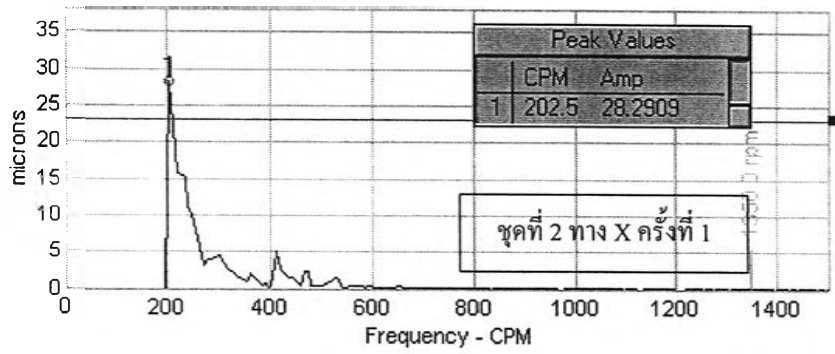




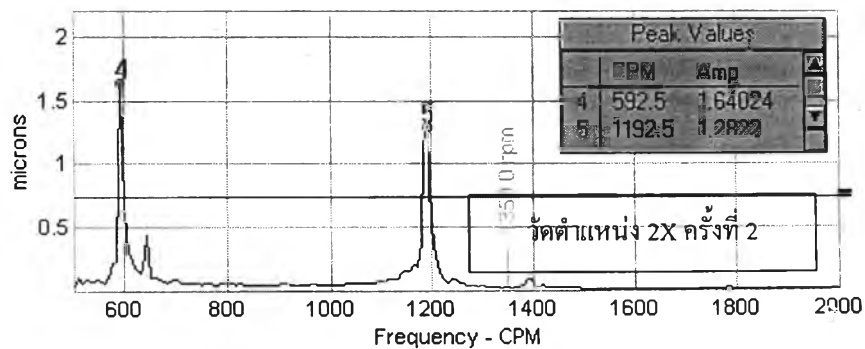
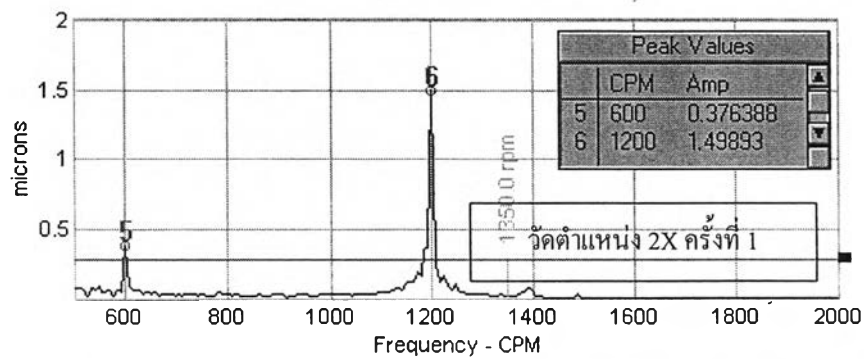
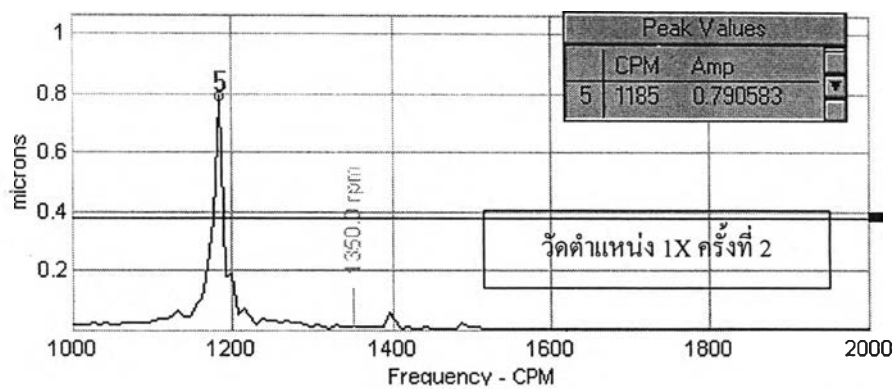
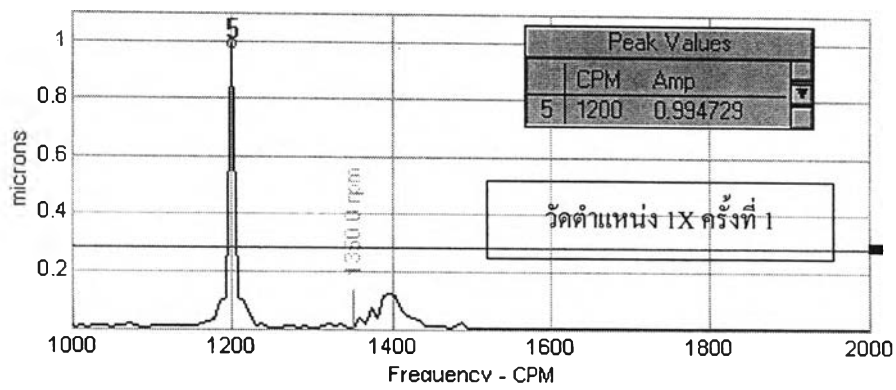


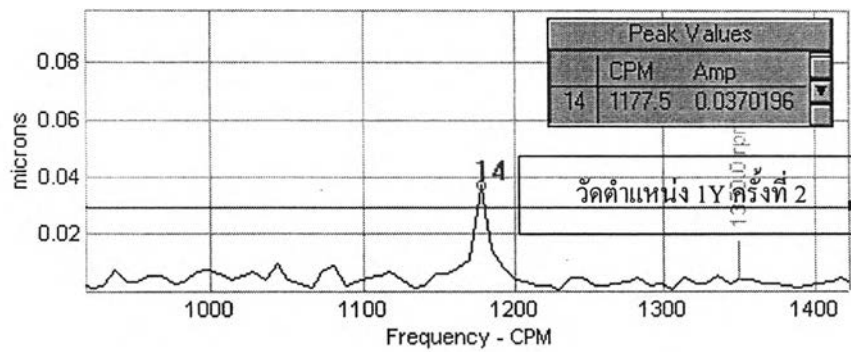
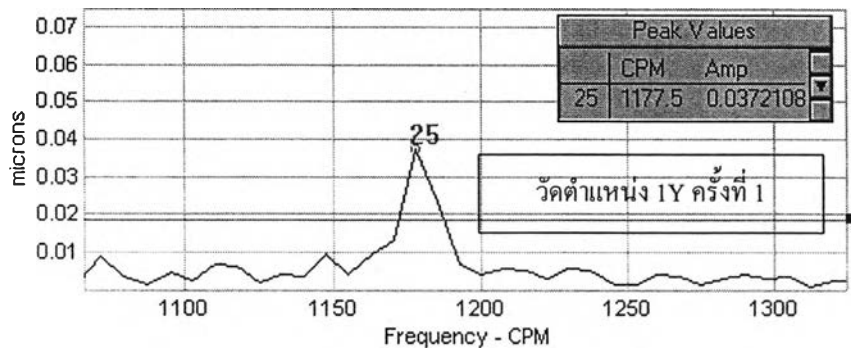
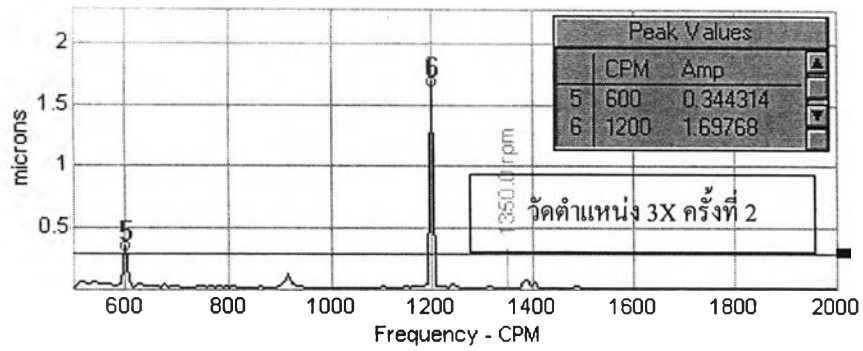
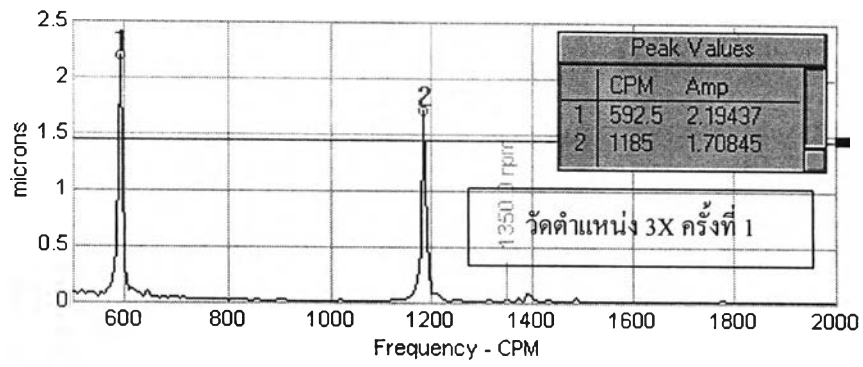
3.) ความถี่ธรรมชาติของชุดแยกการสั่นสะเทือนทั้ง 2 ชุด



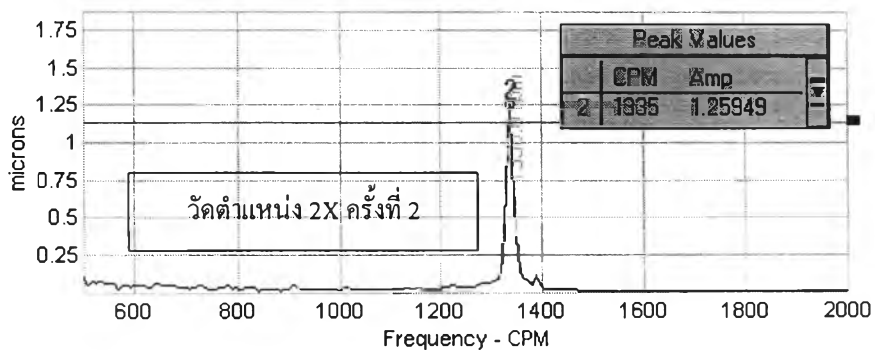
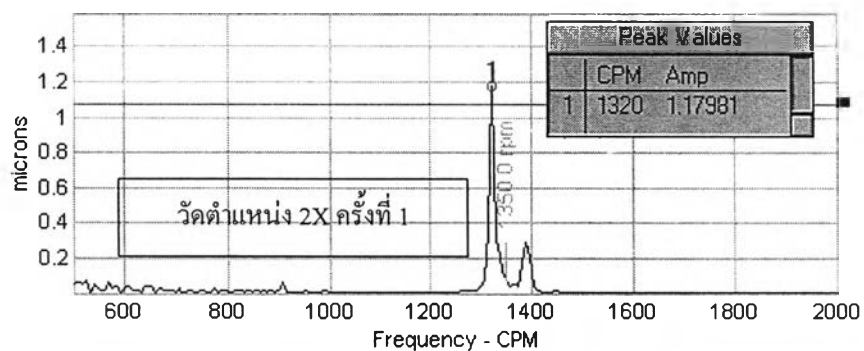
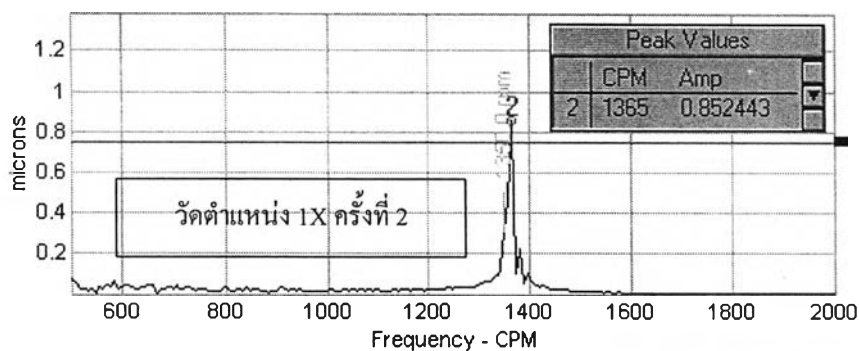
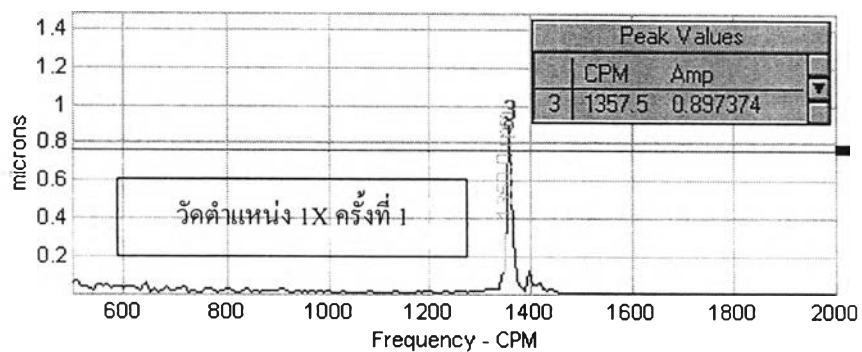


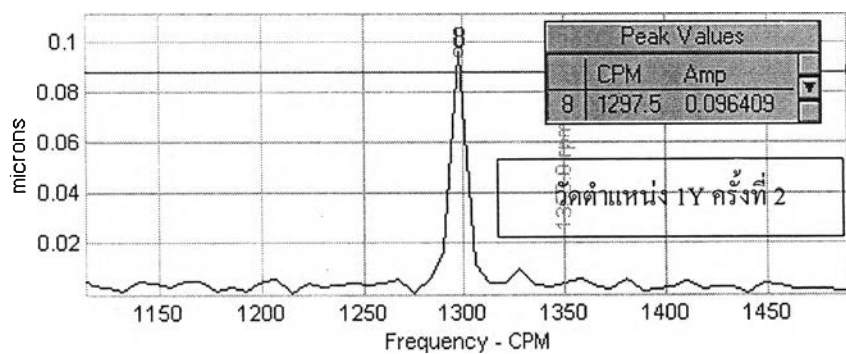
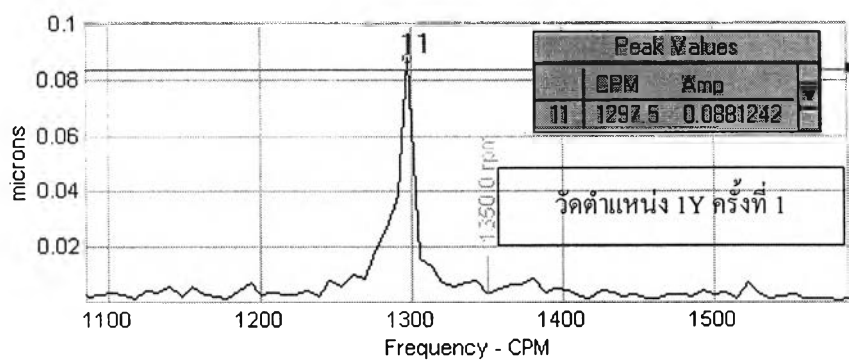
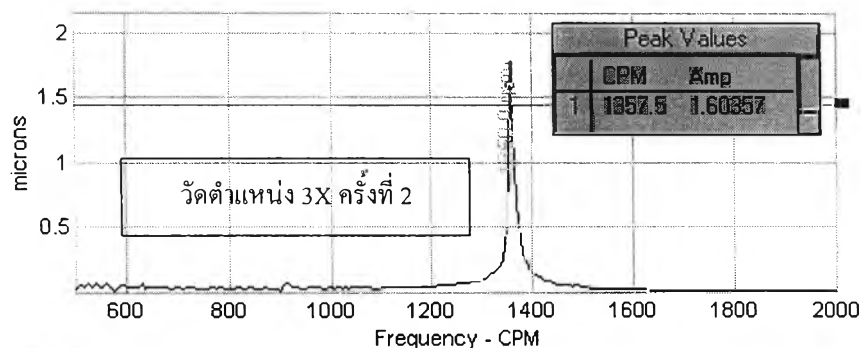
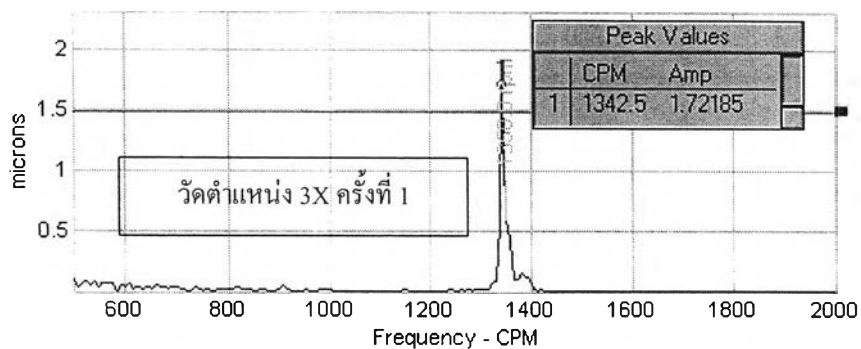
4.) ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้าง เมื่อติดตั้งเครื่องจักรบนชุดแยกการสันสะเทือนชนิดที่ 1





5.) ผลตอบสนองสูงสุดของ โครงสร้าง เมื่อติดตั้งเครื่องจักรบนชุดแยกการสั่นสะเทือนชนิดที่ 2







## ภาคผนวก ฉ : โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TFRAME

```
C*****
C
C TFRAME.F (DOUBLE PRECISION)
C
C NOTE : THIS PROGRAM CAN BE USED FOR CALCULATE STRUCTURAL VIBRATION
C
C OF PLANE FRAME STRUCTURE BY FINITE ELEMENT METHOD IN FINDING ALL
C NATURAL FREQUENCIES AND MODE SHAPES OF THE ENTIRE STRUCTURE WHICH
C IS SEPERATED INTO SEVERAL BEAM ELEMENTS AND THEN, THE PROGRAM
C USE PERTURBATION METHOD TO COMBINE ISOLATION PROPERTIES TO THE
C STRUCTURE AND FIND THE COMBINED MACHINE - STRUCTURE NATURAL
C FREQUENCIES AGAIN. AFTER THAT,THE PROGRAM CONTINUE SOLVING BY USING
C MODAL METHOD TO DECOUPLING THE WHOLE MATRIX AND FINALLY FIND THE
C MAXIMUM RESPONSE OF THE STRUCTURE.
C SUBROUTINES LISTED AT END OF THE MAIN PROGRAM ARE DECOMP, MATINV,
C MATMPY, RG, BALANC, ELMHES, ELTRAN, HQR2, BALBAK, SEARCH AND SORT.
C     DEVICE * IN READ AND WRITE STATEMENTS IS THE CONSOLE.
C     DEVICE 10 IN WRITE STATEMENTS IS DATA FILE 'AFRMIN.DAT'
C     DEVICE 15 IN WRITE STATEMENTS IS DATA FILE 'PRIMAR.DAT' OR
C     DEVICE 15 IN WRITE STATEMENTS IS DATA FILE 'PUREFQ.DAT' OR
C     DEVICE 15 IN WRITE STATEMENTS IS DATA FILE 'RESPON.DAT'
C           IN WHICH THE PROGRAM OUTPUT IS STORED.
C * IN THE PLACE OF A FORMAT STATEMENT NUMBER MEANS FREE FORMAT.
C -----
C LIST OF ALL VARIABLES USING IN THE PROGRAM
C NUMEL      The number of beam elements.
C A(I)       The cross-sectional areas of the beam elements.
C E(I)       Moduli of elasticity of beam elements.
C GAMMA(I)   Mass per unit length of the beam elements.
C NJTS       The number of joints in the system.
C JNM(I,J)   The joint-number matrix.
C X(I),Y(I)  The x and y coordinates of the system joints in the
C            global coordinate system.
C L(I)       Length of each elements.
C NB         The number of fixed coordinates.
C ETHA(I)    The percentage array of modal damping(insert as much
C            as the number of degree of freedoms).
C CFIX(I)    The array of fixed coordinates.
C NEQUIP     The number of isolation systems added in the structure.
C POATTA(I)  The positions of structure connecting with isolation.
C MEQUIP(I)  Mass of machine and base on each isolation.
C CEQUIP(I)  Damp of each isolation system.
C KEQUIP(I)  Stiffness of each isolation system.
C NADDMA     The number of static load adding on the structure.
C NADDEG(I)  Coordinate of adding static load.
C ADDMAS(I)  Quantity of mass adding on the structure.
C NUNBAL(I)  The number of unbalanced force from machines.
C NUNPOS(I)  Coordinate of input force.
C AMPLIT(I)  Amplitude of force.
C UNBFRQ(I)  Frequency of force.
C OMEGA(I)   The natural frequencies of pure structure.
C RMODAL(I,J) Mode shapes of pure structure.
C BOMEGA(I)  The natural frequencies of the combined system.
C RBMODA(I,J) Mode shapes of the combined system.
C COMDIS(I)  The maximum displacements of each coordinates of the
C            entire machine-structure system.
C COMVEL(I)  The maximum velocities of each coordinates of the
C            entire machine-structure system.
C -----
C     PARAMETER ( NUMELM = 50 , NUMJNT = 51 , NM =200 )
C DECLARE THE VARIABLE USED IN THE MAIN PROGRAM.
C INTEGER NUMELM, NUMJNT, NUMEL, NM, NF, COMBDF, EN, B, Z, NJTS, M
C INTEGER NB, IDOF, IC, ID, IM1, N, J1, NA, JC, KL, WNDF, WCDF
C REAL*8 IA (NUMELM) , E (NUMELM) , A (NUMELM) , X (NUMJNT) , Y (NUMJNT)
C REAL*8 GAMMA (NUMELM) , L, QUOT, F, P, R1, Q, S, T, U, V, W, P2
C REAL*8 KEL (6, 6, NUMELM) , MEL (6, 6, NUMELM) , KEG (6, 6, NUMELM) ,
C $     MEG (6, 6, NUMELM) , RT (6, 6) , R (6, 6) , TK (6, 6) , TM (6, 6) ,
```

```

$      SK (NM, NM) , SM (NM, NM) , RSK (NM, NM) , RSM (NM, NM) ,
$      RSC (NM, NM) , BRSC (NM, NM) , BRSK (NM, NM) , BRSM (NM, NM)
REAL*8  OSM (NM, NM) , OSK (NM, NM) , OSC (NM, NM) ,
$      DSM (NM, NM) , DSK (NM, NM) , DSC (NM, NM) ,
$      BOSM (NM, NM) , BOSK (NM, NM) , BOSM (NM, NM) ,
$      BDSM (NM, NM) , BDSK (NM, NM) , BDSC (NM, NM) ,
$      BM (NM, NM) , BMRSM (NM, NM)
REAL*8  RMODAL (NM, NM) , UMODAL (NM, NM) , TMODAL (NM, NM) ,
$      RBMODA (NM, NM) , UBMODA (NM, NM) , TBMODA (NM, NM) ,
$      IUMODA (NM, NM) , ITMODA (NM, NM)
INTEGER SUB, ROWSUB, SUB (6) , CFIX (NM) , JNM (NUMELM, 2)
INTEGER NADDMA, NUNBAL, NUNPOS (10) , POATTA (10)
INTEGER NDGOFM (10) , NADDEG (10)
REAL*8  DIMASS (NM) , DISTIF (NM) , DIDAMP (NM) ,
$      BDIMAS (NM) , BDISTI (NM) , BDIDAM (NM)
REAL*8  AMPLIT (10) , UNBFRQ (10) , ETHA (NM) , ZETHA
REAL*8  MEQUIP (10) , KEQUIP (10) , CEQUIP (10) ,
$      ADDMAS (NM) , PDISPL (NM) , COMVEL (NM) ,
$      PVELOC (NM) , GENCOF, COMDIS (NM) , FREQCO,
$      AROOCO, BROOCO, DENOMI, DECSOL
C
C DECLARE THE VARIABLE USED IN THE "RG" SUBROUTINE.
INTEGER MATZ, IERR, KATZ, LERR
REAL*8  WR (NM) , WI (NM) , BAR (NM, NM) , OMEGA (NM) , FV1 (NM)
REAL*8  BWR (NM) , BWI (NM) , BBA (NM, NM) , BOMEGA (NM) , BFV1 (NM)
INTEGER IV1 (NM) , BIV1 (NM)
C
OPEN (UNIT=10, FILE='AFRMIN.DAT', STATUS='OLD')
OPEN (UNIT=15, FILE='PRIMAR.DAT')
C
C ENTER PROBLEM DATA AS INDICATED BY MESSAGES ON CONSOLE. DATA
C ENTERED IS WRITTEN TO DATA FILE 'AFRMOT.DAT.DAT'.
C
C READ NUMBER OF ELEMENTS 'NUMEL'
READ (10, 1) TEXT
1   FORMAT (20A4)
READ (10, *) NUMEL
C
C READ CROSS-SECTIONAL AREA OF EACH ELEMENTS 'A(I)'
READ (10, 3) TEXT
3   FORMAT (/, 20A4)
DO 4 I = 1, NUMEL
4   READ (10, *) A(I)
WRITE (15, 7)
7   FORMAT (6X, 'THE AREA ARRAY A IS:', /)
DO 8 I = 1, NUMEL
8   WRITE (15, 9) I, A(I)
9   FORMAT (6X, 'A(', I3, ') = ', E14.7)
C
C READ MODULI OF ELASTICITY 'E(I)'
READ (10, 3) TEXT
DO 10 I = 1, NUMEL
10  READ (10, *) E(I)
WRITE (15, 13)
13  FORMAT (/, 6X, 'THE ELASTICITY ARRAY E IS:', /)
DO 14 I = 1, NUMEL
14  WRITE (15, 15) I, E(I)
15  FORMAT (6X, 'E(', I3, ') = ', E14.7)
C
C READ MOMENT OF INERTIA 'IA(I)'
READ (10, 3) TEXT
DO 16 I = 1, NUMEL
16  READ (10, *) IA(I)
WRITE (15, 19)
19  FORMAT (/, 6X, 'THE MOMENT OF INERTIA ARRAY IA IS:', /)
DO 20 I = 1, NUMEL
20  WRITE (15, 21) I, IA(I)
21  FORMAT (6X, 'IA(', I3, ') = ', E14.7)
C
C READ MASS PER UNIT LENGTH 'GAMMA(I)'
READ (10, 3) TEXT
DO 82 I = 1, NUMEL
82  READ (10, *) GAMMA(I)

```

```

      WRITE(15,85)
85   FORMAT(/,6X,'THE GAMMA ARRAY IS;',/)
      DO 86 I = 1,NUMEL
86   WRITE(15,87) I,GAMMA(I)
87   FORMAT(6X,'GAMMA(',I3,') = ',E14.7)
      C
      C READ NUMBER OF JOINTS 'NJTS'
      READ(10,3) TEXT
      READ(10,*)NJTS
      C
      C READ CONNECTION OF JOINTS 'JNM(I,J)'
      READ(10,3) TEXT
      DO 24 I = 1,NUMEL
      DO 24 J = 1,2
24   READ(10,*)JNM(I,J)
      WRITE(15,27)
27   FORMAT(/,6X,'THE JOINT-NUMBER MATRIX IS;',/)
      DO 28 I = 1,NUMEL
28   WRITE(15,29)JNM(I,1),JNM(I,2)
29   FORMAT(10X,I5,I4)
      C
      C READ THE JOINT COORDINATES 'X(I),Y(I)'
      READ(10,3) TEXT
      DO 30 I = 1,NJTS
30   READ(10,*)X(I),Y(I)
      WRITE(15,33)
33   FORMAT(/,6X,'THE JOINT COORDINATES ARE;',/)
      DO 34 I = 1,NJTS
34   WRITE(15,35)I,X(I),I,Y(I)
35   FORMAT(6X,'X(',I3,') = ',E14.7,5X,'Y(',I3,') = ',E14.7)
      C
      C READ NUMBER OF FIXED COORDINATES 'NB'
      READ(10,3) TEXT
      READ(10,*)NB
      IF(NB .EQ. 0)GO TO 94
      C
      C READ ARRAY OF FIXED COORDINATES 'CFIX(I)'
      READ(10,3) TEXT
      DO 38 I = 1,NB
38   READ(10,*)CFIX(I)
      WRITE(15,41)
41   FORMAT(/,6X,'ARRAY CFIX IS;',/)
      DO 42 I = 1,NB
42   WRITE(15,43)I,CFIX(I)
43   FORMAT(6X,'CFIX(',I3,') = ',I3)
      C
      C READ ARRAY OF PERCENTAGE OF MODAL DAMPING MATRIX 'ETHA(I)'.
      C GENERAL STRUCTURES USE THE VALUE BETWEEN 2-10 %.
      READ(10,3)TEXT
      IDOF = NJTS*3 - NB
      DO 300 I = 1,IDOF
300  READ(10,*)ETHA(I)
      WRITE(15,310)
310  FORMAT(/,6X,'PERCENTAGE OF MODAL DAMPING MATRIX ARRAY IS;',/)
      DO 320 I = 1,IDOF
320  WRITE(15,330)I,ETHA(I)
330  FORMAT(6X,'ETHA(',I3,') = ',F3.1)
      C
      C READ ARRAY OF EQUIPMENT PROPERTIES COMBINED ON THE GLOBAL STRUCTURE
      READ(10,3)TEXT
      READ(10,*)NEQUIP
      READ(10,3)TEXT
      DO 1500 I = 1,NEQUIP
1500 READ(10,*)POATTA(I),MEQUIP(I),CEQUIP(I),KEQUIP(I)
      WRITE(15,1510)
1510 FORMAT(/,6X,'PROPERTIES OF EQUIPMENT ATTACH TO THE STRUCTURE')
      WRITE(15,1520)
1520 FORMAT(6X,'Nth-DEGREE',4X,'ATTACHMENT',5X,'MASS'5X,'DAMPING',6X,
      * 'STIFFNESS')
      DO 1530 I = 1,NEQUIP
      NDGOFM(I) = IDOF + I
1530 WRITE(15,1540)I,NDGOFM(I),POATTA(I),MEQUIP(I),CEQUIP(I),KEQUIP(I)
1540 FORMAT(1X,I3,4X,I3,10X,I3,8X,F7.2,2X,F8.2,7X,F8.2)

```

```

C
C READ MASS VALUE ADD TO THE STRUCTURE DUE TO DIRECT BLOCK ISOLATION :
  READ(10,3)TEXT
  READ(10,*)NADDMA
  READ(10,3)TEXT
  DO 1550 I = 1,NADDMA
1550 READ(10,*)NADDEG(I),ADDMAS(I)
  WRITE(15,1560)
1560 FORMAT(/,6X,'COMBINED EFFECT OF MASS DUE TO BLOCK ISOLATION:')
  WRITE(15,1570)
1570 FORMAT(6X,'ADDING POSITIONS',6X,'QUANTITY OF ADDING MASSES')
  DO 1580 I = 1,NADDMA
1580 WRITE(15,1590)NADDEG(I),ADDMAS(I)
1590 FORMAT(11X,I2,16X,E14.2)
C
C READ UNBALANCED FORCES GENERATE FROM OVERALL EQUIPMENT
  READ(10,3)TEXT
  READ(10,*)NUNBAL
  READ(10,3)TEXT
  DO 1650 I = 1,NUNBAL
1650 READ(10,*)NUNPOS(I),AMPLIT(I),UNBFRQ(I)
  WRITE(15,1660)
1660 FORMAT(/,6X,'UNBALANCED FORCES GENERATE FROM OVERALL EQUIPMENT')
  WRITE(15,1670)
1670 FORMAT(6X,'POSITIONS',12X,'AMPLITUDE',12X,'FREQUENCY')
  DO 1680 I = 1,NUNBAL
1680 WRITE(15,1690)I,NUNPOS(I),AMPLIT(I),UNBFRQ(I)
1690 FORMAT(2X,I2,3X,I3,12X,E14.4,7X,E14.4)
C
C CLOSE PRIMARY DATA DISPLAY OUTPUT FILE.
  CLOSE(UNIT = 15)
C
C GENERATE NULL 3-DIMENSIONAL ARRAYS KEL AND MEL. PLANES OF KEL
C AND MEL WILL LATER CONTAIN THE LOCAL ELEMENT STIFFNESS AND MASS
C MATRICES, RESPECTIVELY.
94 DO 44 I = 1,6
  DO 44 J = 1,6
  DO 44 M = 1,NUMEL
  KEL(I,J,M) = 0.
44 MEL(I,J,M) = 0.
C
C GENERATE NULL MATRICES R AND RT WHICH WILL LATER BECOME THE
C TRANSFORMATION MATRIX AND ITS TRANSPOSE, RESPECTIVELY.
  DO 45 I = 1,6
  DO 45 J = 1,6
  R(I,J)=0.0
45 RT(I,J)=0.0
C
C GENERATE THE LOCAL ELEMENT STIFFNESS MATRICES AND STORE IN THE
C 3-DIMENSIONAL STIFFNESS ARRAY KEL.EACH PLANE IN THE 3-DIM. ARRAY
C IS ONE ELEMENT STIFFNESS MATRIX.
  DO 100 EN=1,NUMEL
  IC=JNM(EN,1)
  ID=JNM(EN,2)
  L=DSQRT((X(ID)-X(IC))**2.+(Y(ID)-Y(IC))**2.)
  QUOT=IA(EN)/A(EN)
  R1=DSQRT(QUOT)
  F=E(EN)*IA(EN)/L
  P=F/R1**2.
  Q=4.*P*R1**2.
  S=3.*Q/(2.*L)
  T=S*2./L
  SINA=(Y(ID)-Y(IC))/L
  COSA=(X(ID)-X(IC))/L
  KEL(1,1,EN)=P
  KEL(1,4,EN)=-P
  KEL(2,2,EN)=T
  KEL(2,3,EN)=S
  KEL(2,5,EN)=-T
  KEL(2,6,EN)=S
  KEL(3,3,EN)=Q
  KEL(3,5,EN)=-S
  KEL(3,6,EN)=Q/2.

```

```

      KEL(4,4,EN)=P
      KEL(5,5,EN)=T
      KEL(5,6,EN)=-S
      KEL(6,6,EN)=Q
      DO 46 I=2,6
      IM1 = I-1
      DO 46 J=1,IM1
46    KEL(I,J,EN)=KEL(J,I,EN)
C
C   GENERATE THE LOCAL ELEMENT MASS MATRICES AND STORE THEM IN THE
C   3-DIMENSIONAL MASS ARRAY MEL . EACH PLANE OF THE 3-DIM. ARRAY
C   MEL CONTAINS ONE LOCAL ELEMENT MASS MATRIX.
      F=GAMMA(EN)*L/420.
      P=70.*F
      P2=2.*P
      Q=156.*F
      S=22.*L*F
      T=54.*F
      U=4.*L*L*F
      V=13.*L*F
      W=3.*L*L*F
      MEL(1,1,EN)=P2
      MEL(1,4,EN)=P
      MEL(2,2,EN)=Q
      MEL(2,3,EN)=S
      MEL(2,5,EN)=T
      MEL(2,6,EN)=-V
      MEL(3,3,EN)=U
      MEL(3,5,EN)=V
      MEL(3,6,EN)=-W
      MEL(4,4,EN)=P2
      MEL(5,5,EN)=Q
      MEL(5,6,EN)=-S
      MEL(6,6,EN)=U
      DO 47 I = 2,6
      IM1=I-1
      DO 47 J=1,IM1
47    MEL(I,J,EN)=MEL(J,I,EN)
C
C   GENERATE THE TRANSFORMATION MATRIX R AND ITS TRANSPOSE RT.
      R(1,1)=COSA
      R(1,2)=SINA
      R(2,1)=-SINA
      R(2,2)=COSA
      R(3,3)=1.
      R(4,4)=COSA
      R(4,5)=SINA
      R(5,4)=-SINA
      R(5,5)=COSA
      R(6,6)=1.
      DO 48 I=1,3
      DO 48 J=1,3
      RT(I,J)=R(J,I)
48    RT(I+3,J+3)=R(J+3,I+3)
C
C   DETERMINE THE ELEMENT STIFFNESS MATRICES IN THE GLOBAL
C   COORDINATE SYSTEM AND STORE THEM IN THE 3-DIM. STIFFNESS
C   ARRAY KEG. EACH PLANE OF THE 3-DIM. ARRAY CONTAINS
C   ONE GLOBAL ELEMENT STIFFNESS MATRIX.
      DO 95 I=1,6
      DO 95 J=1,6
      TK(I,J)=0.0
      DO 95 K=1,6
95    TK(I,J)=TK(I,J)+KEL(I,K,EN)*R(K,J)
      DO 96 I=1,6
      DO 96 J=1,6
      KEG(I,J,EN)=0.0
      DO 96 K=1,6
96    KEG(I,J,EN)=KEG(I,J,EN)+RT(I,K)*TK(K,J)
C
C   DETERMINE THE ELEMENT MASS MATRICES IN THE GLOBAL SYSTEM (EQ.
C   7-92A) AND STORE THEM IN THE 3-DIM. MASS ARRAY MEG. EACH PLANE
C   OF THE 3-DIM. ARRAY CONTAINS ONE GLOBAL ELEMENT MASS MATRIX.

```

```

DO 97 I=1,6
DO 97 J=1,6
TM(I,J)=0.0
DO 97 K=1,6
97  TM(I,J)=TM(I,J)+MEL(I,K,EN)*R(K,J)
DO 98 I=1,6
DO 98 J=1,6
MEG(I,J,EN)=0.0
DO 98 K=1,6
98  MEG(I,J,EN)=MEG(I,J,EN)+RT(I,K)*TM(K,J)
100 CONTINUE
C
C GENERATE NULL MATRICES SK AND SM WHICH WILL BECOME THE
C SYSTEM STIFFNESS AND MASS MATRICES, RESPECTIVELY.
N=NJTS*3
DO 49 I=1,N
DO 49 J=1,N
SK(I,J)=0.
49  SM(I,J)=0.
C ASSEMBLE THE SYSTEM STIFFNESS AND MASS MATRICES.
DO 51 I=1,NUMEL
DO 50 J=1,2
DO 50 M=1,3
J1=J*3-M+1
50  SUB(J1)=3*JNM(I,J)-M+1
DO 51 B=1,6
DO 51 Z=1,6
ROWSUB=SUB(B)
COLSUB=SUB(Z)
SK(ROWSUB,COLSUB)=SK(ROWSUB,COLSUB)+KEG(B,Z,I)
51  SM(ROWSUB,COLSUB)=SM(ROWSUB,COLSUB)+MEG(B,Z,I)
C
C CALCULATE THE NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM AND REMOVE ROWS AND
C COLUMNS FROM THE SYSTEM STIFFNESS AND MASS MATRICES.
NF=N-NB
IF(NB .EQ. 0)GO TO 69
NA=1
KL=N-1
62  JC=1
63  IF(JC .EQ. CFIX(NA))GO TO 64
JC=JC+1
IF(JC .EQ. N)GO TO 68
GO TO 63
64  DO 65 I=1,N
DO 65 J=JC,KL
SK(I,J)=SK(I,J+1)
SM(I,J)=SM(I,J+1)
65  CONTINUE
DO 66 J=1,N
DO 66 I=JC,KL
SK(I,J)=SK(I+1,J)
SM(I,J)=SM(I+1,J)
66  CONTINUE
IF(NA .EQ. NB)GO TO 68
NA=NA+1
DO 67 I=NA,NB
67  CFIX(I)=CFIX(I)-1
GO TO 62
68  CONTINUE
C
C ASSIGN REDUCED STIFFNESS AND MASS MATRIX ELEMENTS TO ARRAY
C NAMES RSK AND RSM, RESPECTIVELY.
69  DO 70 I=1,NF
DO 70 J=1,NF
RSK(I,J)=SK(I,J)
70  RSM(I,J)=SM(I,J)
C
C OPEN PURE STRUCTURE DATA ( NATURAL FREQUENCIES )
OPEN(UNIT=15,FILE='PUREFQ.DAT')
WRITE(15,5500)
5500 FORMAT(/,20X,'NATURAL FREQUENCIES AND MODE SHAPES OF STRUCTURE',/)
C
C COMBINED DISTRIBUTED MASS FROM HORIZONTAL MEMBER OR POINT LOAD.

```

```

DO 4000 I = 1, NADDMA
  J = NADDEG(I)
  RSM(J, J) = RSM(J, J) + ADDMAS(I)
4000 CONTINUE
C
C CALL SUBPROGRAM MATMPY TO CALCULATE
  CALL MATINV(NM, RSM, BM, NF)
  CALL MATMPY(NM, NF, BM, RSK, BAR)
C
C CALL SUBPROGRAM RG TO CALCULATE FREQUENCIES AND MODE SHAPES
  CALL RG(NM, NF, BAR, WR, WI, MATZ, RMODAL, IERR, FV1, IV1, OMEGA)
C
C DISPLAY THE NATURAL FREQUENCIES AND MODE SHAPE OF PURE STRUCTURE.
C
  IF (NF .LT. 15) THEN
    WNDF = NF
  ELSE
    WNDF = 15
  END IF
  DO 6500 J = 1, WNDF
    WRITE(15, 6200) J, OMEGA(J)
6200   FORMAT(/, ' ', 5X, 'OMEGA(', I3, ') = ', D20.8, ' RAD/SEC.')
    WRITE(15, 6400)
6400   FORMAT(/, ' ', 5X, 'THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:')
    DO 6800 I = 1, NF
6800     WRITE(15, 6700) I, RMODAL(I, J)
6700     FORMAT(7X, I3, 5X, D16.8)
6500 CONTINUE
C
C GENERATE MODAL MATRIX AND TRANSPOSE OF IT FOR DECOUPLING THE
C SYSTEM DIFFERENTIAL EQUATION.
  DO 220 J=1, NF
    DO 220 I=1, NF
      UMODAL(I, J) = RMODAL(I, J)
      TMODAL(J, I) = UMODAL(I, J)
220 CONTINUE
C
C MULTIPLY THE REDUCED MASS MATRIX AND STIFFNESS MATRIX BY MODAL
C MATRIX UMODAL(I, J) AND TRANSPOSE OF IT TMODAL(I, J).
C   TRANS[u]. [M]. [u] AND TRANS[u]. [K]. [u]
  CALL MATMPY(NM, NF, TMODAL, RSM, OSM)
  CALL MATMPY(NM, NF, TMODAL, RSK, OSK)
  CALL MATMPY(NM, NF, OSM, UMODAL, DSM)
  CALL MATMPY(NM, NF, OSK, UMODAL, DSK)
C
C SEPARATE THE DIAGONAL VALUE FROM DSM AND DSK .
  DO 230 I = 1, NF
    DIMASS(I) = DSM(I, I)
    DISTIF(I) = DSK(I, I)
230 CONTINUE
C
C GENERATE THE ESTIMATION OF MODAL DAMPING MATRIX.
C ASSIGN THE VALUE ONLY IN THE DIAGONAL DIRECTION BECAUSE
C THE OTHERS ARE ZERO.
  DO 240 I = 1, NF
    DIDAMP(I) = 2*ETHA(I)*OMEGA(I)*DIMASS(I)/100
240 CONTINUE
C
C DISPLAY THE DECOUPLING DIFFERENTIAL EQUATIONS.
  WRITE(15, 5245)
5245  FORMAT(/, 7X, 'MODAL MASS', 9X, 'MODAL DAMP', 7X, 'MODAL STIFFNESS',
  $      /)
  DO 5250 I = 1, NF
    WRITE(15, 5260) DIMASS(I), DIDAMP(I), DISTIF(I)
5260  FORMAT(3(5X, E14.7), 7X)
5250 CONTINUE
C
  CLOSE(UNIT = 15)
C
C TRANSFER THE MODAL DAMPING MATRIX TO DAMPING MATRIX.
  DO 2000 I = 1, NF
  DO 2000 J = 1, NF
    IF( I.EQ.J ) THEN

```

```

      DSC(I,J) = DIDAMP(I)
    ELSE
      DSC(I,J) = 0.0
    ENDIF
2000 CONTINUE
      CALL MATINV(NM,TMODAL,ITMODA,NF)
      CALL MATINV(NM,UMODAL,IUMODA,NF)
      CALL MATMPY(NM,NF,ITMODA,DSC,OSC)
      CALL MATMPY(NM,NF,OSC,IUMODA,RSC)
C
C CLOSE PURE STRUCTURE DATA FILE AND OPEN RESPONSE FILE
      CLOSE(UNIT = 15)
      OPEN(UNIT=15,FILE='RESPON.DAT')
      WRITE(15,5600)
5600 FORMAT(/,15X,'RESPONSE OF STRUCTURE UNDER FORCE CONDITIONS',/)
C
C COMBINED PROPERTIES OF EQUIPMENT TO THE ENTIRE STRUCTURE
      COMBDF = NF + NEQUIP
      DO 1800 I = 1,COMBDF
      DO 1800 J = 1,COMBDF
        IF( I.LE.NF .AND. J.LE.NF) THEN
          BRSK(I,J) = RSK(I,J)
          BRSM(I,J) = RSM(I,J)
          BRSC(I,J) = RSC(I,J)
        ELSE
          BRSK(I,J) = 0.0
          BRSM(I,J) = 0.0
          BRSC(I,J) = 0.0
        ENDIF
1800 CONTINUE
C
      DO 1810 K = 1,NEQUIP
      P = POATTA(K)
      M = NF + K
      BRSK(P,P) = BRSK(P,P) + KEQUIP(K)
      BRSK(M,M) = BRSK(M,M) + KEQUIP(K)
      BRSK(P,M) = BRSK(P,M) - KEQUIP(K)
      BRSK(M,P) = BRSK(M,P) - KEQUIP(K)
      BRSC(P,P) = BRSC(P,P) + CEQUIP(K)
      BRSC(M,M) = BRSC(M,M) + CEQUIP(K)
      BRSC(P,M) = BRSC(P,M) - CEQUIP(K)
      BRSC(M,P) = BRSC(M,P) - CEQUIP(K)
      BRSM(M,M) = BRSM(M,M) + MEQUIP(K)
1810 CONTINUE
C
C CALL SUBPROGRAM MATMPY TO CALCULATE
      CALL MATINV(NM,BRSM,BMRSM,COMBDF)
      CALL MATMPY(NM,COMBDF,BMRSM,BSK,BBA)
C
C CALL SUBPROGRAM RG TO CALCULATE FREQUENCIES AND MODE SHAPES
      CALL RG(NM,COMBDF,BBA,BWR,BWI,KATZ,RBMODA,LERR,BFV1,BIV1,BOMEGA)
C
C DISPLAY THE NATURAL FREQUENCIES AND MODE SHAPE OF COMBINED STRUCTURE.
C
      IF (COMBDF.LT. 16) THEN
        WNDF = COMBDF
      ELSE
        WNDF = 16
      END IF
      DO 7500 J = 1,16
        WRITE(15,7200)J,BOMEGA(J)
7200   FORMAT(/, ' ',5X,'OMEGA(',I3,') = ',D20.8,' RAD/SEC. ')
        WRITE(15,7400)
7400   FORMAT(/, ' ',5X,'THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:')
        DO 7800 I = 1,COMBDF
7800     WRITE(15,7700)I,RBMODA(I,J)
7700     FORMAT(7X,I3,5X,D16.8)
7500 CONTINUE
C
C GENERATE MODAL MATRIX AND TRANSPOSE OF IT FOR DECOUPLING THE
C ENTIRE SYSTEM DIFFERENTIAL EQUATIONS.
      DO 2150 J=1,COMBDF
      DO 2150 I=1,COMBDF

```



```

        UBMODA(I,J) = RBMODA(I,J)
        TBMODA(J,I) = UBMODA(I,J)
2150  CONTINUE
C
C MULTIPLY THE REDUCED MASS MATRIX AND STIFFNESS MATRIX BY MODAL
C MATRIX UMODAL(I,J) AND TRANSPOSE OF IT TMODAL(I,J).
C      TRANS[u].[M].[u] AND TRANS[u].[K].[u]
        CALL MATMPY(NM,COMBDF,TBMODA,BRSM,BOSM)
        CALL MATMPY(NM,COMBDF,TBMODA,BRSC,BOSC)
        CALL MATMPY(NM,COMBDF,TBMODA,BRSK,BOSK)
        CALL MATMPY(NM,COMBDF,BOSM,UBMODA,BDSM)
        CALL MATMPY(NM,COMBDF,BOSC,UBMODA,BDSC)
        CALL MATMPY(NM,COMBDF,BOSK,UBMODA,BDSK)
C
C SEPARATE THE DIAGONAL VALUE FROM BDSM,BDSC AND BDSK .
        DO 2160 I = 1,COMBDF
            BDIMAS(I) = BDSM(I,I)
            BDIDAM(I) = BDSC(I,I)
            BDISTI(I) = BDSK(I,I)
2160  CONTINUE
C
C DISPLAY THE DECOUPLING DIFFERENTIAL EQUATIONS AND THE CASE OF EACH
C EQUATION NAMELY 'OVERDAMP' OR 'UNDERDAMP' .
        WRITE(15,245)
245  FORMAT(//,7X,'MODAL MASS',9X,'MODAL DAMP',7X,'MODAL STIFFNESS',
           $      /)
        DO 250 I = 1,COMBDF
            WRITE(15,260)BDIMAS(I),BDIDAM(I),BDISTI(I)
260  FORMAT(3(5X,E14.7),7X)
250  CONTINUE
C
C FIND THE MAXIMUM DISPLACEMENT AND VELOCITY FOR EACH POSITION.
        DO 290 J = 1,COMBDF
            PDISPL(J) = 0.0
            PVELOC(J) = 0.0
290  CONTINUE
        DO 270 K = 1,NUNBAL
            M = NUNPOS(K)
            DO 280 I = 1,COMBDF
                GENCOF = TBMODA(I,M)*AMPLIT(K)/BDISTI(I)
                FREQCO = UNBFRQ(K)/BOMEGA(I)
                AROOCO = (1.-FREQCO**2.)**2.
                ZETHA = BDIDAM(I)/(2.*BDIMAS(I)*BOMEGA(I))
                BROOCO = (2.*ZETHA*FREQCO)**2.
                DENOMI = DSQRT(AROOCO+BROOCO)
                DECSOL = DABS(GENCOF/DENOMI)
                PDISPL(I) = PDISPL(I) + DECSOL
                PVELOC(I) = PVELOC(I) + DABS(PDISPL(I)*UNBFRQ(K))
280  CONTINUE
270  CONTINUE
            DO 295 J = 1,COMBDF
                COMDIS(J) = 0.0
                COMVEL(J) = 0.0
295  CONTINUE
            DO 400 I = 1,COMBDF
                DO 400 J = 1,COMBDF
                    COMDIS(I) = COMDIS(I) + DABS(UBMODA(I,J)*PDISPL(J))
                    COMVEL(I) = COMVEL(I) + DABS(UBMODA(I,J)*PVELOC(J))
400  CONTINUE
C
C DISPLAY THE RESULT IN THE FILE RESPON.DAT
C
        WRITE(15,420)
420  FORMAT(//,7X,'POSITION',10X,'MAX.DISPLACEMENT',6X,'MAX.VELOCITY')
        DO 450 I = 1,COMBDF
            WRITE(15,460)I,COMDIS(I),COMVEL(I)
460  FORMAT(10X,I3,13X,E14.7,7X,E14.7)
450  CONTINUE
C
C CLOSE OUTPUT FILE 'RESPON.DAT'
C
        CLOSE (UNIT = 15)
        STOP

```

```

END

SUBROUTINE DECOMP(NM,A,N,L,LT)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(NM,NM)
REAL*8 L(NM,NM),LT(NM,NM)
DO 9 J = 1,N
IF(J .EQ. 1)GO TO 7
JMI = J-1
DO 6 I = J,N
IF(I .NE. J)GO TO 4
SUM = 0.0
DO 3 K = 1,JMI
3 SUM = SUM + L(I,K)*L(J,K)
L(J,J) = DSQRT(A(J,J) - SUM)
GO TO 6
4 SUM = 0.0
DO 5 K = 1,JMI
5 SUM = SUM + L(I,K)*L(J,K)
L(I,J) = (A(I,J) - SUM)/L(J,J)
6 CONTINUE
GO TO 9
7 L(1,1) = DSQRT(A(1,1))
DO 8 I = 2,N
8 L(I,1) = A(I,1)/L(1,1)
9 CONTINUE
C FILL IN ZERO VALUES OF MATRIX L
DO 11 J = 2,N
JMI = J-1
DO 11 I = 1,JMI
11 L(I,J) = 0.0
C ASSIGN VALUES TO THE UPPER TRIANGULAR MATRIX LT
DO 12 I = 1,N
DO 12 J = 1,N
12 LT(I,J) = L(J,I)
RETURN
END

SUBROUTINE MATINV(NM,B,A,N)
C MATRIX INVERSION USING GAUSS-JORDAN REDUCTION AND PARTIAL
C PIVOTING. MATRIX B IS THE MATRIX TO BE INVERTED AND A IS
C THE INVERTED MATRIX.
PARAMETER(M=200)
REAL*8 BIG,AB,TEMP,A,B
INTEGER NM,N,KROW,IROW,KPL,K,JJ,M
INTEGER INTER(M,2)
DIMENSION B(NM,N),A(NM,N)
DO 2 I = 1,N
DO 2 J = 1,N
2 A(I,J) = B(I,J)
C CYCLE PIVOT ROW NUMBER FROM 1 TO N
DO 12 K = 1,N
JJ = K
IF(K .EQ. N)GO TO 6
KPL = K + 1
BIG = DABS(A(K,K))
C SEARCH FOR LARGEST PIVOT ELEMENT
DO 5 I = KPL,N
AB = DABS(A(I,K))
IF(BIG-AB)4,5,5
4 BIG = AB
JJ = I
5 CONTINUE
C MAKE DECISION ON NECESSITY OF ROW INTERCHANGE AND
C STORE THE NUMBER OF THE TWO ROWS INTERCHANGED DURING KTH
C REDUCTION. IF NO INTERCHANGE, BOTH NUMBERS STORED EQUAL K
6 INTER(K,1) = K
INTER(K,2) = JJ
IF(JJ-K)7,9,7
7 DO 8 J = 1, N
TEMP = A(JJ,J)
A(JJ,J) = A(K,J)
8 A(K,J) = TEMP

```

```

C CALCULATE ELEMENTS OF REDUCED MATRIX
C FIRST CALCULATE NEW ELEMENTS OF PIVOT ROW
9   DO 10 J = 1,N
     IF(J .EQ. K)GO TO 10
     A(K,J) = A(K,J)/A(K,K)
10  CONTINUE
C CALCULATE ELEMENT REPLACING PIVOT ELEMENT
   A(K,K) = 1./A(K,K)
C CALCULATE NEW ELEMENTS NOT IN PIVOT ROW OR COLUMN
   DO 11 I = 1,N
     IF(I .EQ. K)GO TO 11
     DO 110 J = 1,N
       IF(J .EQ. K) GO TO 110
       A(I,J) = A(I,J) - A(K,J)*A(I,K)
110  CONTINUE
11  CONTINUE
C CALCULATE NEW ELEMENTS FOR PIVOT COLUMN--EXCEPT PIVOT ELEMENT
   DO 120 I = 1,N
     IF(I .EQ. K) GO TO 120
     A(I,K) = -A(I,K)*A(K,K)
120  CONTINUE
12  CONTINUE
C REARRANGE COLUMNS OF FINAL MATRIX OBTAINED
   DO 13 L = 1,N
     K = N-L+1
     KROW = INTER(K,1)
     IROW = INTER(K,2)
     IF(KROW .EQ. IROW)GO TO 13
     DO 130 I = 1,N
       TEMP = A(I,IROW)
       A(I,IROW) = A(I,KROW)
       A(I,KROW) = TEMP
130  CONTINUE
13  CONTINUE
   RETURN
   END

   SUBROUTINE MATMPY(NM,N,A,B,C)
C C IS THE PRODUCT MATRIX OF A AND B
   REAL*8 A,B,C
   DIMENSION A(NM,N),B(NM,N),C(NM,N)
   DO 2 I = 1,N
     DO 2 J = 1,N
       C(I,J) = 0.0
     DO 2 K = 1,N
2    C(I,J) = C(I,J) + A(I,K)*B(K,J)
   RETURN
   END

   SUBROUTINE RG(NM,N,A,WR,WI,MATZ,SZ,IERR,IV1,FV1,SOMEGA)
   PARAMETER ( M=200 )
   REAL*8 A(NM,N),Z(M,M),WR(N),WI(N),FV1(N),SQRTWR(M)
   REAL*8 SZ(M,M),SOMEGA(M)
   INTEGER NM,N,IS1,IS2,IERR,MATZ
   INTEGER IV1(N)
   IF (N .LE. NM) GO TO 10
   IERR = 10 * N
   GO TO 50

C
10 CALL BALANC(NM,N,A,IS1,IS2,FV1)
C
   CALL ELMHES(NM,N,IS1,IS2,A,IV1)
C
   IF (MATZ .NE. 0) GO TO 20
C
20 CALL ELTRAN(NM,N,IS1,IS2,A,IV1,Z)
C
   CALL HQR2(NM,N,IS1,IS2,A,WR,WI,Z,IERR)
C
   IF (IERR .NE. 0) GO TO 50
   DO 2010 J = 1,N
     SQRTWR(J) = DSQRT(WR(J))
2010 CONTINUE

```

```

C
CALL BALBAK (NM, N, IS1, IS2, FV1, Z, N)
C
CALL SORT (NM, N, Z, SQRTWR, SZ, SOMEGA)
C
50 RETURN
END

SUBROUTINE BALANC (NM, N, A, LOW, IGH, SCALE)
C
INTEGER I, J, K, L, M, N, JJ, NM, IGH, LOW, IEXC
REAL*8 A (NM, N), SCALE (N)
REAL*8 C, F, G, R, S, B2, RADIX
REAL*8 DABS
LOGICAL NOCONV

C
***** RADIX IS A MACHINE DEPENDENT PARAMETER SPECIFYING
C          THE BASE OF THE MACHINE FLOATING POINT REPRESENTATION.
C
C          *****
C
RADIX = 2.0

C
B2 = RADIX*RADIX
K = 1
L = N
GO TO 100
C
***** IN-LINE PROCEDURE FOR ROW AND
C          COLUMN EXCHANGE *****
20 SCALE (M) = J
IF (J .EQ. M) GO TO 50
C
DO 30 I = 1, L
F = A (I, J)
A (I, J) = A (I, M)
A (I, M) = F
30 CONTINUE
C
DO 40 I = K, N
F = A (J, I)
A (J, I) = A (M, I)
A (M, I) = F
40 CONTINUE
C
50 GO TO (80, 130), IEXC
C
***** SEARCH FOR ROWS ISOLATING AN EIGENVALUE
C          AND PUSH THEM DOWN *****
80 IF (L .EQ. 1) GO TO 280
L = L - 1
C
***** FOR J = L STEP -1 UNTIL 1 DO *****
100 DO 120 JJ = 1, L
J = L + 1 - JJ
C
DO 110 I = 1, L
IF (I .EQ. J) GO TO 110
IF (A (J, I) .NE. 0.0) GO TO 120
110 CONTINUE
C
M = L
IEXC = 1
GO TO 20
120 CONTINUE
C
GO TO 140
C
***** SEARCH FOR COLUMNS ISOLATING AN EIGENVALUE
C          AND PUSH THEM LEFT *****
130 K = K + 1
C
140 DO 170 J = K, L
C
DO 150 I = K, L
IF (I .EQ. J) GO TO 150
IF (A (I, J) .NE. 0.0) GO TO 170
150 CONTINUE

```

```

C
    M = K
    IEXC = 2
    GO TO 20
170 CONTINUE
C ***** NOW BALANCE THE SUBMATRIX IN ROWS K TO L *****
    DO 180 I = K, L
180 SCALE(I) = 1.0
C ***** ITERATIVE LOOP FOR NORM REDUCTION *****
190 NOCONV = .FALSE.
C
    DO 270 I = K, L
        C = 0.0
        R = 0.0
C
        DO 200 J = K, L
            IF (J .EQ. I) GO TO 200
            C = C + DABS(A(J,I))
            R = R + DABS(A(I,J))
200 CONTINUE
C ***** GUARD AGAINST ZERO C OR R DUE TO UNDERFLOW *****
    IF (C .EQ. 0.0 .OR. R .EQ. 0.0) GO TO 270
    G = R / RADIX
    F = 1.0
    S = C + R
210 IF (C .GE. G) GO TO 220
    F = F * RADIX
    C = C * B2
    GO TO 210
220 G = R * RADIX
230 IF (C .LT. G) GO TO 240
    F = F / RADIX
    C = C / B2
    GO TO 230
C ***** NOW BALANCE *****
240 IF ((C+R) / F .GE. 0.95 * S) GO TO 270
    G = 1.0 / F
    SCALE(I) = SCALE(I) * F
    NOCONV = .TRUE.
C
    DO 250 J = K, N
250 A(I,J) = A(I,J) * G
C
    DO 260 J = 1, L
260 A(J,I) = A(J,I) * F
C
270 CONTINUE
C
    IF (NOCONV) GO TO 190
C
280 LOW = K
    IGH = L
    RETURN
    END

SUBROUTINE ELMHES(NM,N,LOW,IGH,A,INT)
C
    INTEGER I,J,M,N,LA,NM,IGH,KP1,LOW,MM1,MP1
    REAL*8 A(NM,N)
    REAL*8 X,Y
    REAL*8 DABS
    INTEGER INT(IGH)
C
    LA = IGH - 1
    KP1 = LOW + 1
    IF (LA .LT. KP1) GO TO 200
C
    DO 180 M = KP1, LA
        MM1 = M - 1
        X = 0.0
        I = M
C
        DO 100 J = M, IGH

```

```

        IF (DABS(A(J,MM1)) .LE. DABS(X)) GO TO 100
        X = A(J,MM1)
        I = J
100    CONTINUE
C
        INT(M) = I
        IF (I .EQ. M) GO TO 130
C      ***** INTERCHANGE ROWS AND COLUMNS OF A *****
        DO 110 J = MM1, N
            Y = A(I,J)
            A(I,J) = A(M,J)
            A(M,J) = Y
110    CONTINUE
C
        DO 120 J = 1, IGH
            Y = A(J,I)
            A(J,I) = A(J,M)
            A(J,M) = Y
120    CONTINUE
C      ***** END INTERCHANGE *****
130    IF (X .EQ. 0.0) GO TO 180
        MP1 = M + 1
C
        DO 160 I = MP1, IGH
            Y = A(I,MM1)
            IF (Y .EQ. 0.0) GO TO 160
            Y = Y / X
            A(I,MM1) = Y
C
            DO 140 J = M, N
140        A(I,J) = A(I,J) - Y * A(M,J)
C
            DO 150 J = 1, IGH
150        A(J,M) = A(J,M) + Y * A(J,I)
C
160    CONTINUE
C
180    CONTINUE
C
200    RETURN
        END

SUBROUTINE ELTRAN(NM,N,LOW,IGH,A,INT,Z)
C
    INTEGER I,J,N,KL,MM,MP,NM,IGH,LOW,MP1
    REAL*8 A(NM,IGH),Z(NM,N)
    INTEGER INT(IGH)
C
C      ***** INITIALIZE Z TO IDENTITY MATRIX *****
    DO 80 I = 1, N
C
        DO 60 J = 1, N
160    Z(I,J) = 0.0
C
            Z(I,I) = 1.0
80    CONTINUE
C
        KL = IGH - LOW - 1
        IF(KL .LT. 1) GO TO 200
C      ***** FOR MP = IGH - 1 STEP -1 UNTIL LOW + 1 DO__ *****
        DO 140 MM = 1, KL
            MP = IGH - MM
            MP1 = MP + 1
C
            DO 100 I = MP1, IGH
100        Z(I,MP) = A(I,MP-1)
C
            I = INT(MP)
            IF (I .EQ. MP) GO TO 140
C
            DO 130 J = MP, IGH
130        Z(MP,J) = Z(I,J)
            Z(I,J) = 0.0

```

```

130  CONTINUE
C
      Z(I,MP) = 1.0
140  CONTINUE
C
200  RETURN
      END

      SUBROUTINE HQR2(NM,N,LOW,IGH,H,WR,WI,Z,IERR)
C
      INTEGER I,J,K,L,M,N,EN,II,JJ,LL,MM,NA,NM,NN,
S      IGH,ITS,LOW,MP2,ENM2,IERR
      REAL*8 H(NM,N),WR(N),WI(N),Z(NM,N)
      REAL*8 P,Q,R,S,T,W,X,Y,RA,SA,VI,VR,ZZ,NORM,MACHEP
      REAL*8 DSQRT,DABS,SIGN
      INTEGER MINO
      LOGICAL NOTLAS
      COMPLEX Z3
      COMPLEX CMLPX
      REAL*8 REAL,AIMAG
C
      ***** MACHEP IS A MACHINE DEPENDENT PARAMETER SPECIFYING
C      THE RELATIVE PRECISION OF FLOATING POINT ARITHMETIC.
C
C      *****
C
      MACHEP = 1.0
10  IF (1.0 + MACHEP*0.99 .GT. 1.0) THEN
      MACHEP = MACHEP/2.0
      GO TO 10
      END IF
      MACHEP = MACHEP * 2
*
*      FINALLY THE MACHEP VALUE BECAME ABOUT 1.0842022D-19
*
      IERR = 0
      NORM = 0.0
      K = 1
C      ***** STORE ROOTS ISOLATED BY BALANC
C      AND COMPUTE MATRIX NORM *****
C
      DO 50 I = 1, N
C
          DO 40 J = K, N
140  NORM = NORM + DABS(H(I,J))
C
          K = I
          IF (I .GE. LOW .AND. I .LE. IGH) GO TO 50
          WR(I) = H(I,I)
          WI(I) = 0.0
50  CONTINUE
C
          EN = IGH
          T = 0.0
C      ***** SEARCH FOR NEXT EIGENVALUES *****
60  IF (EN .LT. LOW) GO TO 340
          ITS = 0
          NA = EN - 1
          ENM2 = NA - 1
C      ***** LOOK FOR SINGLE SMALL SUB-DIAGONAL ELEMENT
C      FOR L=EN STEP -1 UNTIL LOW DO ___ *****
70  DO 80 LL = LOW, EN
          L = EN + LOW - LL
          IF (L .EQ. LOW) GO TO 100
          S = DABS(H(L-1,L-1)) + DABS(H(L,L))
          IF (S .EQ. 0.0) S = NORM
          IF (DABS(H(L,L-1)) .LE. MACHEP*S) GO TO 100
80  CONTINUE
C      ***** FORM SHIFT *****
100 X = H(EN,EN)
          IF (L .EQ. EN) GO TO 270
          Y = H(NA,NA)
          W = H(EN,NA) * H(NA,EN)
          IF (L .EQ. NA) GO TO 280
          IF (ITS .EQ. 30) GO TO 1000

```

```

IF (ITS .NE. 10 .AND. ITS .NE. 20) GO TO 130
C ***** FORM EXCEPTIONAL SHIFT *****
T = T + X
C
DO 120 I = LOW, EN
120 H(I,I) = H(I,I) - X
C
S = DABS(H(EN,NA)) + DABS(H(NA,ENM2))
X = 0.75 * S
Y = X
W = -0.4375 * S * S
130 ITS = ITS + 1
C ***** LOOK FOR TWO CONSECUTIVE SMALL
C SUB-DIAGONAL ELEMENTS.
C FOR M = EN-2 STEP -1 UNTIL L DO *****
DO 140 MM = L, ENM2
M = ENM2 + L - MM
ZZ = H(M,M)
R = X - ZZ
S = Y - ZZ
P = (R * S - W) / H(M+1,M) + H(M,M+1)
Q = H(M+1,M+1) - ZZ - R - S
R = H(M+2,M+1)
S = DABS(P) + DABS(Q) + DABS(R)
P = P / S
Q = Q / S
R = R / S
IF (M .EQ. L) GO TO 150
IF (DABS(H(M,M-1)) * (DABS(Q) + DABS(R)) .LE. MACHEP * DABS(P)
$ * (DABS(H(M-1,M-1)) + DABS(ZZ) + DABS(H(M+1,M+1)))) GO TO 150
140 CONTINUE
C
150 MP2 = M + 2
C
DO 160 I = MP2, EN
H(I,I-2) = 0.0
IF (I .EQ. MP2) GO TO 160
H(I,I-3) = 0.0
160 CONTINUE
C ***** DOUBLE QR STEP INVOLVING ROWS L TO EN AND
C COLUMNS M TO EN *****
DO 260 K = M, NA
NOTLAS = K .NE. NA
IF (K .EQ. M) GO TO 170
P = H(K,K-1)
Q = H(K+1,K-1)
R = 0.0
IF (NOTLAS) R = H(K+2,K-1)
X = DABS(P) + DABS(Q) + DABS(R)
IF (X .EQ. 0.0) GO TO 260
P = P / X
Q = Q / X
R = R / X
170 S = SIGN(DSQRT(P*P+Q*Q+R*R), P)
IF (K .EQ. M) GO TO 180
H(K,K-1) = -S * X
GO TO 190
180 IF (L .NE. M) H(K,K-1) = -H(K,K-1)
190 P = P + S
X = P / S
Y = Q / S
ZZ = R / S
Q = Q / P
R = R / P
C ***** ROW MODIFICATION *****
DO 210 J = K, N
P = H(K,J) + Q * H(K+1,J)
IF (.NOT. NOTLAS) GO TO 200
P = P + R * H(K+2,J)
H(K+2,J) = H(K+2,J) - P * ZZ
200 H(K+1,J) = H(K+1,J) - P * Y
H(K,J) = H(K,J) - P * X
210 CONTINUE

```



```

C
  J = MINO(EN, K+3)
C ***** COLUMN MODIFICATION *****
  DO 230 I = 1, J
    P = X * H(I, K) + Y * H(I, K+1)
    IF (.NOT. NOTLAS) GO TO 220
    P = P + ZZ * H(I, K+2)
    H(I, K+2) = H(I, K+2) - P * R
220   H(I, K+1) = H(I, K+1) - P * Q
    H(I, K) = H(I, K) - P
230   CONTINUE
C ***** ACCUMULATE TRANSFORMATIONS *****
  DO 250 I = LOW, IGH
    P = X * Z(I, K) + Y * Z(I, K+1)
    IF (.NOT. NOTLAS) GO TO 240
    P = P + ZZ * Z(I, K+2)
    Z(I, K+2) = Z(I, K+2) - P * R
240   Z(I, K+1) = Z(I, K+1) - P * Q
    Z(I, K) = Z(I, K) - P
250   CONTINUE
C
260 CONTINUE
C
  GO TO 70
C ***** ONE ROOT FOUND *****
270 H(EN, EN) = X + T
    WR(EN) = H(EN, EN)
    WI(EN) = 0.0
    EN = NA
    GO TO 60
C ***** TWO ROOTS FOUND *****
280 P = (Y-X) / 2.0
    Q = P * P + W
    ZZ = DSQRT(DABS(Q))
    H(EN, EN) = X + T
    X = H(EN, EN)
    H(NA, NA) = Y + T
    IF (Q .LT. 0.0) GO TO 320
C ***** REAL PAIR *****
    ZZ = P + SIGN(ZZ, P)
    WR(NA) = X + ZZ
    WR(EN) = WR(NA)
    IF (ZZ .NE. 0.0) WR(EN) = X - W / ZZ
    WI(NA) = 0.0
    WI(EN) = 0.0
    X = H(EN, NA)
    S = DABS(X) + DABS(ZZ)
    P = X / S
    Q = ZZ / S
    R = DSQRT(P*P+Q*Q)
    P = P / R
    Q = Q / R
C ***** ROW MODIFICATION *****
  DO 290 J = NA, N
    ZZ = H(NA, J)
    H(NA, J) = Q * ZZ + P * H(EN, J)
    H(EN, J) = Q * H(EN, J) - P * ZZ
290 CONTINUE
C ***** COLUMN MODIFICATION *****
  DO 300 I = 1, EN
    ZZ = H(I, NA)
    H(I, NA) = Q * ZZ + P * H(I, EN)
    H(I, EN) = Q * H(I, EN) - P * ZZ
300 CONTINUE
C ***** ACCUMULATE TRANSFORMATIONS *****
  DO 310 I = LOW, IGH
    ZZ = Z(I, NA)
    Z(I, NA) = Q * ZZ + P * Z(I, EN)
    Z(I, EN) = Q * Z(I, EN) - P * ZZ
310 CONTINUE
C
  GO TO 330
C ***** COMPLEX PAIR *****

```

```

320 WR(NA) = X + P
    WR(EN) = X + P
    WI(NA) = ZZ
    WI(EN) = -ZZ
330 EN = ENM2
    GO TO 60
C   ***** ALL ROOTS FOUND. BACKSUBSTITUTE TO FIND
C   VECTORS OF UPPER TRIANGULAR FORM *****
340 IF (NORM .EQ. 0.0) GO TO 1001
C   ***** FOR EN = N STEP -1 UNTIL 1 DO ___ *****
    DO 800 NN = 1, N
        EN = N + 1 - NN
        P = WR(EN)
        Q = WI(EN)
        NA = EN - 1
        IF (Q) 710, 600, 800
C   ***** REAL VECTOR *****
600 M = EN
    H(EN,EN) = 1.0
    IF (NA .EQ. 0) GO TO 800
C   ***** FOR I = EN - 1 STEP -1 UNTIL 1 DO ___ *****
    DO 700 II = 1, NA
        I = EN - II
        W = H(I,I) - P
        R = H(I,EN)
        IF (M .GT. NA) GO TO 620
C
        DO 610 J = M, NA
610 R = R + H(I,J) * H(J,EN)
C
620 IF (WI(I) .GE. 0.0) GO TO 630
    ZZ = W
    S = R
    GO TO 700
630 M = I
    IF (WI(I) .NE. 0.0) GO TO 640
    T = W
    IF (W .EQ. 0.0) T = MACHEP * NORM
    H(I,EN) = -R / T
    GO TO 700
C   ***** SOLVE REAL EQUATIONS *****
640 X = H(I,I+1)
    Y = H(I+1,I)
    Q = (WR(I) - P) * (WR(I) - P) + WI(I) * WI(I)
    T = (X * S - ZZ * R) / Q
    H(I,EN) = T
    IF (DABS(X) .LE. DABS(ZZ)) GO TO 650
    H(I+1,EN) = (-R - W * T) / X
    GO TO 700
650 H(I+1,EN) = (-S - Y * T) / ZZ
700 CONTINUE
C   ***** END REAL VECTOR *****
    GO TO 800
C   ***** COMPLEX VECTOR *****
710 M = NA
C   ***** LAST VECTOR COMPONENT CHOSEN IMAGINARY SO THAT
C   EIGENVECTOR MATRIX IS TRIANGULAR *****
    IF (DABS(H(EN,NA)) .LE. DABS(H(NA,EN))) GO TO 720
    H(NA,NA) = Q / H(EN,NA)
    H(NA,EN) = -(H(EN,EN)-P) / H(EN,NA)
    GO TO 730
720 Z3 = CMLPX(0.0, -H(NA,EN)) / CMLPX(H(NA,NA)-P,Q)
    H(NA,NA) = REAL(Z3)
    H(NA,EN) = AIMAG(Z3)
730 H(EN,NA) = 0.0
    H(EN,EN) = 1.0
    ENM2 = NA - 1
    IF (ENM2 .EQ. 0) GO TO 800
C   ***** FOR I = EN - 2 STEP - 1 UNTIL 1 DO ___ *****
    DO 790 II = 1, ENM2
        I = NA - II
        W = H(I,I) - P
        RA = 0.0

```

```

      SA = H(I,EN)
C
      DO 760 J = M, NA
        RA = RA + H(I,J) * H(J,NA)
        SA = SA + H(I,J) * H(J,EN)
760    CONTINUE
C
      IF (WI(I) .GE. 0.0) GO TO 770
      ZZ = W
      R = RA
      S = SA
      GO TO 790
770    M = I
      IF (WI(I) .NE. 0.0) GO TO 780
      Z3 = CMPLX(-RA,-SA) / CMPLX(W,Q)
      H(I,NA) = REAL(Z3)
      H(I,EN) = AIMAG(Z3)
      GO TO 790
C
      ***** SOLVE COMPLEX EQUATIONS *****
780    X = H(I,I+1)
      Y = H(I+1,I)
      VR = (WR(I) - P) * (WR(I) - P) + WI(I) * WI(I) - Q * Q
      VI = (WR(I) - P) * 2.0 * Q
      IF (VR .EQ. 0.0 .AND. VI .EQ. 0.0) VR = MACHEP * NORM
      * (DABS(W) + DABS(Q) + DABS(X) + DABS(Y) + DABS(ZZ))
      Z3 = CMPLX(X*R-ZZ*RA+Q*SA,X*S-ZZ*SA-Q*RA) / CMPLX(VR,VI)
      H(I,NA) = REAL(Z3)
      H(I,EN) = AIMAG(Z3)
      IF (DABS(X) .LE. DABS(ZZ) + DABS(Q)) GO TO 785
      H(I+1,NA) = (- RA - W * H(I,NA) + Q * H(I,EN)) / X
      H(I+1,EN) = (- SA - W * H(I,EN) - Q * H(I,NA)) / X
      GO TO 790
785    Z3 = CMPLX(-R-Y*H(I,NA),-S-Y*H(I,EN)) / CMPLX(ZZ,Q)
      H(I+1,NA) = REAL(Z3)
      H(I+1,EN) = AIMAG(Z3)
790    CONTINUE
C
      ***** END COMPLEX VECTOR *****
800    CONTINUE
C
      ***** END BACK SUBSTITUTION
      VECTORS OF ISOLATED ROOTS *****
C
      DO 840 I = 1, N
        IF (I .GE. LOW .AND. I .LE. IGH) GO TO 840
C
          DO 820 J = I, N
820        Z(I,J) = H(I,J)
C
840    CONTINUE
C
      ***** MULTIPLY BY TRANSFORMATION MATRIX TO GIVE
      VECTORS OF ORIGINAL FULL MATRIX.
      FOR J = N STEP -1 UNTIL LOW DO ___ *****
C
      DO 880 JJ = LOW, N
        J = N + LOW - JJ
        M = MIN0(J,IGH)
C
          DO 880 I = LOW, IGH
            ZZ = 0.0
C
              DO 860 K = LOW, M
860            ZZ = ZZ + Z(I,K) * H(K,J)
C
                Z(I,J) = ZZ
880    CONTINUE
C
      GO TO 1001
C
      ***** SET ERROR -- NO CONVERGENCE TO AN
      EIGENVALUE AFTER 30 ITERATIONS *****
1000  IERR = EN
1001  RETURN
      END
C
      SUBROUTINE BALBAK(NM,N,LOW,IGH,SCALE,Z,M)
C
      INTEGER I, J, K, M, N, II, NM, IGH, LOW

```

```

REAL*8 SCALE(N), Z(NM,M)
REAL*8 S
C
IF (M .EQ. 0) GO TO 200
IF (IGH .EQ. LOW) GO TO 120
C
DO 110 I = LOW, IGH
  S = SCALE(I)
C ***** LEFT HAND EIGENVECTORS ARE BACK TRANSFORMED
C IF THE FOREGOING STATEMENT IS REPLACED BY
C S = 1.0 / SCALE(I). *****
  DO 100 J = 1, M
100  Z(I,J) = Z(I,J) * S
C
110 CONTINUE
C ***** FOR I=LOW-1 STEP -1 UNTIL 1 ,
C IGH + 1 STEP 1 UNTIL N DO ___ *****
120 DO 140 II = 1, N
  I = II
  IF (I .GE. LOW .AND. I .LE. IGH) GO TO 140
  IF (I .LT. LOW) I = LOW - II
  K = SCALE(I)
  IF (K .EQ. I) GO TO 140
C
  DO 130 J = 1, M
    S = Z(I,J)
    Z(I,J) = Z(K,J)
    Z(K,J) = S
130  CONTINUE
C
140 CONTINUE
C
200 RETURN
END

SUBROUTINE SEARCH(NM,RT,J,II,N)
C THIS SUBROUTINE SEARCHES THE JTH COLUMN OF THE MATRIX RT
C FOR THE LARGEST EIGENVECTOR COMPONENT. ITS ROW NUMBER IS
C ASSIGNED TO THE NAME II.
REAL*8 RT(NM,NM),BIG,AB
INTEGER NM,J,II,N
II = 1
BIG = DABS(RT(1,J))
DO 3 I = 2,N
  AB = DABS(RT(I,J))
  IF(BIG-AB) 2,3,3
2  BIG = AB
  II = I
3 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE SORT(NM,N,Z,AOMEGA,SZ,SOMEGA)
C THIS SUBROUTINE SORTS THE EIGENVALUES AND EIGENVECTORS OBTAINED
C FROM EISPACK SUBROUTINE.
PARAMETER ( M = 200 )
INTEGER NM,N,K,L,I,J
INTEGER P(M)
REAL*8 Z(NM,N),SZ(NM,N),AOMEGA(N),SOMEGA(N)
REAL*8 SCOMP,COMP,SMCOMP
C
C FIND MAXIMUM VALUE OF EIGENVALUS AND STORE IN SCOMP
C
DO 100 I = 1, N
  P(I) = 0
100 CONTINUE
SCOMP = AOMEGA(1)
DO 200 I = 2, N
  IF (AOMEGA(I) .GT. SCOMP) THEN
    SCOMP = AOMEGA(I)
  END IF
200 CONTINUE
SMCOMP = SCOMP

```

```

C
C FIND THE POSITION OF EACH EIGENVALUS AND EIGENVECTORS
C
  COMP = 0.0
  DO 500 I = 1, N
    DO 400 J = 1, N
      IF (AOMEGA(J) .GT. COMP) THEN
        IF (AOMEGA(J) .LE. SCOMP) THEN
          SCOMP = AOMEGA(J)
          P(I) = J
        END IF
      END IF
    CONTINUE
  400  SOMEGA(I) = SCOMP
      COMP = SOMEGA(I)
      SCOMP = SMCOMP
  500  CONTINUE
      DO 700 I = 1, N
        K = P(I)
        DO 600 J = 1, N
          SZ(J,I) = Z(J,K)
        600  CONTINUE
      700  CONTINUE
          DO 1200 I = 1, N
            IF (DABS(SZ(1,I)) .LE. 0.00001) THEN
              CALL SEARCH(NM,SZ,I,L,N)
              DO 800 K = 1, N
                IF (K .EQ. J) GO TO 800
                SZ(K,I) = SZ(K,I)/DABS(SZ(L,I))
              800  CONTINUE
                  SZ(L,I) = SZ(L,I)/DABS(SZ(L,I))
                END IF
              DO 1000 J = 2, N
                SZ(J,I) = SZ(J,I)/SZ(1,I)
              1000  CONTINUE
                  SZ(1,I) = 1.00000
              1200  CONTINUE
            RETURN
          END
C *****

```

### ประวัติผู้วิจัย

นายสมนึก จรูญจิตเสถียร เกิดวันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2517 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2539

