

## การศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### A Study of Vibration Characteristic of Curvilinear Ultrasonic Motors By Using Finite Element Method

ปานามาศ สุยบังดุม\*, พฤทธิกร สมิตไมตรี, เจริญยุทธ เดชวายุกุล และ ศุภสรโรช หมั่นสิทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทรศัพท์ (074) 287-035 โทรสาร (074) 212-893 \*Email s4712023@psu.ac.th

Panamas Suybangdum\*, Pruittikorn Smithmaitrie, Charoenyut Dechwayukul and Supasarote Muensit

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkla 90112, Tel

(074)287-035, Fax : (074)212893, \*Email : s4712023@psu.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มอเตอร์อัลตราโซนิกมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญสองส่วนคือ สเตเตอร์ และ โรเตอร์ โดยในการศึกษานี้สเตเตอร์มีลักษณะเป็นคานโค้งทำหน้าที่ขับโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามแนวของคานโดยอาศัยคลื่นเคลื่อนที่ คลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของคานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณแบบฮาร์โมนิก โดยทั่วไปวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ถูกใช้เป็นตัวทำงานที่กระตุ้นให้เกิดแรงแบบฮาร์โมนิกในมอเตอร์อัลตราโซนิก แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสเตเตอร์ถูกศึกษาเกี่ยวกับการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ และการตอบสนองเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแรงฮาร์โมนิกจากตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก โดยจากผลการศึกษาพบว่าจำนวนเอลิเมนต์มีผลต่อความสูงของคลื่นเคลื่อนที่และความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่ ผลการคำนวณค่าความสูงและความถี่ของคลื่นเคลื่อนที่จะเข้าสู่เมื่อจำนวนเอลิเมนต์ที่แบ่งมีค่ามากขึ้น นอกเหนือจากนี้วัสดุดูดซับการสั่นสะเทือน ถูกเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าการสะท้อนของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระทบกับจุดรองรับมีน้อยและทำให้คลื่นเคลื่อนที่ที่เกิบนสเตเตอร์มีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้นวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง

#### Abstract

The purpose of this research is to study vibration characteristic of curvilinear ultrasonic motors by using finite element method. An ultrasonic motor system consists of a rotor and a stator. The stator drives and guides a rotor along the curve beam to any specific angular position by using traveling wave. In this study, the stator is similar to a curve beam. The traveling wave is generated by piezoelectric actuators on the curve beam which is excited by the harmonic signal. The number of model elements and the stator response are investigated. The simulation results

show that the number of elements have an effect on the wave amplitude and operating frequency of the traveling wave. The calculated results of the amplitude and operating frequency are convergence as the number of elements increase. Furthermore, the damping material is included into the model to decrease the wave reflection. The result shows that the traveling wave is less reflected when it reaches the boundary. Therefore, the wave travels more stably. Accordingly, the damping material is very important in the design of ultrasonic curvilinear motors.

#### 1. บทนำ

อัลตราโซนิกมอเตอร์สามารถแบ่งออกได้สองรูปแบบด้วยกันคือ อัลตราโซนิกมอเตอร์ที่มีการเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรง (linear motor) [1-4] และแบบหมุน (rotary motor) [4-7] โดยปกติแล้วอัลตราโซนิกมอเตอร์มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญสองส่วนด้วยกันคือ สเตเตอร์ (stator) และโรเตอร์ (rotor) ซึ่งการศึกษานี้สเตเตอร์มีลักษณะเป็นคานโค้งทำหน้าที่ขับให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ตามแนวของคาน โดยอาศัยคลื่นเคลื่อนที่ (traveling wave) การเกิดคลื่นเคลื่อนที่นี้จะอาศัยตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกติดบนคานโค้ง ที่ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าส่งผลให้มีแรงไปกระทำต่อสเตเตอร์ทำให้เกิดการสั่นเกิดขึ้น เนื่องจากตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติคือ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด ดังนั้นเมื่อนำไปติดบนคานโค้งในรูปแบบที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ และกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าฮาร์โมนิกทำให้คานเกิดการสั่นสะเทือนส่งผลให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่ขึ้น

อัลตราโซนิกมอเตอร์สามารถนำมาใช้เป็นตัวทำงานในอุปกรณ์สมัยใหม่ เช่น ควบคุมการเคลื่อนที่ของเลนส์ในกล้องถ่ายรูป ซึ่งส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้งานจากอัลตราโซนิกมอเตอร์ทั้งสองรูปแบบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ในปัจจุบันยังมีงานอีกเป็นจำนวนมากที่ต้องการการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นโค้ง [8-9] เช่นการปรับองศาของกล้องจับภาพ

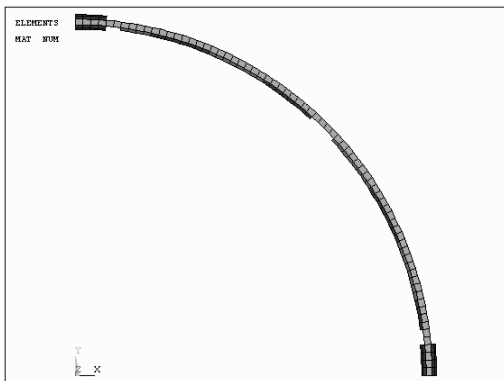
หรือข้อต่อของหุ่นยนต์ ลักษณะของคลื่นที่เกิดในอัลตราโซนิคมอเตอร์เชิงเส้นโค้งเป็นแบบเดียวกับคลื่นที่เกิดขึ้นกับคานโค้งหรือวัสดุที่มีขอบเขตจำกัดอื่นๆ แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้งเมื่อจำนวนเอลิเมนต์บนสเตเตอร์เปลี่ยนไปและผลของการจัดวางวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนต่อคลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์

## 2. แบบจำลองสเตเตอร์ของอัลตราโซนิคมอเตอร์เชิงเส้นโค้ง

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ 1) ศึกษาผลของการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ต่อการเกิดคลื่นเคลื่อนที่ และ 2) ศึกษาผลของตำแหน่งการจัดวางวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนบนสเตเตอร์ต่อพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง

### 2.1 การแบ่งเอลิเมนต์

รูปที่ 1 แสดงลักษณะการจัดวางตัวทำงานบนสเตเตอร์ที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้ คลื่นจะเคลื่อนที่สม่ำเสมอตลอดคานโค้งและการเกิดคลื่นบนคานโค้งเกิดจากการติดตัวทำงานถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดแรงและโมเมนต์ดัดบนคานโค้ง



รูปที่ 1 แสดงลักษณะการจัดวางตัวทำงานบนสเตเตอร์ที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่

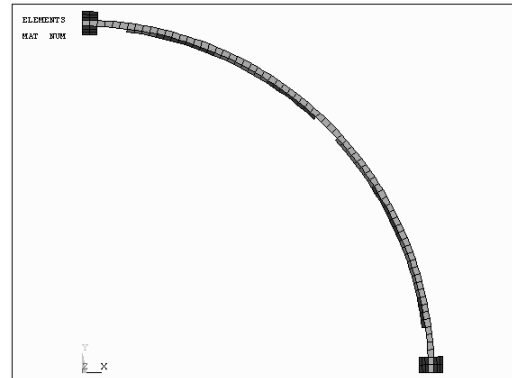
กรณีศึกษานี้คานโค้งมีรัศมีของคานโค้ง  $R=60$  mm, กว้าง  $b=9$  mm, และหนา  $h=1$  mm โดยที่คานโค้งมีมุมเปิด  $\phi_c=\pi/2$  และใช้ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกชนิด Lead Zirconate Titanate (PZT) ที่มีความหนา  $h^p=0.5$  mm ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกที่ติดบนคานโค้งมีขนาดความยาว  $\lambda/2$  หรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น จากนั้นกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า  $A\cos(\omega t)$  และ  $A\sin(\omega t)$  บนตัวทำงานตามลำดับ เมื่อ  $A$  คือขนาดของแอมพลิจูด และ  $\omega$  คือความถี่ทำงาน,  $t$  คือเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4

### 2.2 การจัดวางวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือน (Damping material)

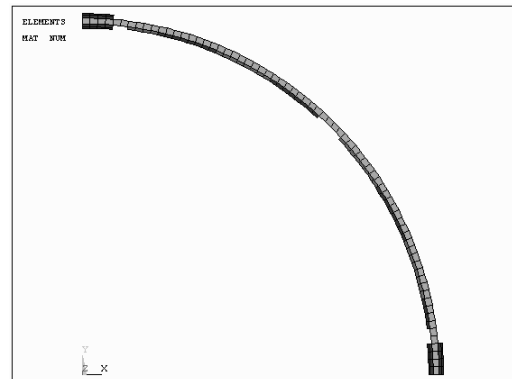
การศึกษาการจัดวางวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนบนสเตเตอร์ มีสองรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบทั้งสองสามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ที่เหมาะสมบนคานโค้งได้ โดยการติดตัวทำงานทั้งสองรูปแบบปริมาตรของวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนเท่ากันแต่

ความยาวไม่เท่ากัน  
เท่ากับกับรูปแบบที่ 1

ส่วนขนาดของคานโค้งและตัวทำงานมีขนาด

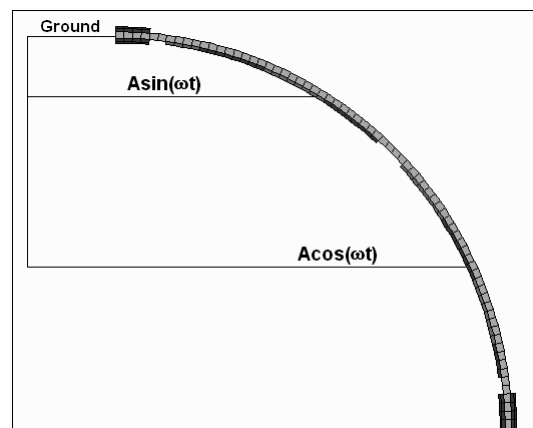


รูปที่ 2 แสดงลักษณะการติดวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนแบบสั้น



รูปที่ 3 แสดงลักษณะการติดวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนแบบยาว

จากนั้นกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า  $A\cos(\omega t)$  และ  $A\sin(\omega t)$  บนตัวทำงานดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงลักษณะการกระตุ้นสัญญาณไฟฟ้าบนตัวทำงานของ

รูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 3

อย่างไรก็ตามเมื่อกระตุ้นตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรง  $N^c \phi$  (Membrane Force) และโมเมนต์ดัด  $M^c \phi$  (Bending Moment) การหาค่าของแรงและโมเมนต์ดังกล่าว

สามารถใช้สมการของเลฟ (Love's Equation) หาสมการการเคลื่อนที่ของระบบได้ ดังสมการ

$$-\frac{\partial(N_{11}A_2)}{\partial\alpha_1} - \frac{\partial(N_{21}A_1)}{\partial\alpha_2} - N_{12}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} + N_{22}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} - A_1A_2\frac{Q_{13}}{R_1} + A_1A_2\rho h\ddot{u}_1 = A_1A_2q_1 \quad (1)$$

$$-\frac{\partial(N_{12}A_2)}{\partial\alpha_1} - \frac{\partial(N_{22}A_1)}{\partial\alpha_2} - N_{21}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} + N_{11}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} + A_1A_2\frac{Q_{23}}{R_2} + A_1A_2\rho h\ddot{u}_2 = A_1A_2q_2 \quad (2)$$

$$-\frac{\partial(Q_{13}A_2)}{\partial\alpha_1} - \frac{\partial(Q_{23})}{\partial\alpha_2} + A_1A_2\left(\frac{N_{11}}{R_1} + \frac{N_{22}}{R_2}\right) + A_1A_2\rho h\ddot{u} = A_1A_2q_3 \quad (3)$$

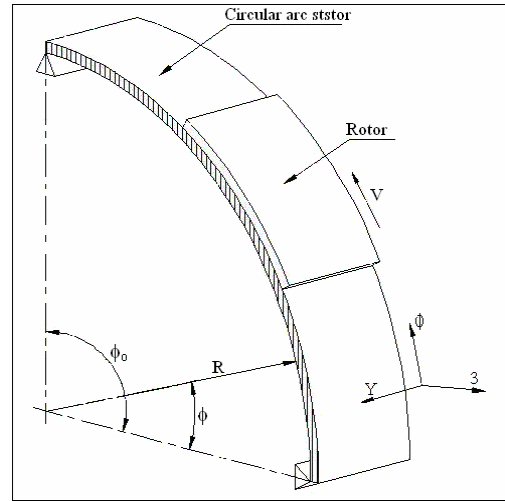
เมื่อ  $p$  คือความหนาแน่นของวัสดุ,  $q_i$  คือแรงภายนอก,  $Q_{13}$  และ  $Q_{23}$  สามารถหาได้จากสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \frac{\partial(M_{11}A_2)}{\partial\alpha_1} + \frac{\partial(M_{21}A_1)}{\partial\alpha_2} + M_{12}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} - M_{22}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} - Q_{13}A_1A_2 &= 0 \\ \frac{\partial(M_{12}A_2)}{\partial\alpha_1} + \frac{\partial(M_{22}A_1)}{\partial\alpha_2} + M_{21}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} - M_{11}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} - Q_{23}A_1A_2 &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

กรณีศึกษาที่สมมติให้สเตเตอร์มีลักษณะเป็นคานที่มีความหนาน้อยมาก (Thin beam) เมื่อนำความกว้างของคานเทียบกับรัศมีความโค้งมีค่าน้อยมากจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางของ  $y$  เนื่องจากความเค้นและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับศูนย์รวมถึงการยืดหดในแนวแกน  $y$  ก็มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย และสามารถหาค่า  $A_1$ ,  $A_2$  และ  $R_1$ ,  $R_2$  ได้จากสมการของ infinitesimal displacement,

$$(ds)^2 = (Rd\theta)^2 + (dy)^2 \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) จะได้ Lamé's Parameter  $A_1=R$ ,  $A_2=1$ , และ Radii of Curvature  $R_1=R$ ,  $R_2=\infty$  จากนั้นนำค่า Lamé's Parameter และ Radii of Curvature แทนลงในสมการของเลฟ (Love's Equation) โดยเปลี่ยนทิศทาง 1 ไปเป็นทิศทาง  $\phi$  ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างระบบของคานโค้ง

ทำให้สมการการเคลื่อนที่ของระบบลดรูปลงเหลือ

$$\frac{\partial(N_{\phi\phi})}{\partial\phi} + Q_{\phi 3} + Rq_{\phi} = R\rho h\frac{\partial^2 u_{\phi}}{\partial t^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_{\phi 3}}{\partial\phi} - (N_{\phi\phi}) + Rq_3 = R\rho h\frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (8)$$

$$Q_{\phi 3} = \frac{1}{R}\frac{\partial(M_{\phi\phi})}{\partial\phi} \quad (9)$$

เมื่อ  $N_{\phi\phi}$  คือ แรงกระทำ,  $M_{\phi\phi}$  คือโมเมนต์ดัด,  $Q_{\phi 3}$  คือความเค้นเฉือน จากนั้นแทนค่า  $N_{\phi\phi}$ ,  $M_{\phi\phi}$  และ  $Q_{\phi 3}$  แทนในสมการที่ (7) ถึงสมการที่ (9) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบในทิศทางของ  $\phi$  และทิศทาง 3 ตามลำดับ

$$\frac{D}{R^4}\left(\frac{\partial^2 u_{\phi}}{\partial\phi^2} - \frac{\partial^3 u_3}{\partial\phi^3}\right) + \frac{K}{R^2}\left(\frac{\partial^2 u_{\phi}}{\partial\phi^2} + \frac{\partial u_3}{\partial\phi}\right) + q_{\phi} = \rho h\frac{\partial^2 u_{\phi}}{\partial t^2} \quad (10)$$

$$\frac{D}{R^4}\left(\frac{\partial^3 u_{\phi}}{\partial\phi^3} - \frac{\partial^4 u_3}{\partial\phi^4}\right) - \frac{K}{R^2}\left(\frac{\partial u_{\phi}}{\partial\phi} + u_3\right) + q_3 = \rho h\frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (11)$$

การหาค่าความถี่ธรรมชาติ ( $f_k$ ) และ mode shape ( $u_{ij}$ ) สามารถหาได้จากสมการ ; [Smithmaitrie,2004]

กรณีเมื่อ  $k = 2,4,6,\dots$

$$f_k = \frac{k^2\pi^2}{2\pi(R\phi_0)^2} \left[ \frac{\left(1 - \left(\frac{\phi_0}{k\pi}\right)^2\right)^2}{1 + 3(\phi_0/k\pi)^2} \right]^{1/2} \sqrt{\frac{YI}{\rho h b}}; k = 2,4,6 \quad (12)$$

$$U_{\phi k} = \frac{\phi_0}{k\pi} \left[ 1 - \cos\left(\frac{k\pi\phi}{\phi_0}\right) \right]; k = 2,4,6 \quad (13)$$

$$U_{3k} = -\sin\left(\frac{k\pi\phi}{\phi_0}\right); k = 2,4,6 \quad (14)$$

กรณีเมื่อ  $k = 1, 3, 5, \dots$

$$f_k = \frac{k^2 \pi^2}{2\pi(R\phi_o)} \left[ \frac{(1 - (\phi_o/k\pi)^2)^2}{1 + \frac{1}{k^2} + 2\left(\frac{\phi_o}{k\pi}\right)^2} \right]^{1/2} \sqrt{\frac{YI}{\rho h b}}; k = 3, 5, 7 \quad (15)$$

$$U_{\phi k} = -\frac{\phi_o}{k\pi} \left[ \cos\left(\frac{k\pi\phi}{\phi_o}\right) - \frac{1}{\pi^3} \cos\left(\frac{\pi\phi}{\phi_o}\right) \right]; k = 3, 5, 7 \quad (16)$$

$$U_{3k} = -\sin\left(\frac{k\pi\phi}{\phi_o}\right) + \frac{1}{k} \sin\left(\frac{\pi\phi}{\phi_o}\right); k = 3, 5, 7 \quad (17)$$

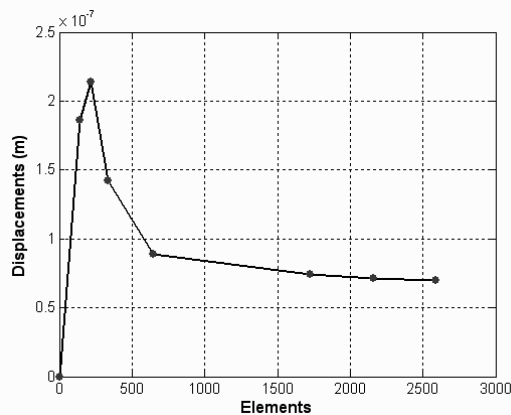
เมื่อ  $k$  = โหมดของการสั่น (mode number)

$\phi$  = ตำแหน่งเชิงมุม (angular position)

$\phi_o$  = มุมเปิดทั้งหมดของคานโค้ง (opening angle of the arc)

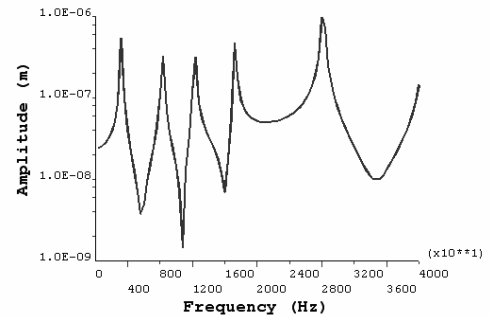
### 3. ผลการคำนวณ

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าหากจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองมีน้อย ค่าความสูงของคลื่นจะมีค่าน้อยและเมื่อจำนวนเอลิเมนต์เพิ่มขึ้นค่าความสูงของคลื่นจะเข้าสู่ที่จำนวนเอลิเมนต์ประมาณ 1700 เอลิเมนต์ และต่อจากนั้นเมื่อเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ขึ้นอีกความสูงของคลื่นจะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก

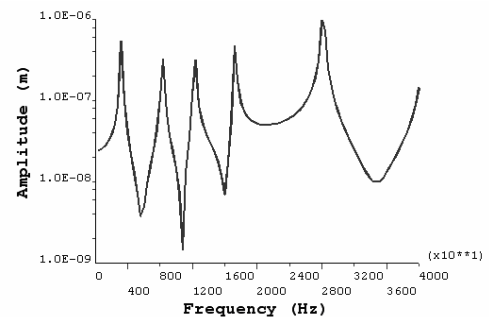


รูปที่ 6 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองกับความสูงของคลื่นเคลื่อนที่

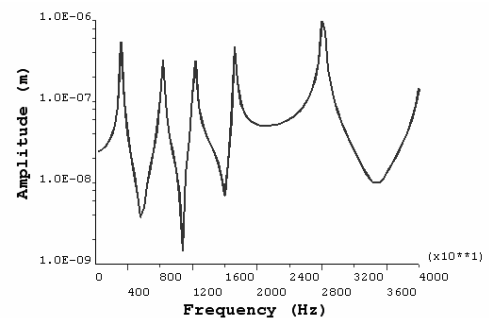
จากรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 9 การตอบสนองต่อความถี่ไม่มีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะกราฟรูปที่ 7 ซึ่งไม่ได้ติดตั้งวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนก็มีลักษณะเหมือนกับรูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการจัดวางวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือน (Damping material) ไม่มีผลต่อการตอบสนองของสเตเตอร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง แต่จากการสังเกตพฤติกรรมของคลื่นที่เกิดขึ้นพบว่าหากไม่ติดตั้งวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนบนสเตเตอร์จะทำให้คลื่นเคลื่อนที่เสียรูปได้เมื่อเคลื่อนที่มาถึงบริเวณจุดรองรับซึ่งเกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นลูกก่อนหน้าเป็นผลให้คลื่นที่ตามมาเสียรูปได้



รูปที่ 7 แสดงการตอบสนองต่อความถี่กรณีไม่ติดตั้งวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนบนสเตเตอร์



รูปที่ 8 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของรูปแบบกรณีติดตั้งวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนแบบสั้น



รูปที่ 9 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของรูปแบบกรณีติดตั้งวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนแบบยาว

### 4. สรุป

จากผลของการจำลองแบบสเตเตอร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งสรุปได้ว่า ผลการคำนวณค่าความสูงและความถี่ของคลื่นเคลื่อนที่จะเข้าสู่เมื่อจำนวนเอลิเมนต์ที่แบ่งมีค่ามากขึ้น นอกเหนือจากนี้วัสดุดูดซับการสั่นสะเทือน (Damping material) ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าทำให้การสะท้อนของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระทบกับจุดรองรับมีน้อยและทำให้คลื่นที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์มีเสถียรภาพมากขึ้น แต่ขนาดความยาวของวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนไม่ส่งผลกระทบต่อคลื่นเคลื่อนที่และค่าความแข็งตึง (Stiffness) ของสเตเตอร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ รวมถึงสถานที่ใช้ในการทำวิจัยและ  
ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุน  
สนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] Hemsell, T., and Wallaschek, J., 2000. Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors. *Ultrasonics* 38 (2000), pp. 37-40.
- [2] Hermann, M., and Schinkothe, W(IKFF)., 1999. Piezoelectric traveling wave motors generating direct linear motion. *Conference Proceeding, Bremen* 26, 28 June 1996, pp. 200-203
- [3] Yongrae, R., Susung, L., and Wooseok, H., 2001. Design and fabrication of a new traveling wave-type ultrasonic linear motor. *Sensors and Actuators A* 94 (2001), pp. 205-210.
- [4] Ueha, S., Tomikawa, Y., Kurosawa, M., and Nakamura, N., 1993. *Ultrasonic Motors Theory and Applications*. Clarendon Press, Oxford, UK.
- [5] Sashida, T., and Kenjo, T., 1993. *An Introduction to Ultrasonic Motors*. Clarendon Press, Oxford.
- [6] Lih, S.S., Bar-Cohen, Y., and Grandia, W., 1997. Rotary Ultrasonic Motor Actuated By Traveling Fluxural Wave. *Smart Structures and Integrated Systems*, San Diego, CA, 3-6 March, pp. 912-917
- [7] Bar-Cohen, Y., Bao, X., and Grandia, W., 1999. Rotary Ultrasonic Motors Actuated By Traveling Flexural Wave. *Proceedings of SPIE's 6<sup>th</sup> Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, 1-5 March, pp. 698-704
- [8] Smithmaitrie, P., and Tzou, H.S., 2005. Electro-dynamics, micro-actuation and design of arc stators in an ultrasonic curvilinear motor. *Journal of Sound and Vibration* 284 (2005), pp. 635-650.
- [9] Soedel, W., 1993. *Vibrations of Shells and Plate*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [10] Uchino, K., 1997. *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [11] Tzou, H.S., 1993. *Piezoelectric Shell (Distributed Sensing and Control of Continua)*. Kluwer Academic, Boston/Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [12] Frangi, A., Corigliano, A., Binci, M., and Faure, P., 2005. Finite element modeling of a rotating piezoelectric ultrasonic motor. *Ultrasonoics* 43 (2005), pp. 747-755.
- [13] Sun, D., Liu, J., and Ai, X., 2002. Modeling and performance evaluation of traveling-wave piezoelectric ultrasonic motors with analytical method. *Sensor and Actuators A* 100 (2002), pp. 84-93.