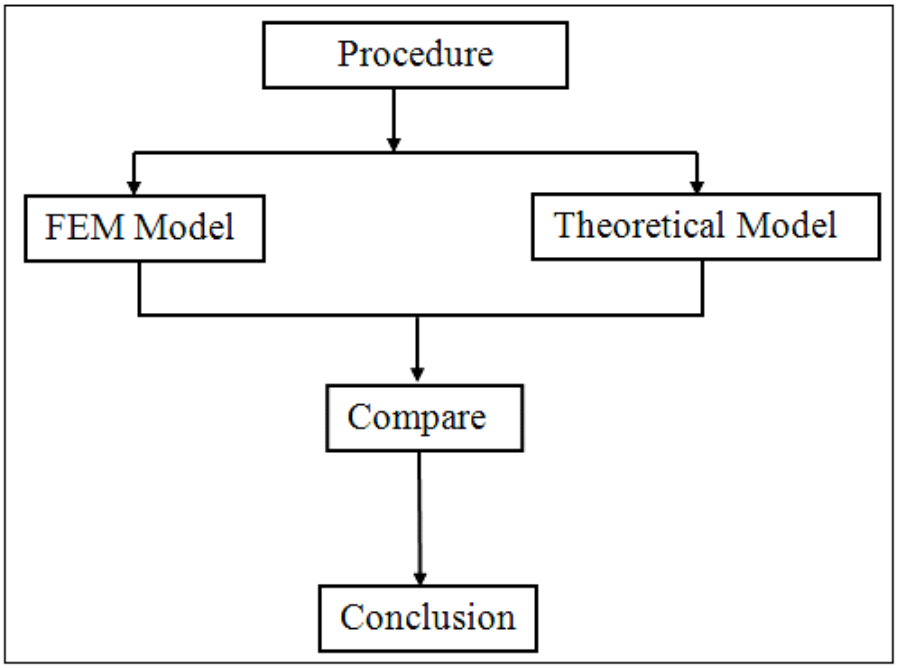
# บทที่ 3

# วิธีการวิจัย

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง ส่วนในบทนี้จะได้กล่าวถึงวิธีและขั้นตอนของการวิจัยเกี่ยวกับมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง ซึ่งได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลโดยการจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะได้อธิบายขั้นตอนวิธีการจำลองแบบอัลตราโซนิกมอเตอร์เชิงเส้นโค้งตามภาพประกอบที่ 3.1

## 3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนการวิจัยหลักซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.1

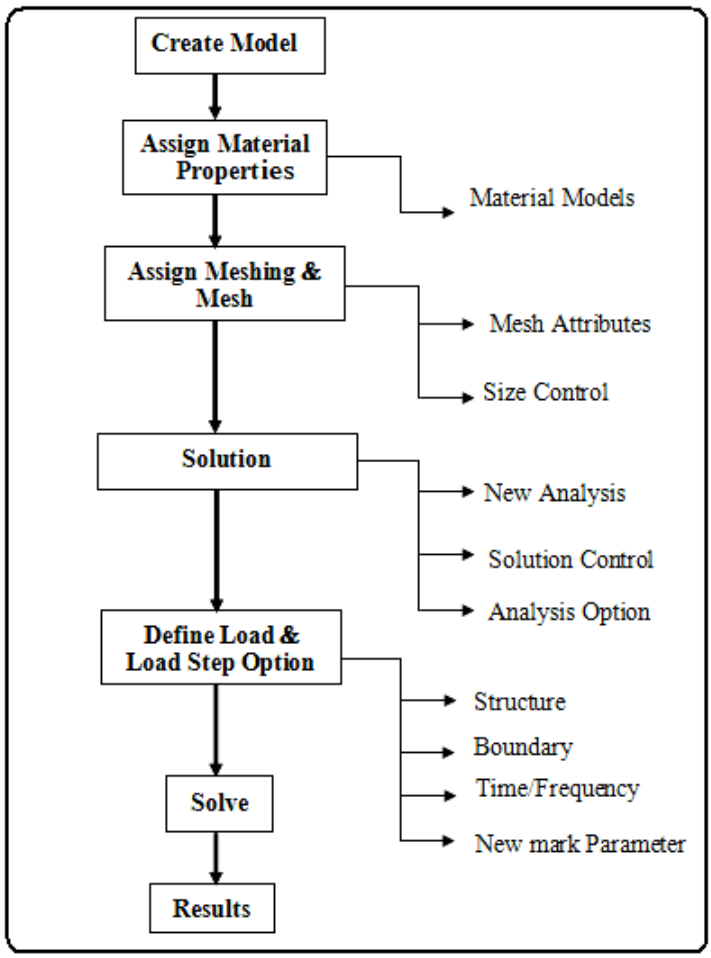



ภาพประกอบที่ 3.1 แสดงขั้นตอนของการวิจัย

การศึกษาการจำลองแบบมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. **Theoretical Analysis** คือ ศึกษาโดยอาศัยสมการการเคลื่อนที่ของอัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งที่นำเสนอในบทที่ 2 โดยกรณีศึกษานี้กำหนดให้ Lame's Parameter $A_1 = R$, $A_2 = 1$ และ Radii of Curvature $R_1 = R$, $R_2 = \infty$ และกรณีศึกษานี้สมมุติให้น้ำหนักของตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ และในทิศทาง y ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงขนาดรวมทั้งความเค้นและความเครียด ดังนั้นจึงพิจารณาสองทิศทางคือ ทิศทาง $\phi$ ($\phi = \alpha_1$) และทิศทาง 3($\phi = \alpha_3$) ซึ่งใช้สมการการเคลื่อนที่ของเลิฟในการทำนายพฤติกรรมของคานโค้ง เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงฮาร์โมนิกส์

2. **FEM Model** คือการจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเขียนแบบจำลองของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งซึ่งมีลักษณะเป็นคานโค้งในรูปแบบที่ติดตัวทำงานเพียโซอิเล็ก-ทริกที่แตกต่างกันตามที่ออกแบบไว้ จากนั้นกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าบนตัวทำงานด้วยสัญญาณไฟฟ้า $\cos(\omega t)$ และ $\sin(\omega t)$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบด้วยว่าจะกระตุ้นไฟฟ้า $\cos(\omega t)$ และ $\sin(\omega t)$ ที่ผิวด้านบนหรือด้านล่างของสเตเตอร์ จากนั้นทำการหาค่าความถี่ที่เหมาะสมที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ที่มีลักษณะเสถียรภาพคือคลื่นจะเคลื่อนที่ทิศทางเดียวตลอดคานโค้งและมีลักษณะการเคลื่อนที่สม่ำเสมอ โดยทำการเปลี่ยนค่าความถี่จากความถี่ต่ำไปยังความถี่สูงจนสามารถพบความถี่ที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้ ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.2




ภาพประกอบที่ 3.2 ขั้นตอนการจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**ขั้นตอนที่ 1 : การสร้างแบบจำลอง (Create Modeling):** เป็นขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์ให้มีลักษณะเหมือนกับรูปร่างลักษณะและขนาดเท่ากับมอเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการเพื่อใช้ในการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยคานโค้งมีขนาดรัศมีความโค้งเท่ากับ 60 mm หนา 1 mm ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกและวัสดุดูดซับแรงกระแทกมีความหนาเท่ากับ 0.5 mm และความยาวของตัวทำงานมีความยาวเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นและวัสดุดูดซับแรงระแทกมีความยาวครึ่งหนึ่งของตัวทำงาน

**ขั้นตอนที่ 2 : คุณสมบัติของวัสดุ (Assign Material Properties):** เป็นขั้นตอนของการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างของมอเตอร์อัลตราโซนิกส์เชิงเส้นโค้งซึ่งวัสดุที่ใช้ในการจำลองมีสามชนิดด้วยกันคือ เหล็กใช้ทำเป็นโครงสร้าง วัสดุเพียโซอิเล็กทริกใช้เป็นตัวทำงาน และวัสดุดูดซับแรงกระแทกใช้สำหรับการป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่น โดยไม่คำนึงถึงน้ำหนักของตัวทำงานและ

วัสดุดูดซับแรงกระแทก คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งแสดงตามตารางที่ 3.1 และกรณีที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ทำจากโพลิเมอร์เป็นตัวทำงานจะใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุกรณีใช้ตัวทำงาน PZT-4 (Smithmaitrie and Tzou, 2005)

| | Lead Zirconate Titanate PZT-4 actuator | Steel circular arc | Silicon rubber damping material | Unit |
|---|---|---|---|---|
| Young's modulus | 80 ($Y_p$) | 210 ($Y_p$) | $4.2x10^{-3}$ ($Y_d$) | GPa |
| Density | 7550 ($\rho_p$) | 7850 ($\rho_{stator}$) | 1510 ($\rho_d$) | $kg/m^3$ |
| Posson's ratio | 0.34 ($\mu_p$) | 0.27 ( $\mu_{stator}$) | 0.45 ($\mu_d$) | |
| Damping coefficient | - | - | 0.002 | |
| Piezoelectric constant | | - | - | |
| $d_{31}$ | $-1.2x\ 10^{-10}$ | - | - | m/V |
| $e_{33}$ | 15.1 | - | - | $C/m^2$ |
| $e_{31}$ | 15.1 | - | - | $C/m^2$ |
| $e_{15}$ | 12.7 | - | - | $C/m^2$ |
| Permittivity | $1.15x10^{-8}$ ($\varepsilon_{33}$) | - | - | F/m |

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุกรณีใช้ตัวทำงาน PVDF (Smithmaitrie, 2004)

| | Lead Zirconate Titanate PZT-4 actuator | Steel circular arc | Silicon rubber damping material | Unit |
|---|---|---|---|---|
| Young's modulus | 2 ($Y_p$) | 210 ($Y_p$) | $4.2x10^{-3}$ ($Y_d$) | GPa |
| Density | 1780 ($\rho_p$) | 7850 ($\rho_{stator}$) | 1510 ($\rho_d$) | $kg/m^3$ |
| Posson's ratio | 0.29 ($\mu_p$) | 0.27 ( $\mu_{stator}$) | 0.45 ($\mu_d$) | |
| Damping coefficient | - | - | 0.002 | |
| Piezoelectric constant | | - | - | |
| $d_{31}$ | $-23x\ 10^{-12}$ | - | - | m/V |
| $e_{33}$ | 0.0372 | - | - | $C/m^2$ |
| $e_{31}$ | -0.0496 | - | - | $C/m^2$ |
| $e_{15}$ | 0.0016 | - | - | $C/m^2$ |
| Permittivity | $1.062x10^{-10}$ ($\varepsilon_{33}$) | - | - | F/m |

**ขั้นตอนที่ 3 : Assign Meshing & Mesh**: มีขั้นตอนย่อยสองขั้นตอนคือ Mesh Attributed เป็นขั้นตอนของการระบุว่าในโครงสร้างมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งตำแหน่งใดติดวัสดุประเภทใด และ Size Control เป็นการกำหนดขนาดของแบ่งเอลิเมนต์ เนื่องจากลักษณะของมอเตอร์เป็นคานโค้ง จำนวนของเอลิเมนต์มีผลต่อค่าความแม่นยำในการคำนวณกล่าวคือหากมีเอลิเมนต์จำนวนมากก็จะทำให้ค่าที่ได้เข้าใกล้ความเป็นจริงมากขึ้น แต่ขณะเดียวกันเวลาที่ใช้และประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ก็จะต้องมากและสูงตามไปด้วย จึงต้องแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ให้เหมาะสม

**ขั้นตอนที่ 4 : Solution:** ขั้นตอนนี้สามารถแบ่งเป็นสามขั้นตอนย่อยด้วยกันคือ การเลือกวิธีเคราะห์เพื่อที่โปรแกรมจะได้เลือกวิธีคำนวณ เช่นหากเป็นการคำนวณแบบ Transient ผลการคำนวณจะแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นออกมา โดยในขั้นตอน Solution Control ต้องกำหนดค่า Time Step ซึ่งในที่นี้

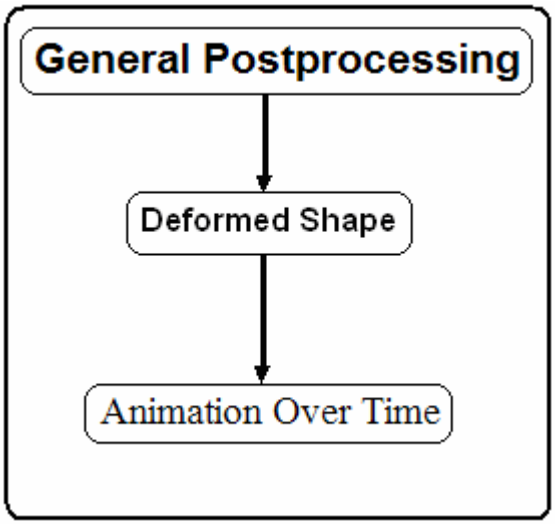
มีค่าเท่ากับ 0.0027 วินาที ส่วนค่าจำนวนของ sub step เท่ากับ 996 และ Analysis Options เป็นการระบุวิธีการคำนวณผลซึ่งในที่นี้ใช้วิธีการคำนวณแบบ Sparse Solver

**ขั้นตอนที่ 5 : Define Loads & Load Step Option:** เป็นขั้นตอนของการกำหนดค่าลงในโปรแกรมที่สำคัญสองค่าคือ แรงกระทำ และ Boundary Condition โดยในที่นี้ขั้นตอนของการกำหนดเงื่อนไขขอบซึ่งจะต้องเปลี่ยนโคออร์ดิเนตจากคาร์ทีเซียนไปเป็นทรงกระบอกเสียก่อน ต่อจากนั้นจะกำหนดเงื่อนไขขอบ คือที่ node ตรงกลางของคานโค้งจะทำการยึดทั้งแกน R และแกน θ ส่วนที่ node อื่นๆ จะยึดเฉพาะแกน θ เท่านั้น ส่วนการกระตุ้นไฟฟ้าบนตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกนั้นจะกระตุ้นด้วย Acos(ωt) ที่ผิวด้านบนและ Asin(ωt) ที่ผิวด้านล่างของลักษณะที่ 1 ส่วนลักษณะที่ 2 จะกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า Acos(ωt) ที่กลุ่มที่ติดบริเวณขอบด้านล่างของคานและกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า Asin(ωt) ที่ติดบริเวณขอบด้านบนของคานโค้ง ซึ่งลักษณะนี้จะติดตัวทำงานเฉพาะที่ผิวด้านล่างเท่านั้น และลักษณะที่ 3 ซึ่งเป็นลักษณะสุดท้ายจะกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า Acos(ωt) ที่กลุ่มของคลื่น cosine และกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า Asin(ωt) ที่กลุ่มของคลื่น sine สิ่งที่จะเปลี่ยนค่าได้ในขั้นตอนนี้คือค่าความถี่ (ω) ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ความถี่ทำงานที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ที่เหมาะสม จากนั้นทำการกำหนดค่ารายละเอียดต่างๆ ที่ใช้คำนวณเพิ่มเติมเพื่อให้โปรแกรมสามารถคำนวณค่าได้

**ขั้นตอนที่ 6 : Solve:** เมื่อทำทุกขั้นตอนแล้วขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่สั่งให้ทำการคำนวณ เวลาที่ใช้คำนวณขึ้นกับจำนวนเอลิเมนต์และประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์

**ขั้นตอนที่ 7 : ผลการคำนวณ (Results):** เป็นขั้นตอนของการดูผลการจำลองซึ่งวิธีการแสดงดังภาพประกอบที่ 3.3 ผลการคำนวณที่สนใจคือ ความถี่ที่กระตุ้นกับการตอบสนองของคลื่นที่เกิดขึ้น คลื่นเคลื่อนที่ที่เหมาะสมจะมีลักษณะเคลื่อนที่ไปทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างสม่ำเสมอตลอดคานโค้ง หากคลื่นที่ได้มีลักษณะดังกล่าวก็ถือว่ารูปแบบการติดตั้งและความถี่กระตุ้นสามารถนำไปออกแบบใช้งานได้ แต่หากไม่ได้ก็จะต้องกลับไปเปลี่ยนความถี่กระตุ้นใหม่จนกว่าจะได้ความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่หรือเรียกว่าความถี่ทำงาน

การแสดงผลการคำนวณเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของคลื่นเคลื่อนที่มีขั้นตอนดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.3




ภาพประกอบที่ 3.3 แสดงขั้นตอนของการแสดงผลของการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

General Postprocessing เป็นหมวดของการแสดงผลหลังจากโปรแกรมคำนวณผลเรียบร้อยแล้ว Plot Results คือคำสั่งที่ใช้แสดงผล เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation shape) นอกจากนี้ยังมีการแสดงผลการเคลื่อนที่ของคลื่นโดยเลือกใช้ animation ซึ่งสามารถระบุช่วงเวลาที่ต้องการให้แสดงผล หากคลื่นที่ได้ไม่ใช่คลื่นเคลื่อนที่ก็จะต้องย้อนกลับไปทำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปลี่ยนความถี่กระตุ้นใหม่จนกว่าจะได้คลื่นเคลื่อนที่หรือสามารถบอกได้ว่ารูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ไม่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้

3. Compare เป็นขั้นตอนการยืนยันความถูกต้องของผลการจำลองที่ได้จากวิธี Theoretical Analysis และ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM Model) โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งค่าที่ใช้คือ ค่าความถี่ทำงาน แอมปลิจูดของคลื่นเคลื่อนที่ และพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลื่นเคลื่อนที่ การเปรียบเทียบผลดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าแบบจำลองของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งถูกต้องหรือไม่ถูกต้อง

4. Conclusion นำค่าที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองจากการเปรียบเทียบผลแล้วมาทำการสรุปผล หากผลที่ได้ทั้งหมดจากทั้งสองวิธีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันถือว่าแบบจำลองนั้นถูกต้อง และจะไม่ถูกต้องหากค่าที่ได้นั้นมีความแตกต่างกัน