

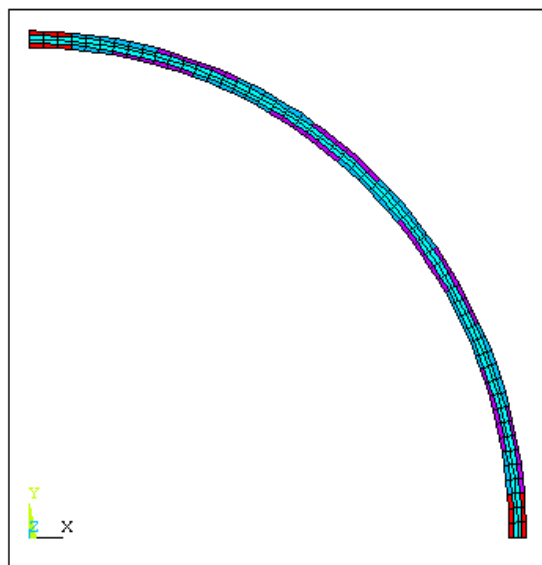
## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งไว้ 3 ลักษณะด้วยกันคือ 1) จัดวางตัวทำงานที่ผิวของคานโค้งทั้งด้านบนและด้านล่างของคาน 2) จัดวางตัวทำงานที่ผิวของคานโค้งเฉพาะด้านล่าง และ 3) จัดวางตัวทำงานที่ผิวของคานโค้งเฉพาะด้านบน และขณะเดียวกันในแต่ละลักษณะยังสามารถแยกย่อยได้อีก ซึ่งในแต่ละแบบย่อยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้คือ ลักษณะที่ 1 ศึกษาตำแหน่งการจัดวางตัวทำงานและผลกระทบของความแข็งตึงของคานโค้งที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ ลักษณะที่ 2 ศึกษาและวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางวัสดุดูดซับแรงกระแทกบนคานโค้ง และลักษณะที่ 3 เพื่อหารูปแบบการจัดวางตัวทำงานที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดเฉพาะผิวด้านบนของคานโค้ง

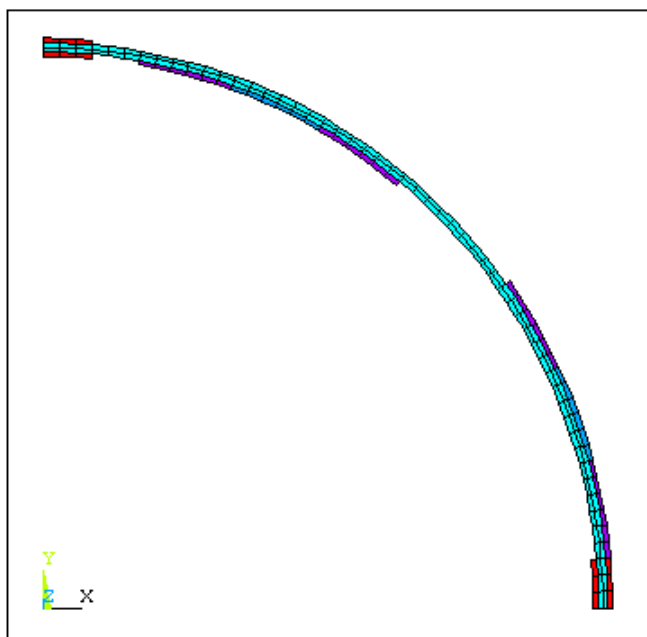
#### 4.1 การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 1 เพื่อศึกษาค่าความแข็งตึงของคานโค้ง

การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 1 สามารถแบ่งออกได้ 5 รูปแบบที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่บนคานโค้ง การจัดวางลักษณะนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับความแข็งตึงของคานโค้งและตำแหน่งการจัดวางตัวทำงาน ที่มีผลต่อการกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.1 ถึงภาพประกอบที่ 4.5 ตามลำดับ

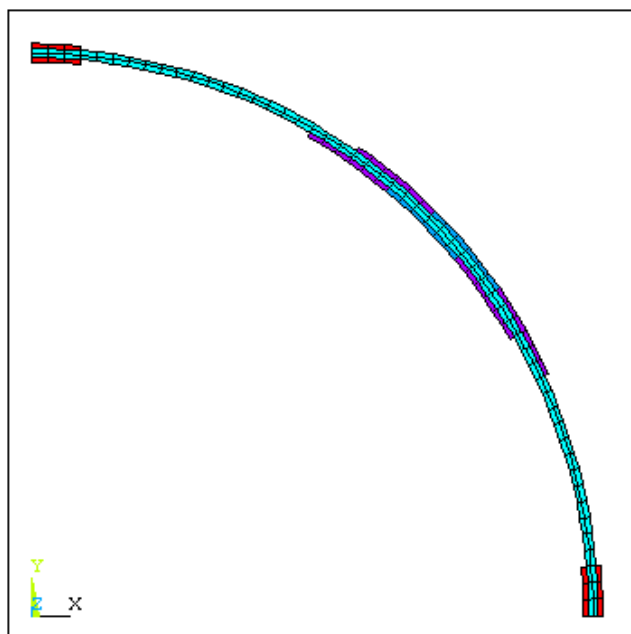


ภาพประกอบที่ 4.1 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งลักษณะที่ 1 รูปแบบที่ 1

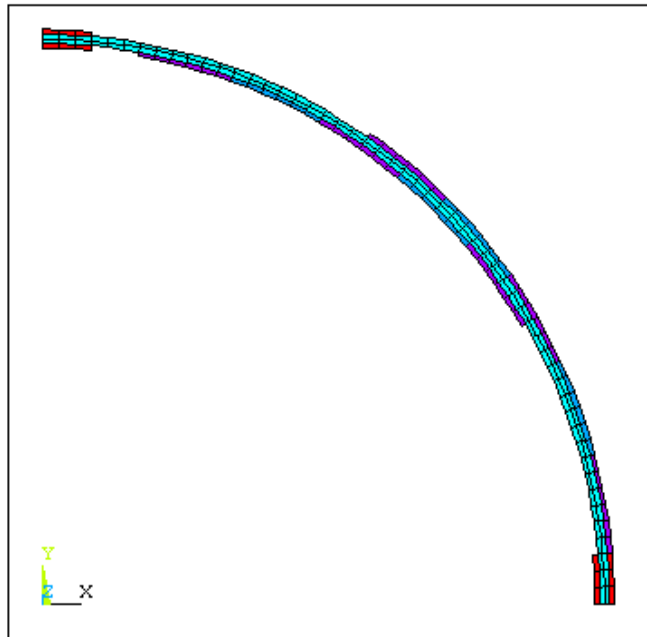
(ที่มา: Smithmairie et al., 2005)



ภาพประกอบที่ 4.2 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งลักษณะที่ 1 รูปแบบที่ 2



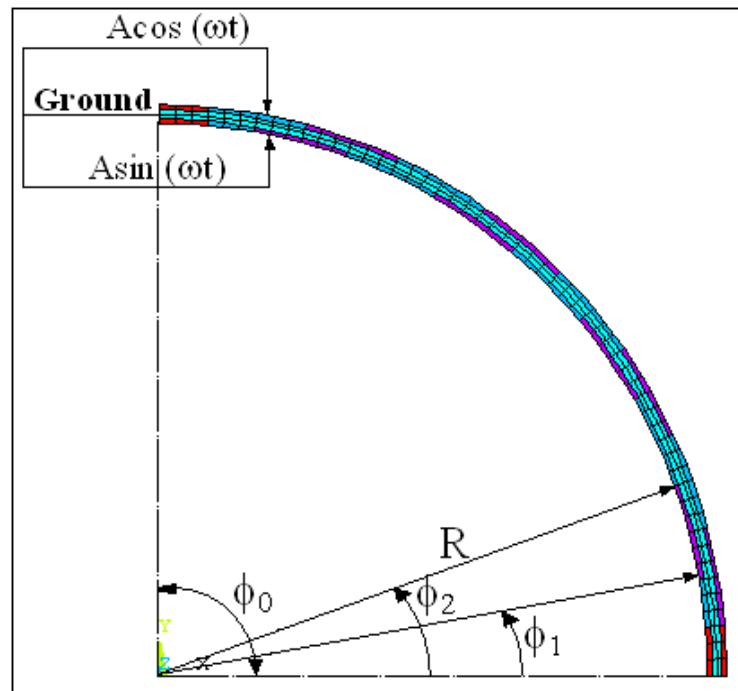
ภาพประกอบที่ 4.3 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งลักษณะที่ 1 รูปแบบที่ 3



ภาพประกอบที่ 4.4 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคาน โค้งลักษณะที่ 1 รูปแบบที่ 4



ภาพประกอบที่ 4.5 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคาน โค้งลักษณะที่ 1 รูปแบบที่ 5

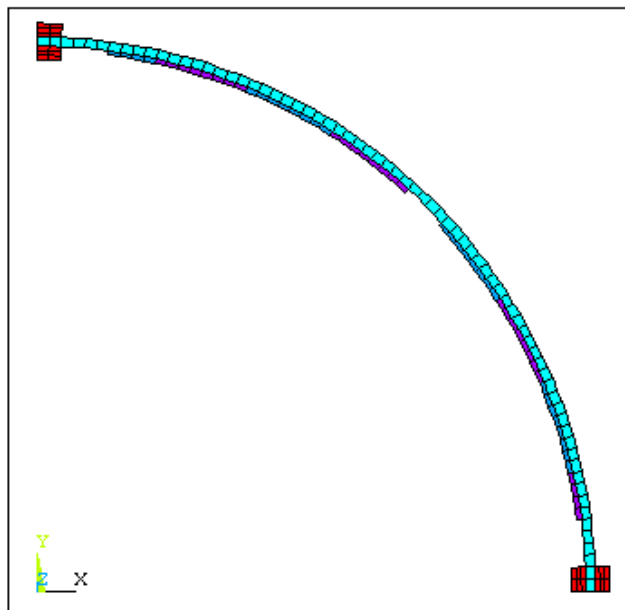


ภาพประกอบที่ 4.6 แสดงลักษณะการกระตุ้นไฟฟ้าบนตัวทำงานลักษณะที่ 1  
(ที่มา: Smithmaitrie et al., 2005)

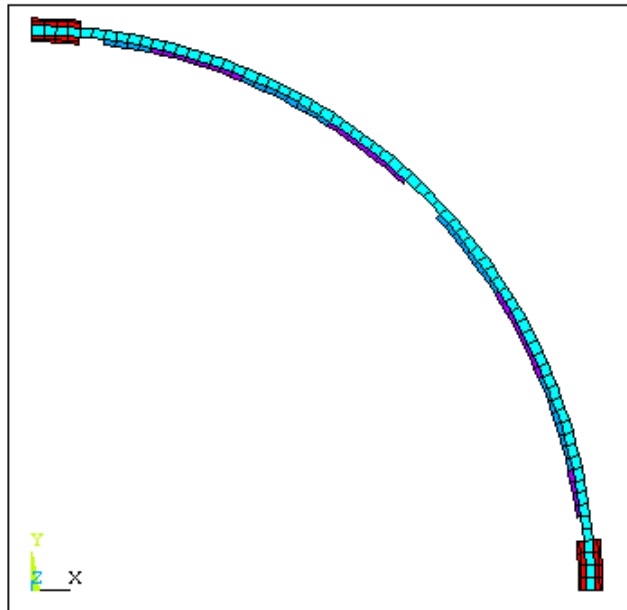
จะเห็นว่าทุกรูปแบบมีการติดตัวทำงานจำนวนไม่เท่ากัน โดยรูปแบบที่ 1 (ภาพประกอบที่ 4.1) มีการติดตั้งตัวทำงานเต็มคานโค้งจำนวนทั้งหมด 17 ชิ้น ส่วนรูปแบบที่ 2 จะถอดตัวทำงานออกบางส่วน วัตถุประสงค์ของการถอดหรือลดจำนวนตัวทำงานลงก็เพื่อจะดูผลความแข็งแรงของคานโค้ง เพราะเมื่อติดตัวทำงานบนคานโค้งน้อยลงจะทำให้ค่าความแข็งแรงของคานลดลงเช่นกัน การลดขนาดของตัวทำงานลงเรื่อยๆ ก็เป็นการลดความแข็งแรงของคานลงเช่นกัน แต่ขนาดของตัวทำงานที่เล็กลงอาจจะไปกระตุ้นรูปแบบการสั่น (vibration mode) อื่นซึ่งไม่ใช่รูปแบบการสั่นที่ต้องการ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นเพื่อคงรูปแบบการสั่นแบบเดิมไว้ การลดค่าความแข็งแรงของคานจึงกระทำด้วยการถอดตัวทำงานออกบางส่วน โดยที่ขนาดของตัวทำงานทุกรูปแบบยังคงมีขนาดเท่ากันแต่จำนวนและตำแหน่งการจัดวางบนคานโค้งต่างกัน

#### 4.2 การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 เพื่อศึกษาขนาดของวัสดุคูดซับแรงกระแทก

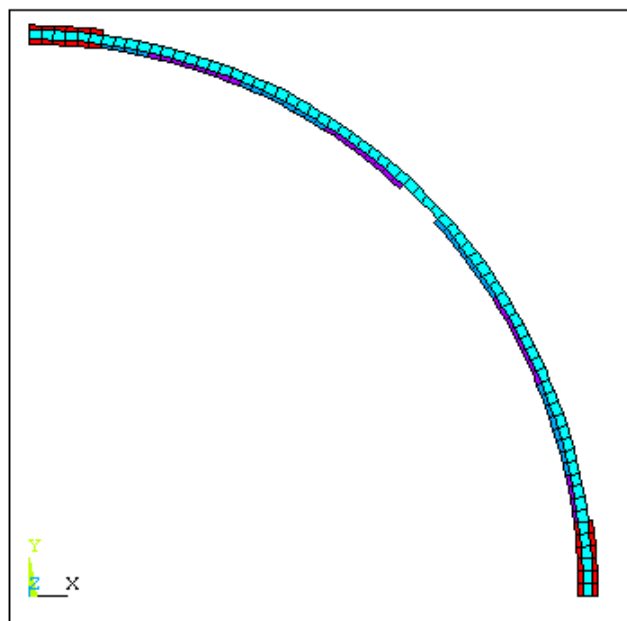
การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดของวัสดุคูดซับแรงกระแทก สามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ โดยมีการจัดวางตัวทำงานเหมือนกันและสามารถกำหนดคลื่นเคลื่อนที่ได้ แต่ทั้งสามรูปแบบจะมีความยาวของวัสดุคูดซับแรงกระแทกต่างกันขณะที่ปริมาตรเท่ากัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.7 ถึงภาพประกอบที่ 4.9 ตามลำดับ



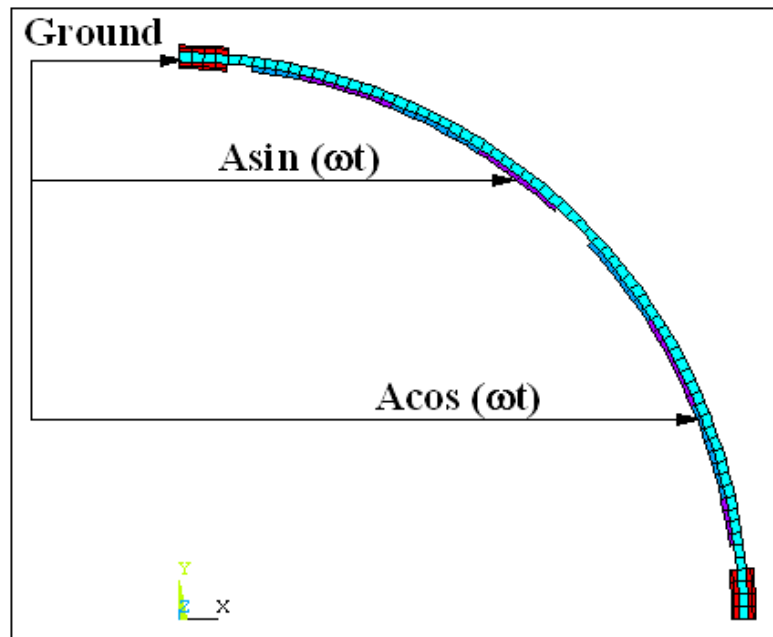
ภาพประกอบที่ 4.7 แสดงการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 และวัสดุคูดซับแรงกระแทกแบบที่ 1



ภาพประกอบที่ 4.8 แสดงการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 และวัสดุคูดซับแรงกระแทกแบบที่ 2



ภาพประกอบที่ 4.9 แสดงการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 และวัสดุคูดซับแรงกระแทกแบบที่ 3

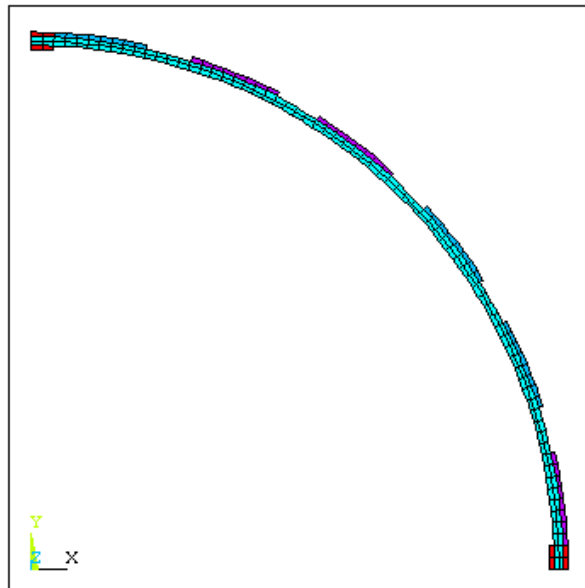


ภาพประกอบที่ 4.10 แสดงลักษณะการกระตุ้นไฟฟ้าบนตัวทำงานลักษณะที่ 2

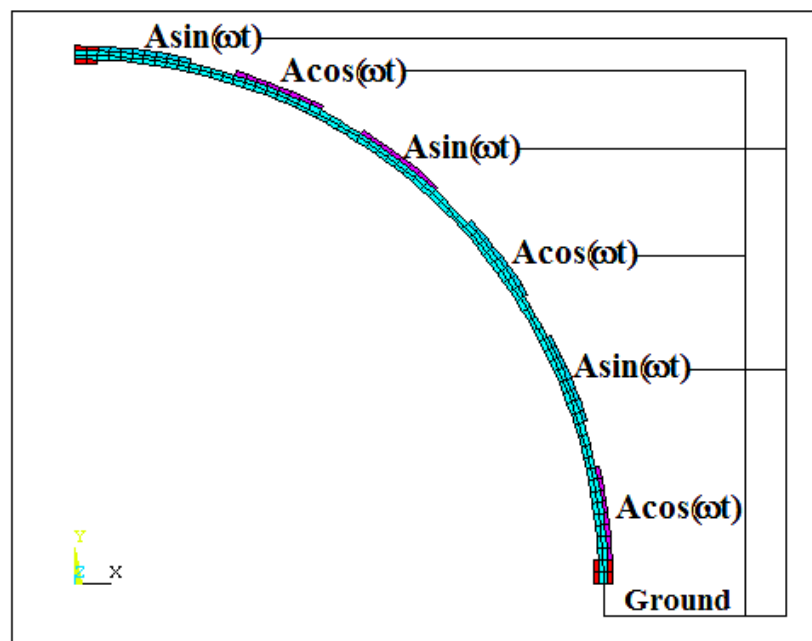
รูปแบบการจัดวางวัสดุคูดซับแรงกระแทกจะมีความยาวไม่เท่ากันดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.7 ถึงภาพประกอบที่ 4.9 ซึ่งมีความยาว 2.5 องศา 5 องศา และ 7.5 องศา ตามลำดับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดของวัสดุคูดซับแรงกระแทกต่อคลื่นเคลื่อนที่เมื่อตำแหน่งการจัดวางแตกต่างกันแต่มีปริมาตรเท่ากัน ในกรณีนี้มีการจัดวางตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric actuator) เหมือนกัน และสามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้ ตามผลการวิเคราะห์คลื่นจะเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกาตลอดคานโค้ง จากนั้นจึงศึกษาผลกระทบจากวัสดุคูดซับแรงกระแทกต่อคลื่นเคลื่อนที่

#### 4.3 การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 เพื่อหารูปแบบการจัดวางตัวทำงานที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดตั้งเฉพาะผิวด้านบนของคานโค้ง

การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 มีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบการจัดวางตัวทำงานที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดตั้งเฉพาะผิวด้านบนของคานโค้ง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.11



ภาพประกอบที่ 4.11 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งลักษณะที่ 3



ภาพประกอบที่ 4.12 แสดงลักษณะการกระตุ้นไฟฟ้าบนตัวทำงานลักษณะที่ 3

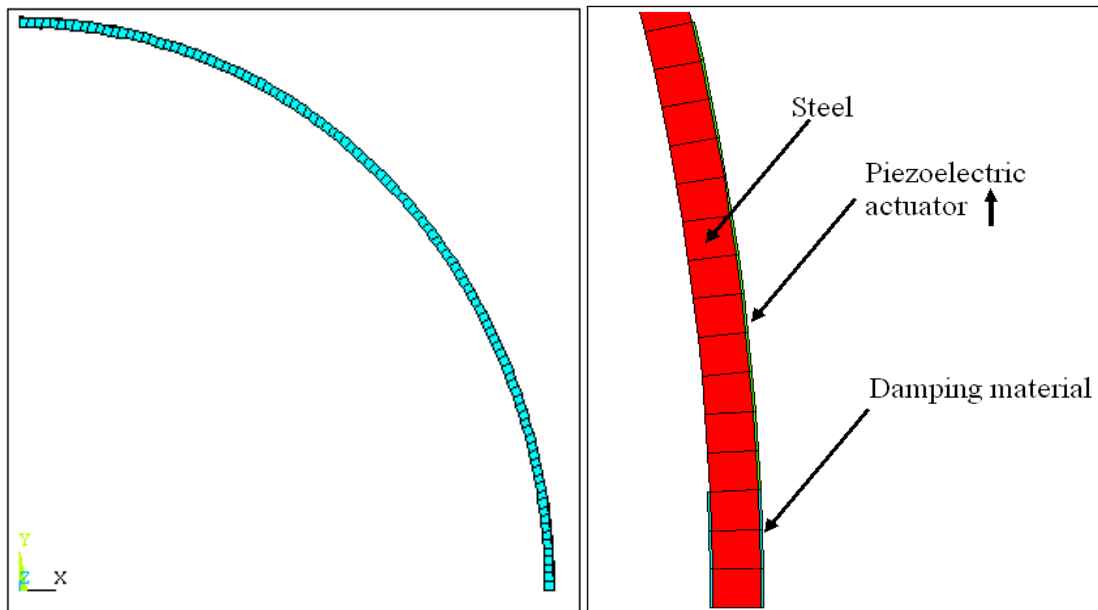
ตัวทำงานในลักษณะที่ 3 จะติดตั้งเฉพาะผิวด้านบนของคานโค้งเท่านั้น โดยแบ่งตัวทำงานออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า  $A\cos(\omega t)$  และ  $A\sin(\omega t)$  ตามลำดับ ซึ่งจะจัดวางในลักษณะสลับกันและวางห่างกัน 5 องศา และมีลักษณะสมมาตรตามแกน  $\theta$  และขอบของ



คาน โค้งจะติดวัสดุดูดซับแรงกระแทกเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนที่มาถึงบริเวณขอบของคาน โค้ง

#### 4.4 การจำลองแบบมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้งโดยใช้ตัวทำงานชนิดโพลีเมอร์ [PVDF]

การหาค่าความถี่ทำงาน แอมพลิจูด และลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเคลื่อนที่ของทุกรูปแบบที่ผ่านมาจะใช้ตัวทำงานชนิดเซรามิก [PZT-4] ตัวทำงานนอกจากทำมาจากเซรามิกแล้วยังสามารถทำมาจากโพลีเมอร์ [PVDF] ซึ่งมีข้อดีคือ ทนต่อการแตกหักได้ดีกว่าวัสดุที่ทำจากเซรามิก ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กับอัลตราโซนิคมอเตอร์ที่ติดตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกโพลีเมอร์เพียงรูปแบบเดียวเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการใช้วัสดุโพลีเมอร์เป็นตัวทำงาน โดยรูปแบบที่เลือกใช้คือ การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 ตัวทำงานและวัสดุดูดซับแรงกระแทกมีความหนาเท่ากับ  $0.05 \times 10^{-3}$  m และขนาดของเหล็กมีความหนา 1 mm ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.13



ภาพประกอบที่ 4.13 a) แสดงคาน โค้งที่ติดตัวทำงานชนิด PVDF

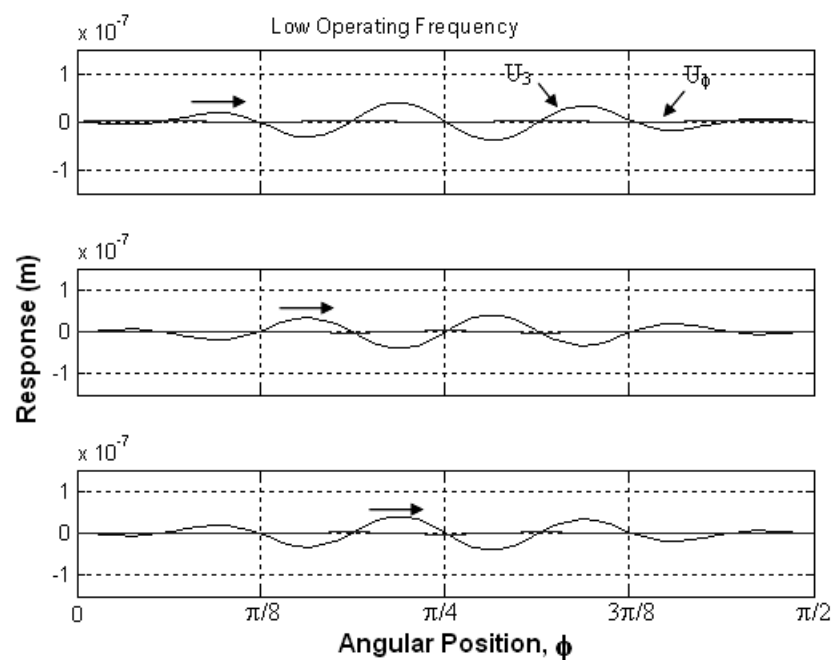
b) แสดงตำแหน่งการติดตัวทำงานและวัสดุดูดซับแรงกระแทกบนคาน โค้ง

#### 4.5 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

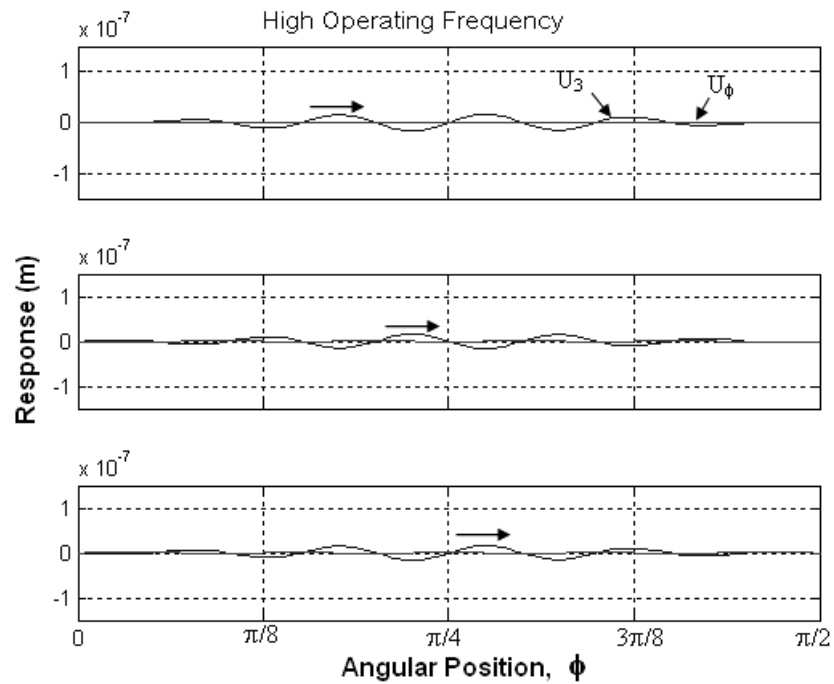
โปรแกรม MATLAB ถูกใช้ในการคำนวณผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง ซึ่งผลที่สนใจได้แก่ ค่าความถี่ทำงาน แอมพลิจูด และพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยจะนำผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยผลที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองจะต้องสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 1 เพื่อศึกษาค่าความแข็งตึงของคานโค้ง

การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 1 : ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือ ความถี่ต่ำเท่ากับ 18102 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 50000 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.14 และภาพประกอบที่ 4.15 ตามลำดับ



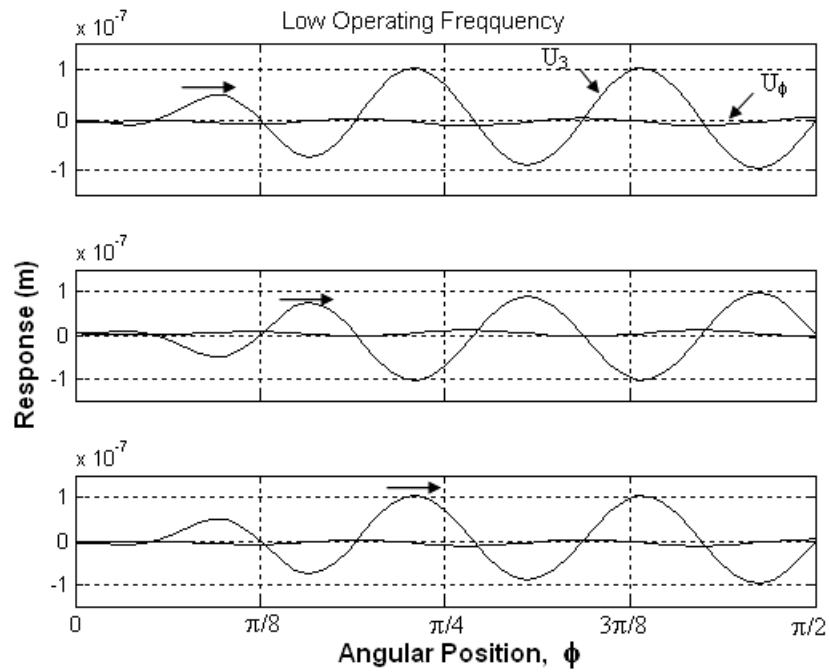
ภาพประกอบที่ 4.14 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 18102 Hz



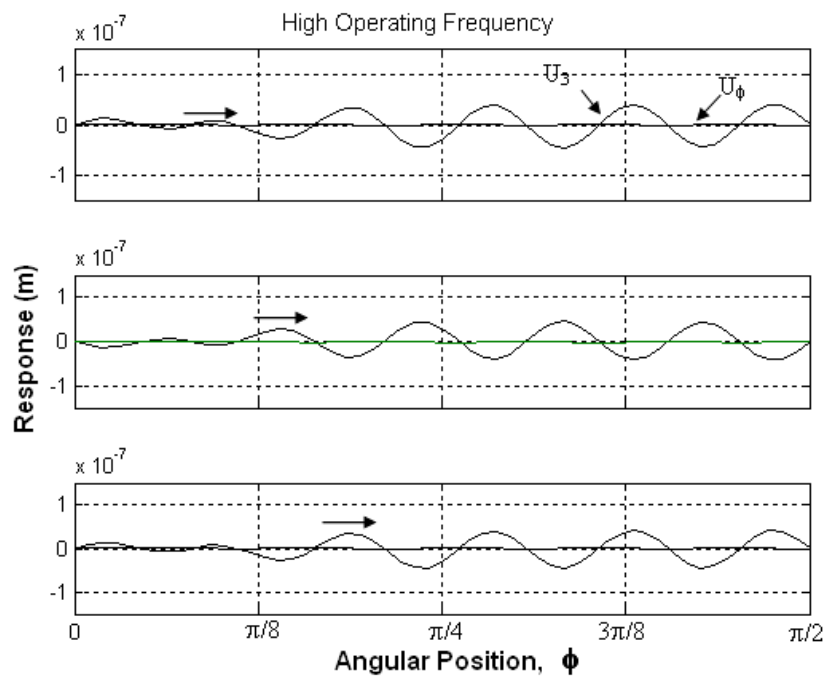
ภาพประกอบที่ 4.15 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 50000 Hz

ภาพประกอบที่ 4.14 และภาพประกอบที่ 4.15 แสดงลักษณะของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความถี่ 18102 Hz และ 50000 Hz ตามลำดับ ซึ่งความถี่ทั้งสองนี้สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน กล่าวคือลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นมีความราบเรียบสม่ำเสมอและเคลื่อนที่ไปทิศทางเดียวกันตลอด แต่จากรูปจะเห็นว่าแอมพลิจูดของคลื่นที่ความถี่ต่ำจะสูงกว่าที่ความถี่สูง และที่ความถี่อื่นนอกเหนือจากนี้คลื่นที่มีค่าแอมพลิจูดสูงมากๆ เมื่อกระตุ้นความถี่เข้าใกล้หรือเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ เพราะจะทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรงและจะไม่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้

**การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 2 :** ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 12500 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 33200 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.16 และภาพประกอบที่ 4.17 ตามลำดับ



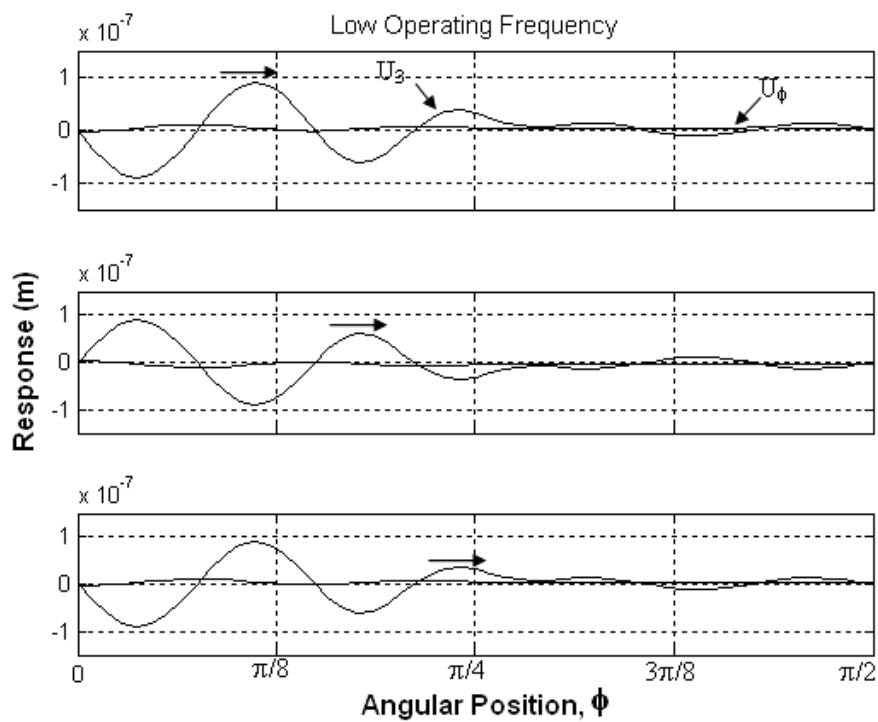
ภาพประกอบที่ 4.16 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 2 ที่ความถี่ 12500 Hz



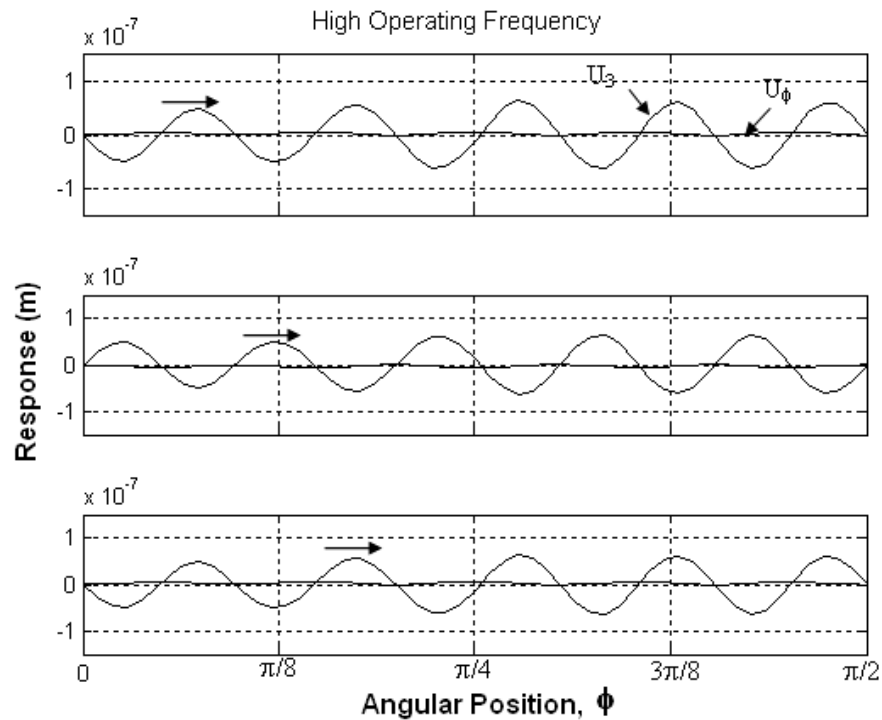
ภาพประกอบที่ 4.17 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 2 ที่ความถี่ 33200 Hz

ภาพประกอบที่ 4.16 และภาพประกอบที่ 4.17 แสดงพฤติกรรมของคลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นบนคานโค้ง ซึ่งมีความสม่ำเสมอจากบริเวณตรงส่วนกลางเป็นต้นไป และขนาดแอมพลิจูดของคลื่นเคลื่อนที่บริเวณตรงส่วนกลางของคานจะมีขนาดสูงสุด ส่วนที่ความถี่อื่นๆ ไม่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ที่เหมาะสมได้เลย โดยเฉพาะความถี่ที่เข้าใกล้หรือเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ

**การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 3 :** ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 13460 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 32400 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.18 และภาพประกอบที่ 4.19 ตามลำดับ



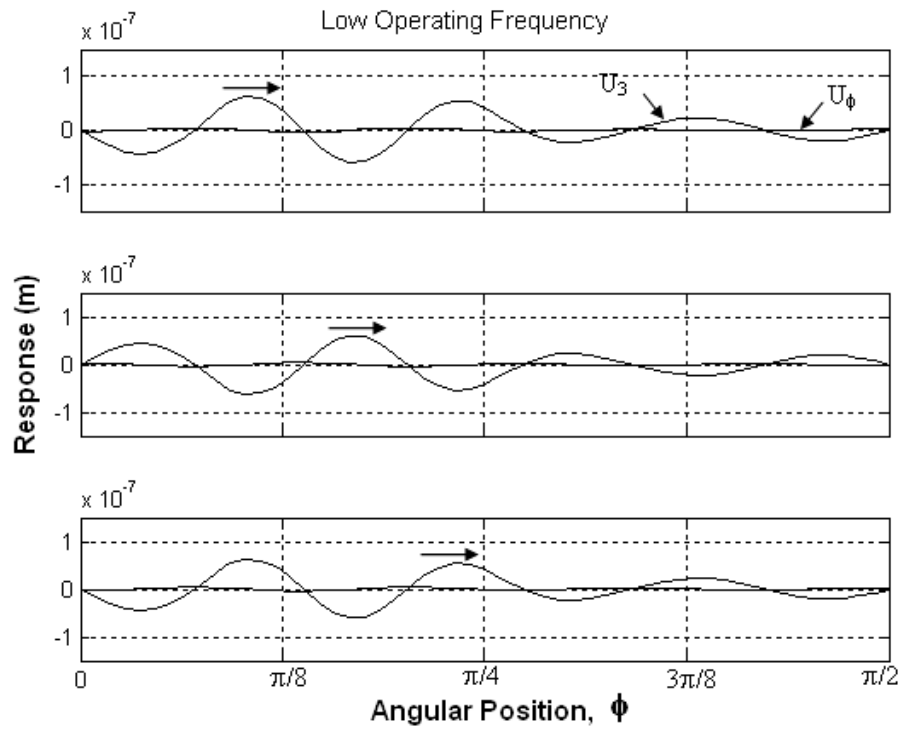
ภาพประกอบที่ 4.18 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ 13460 Hz



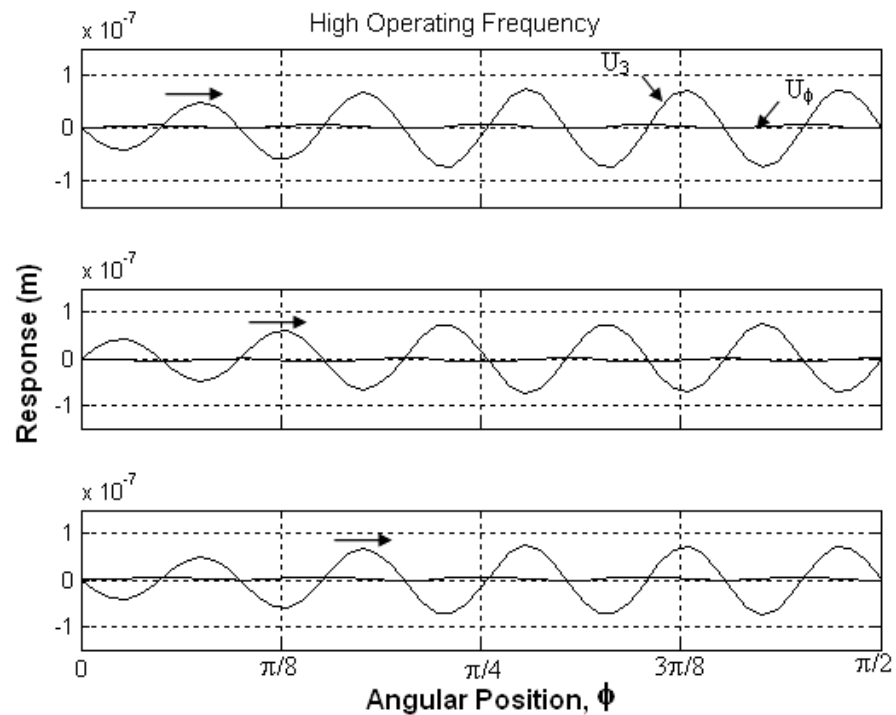
ภาพประกอบที่ 4.19 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ 32400 Hz

ภาพประกอบที่ 4.18 และภาพประกอบที่ 4.19 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เกิดบนคานโค้ง ซึ่งมีพฤติกรรมคือ บริเวณขอบของคานโค้งคลื่นมีขนาดแอมพลิจูดสูงแต่เมื่อเคลื่อนที่ถึงบริเวณส่วนกลางของคานความสูงของคลื่นจะลดลงอย่างมากเพราะบริเวณตรงส่วนกลางคานจะมีความแข็งมากนั่นเอง และแอมพลิจูดของคลื่นจะต่ำมากบริเวณด้านบนของคานโค้ง ส่วนความถี่อื่นๆ ที่นอกเหนือจากนี้จะไม่สามารรถกำเนิดคลื่นที่เหมาะสมเลยกรณีที่มีความถี่ต่ำ ในกรณีที่มีความถี่สูงจะทำให้มีแรงกระตุ้นมากขึ้นขณะเดียวกันความแข็งของคานเท่าเดิมเป็นผลให้การเคลื่อนที่ของคลื่นดีขึ้น

**การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 4 :** ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือ ความถี่ต่ำเท่ากับ 13600 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 35800 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.20 และภาพประกอบที่ 4.21 ตามลำดับ



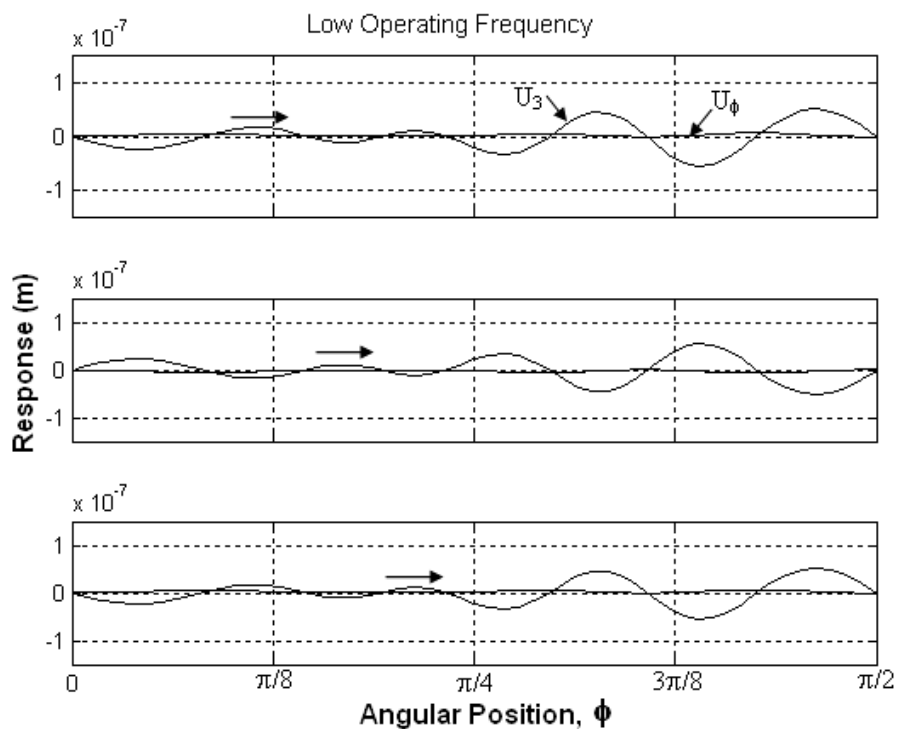
ภาพประกอบที่ 4.20 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 4 ที่ความถี่ 13600 Hz



ภาพประกอบที่ 4.21 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 4 ที่ความถี่ 35800 Hz

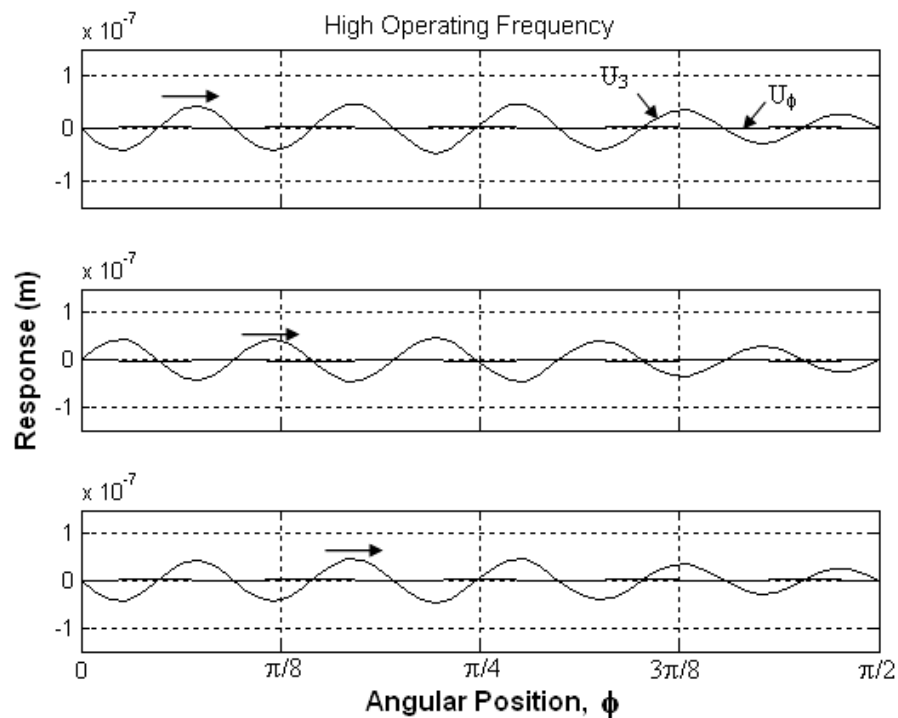
ภาพประกอบที่ 4.20 และภาพประกอบที่ 4.21 แสดงลักษณะของคลื่นที่เหมาะสมต่อการออกแบบเมื่อกระตุ้นด้วยความถี่สองค่าความถี่ด้วยกันคือ ที่ความถี่ต่ำมีค่าเท่ากับ 13600 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 35800 Hz ความถี่กระตุ้นที่ความถี่สูงจะมีแรงกระตุ้นมากขึ้นขณะที่ความแข็งของคานเท่าเดิม เป็นผลให้การเคลื่อนที่ของคลื่นสม่ำเสมอตลอดคาน โค้งมากกว่าความถี่ทำงานความถี่ต่ำ และบริเวณขอบด้านล่างของคานโค้งแอมพลิจูดจะสูงกว่าบริเวณตรงส่วนกลาง ส่วนความถี่อื่นคลื่นมีลักษณะที่สลับขึ้นลง และบางช่วงเวลาเกิดเพียงช่วงสั้นๆ ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดคาน ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวไม่ใช่พฤติกรรมของคลื่นเคลื่อนที่จึงไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

**การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 5 :** ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือ ความถี่ต่ำเท่ากับ 14000 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 37200 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.22 และภาพประกอบที่ 4.23 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.22 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 5 ที่ความถี่ 14000 Hz



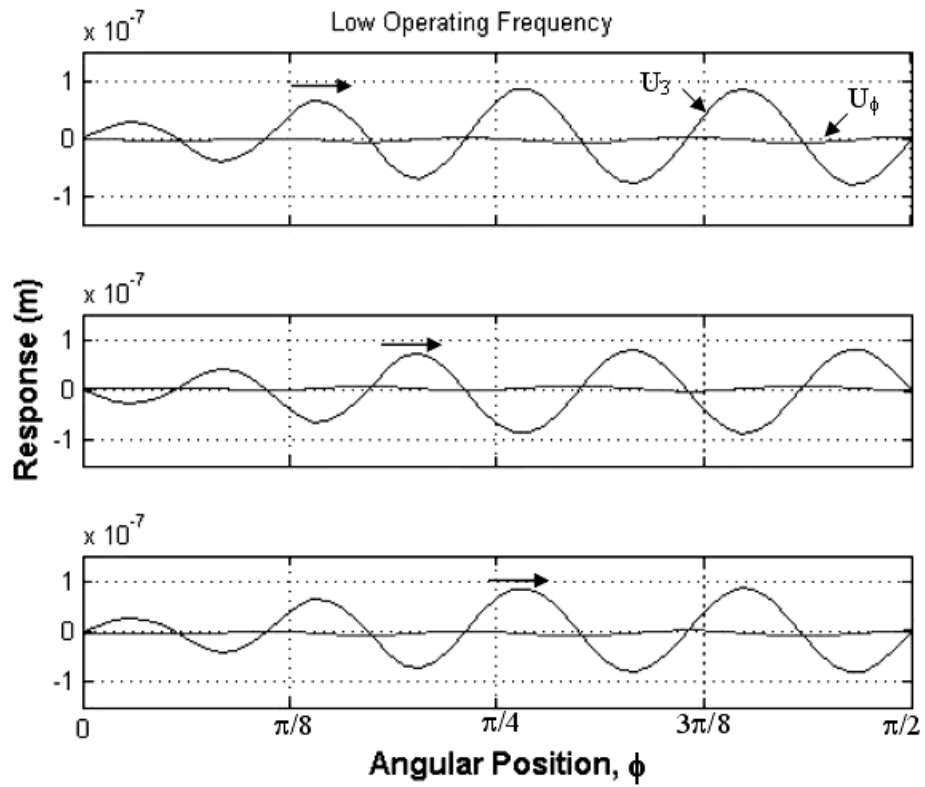


ภาพประกอบที่ 4.23 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 5 ที่ความถี่ 37200 Hz

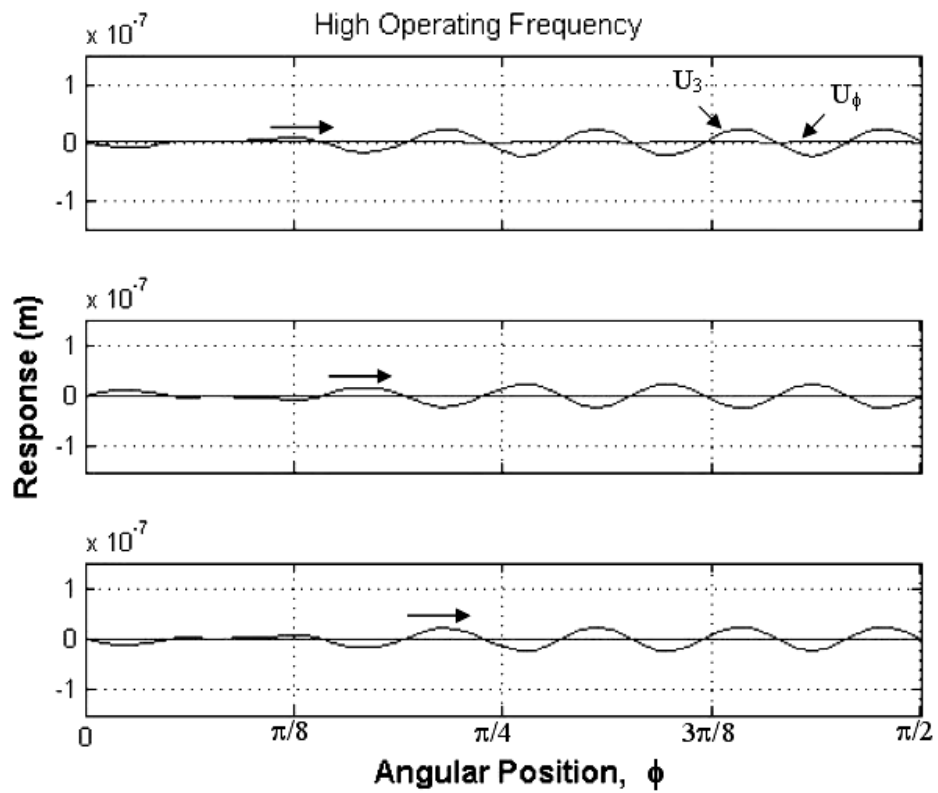
ภาพประกอบที่ 4.22 และภาพประกอบที่ 4.23 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ที่เหมาะสมคือ 14000 Hz ที่ความถี่ต่ำและ 37200 Hz ที่ความถี่สูง ซึ่งทั้งสองความถี่จะทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่ที่เหมาะสมคือ เคลื่อนที่ขึ้นด้านบนตลอดคาบโค้ง ส่วนค่าแอมพลิจูดนั้นที่ความต่ำจะมีค่ามากกว่าที่ความถี่สูง และจะเกิดค่าแอมพลิจูดที่สูงมากๆ เมื่อกระตุ้นเข้าใกล้หรือเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ

**การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 เพื่อศึกษาขนาดวัสดุดูดซับแรงกระแทก**

**การจัดวางวัสดุดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 1, 2 และ 3:** ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีค่าเท่ากันทั้งสามรูปแบบคือ ความถี่ต่ำเท่ากับ 17500 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 42000 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.24 และภาพประกอบที่ 2.25 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.24 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อตีควัดดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 17500 Hz

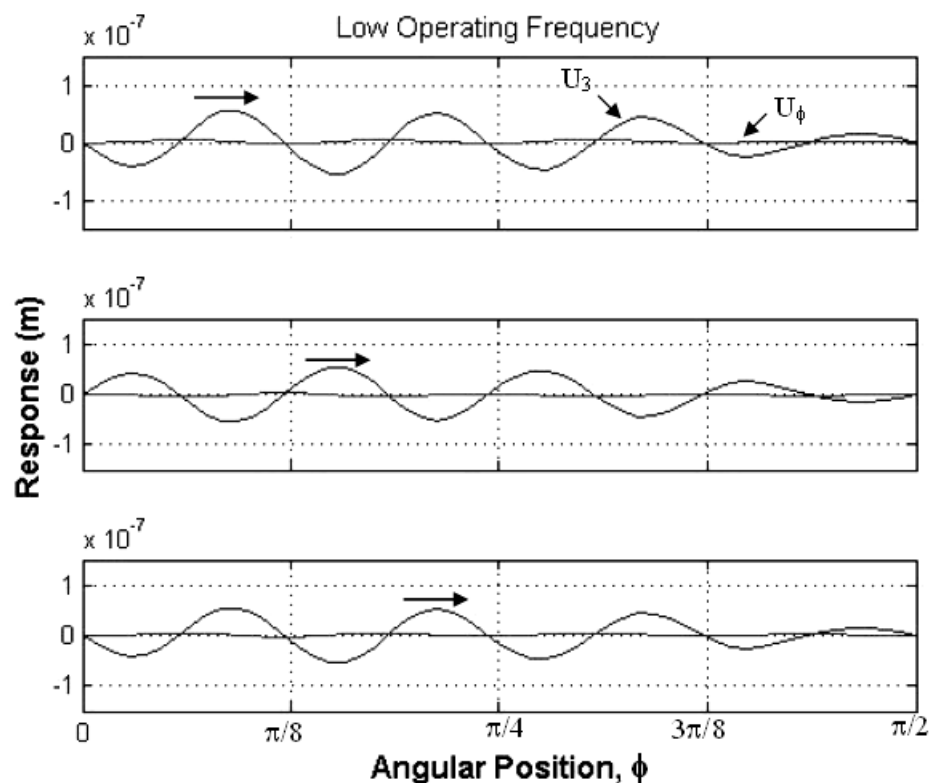


ภาพประกอบที่ 4.25 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อตีควัดดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 42000 Hz

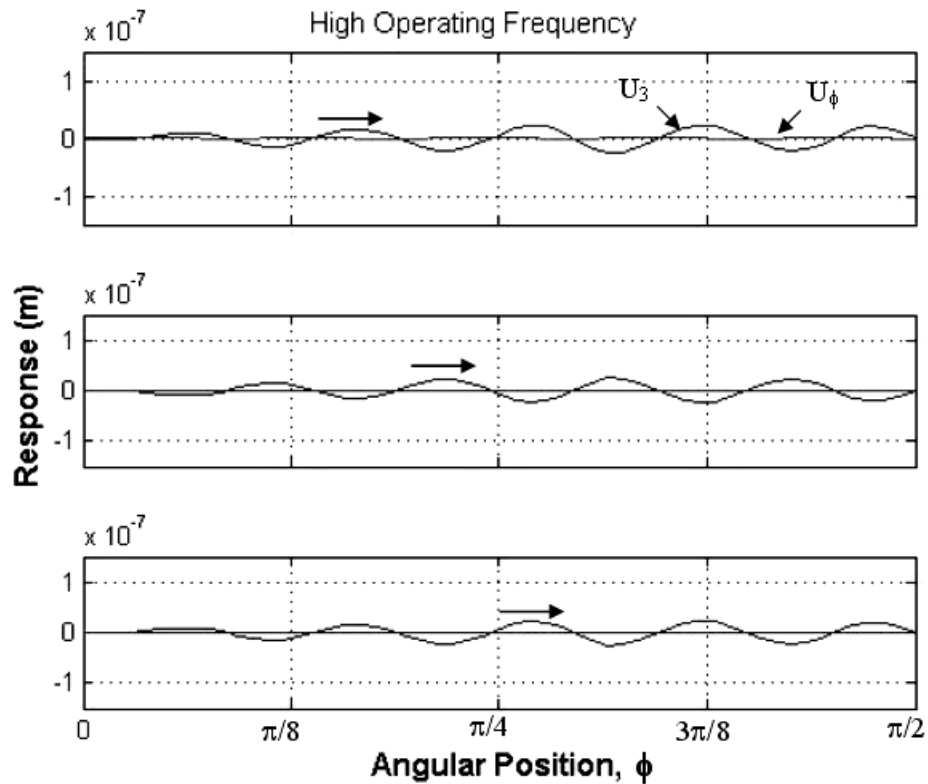
ในกรณีศึกษาขนาดของวัสดุคูดซับแรงกระแทกรูปแบบการติดตั้งตัวทำงานมีเพียงรูปแบบเดียวที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้ ส่วนขนาดของวัสดุคูดซับแรงกระแทกจะมีขนาดแตกต่างกัน ในการวิเคราะห์ผลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะไม่ตีคววัสดุคูดซับแรงกระแทกในแบบจำลอง ดังนั้นผลที่ได้จึงมีค่าเท่ากัน ภาพประกอบที่ 4.24 และภาพประกอบที่ 2.25 แสดงลักษณะของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความถี่ 17500 Hz และ 42000 Hz ตามลำดับ ซึ่งความถี่ทั้งสองนี้จะทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่ กล่าวคือลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นมีลักษณะค่อนข้างสม่ำเสมอและเคลื่อนที่ไปทิศทางเดียวกันตลอด โดยเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกาตลอดคาน โค้ง และที่ความถี่นอกเหนือจากนี้ไม่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้

การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 เพื่อหารูปแบบการจัดวางตัวทำงานที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดเฉพาะผิวด้านบนของคานโค้ง

ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่ที่ได้จากแบบจำลองมีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 17300 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 32800 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.26 และภาพประกอบที่ 4.27 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.26 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ 17300 Hz

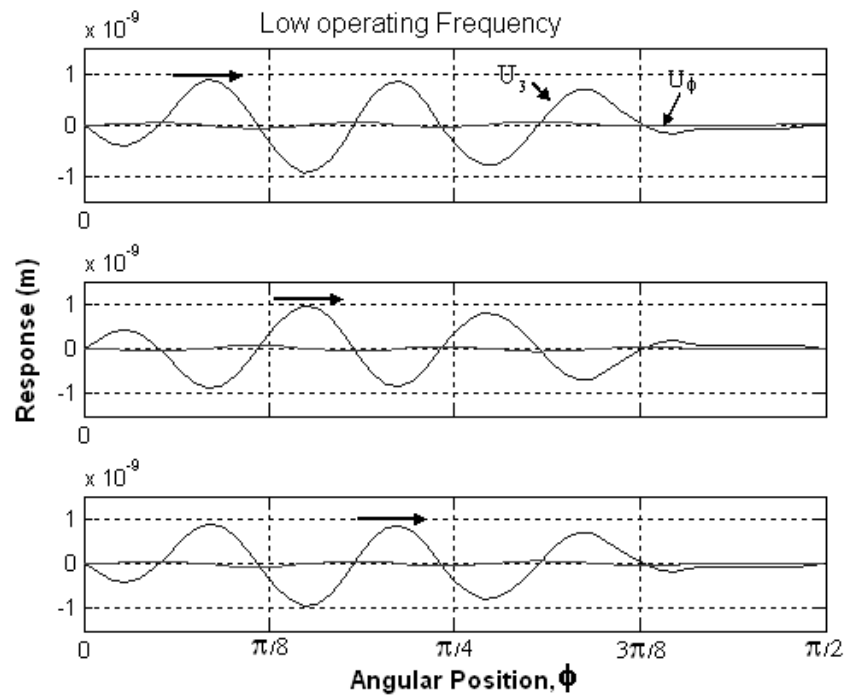


ภาพประกอบที่ 4.27 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ 32800 Hz

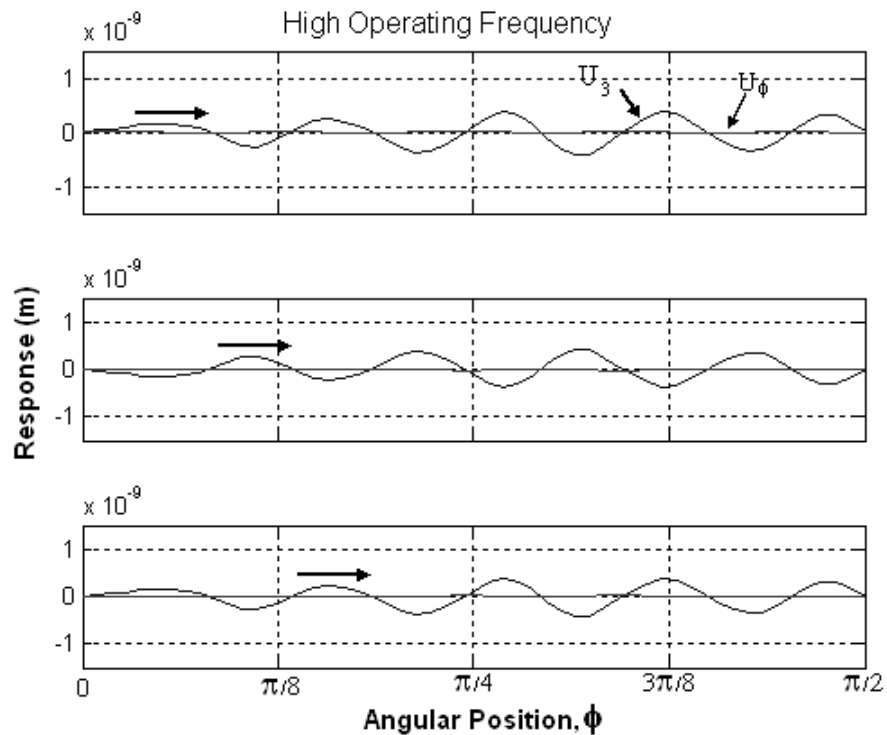
ภาพประกอบที่ 4.26 และภาพประกอบที่ 4.27 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ที่เหมาะสมคือ 17300 Hz ที่ความถี่ต่ำและ 32800 Hz ที่ความถี่สูง ซึ่งจะติดตัวทำงานที่ผิวด้านบนตลอดทั้งคานโค้ง (ภาพประกอบที่ 4.11) จากผลการจำลองแบบทำให้ทราบถึงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นจะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง  $\phi = 0$  ไปยัง  $\phi = 90$  และลักษณะของคลื่นจะมีความสม่ำเสมอบริเวณขอบของคาน และจะมีลักษณะของคลื่นที่มียอดคลื่นสูงสม่ำเสมอเป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นความสูงของยอดคลื่นจะลดลงและเคลื่อนที่สม่ำเสมออีกระยะเวลาหนึ่งต่อจากนั้นคลื่นจะมีความสูงเพิ่มขึ้นและเคลื่อนที่สม่ำเสมออีกครั้งสลับไปสลับมา พฤติกรรมของคลื่นจะมีลักษณะเช่นนี้ที่บริเวณขอบทั้งสองของคานโค้ง แต่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงบริเวณตรงส่วนกลางของคานคลื่นจะมีความสูงลดลง

ผลการจำลองแบบด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งโดยใช้ตัวทำงานชนิด โพลีเมอร์ [PVDF]

ความถี่ทำงานที่สามารถทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือ ความถี่ต่ำเท่ากับ 6600 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 14200Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.28 และ ภาพประกอบที่ 4.29 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.28 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ 6600 Hz



ภาพประกอบที่ 4.29 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ 14200 Hz

ภาพประกอบที่ 4.28 และภาพประกอบที่ 4.29 แสดงลักษณะคลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นบนคานโค้ง ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ตัวทำงานที่ทำมาจาก PZT-4 แต่คลื่นจะมีแอมพลิจูดที่ต่ำกว่ามาก เนื่องจากค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกของโพลิเมอร์น้อยกว่าเซรามิกมากนั่นเอง

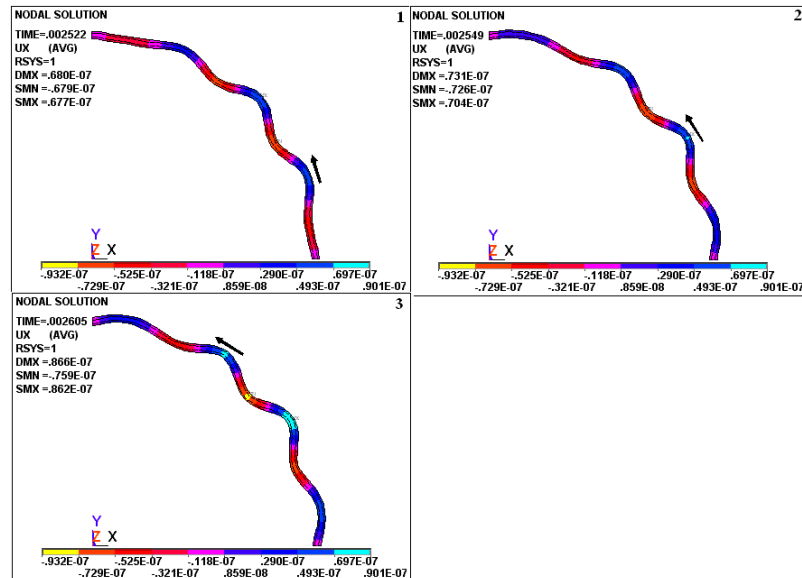
#### 4.6 ผลการจำลองแบบมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ผลแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลื่น รวมถึงหาค่าความถี่ทำงานที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ และความสูงของแอมพลิจูดเพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบและยืนยันความถูกต้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

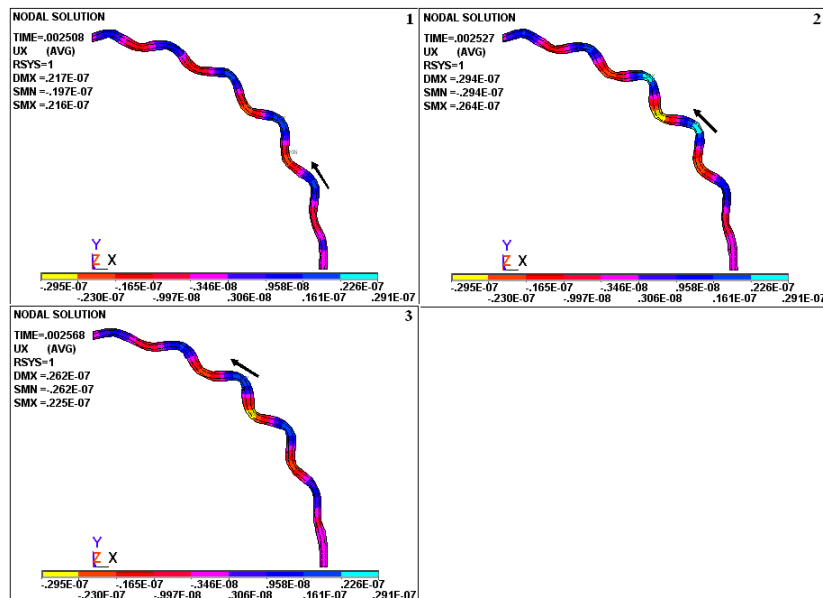
##### การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 1 เพื่อศึกษาค่าความแข็งดึงของคานโค้ง

การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 1 : ตัวทำงานถูกติดตั้งทั้งด้านบนและด้านล่างที่ผิวของคานโค้ง ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 18102 Hz และความถี่สูง

เท่ากับ 47000 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.30 และภาพประกอบที่ 4.31 ตามลำดับ



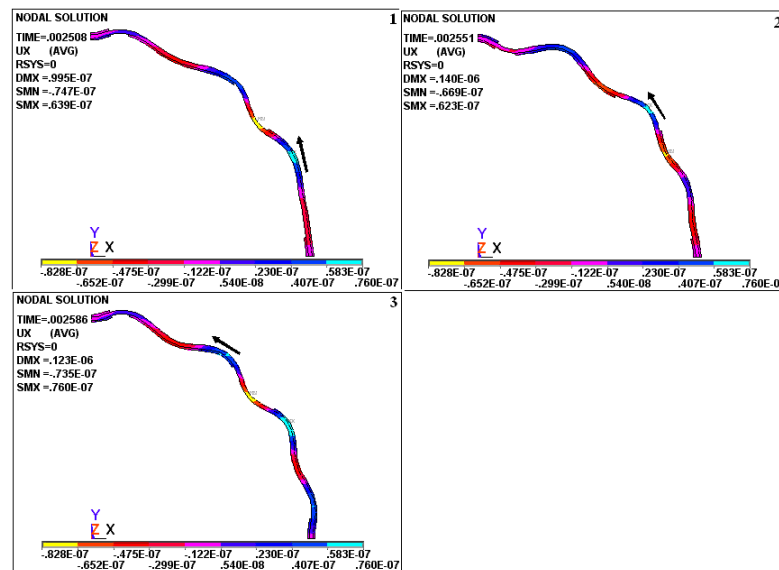
ภาพประกอบที่ 4.30 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 18102 Hz



ภาพประกอบที่ 4.31 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 47000 Hz

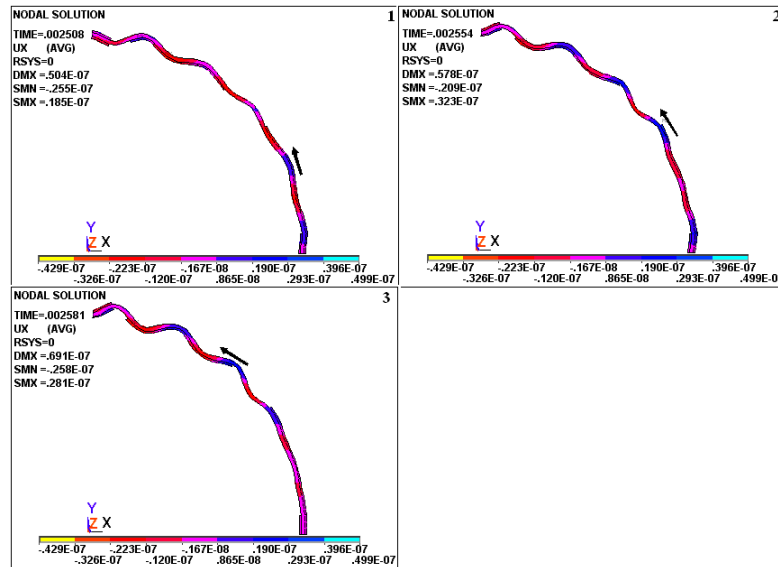
ภาพประกอบที่ 4.30 และภาพประกอบที่ 4.31 แสดงการติดตัวทำงานรูปแบบที่ 1 ซึ่งจะติดตัวทำงานทั้งด้านบนและด้านล่างของคาน โคง้ตลอดทั้งคาน พฤติกรรมการตอบสนองของคาน โคง้ที่ติดตัวทำงานมีลักษณะของคลื่นเคลื่อนที่คือ มีลักษณะการเคลื่อนที่ที่สม่ำเสมอ และเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนของคานตลอดเวลา โดยที่แอมพลิจูดของคลื่นลูกที่สูงที่สุดนั้นจะคงที่ตลอดเวลาทั้งที่ความถี่ต่ำและความถี่สูง กล่าวคือการเพิ่มแอมพลิจูดของคลื่นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างสม่ำเสมอจนมีขนาดแอมพลิจูดสูงสุด และค่อยๆ ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ และในขณะที่คลื่นลูกใหม่ก็จะเพิ่มแอมพลิจูดจากน้อยจนมีค่าสูงสุดและลดลงจนกลายเป็นศูนย์จะมีลักษณะเช่นนี้ตลอดทุกช่วงเวลา

การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 2: ตัวทำงานถูกติดตั้งบริเวณขอบทั้งสองด้านของคาน โคง้ ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 14320 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 35400 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.32 และภาพประกอบที่ 4.33 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.32 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 2 ที่ความถี่ 14320 Hz

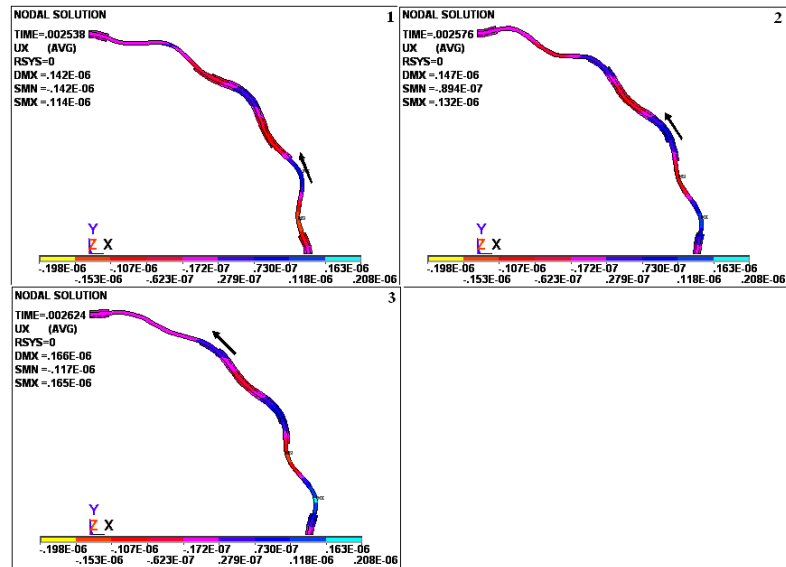




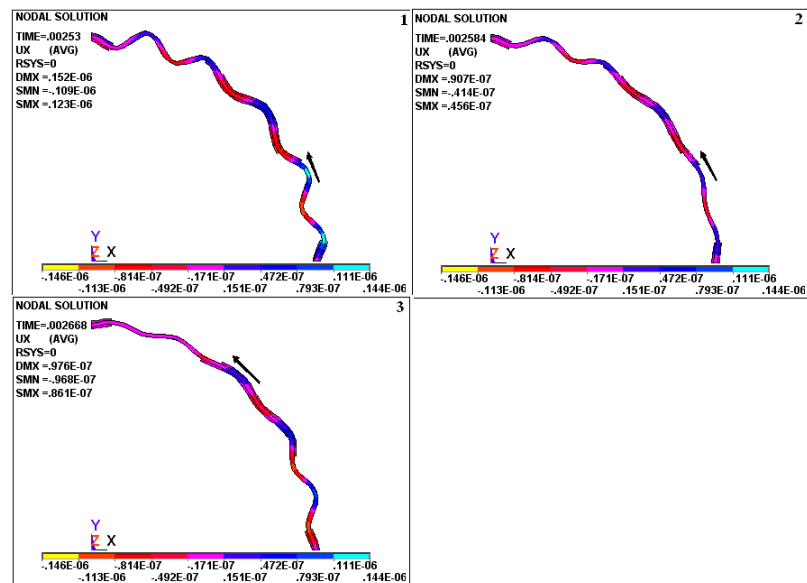
ภาพประกอบที่ 4.33 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 2 ความถี่ 35400 Hz

ภาพประกอบที่ 4.32 และภาพประกอบที่ 4.33 รูปแบบนี้ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นจะค่อนข้างราบเรียบสม่ำเสมอโดยวิงทวนเข็มนาฬิกาบนแกนโค้ง เกิดจากการติดตั้งตัวทำงานที่บริเวณขอบด้านล่างและขอบด้านบน ขณะที่บริเวณส่วนกลางของคานจะไม่ติดตั้งตัวทำงานเป็นผลให้บริเวณส่วนกลางของคานมีความอ่อนตัวมากที่สุด ในขณะที่บริเวณขอบของคานจะมีความแข็งตัวมากกว่า เนื่องจากติดตั้งตัวทำงาน จึงเป็นผลให้คลื่นที่เกิดขึ้นบริเวณขอบมีแอมพลิจูดต่ำ ขณะที่บริเวณตรงส่วนกลางของคานโค้งมีความแข็งตัวต่ำทำให้คลื่นเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะที่สม่ำเสมอ และมีค่าแอมพลิจูดสูง

**การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 3 :** ลักษณะการติดตั้งตัวทำงานจะติดตั้งเฉพาะบริเวณตรงส่วนกลางของคาน โค้งเท่านั้น ความถี่ทำงานที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 15050 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 34000 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.34 และภาพประกอบที่ 4.35 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.34 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ 15050 Hz

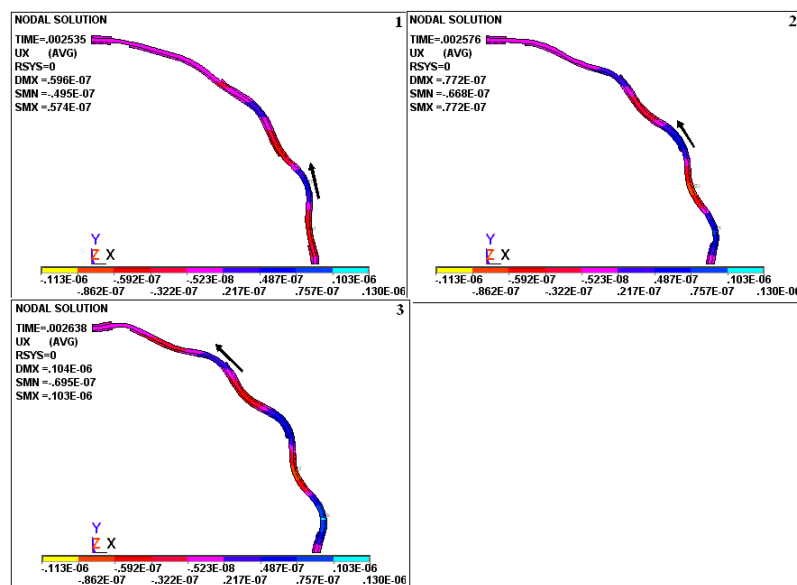


ภาพประกอบที่ 4.35 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ 34000 Hz

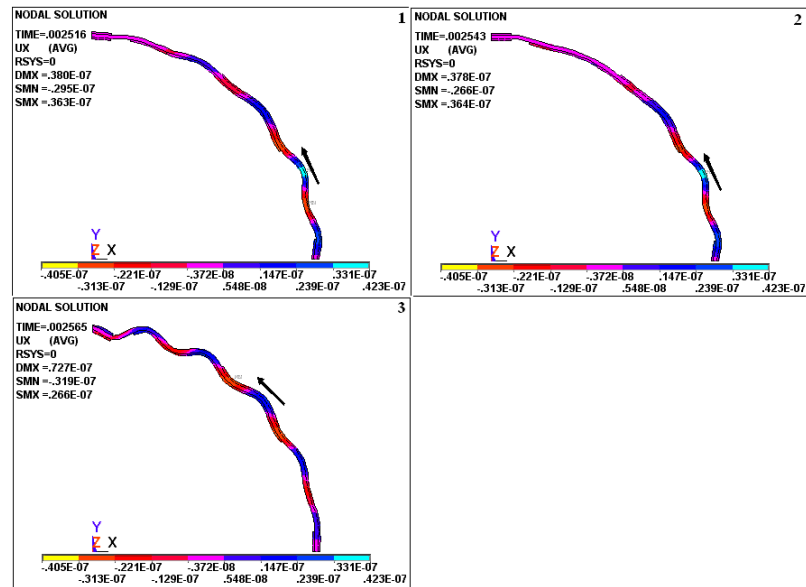
ภาพประกอบที่ 4.34 และภาพประกอบที่ 4.35 แสดงพฤติกรรมของคลื่นเคลื่อนที่มีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ โดยคลื่นเคลื่อนที่จะมีแอมพลิจูดสูงบริเวณขอบด้านล่างและค่อยๆ ลดลงเมื่อเคลื่อนที่ไปยังขอบด้านบน สาเหตุที่ทำให้คลื่นมีแอมพลิจูดสูงบริเวณขอบด้านล่างเป็นเพราะบริเวณดังกล่าวมีลักษณะอ่อนตัวมากกว่าบริเวณตรงส่วนกลางเนื่องจากบริเวณดังกล่าวไม่มีตัวงานติดตั้งอยู่ และเมื่อ

คลื่นเคลื่อนที่มาถึงบริเวณตรงส่วนกลางของคานจะทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลดลง ซึ่งเกิดจากบริเวณดังกล่าวติดตัวทำงานที่ทับซ้อนกันเป็นผลให้มีค่าความแข็งตึงมาก

**การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 4 :** ตัวทำงานถูกติดตั้งในลักษณะที่มีการกระจายตัวเกือบตลอดคาน โค้ง โดยที่บริเวณตรงส่วนกลางจะมีการทับซ้อนกันเพียงบางส่วน ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 16005 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 42600 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.36 และภาพประกอบที่ 4.37 ตามลำดับ



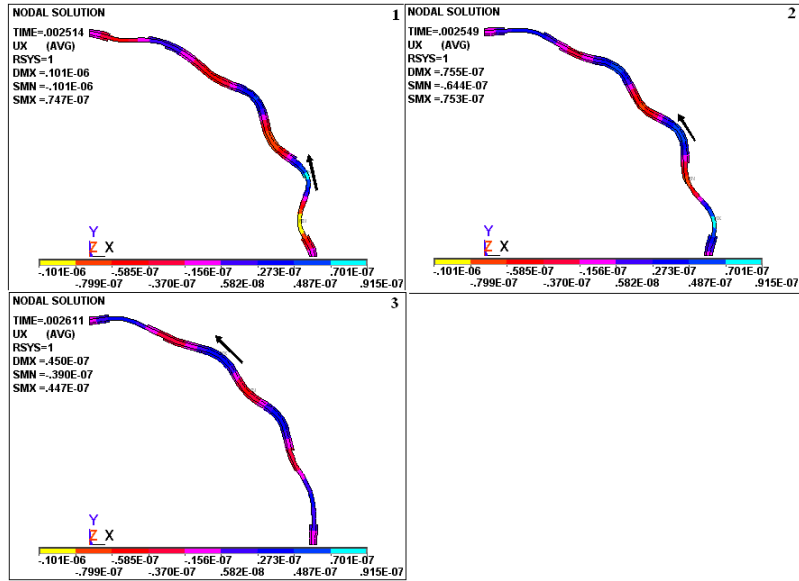
ภาพประกอบที่ 4.36 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 4 ที่ความถี่ 16005 Hz



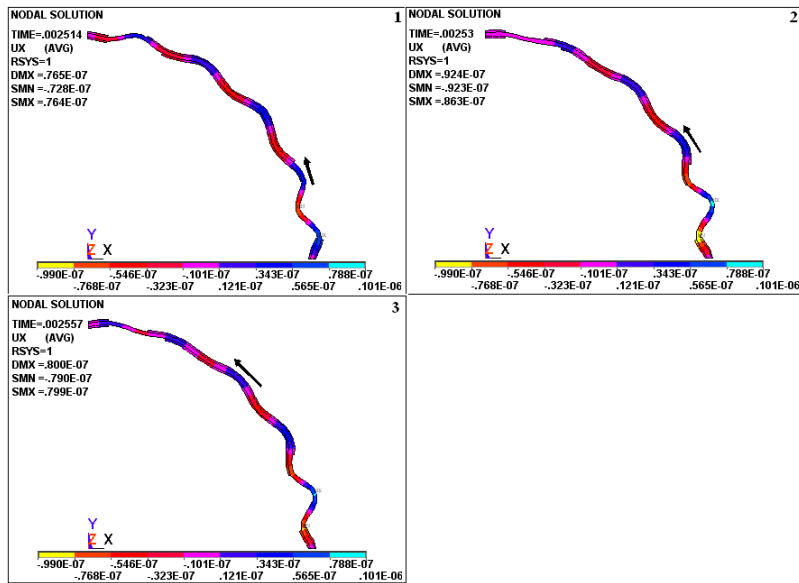
ภาพประกอบที่ 4.37 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 4 ที่ความถี่ 42600 Hz

ภาพประกอบที่ 4.36 และภาพประกอบที่ 4.37 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นเคลื่อนที่จากการจำลองแบบ พบว่าลักษณะของคลื่นจะมีการเคลื่อนที่ที่ราบเรียบสม่ำเสมอ เนื่องจากรูปแบบนี้ติดตั้งตัวทำงานที่บริเวณขอบของคานทั้งสองด้านและมีการทับซ้อนของตัวทำงานน้อย จึงทำให้คานโค้งมีค่าความแข็งดิ่งค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดคานซึ่งเหมาะสมต่อการเกิดคลื่นเคลื่อนที่ และบริเวณส่วนกลางของคาน โค้งมีลักษณะยอดคลื่นสูงซึ่งทำให้เกิดแรงผลึกได้มาก เนื่องจากติดตั้งตัวทำงานทั้งด้านบนและด้านล่างวางในตำแหน่งที่ทับซ้อนกันเพียงบางส่วนเป็นผลให้แอมพลิจูดของคลื่นสูงขึ้น

**การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 5:** ตัวทำงานถูกติดตั้งในลักษณะที่มีการทับซ้อนกันเฉพาะบริเวณตรงส่วนกลางของคาน และความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือ ความถี่ต่ำเท่ากับ 16550 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 41750 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.38 และภาพประกอบที่ 4.39 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.38 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 5 ที่ความถี่ 16550 Hz



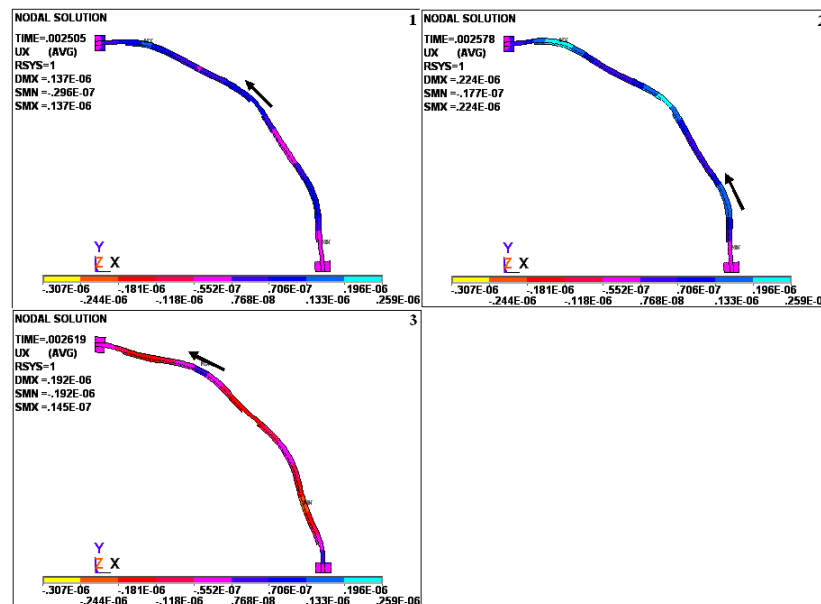
ภาพประกอบที่ 4.39 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 5 ที่ความถี่ 41750 Hz

ภาพประกอบที่ 4.38 และภาพประกอบที่ 4.39 แสดงพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของคลื่นมีลักษณะที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ โดยรวมแล้วความสูงของยอดคลื่นจะต่ำกว่ารูปแบบที่ผ่านมา เนื่องจากติดตั้งตัวทำงานที่ผิวด้านบนและด้านล่างของคานโค้ง ในตำแหน่งที่ทับซ้อนกันบริเวณส่วนกลางของคานมากเป็นผลให้

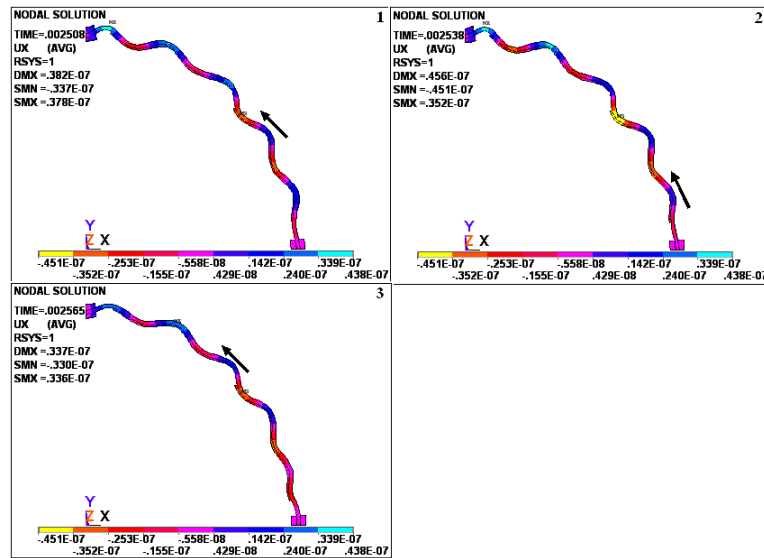
มีค่าความแข็งตึงมากขึ้น และเมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงบริเวณส่วนกลางของคานทำให้แอมพลิจูดลดลงทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูงเนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีค่าความแข็งตึงมาก

**การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 เพื่อศึกษาขนาดของวัสดุคูดซับแรงกระแทก**

**การจัดวางวัสดุคูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 1 :** วัสดุคูดซับแรงกระแทกถูกติดตั้งที่ขอบทั้งสองด้านของคานโค้งโดยมีความยาวจากขอบ 2.5 องศา ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 21870 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 32550 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.40 และภาพประกอบที่ 4.41 ตามลำดับ

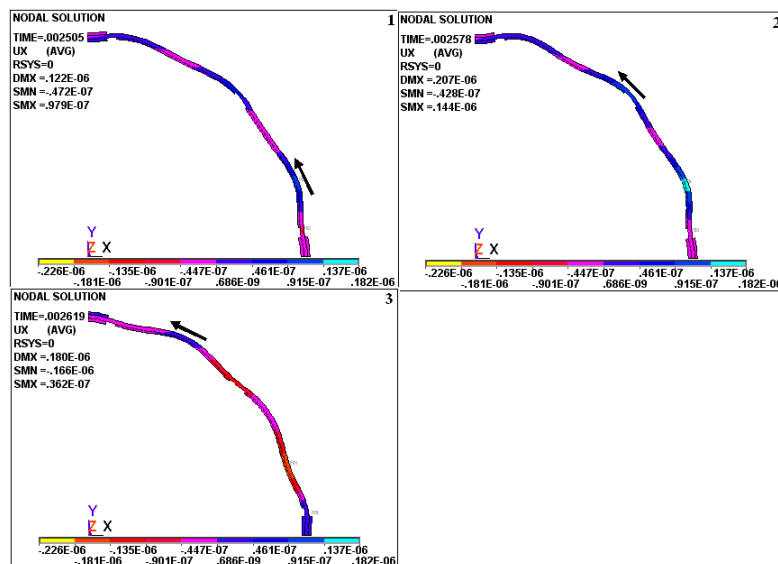


ภาพประกอบที่ 4.40 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อตีวัสดุคูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ทำงาน 21870 Hz

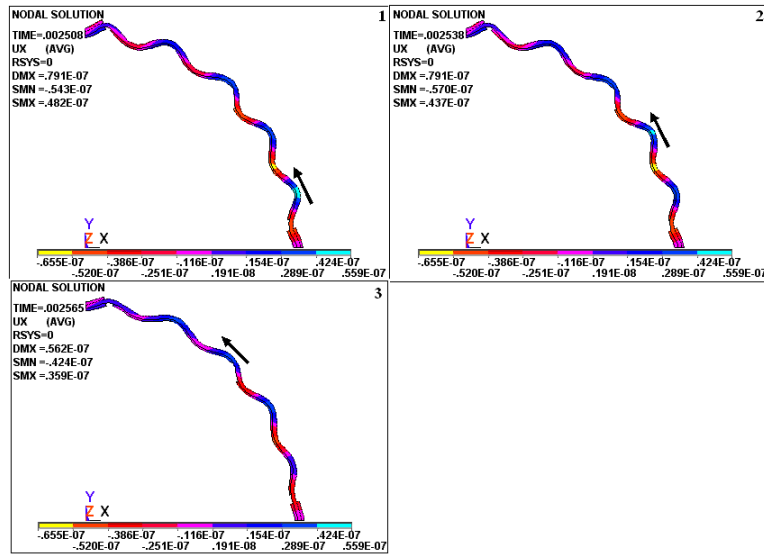


ภาพประกอบที่ 4.41 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อตีวัสดุคูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ทำงาน 32550 Hz

การจัดวางวัสดุคูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 2: วัสดุคูดซับแรงกระแทกถูกติดตั้งที่ขอบทั้งสองด้านของคานโค้งโดยมีความยาวจากขอบ 5 องศา ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกัน คือความถี่ต่ำเท่ากับ 21870 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 32550 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.42 และภาพประกอบที่ 4.43 ตามลำดับ

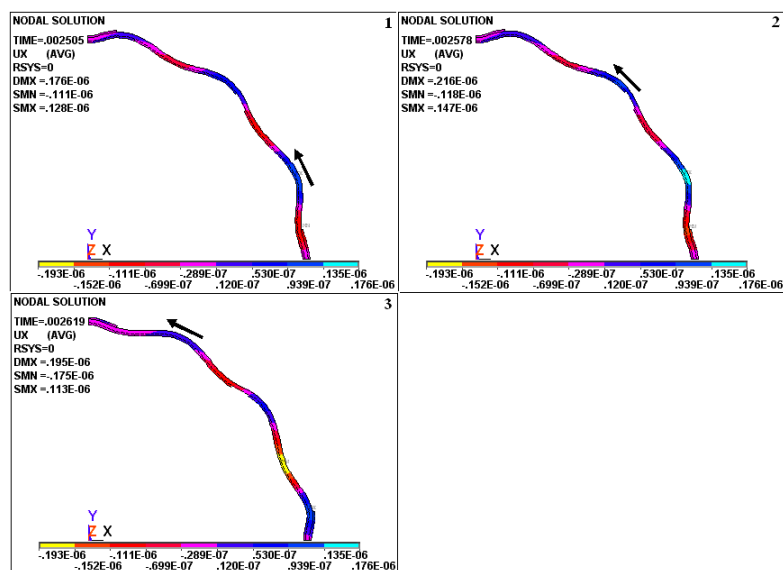


ภาพประกอบที่ 4.42 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อตีวัสดุคูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 2 ที่ความถี่ทำงาน 21870 Hz



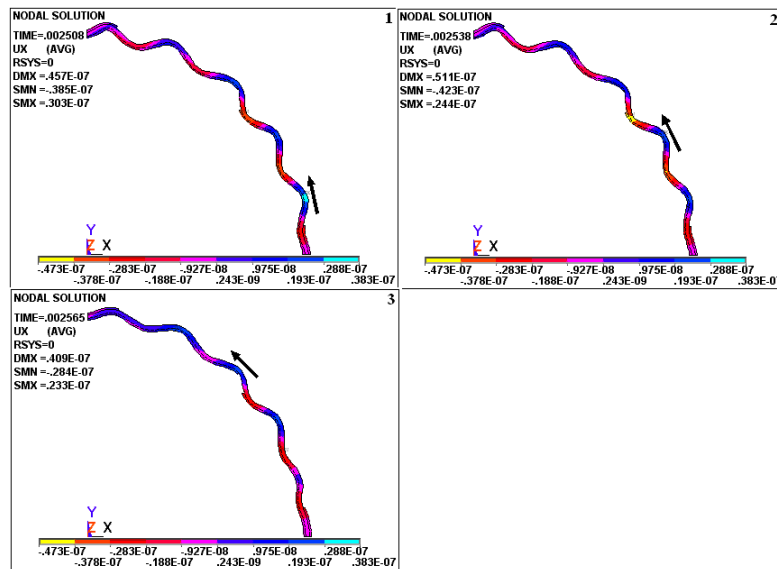
ภาพประกอบที่ 4.43 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อตีวัสดุคูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 2 ที่ความถี่ทำงาน 32550 Hz

การจัดวางรูปแบบที่ 3 : วัสดุคูดซับแรงกระแทกถูกติดตั้งที่ขอบทั้งสองด้านของคานโค้ง โดยมีความยาวจากขอบ 7.5 องศา ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 21870 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 32550 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.44 และภาพประกอบที่ 4.45 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.44 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อตีวัสดุคูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ทำงาน 21870 Hz



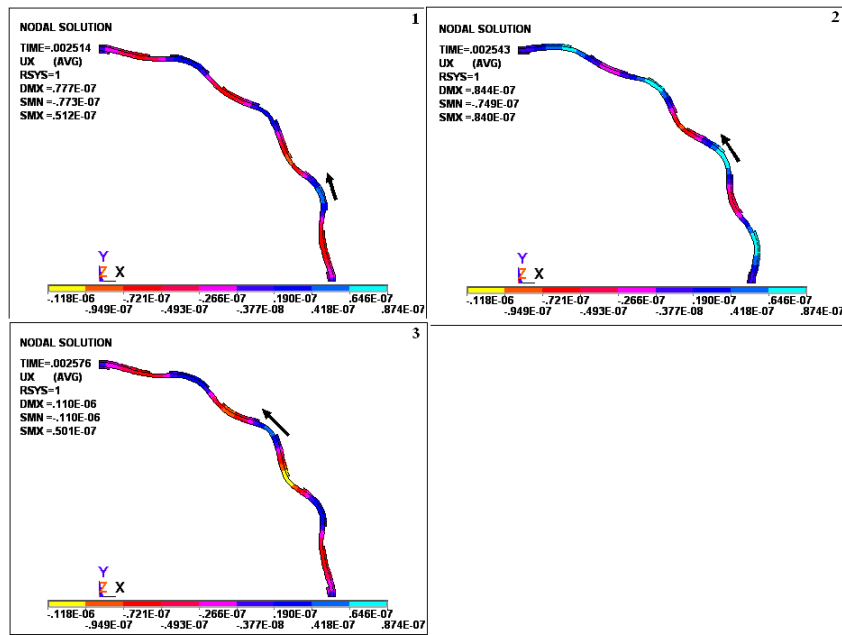


ภาพประกอบที่ 4.45 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อตีควัดูดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ทำงาน 32550 Hz

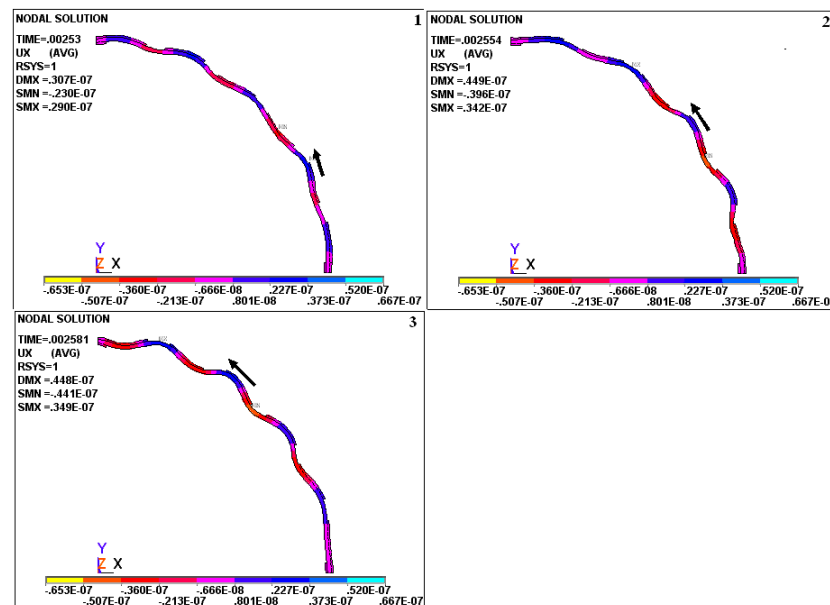
ภาพประกอบที่ 4.40 ถึงภาพประกอบที่ 4.45 แสดงผลตอบสนองของคานโค้งที่ติดตั้งวัสดุดูดซับแรงกระแทกทั้งสามรูปแบบต่อความถี่ทำงาน จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าทั้งสามรูปแบบมีค่าความถี่ทำงานเท่ากัน ที่ความถี่ทำงานต่ำลักษณะการเกิดคลื่นก่อนข้างสม่ำเสมอและเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งมีพฤติกรรมเหมือนกันทั้งหมดไม่ขึ้นกับขนาดของวัสดุดูดซับแรงกระแทก และที่ความถี่อื่นๆ จะไม่เกิดคลื่นเคลื่อนที่ขึ้นเลย ที่ความถี่ทำงานสูงแบบจำลองทั้งสามมีค่าความถี่ทำงานเท่ากันเช่นกัน คลื่นจะมีการเคลื่อนที่ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอโดยเฉพาะตรงบริเวณส่วนกลางของคานโค้งจะเกิดคลื่นเคลื่อนที่ที่เด่นชัดมากและเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนของคาน

การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 เพื่อหารูปแบบการจัดวางตัวทำงานที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดตั้งเฉพาะผิวด้านบนของคานโค้ง

ตัวทำงานถูกติดตั้งในลักษณะที่สลับกันระหว่างกลุ่มของ cosine และกลุ่มของ sine และติดตั้งที่ผิวด้านบนของคานเท่านั้น ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 19900 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 29010 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.46 และภาพประกอบที่ 4.47 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.46 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 ที่ความถี่ทำงาน 1990 Hz

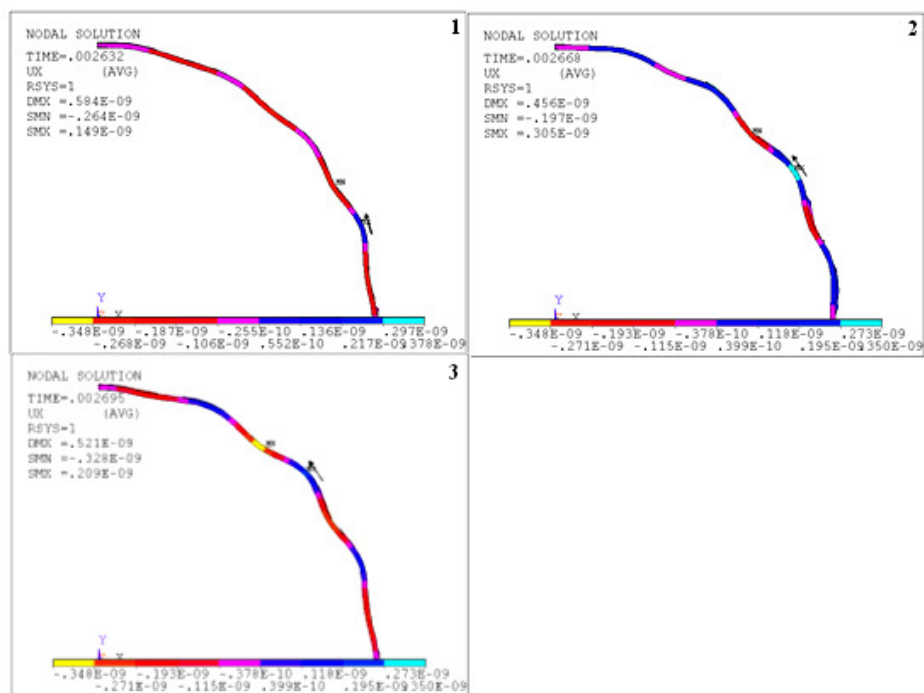


ภาพประกอบที่ 4.47 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 ที่ความถี่ทำงาน 29010 Hz

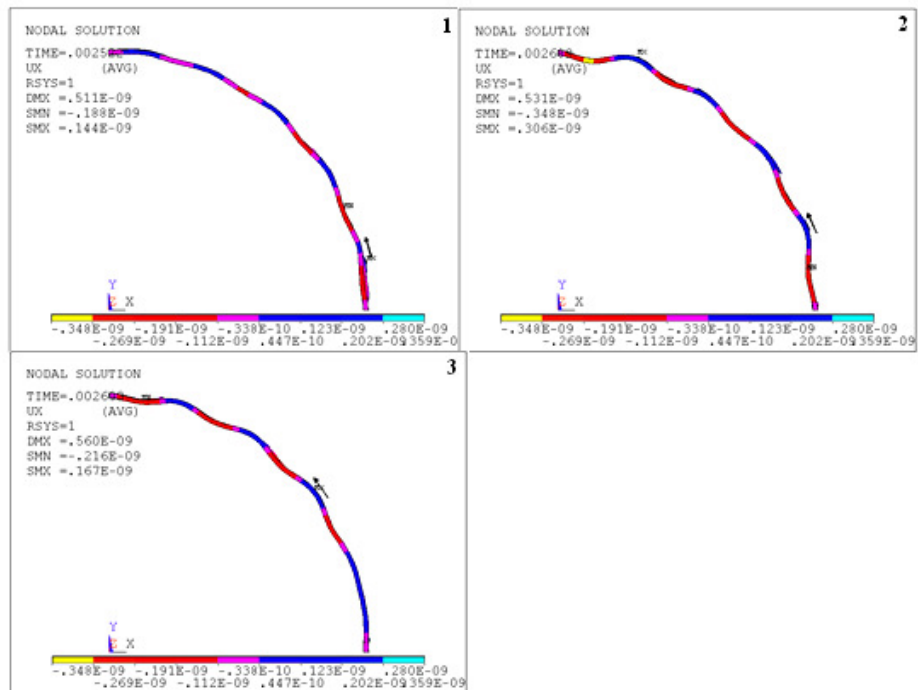
ภาพประกอบที่ 4.46 และภาพประกอบที่ 4.47 แสดงผลตอบสนองของคานโค้งเมื่อติดตั้งตัวทำงานลักษณะที่ 3 รูปแบบนี้จะติดตั้งตัวทำงานที่ผิวด้านบนตลอดทั้งคานโค้ง พบว่าการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ที่เหมาะสมคือ 19900 Hz ที่ความถี่ต่ำและ 29010 Hz ที่ความถี่สูง คลื่นจะเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกาและมีการเคลื่อนที่ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดคานโค้ง ลักษณะของคลื่นมียอดคลื่นสูงสม่ำเสมอระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นความสูงของยอดคลื่นจะลดลงและเคลื่อนที่สม่ำเสมออีกระยะเวลาหนึ่งแล้วคลื่นจะมีความสูงเพิ่มขึ้นอีกและเคลื่อนที่สม่ำเสมออีกครั้งสลับไปสลับมา แต่การลดลงของยอดคลื่นมีขนาดไม่มากนัก

### ผลการจำลองแบบของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโดยใช้ตัวทำงานชนิดโพลีเมอร์ [PVDF]

ความถี่ทำงานที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่มีสองค่าความถี่ด้วยกันคือความถี่ต่ำเท่ากับ 17000 Hz และความถี่สูงเท่ากับ 26800 Hz ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.48 และภาพประกอบที่ 4.49



ภาพประกอบที่ 4.48 ผลการจำลองแบบเมื่อใช้ตัวทำงาน PVDF ความถี่ทำงานเท่ากับ 17000 Hz



ภาพประกอบที่ 4.49 ผลการจำลองแบบเมื่อใช้ตัวทำงาน PVDF ความถี่ทำงานเท่ากับ 26800 Hz

ภาพประกอบที่ 4.48 และภาพประกอบที่ 4.49 แสดงลักษณะของคลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นบนคานโค้ง มีลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ตัวทำงานที่ทำมาจากเซรามิก ในลักษณะที่ 3 แต่คลื่นเคลื่อนที่มีแอมพลิจูดที่ต่ำมาก เนื่องจากค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับที่ทำจากเซรามิก แอมพลิจูดของคลื่นเคลื่อนที่สามารถปรับให้สูงขึ้น โดยการเพิ่มแอมพลิจูดของการกระตุ้นให้มากขึ้นจากเดิมที่ใช้เพียง 10 V

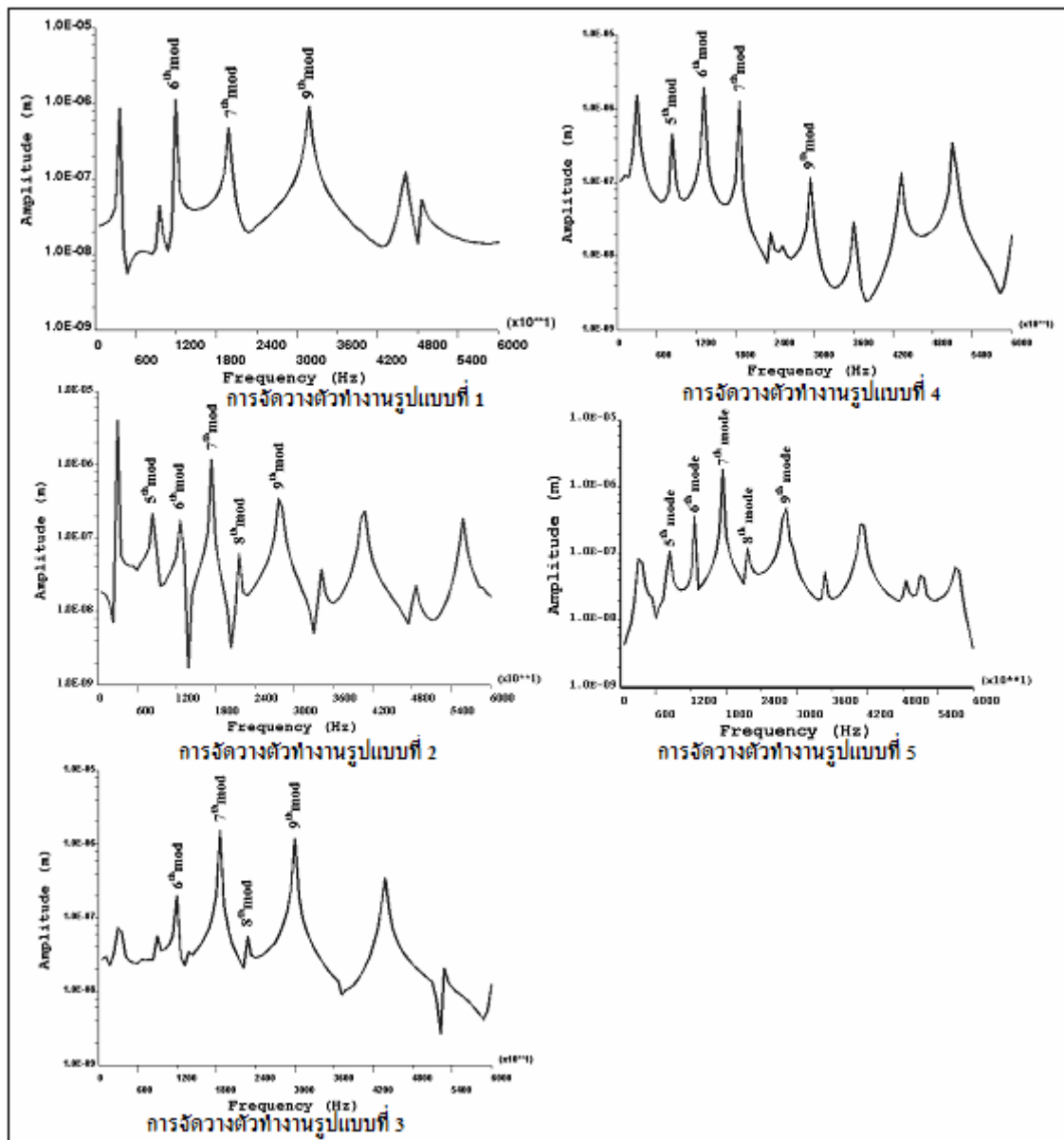
#### 4.7 การวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความถี่ (Harmonic Response)

การวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความถี่ของอัลตราโซนิคมอเตอร์เชิงเส้นโค้งนั้นจะทำการวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยในแต่ละลักษณะ ดังนี้คือ

##### การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 1 เพื่อศึกษาค่าความแข็งตึงของคานโค้ง

ภาพประกอบที่ 4.50 แสดงผลตอบสนองฮาร์โมนิกของการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 1 ทุกรูปแบบและติดตั้งวัสดุคูดซับแรงกระแทกที่ขอบของคานโค้งทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อป้องกันการ

สะท้อนกลับของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนมาถึงบริเวณขอบของคานโค้ง วิธีศึกษาการตอบสนองต่อความถี่ที่กระตุ้นของอัลตราโซนิคมอเตอร์เชิงเส้นโค้งคือ กระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ 10V ที่ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก โดยแบ่งกลุ่มของตัวทำงานออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มติดที่ผิวด้านบนและกลุ่มติดที่ผิวด้านล่างของคานโค้ง กลุ่มติดที่ผิวด้านบนของคานโค้งกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า  $10\cos(\omega t)$  และกลุ่มติดที่ผิวด้านล่างของคานโค้งกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า  $10\sin(\omega t)$  ความถี่กระตุ้น ( $\omega$ ) จะเปลี่ยนจาก 0 ถึง 60,000 Hz และสังเกตการตอบสนองของจุดกึ่งกลางของคานโค้ง  $\phi = \pi/4$  (mid-span node) ซึ่งเป็นค่าของแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่สภาวะอยู่ตัว (stead-state) ภาพประกอบที่ 4.50 แสดงการตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง จากกราฟฮาร์โมนิกส์นั้นแสดงให้เห็นว่าความถี่ทำงานอยู่ระหว่างความถี่ธรรมชาติโหมคใด และสามารถแสดงความถี่ธรรมชาติของโหมคการสั่นได้อีกด้วย ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากเพราะเมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ที่เท่ากับความถี่ธรรมชาติ จะทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรงและไม่มีคลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นกราฟฮาร์โมนิกส์ยังสามารถบอกถึงค่าความแข็งตึง (stiffness) ของโครงสร้างของมอเตอร์ได้อีกด้วย ภาพประกอบที่ 4.50 แสดงให้เห็นว่าเมื่อลดจำนวนการติดตั้งตัวทำงานบนคานโค้งจะทำให้คานมีความแข็งลดลง โดยสังเกตเห็นว่ากราฟจะเคลื่อนไปทางด้านซ้าย จากกราฟฮาร์โมนิกส์แสดงให้เห็นว่าการจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 2 คานมีความแข็งน้อยที่สุด แต่การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 1 คานจะมีความแข็งมากที่สุดเนื่องจากติดตั้งตัวทำงานเต็มคานโค้งทั้งด้านบนและด้านล่าง นอกจากนั้นยังพบว่าตำแหน่งการติดตั้งตัวทำงานมีผลต่อความแข็งของคานด้วย จะสังเกตเห็นว่าการติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 2 และ 3 จำนวนตัวทำงานที่ติดตั้งเท่ากันแต่ตำแหน่งต่างกัน โดยการติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 2 (ภาพประกอบที่ 4.2) จะติดบริเวณขอบทั้งสองด้านของคาน ในขณะที่การจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 3 (ภาพประกอบที่ 4.3) จะติดเฉพาะบริเวณตรงส่วนกลางของคานเท่านั้น พบว่าการจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 2 มีค่าความแข็งน้อยกว่าการจัดวางตัวทำงานรูปแบบที่ 3 และคลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน แสดงให้เห็นว่าทั้งค่าความแข็งตึงของคานโค้งและตำแหน่งการจัดวางตัวทำงานมีความสำคัญต่อการออกแบบมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง แต่อย่างไรก็ตามกราฟฮาร์โมนิกส์ไม่สามารถระบุความถี่ทำงานที่เกิดคลื่นเคลื่อนที่ได้

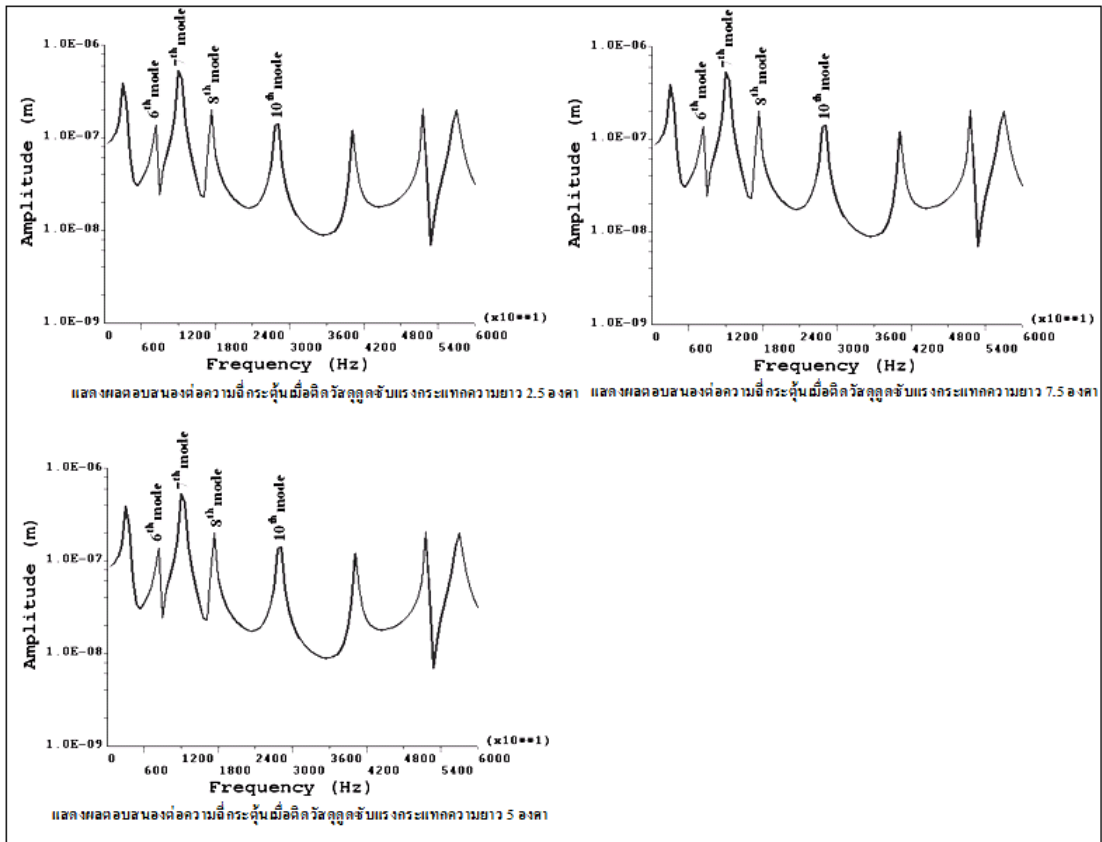


ภาพประกอบที่ 4.50 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของการจذبตัวทำงานลักษณะที่ 1

การจذبตัวทำงานลักษณะที่ 2 เพื่อศึกษาขนาดวัสดุดูดซับแรงกระแทก

ภาพประกอบที่ 4.51 แสดงผลตอบสนองฮาร์โมนิกของการติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 2 และแบบจำลองดังกล่าวจะติดวัสดุดูดซับแรงกระแทกเหมือนที่ขอบของคานโค้งทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนมาถึงบริเวณขอบของคานโค้ง วิธีศึกษาผลการตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของคานคือ กระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าที่มีแอมป์จูดเท่ากับ 10V ที่ตัว

ทำงานเพียโซอิเล็กทริก โดยแบ่งกลุ่มของตัวทำงานออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มติดขอบด้านบนและกลุ่มติดขอบด้านล่างของคานโค้ง โดยทั้งสองกลุ่มจะติดตัวทำงานที่บริเวณผิวด้านล่างของคานโค้งและทั้งสองกลุ่มวางห่างกันเท่ากับ  $a=3\lambda/4$  จากนั้นกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าบนตัวทำงานคือ กลุ่มติดที่บริเวณขอบด้านล่างของคานโค้งกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า  $10\cos(\omega t)$  และกลุ่มติดบริเวณขอบด้านบนของคานโค้งกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า  $10\sin(\omega t)$  ความถี่กระตุ้น ( $\omega$ ) จะเปลี่ยนจาก 0 ถึง 60,000 Hz และสังเกตการตอบสนองของจุดกึ่งกลางของคานโค้ง  $\phi=\pi/4$  (mid-span node) ซึ่งเป็นค่าแอมพลิจูดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state response) ภาพประกอบที่ 4.51 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง จากกราฟฮาร์โมนิกส์แสดงให้เห็นว่าความถี่ทำงานอยู่ระหว่างความถี่ธรรมชาติโหมดใด นอกจากนั้นยังสามารถบอกความถี่ธรรมชาติของโหมดการสั่นได้อีกด้วย ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากเพราะเมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ที่เท่ากับความถี่ธรรมชาติจะเกิดการสั่นอย่างรุนแรงและไม่มีคลื่นเคลื่อนที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกราฟฮาร์โมนิกส์ไม่สามารถระบุความถี่ทำงานที่เกิดคลื่นเคลื่อนที่ได้ จากผลการศึกษานาของวัสดุคูดซับแรงกระแทกทั้งสามรูปแบบพบว่าผลต่อคลื่นเคลื่อนที่เนื่องจากกราฟฮาร์โมนิกส์ที่ได้จากทั้งสามรูปแบบไม่แตกต่างกันเลย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.51 นอกจากนั้นความถี่ทำงานก็มีค่าเท่ากันทั้งที่ความถี่ทำงานต่ำและสูง



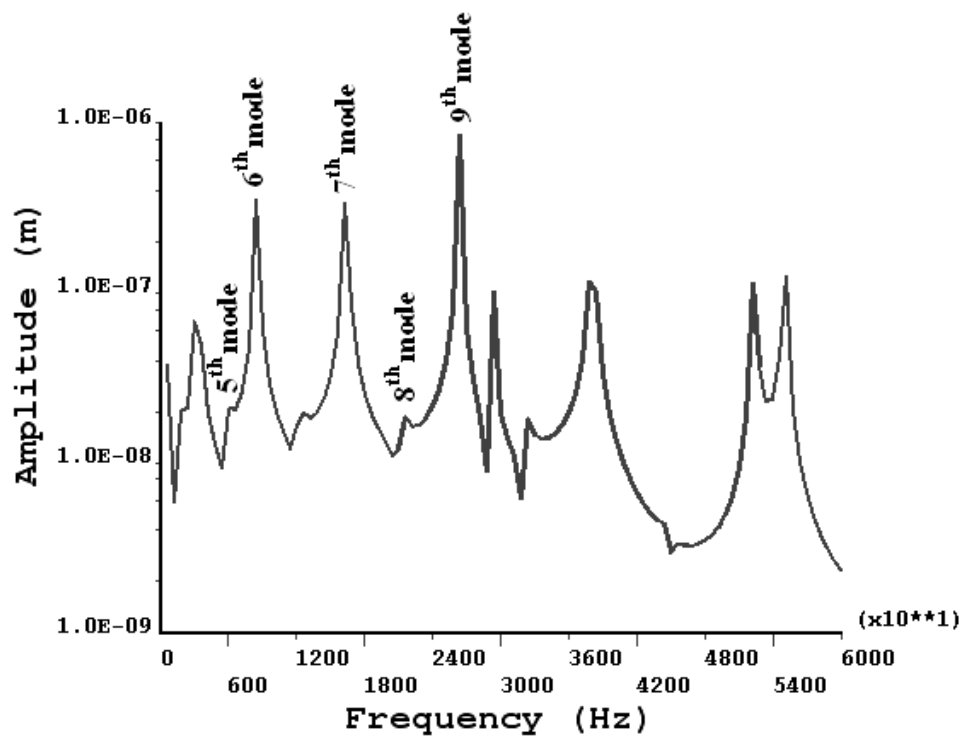
ภาพประกอบที่ 4.51 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2

การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 เพื่อหารูปแบบการจัดวางตัวทำงานที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดตั้งเฉพาะผิวด้านบนของคานโค้ง

ภาพประกอบที่ 4.52 แสดงผลตอบสนองฮาร์โมนิกซ์ของการติดตั้งตัวทำงานลักษณะที่ 3 และคิดวัสดุจุดจับแรงกระทำที่ขอบของคานโค้งทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อเคลื่อนมาถึงบริเวณขอบของคานโค้ง วิธีการศึกษาผลการตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้น โค้งคือ กระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ 10V ที่ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก โดยแบ่งกลุ่มของตัวทำงานออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่กระตุ้นให้เกิดคลื่น cosine และกลุ่มที่กระตุ้นให้เกิดคลื่น sine ซึ่งทั้งสองกลุ่มจะติดตั้งเฉพาะที่ผิวด้านบนของคานโค้ง และมีระยะห่างของตัวทำงานทั้งสองกลุ่มเท่ากับ 5 องศา จากนั้นกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าคือ กลุ่มที่กำเนิดคลื่น cosine กระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า  $10\cos(\omega t)$  และกลุ่มที่กำเนิดคลื่น sine กระตุ้นด้วย



สัญญาณไฟฟ้า  $10\sin(\omega t)$  ความถี่กระตุ้น ( $\omega$ ) จะเปลี่ยนจาก 0 ถึง 60,000 Hz และสังเกตการตอบสนองของจุดกึ่งกลางคานโค้ง  $\phi = \pi/4$  (mid-span node) ซึ่งแสดงค่าแอมพลิจูดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state response) ภาพประกอบที่ 4.52 แสดงการตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง จากกราฟฮาร์โมนิกส์แสดงให้เห็นว่าความถี่ทำงานอยู่ระหว่างความถี่ธรรมชาติโหมมการสั่นใด และนอกจากนั้นยังแสดงความถี่ธรรมชาติของโหมมการสั่นได้อีกด้วย ซึ่งลักษณะการติดตั้งตัวทำงานลักษณะที่ 3 สามารถกำหนดคลื่นเคลื่อนที่ที่เหมาะสมได้



ภาพประกอบที่ 4.52 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3

ความถี่ธรรมชาติของแต่ละโหมมการสั่นมีความสำคัญคือ เมื่อกระตุ้นความถี่ที่เท่ากับความถี่ธรรมชาติดังกล่าวจะทำให้ระบบเกิดการสั่นอย่างรุนแรงและไม่เกิดเป็นคลื่นเคลื่อนที่ ความถี่ธรรมชาติของแต่ละโหมมการสั่นแสดงในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงความถี่ธรรมชาติของลักษณะที่ 1 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Mode (k)	Natural Frequency : FE Result [Hz]				
	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3	Pattern 4	Pattern 5
2	1819	1649	1532	1653	1665
3	3688	3254	2996	3295	3109
4	6984	5841	5966	6250	6278
5	9679	8176	8592	8890	8490
6	15182	12511	12714	13601	13502
7	20717	17339	17451	18571	18631
8	24637	21707	21487	22631	23241
9	33098	27953	27850	29919	29479
10	40563	34672	33883	36739	36018
11	47318	40910	40327	43350	42777

ตารางที่ 4.2 แสดงความถี่ธรรมชาติของลักษณะที่ 1 ด้วยวิธีคณิตศาสตร์

Mode (k)	Natural Frequency : Analytical Result [Hz]				
	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3	Pattern 4	Pattern 5
2	1362.4	1058	1058	1132	1132
3	3207.3	2491	2491	2667.7	2667.7
4	6094.4	4733	4733	5069.1	5069.1
5	9517.5	7392	7392	79163	79163
6	14009	10879	10879	11652	11652
7	19012	14765	14765	15813	15813
8	25093	19488	19488	20871	20871
9	31678	24602	24602	26349	26349
10	39345	30556	30556	32726	32726
11	47513	36899	36899	39520	39520

ตารางที่ 4.3 แสดงความถี่ธรรมชาติของลักษณะที่ 2

Mode(k)	Natural Frequency [Hz]					
	Analytical Result			FE Result		
	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3
2	1089.6	1089.6	1089.6	1731	1731	1731
3	2565.1	2565.1	2565.1	3376	3376	3376
4	4874.1	4874.1	4874.1	6343	6343	6343
5	7611.8	7611.8	7611.8	8488	8488	8488
6	11204	11204	11204	13378	13378	13378
7	15205	15205	15205	17711	17711	17711
8	20069	20069	20069	22359	22359	22359
9	25335	25335	25335	28159	28159	28159
10	31467	31467	31467	35326	35326	35326
11	37999	37999	37999	41052	41052	41052

ตารางที่ 4.4 แสดงความถี่ธรรมชาติของลักษณะที่ 3

Mode (k)	Natural Frequency [Hz]	
	Analytical Result	FE Result
2	1056.7	1648.1
3	2487.6	3095.3
4	4726.9	5606
5	7318.9	7951
6	10865	13097
7	14746	17414
8	19462	21444
9	24570	27418
10	30516	35473
11	36851	41276