

การศึกษาลักษณะการสั่นตอบสนองของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้าย
ต่อการไหลผ่านของอากาศสำหรับประยุกต์ใช้ในเชิงการเก็บเกี่ยวพลังงาน
A Study of Downstream Structure's Vibration Respond to an Air-Flow
for Energy Harvesting Application

ภาคร อุทโยภาศ และ ขวลิต กิตติชัยการ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: mindgats@gmail.com, fengclk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาหารูปทรงของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงการเก็บเกี่ยวพลังงาน อุปกรณ์รับแรงลมรูปแบบต่างๆ ได้ถูกทดสอบในอุโมงค์ลมที่มีความปั่นป่วนต่ำที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 3000 ถึง 20000 ในงานวิจัยครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การสั่นตอบสนองของอุปกรณ์รับแรงลมต่อการไหลผ่านของอากาศ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวถูกออกแบบให้มีเสาทรงกระบอกด้านหน้ายึดติดอยู่กับที่เพื่อขวางการไหลของอากาศ และมีอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายเชื่อมเข้ากับบริเวณกึ่งกลางของเสาทรงกระบอกด้านหน้า ซึ่งอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายจะประกอบไปด้วยแผ่นอลูมิเนียมที่มีวัดรับแรงลมติดอยู่บริเวณปลายของแผ่นอลูมิเนียม จากผลการทดลองพบว่าการสั่นตอบสนองของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายขึ้นอยู่กับทั้งรูปทรงของวัดรับแรงลม และความยาวของแผ่นอลูมิเนียมโดยวัดรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นสูงที่สุดที่ค่าความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 160 มิลลิเมตร นอกจากนี้จากผลการศึกษาเส้นทางการไหลของอากาศผ่านชุดทดสอบอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายด้วยเทคนิคควันจะพบว่า การสั่นที่รุนแรงจะเกิดขึ้นเมื่อการไหลวนของอากาศเกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้าย ในทางกลับกันหากการไหลวนของอากาศเกิดขึ้น ณ บริเวณอื่น เช่น บริเวณด้านหลังของวัดรับแรงลมด้านท้าย จะทำให้เกิดการสั่นตอบสนองเพียงเล็กน้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย

คำสำคัญ :

การสั่นที่เกิดจากการชักนำของของไหล การจำลองการไหลวนของอากาศ การไหลวน อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

Abstract

This paper aims to analyze a vibration response of a downstream structure when subjected to an air flow. In order to seek an optimal downstream structure for energy harvesting application, different configurations of downstream structure were tested in a low turbulence intensity wind tunnel in a range of 3000-20000 of Reynolds number. Particular attention was paid to study a vibration response to subjected flow. A tested model consists of upstream cylinder connected with a downstream tip body via aluminum cantilever beam. According to experimental results, the vibration response of downstream structure depended on both of shapes of downstream structure and aluminum cantilever beam length. The highest vibration amplitude was found in a tested model with a triangular tip body and aluminum cantilever beam length of 160 mm. Furthermore, from smoke-flow visualization study, the high vibration response can be found when vortices were formed on each side of downstream structure. On the contrary, if the vortices were formed behind the downstream structure, there will be little or no vibration response for downstream structure.

Keyword :

flow-induced vibration; flow visualization; vortex; energy harvester

1. บทนำ

เมื่อนำวัตถุเช่น เสาทรงกระบอก มาวางขวางเส้นทางการไหลของของไหล วัตถุชิ้นนั้นจะเกิดการสั่นตอบสนองต่อการไหลผ่านของของไหล ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นที่รู้จักในชื่อ การสั่นที่เกิดมาจากการเหนี่ยวนำของของไหล(flow-induced vibrations) โดยทั่วไปความรุนแรงของการสั่นที่เกิดขึ้นสามารถสร้างความเสียหายและลดอายุการใช้งานให้แก่โครงสร้างของอาคารได้ ส่งผลให้เกิดความเสียหายทั้งทางทรัพย์สินและจิตใจ อย่างไรก็ตามด้วยพลังงานทางกลที่มากนั้นจึงเป็นที่น่าดึงดูดสำหรับนักวิจัยในการเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ นอกเหนือจากการใช้พลังงานลมดั้งเดิม [1]

วิธีการแปลงพลังงานทางกลจากการสั่นที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของของไหลไปสู่พลังงานไฟฟ้าสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก [2] หรือการใช้หลักการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า [3] เพื่อให้ได้ค่าพลังงานทางกลที่สูงเพียงพอต่อการแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ค่าแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุรับแรงลมที่ทำหน้าที่ในการแปลงพลังงานจึงจำเป็นต้องมีการสั่นตอบสนองที่เหมาะสม กล่าวคือ มีค่าแอมพลิจูดการสั่นที่สูงและมีการสั่นตอบสนองที่ความเร็วการไหลของของไหลต่ำๆ

หากนำวัตถุสองชิ้นมาวางเรียงกันในทิศการไหลของของไหล โดยมีวัตถุด้านลมอยู่บริเวณด้านหน้าและมีวัตถุรับแรงลมอยู่บริเวณด้านหลัง

จะพบว่าวัตถุทั้งสองเกิดการสั่นโดยวัตถุรับแรงลมด้านท้ายจะมีค่าแอมพลิจูดการสั่นที่สูงกว่าวัตถุด้านลมด้านหน้า อีกทั้งยังมีค่าแอมพลิจูดการสั่นสูงกว่าค่าแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุแบบเดียวกันที่ขบวนการไหลของของไหลเพียงชั้นเดียว [4] Abedelkefi และคณะ [5] ได้นำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์กับการเก็บเกี่ยวพลังงานผ่านวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยจากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์รับแรงลมรูปทรงกระบอกด้านท้ายสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าออกมาได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับอุปกรณ์รับแรงลมเพียงชั้นเดียว ที่ระยะระหว่างอุปกรณ์รับแรงลมทั้ง 2 ชั้นที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม การศึกษารูปทรงของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายยังไม่เป็นที่แพร่หลายนักสำหรับการประยุกต์ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงาน มีเพียงการศึกษาเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสั่นที่รุนแรง [6]

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทดสอบและศึกษาอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าแอมพลิจูดการสั่นของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายที่สูงเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงการเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยชุดทดสอบจะประกอบไปด้วยวัตถุด้านลมด้านหน้ารูปทรงกระบอกยึดติดอยู่กับพื้น โดยมีแผ่นอลูมิเนียมบางเชื่อมติดที่บริเวณกลางเสาพร้อมกับมีวัตถุรับแรงลมติดอยู่ที่ปลายของแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะและรูปทรงที่เหมาะสมจะทำให้ของไหลที่ไหลแยกออกมาจากวัตถุรับแรงลมด้านหน้าปะทะเข้ากับวัตถุรับแรงลมด้านท้ายโดยตรง ส่งผลให้เกิดการสั่นที่รุนแรง โดยจะทำการศึกษาพฤติกรรมการสั่นตบของ และเส้นทางการไหลของอากาศ

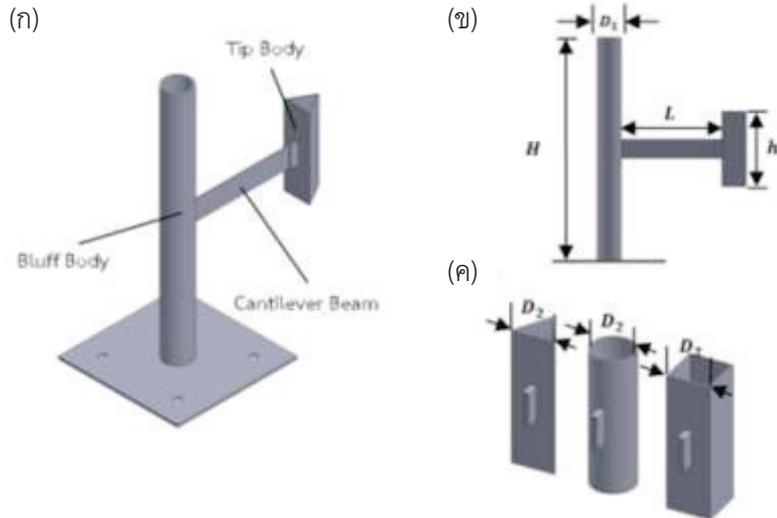
ผ่านอุปกรณ์ดังกล่าวโดยใช้เทคนิคการใช้ควันกับปัจจัยต่างๆ อันได้แก่ รูปทรงของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้าย ความยาวแผ่นอลูมิเนียมระหว่างเสาทรงกระบอกด้านหน้าและอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้าย และความเร็วการไหลของอากาศในรูปของตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 3000 ถึง 20000

2. วัสดุและอุปกรณ์

ภาพที่ 1 ชุดทดสอบอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้าย ซึ่งประกอบไปด้วยวัตถุด้านลมด้านหน้า (Bluff body) รูปทรงกระบอกทำมาจากวัสดุอลูมิเนียมยึดติดอยู่กับที่เพื่อขบวนการไหลของอากาศโดยจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก (D_1) เท่ากับ 32 มิลลิเมตร และสูง (H) 30 เซนติเมตรตาม ความสูงของส่วนการทดลองในอุโมงค์ลม แผ่นอลูมิเนียมหนาเพียง 0.5 มิลลิเมตร กว้าง 25 เซนติเมตร และมีความยาว (L) เป็นค่าต่างๆ สำหรับการทดลองได้แก่ 128 และ 160 มิลลิเมตร โดยจะเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของแผ่นอลูมิเนียมกับเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุด้านลม L/D_1 เท่ากับ 4 และ 5 ตามลำดับซึ่งเป็นระยะที่ทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรงสำหรับวัตถุทรงกระบอก 2 ชั้นมาวางเรียงกัน [7] โดยแผ่นอลูมิเนียมบางจะยึดติดแน่นอยู่บริเวณกึ่งกลางของวัตถุด้านลมทรงกระบอกด้านหน้า โดยปล่อยให้ปลายของแผ่นอลูมิเนียมอีกด้านหนึ่งเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระในแนวของการสั่นทางขวางและการสั่นแบบบิด วัตถุรับแรงลมด้านท้าย (Tip body) ถูกขึ้นรูปจากวัสดุพลาสติคชนิด Polylactic acid (PLA) โดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ รูปทรง

ของวัตถุรับแรงลมที่นำมาทดสอบได้แก่ ทรงสามเหลี่ยม ด้านเท่า ทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่า โดยแต่ละชิ้นมีความหนา 0.7 มิลลิเมตร สูง (h) 100 มิลลิเมตร และมีความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง D_2 เท่ากับ

3 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 (ค) โดยวัตถุที่อยู่ด้านท้ายวัตถุด้านลมรูปทรงทรงกระบอกด้านหน้าทั้งหมดจะเรียกว่า อุปกรณ์รับแรงลมด้านท้าย (Down-stream structure)

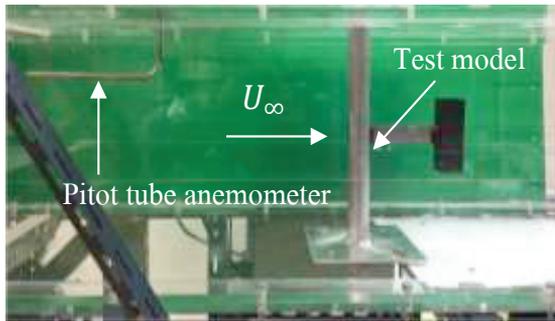


ภาพที่ 1 แบบชุดทดสอบอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้าย (ก) ภาพฉายที่มีมิติเท่ากัน ที่ $L/D_1 = 5$ และวัตถุรับแรงลมเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า (ข) ภาพฉายด้านข้าง (ค) อุปกรณ์รับแรงลมแต่ละรูปทรงเรียงจากซ้ายไปขวา รูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า, รูปทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

3. การติดตั้งและการทดลอง

ภาพที่ 2 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายภายในอุโมงค์ลมที่มีความปั่นป่วนต่ำ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและการสั่นตบสนองของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายต่อการไหลผ่านของอากาศ ชุดทดสอบอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายจะถูกยึดติดให้อยู่กับที่เข้ากับส่วนล่างของส่วนการทดลองของอุโมงค์ลม และให้ส่วนของแผ่นอลูมิเนียมและอุปกรณ์รับแรงลม

เคลื่อนที่อย่างอิสระ การทดลองแต่ละครั้งจะกระทำต่ออุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียงชิ้นเดียวในอุโมงค์ลม โดยการปรับความเร็วการไหลของอากาศ ตั้งแต่ 1.55 ถึง 9.8 เมตรต่อวินาที การบันทึกพฤติกรรมการสั่นของอุปกรณ์ที่ทำขึ้นในแต่ละความเร็วที่กำหนดจนครบ หลังจากนั้นจึงทดสอบกับอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายกรณีต่อไป



ภาพที่ 2 อุปกรณ์การทดลองสำหรับศึกษาพฤติกรรมของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบต่างๆ ถูกติดตั้งภายในอุโมงค์ลม

เครื่องวัดความเร็วลมชนิดท่อปีโตต์ (DP-CALC 5815, TSI inc., U.S.A.) ได้ถูกนำมาวัดความเร็วอากาศที่ไหลผ่านในส่วนการทดลองด้านหน้าอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานก่อนจะนำออกจากส่วนทดลองแล้วจึงทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวพฤติกรรมการสั่นของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้าย ข้อมูลช่วงความเร็วการไหลของอากาศที่ได้จากเครื่องวัดนั้นจะนำไปคำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์โดยใช้สมการที่ 1

$$Re_D = \frac{\rho U_\infty D}{\mu} = \frac{U_\infty D}{\nu} \quad (1)$$

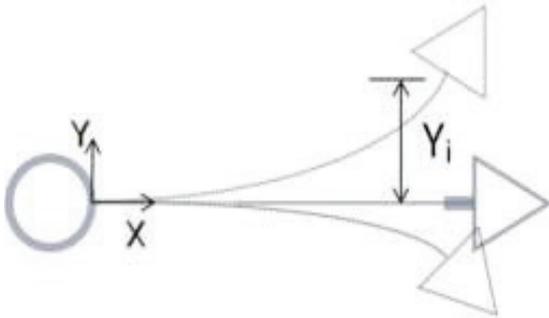
เมื่อ U_∞ คือความเร็วการไหลของอากาศ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที D คือเส้นผ่านศูนย์กลางวัตถุต้านลมด้านหน้ามีหน่วยเป็นเมตร ρ คือค่าคงที่ความหนาแน่นของอากาศ μ คือค่าคงที่ความหนืดของของไหลแบบไดนามิก และ ν คือค่าคงที่ความหนืดของของไหลแบบคินแมติก ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้ทำการศึกษา

ที่ความดันระดับชั้นบรรยากาศและมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าคงที่ต่างๆ จึงใช้เป็นค่าที่สภาวะดังกล่าว ทำให้ได้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลในช่วงการทดลองอยู่ระหว่าง 3000 ถึง 20000

กล้องความเร็วสูง ซึ่งสามารถบันทึกภาพเคลื่อนไหวได้ 120 เฟรมต่อวินาทีได้ถูกนำมาใช้บันทึกพฤติกรรมการสั่นของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายหลังจากนั้นจึงนำผลการทดลองที่เข้าสู่โปรแกรมประมวลผลภาพ Tracker เพื่อแปลงภาพเคลื่อนไหวที่ได้เป็นกราฟการสั่นตอบสนองของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้าย ข้อมูลการสั่นที่ได้มานั้นจะถูกประมวลผลในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง (Root mean square) ของค่าแอมพลิจูดการสั่นโดยจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2} = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_N^2}{N}} \quad (2)$$

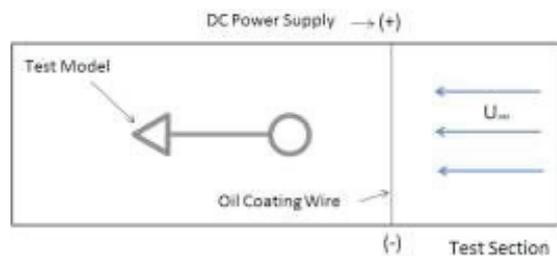
เมื่อ A_{rms} คือ ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมพลิจูดการสั่น มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร N แทนค่าด้วยจำนวนตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง และ Y_i แทนด้วยระยะทางการเคลื่อนที่ในแกน Y ของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายเทียบกับจุดสมดุล (equilibrium) ของระบบดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ตัวอย่างการสั้นของวัตถุรับแรงลมด้านท้าย
การสั้นตอบสนองของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายจะถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟแสดงค่าอัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมพลิจูดการสั้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุด้านลมตรงกระบอกด้านหน้า (A_{rms}/D_1) หรือเรียกโดยย่อว่าค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั้นในแนวแกน Y เทียบกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในแนวแกน X

นอกจากนี้งานวิจัยชิ้นนี้ยังได้นำเทคนิคการศึกษาเส้นทางการไหลของอากาศด้วยควัน (smoke flow visualization) มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของอากาศกับอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายดังแสดงในภาพที่ 4 ลวดสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ถูกขึงตามแนวขวางการไหลบริเวณด้านหน้าของชิ้นงานโดยห่างจาก

ชิ้นงานเป็นระยะ 150 มิลลิเมตร และสูงจากพื้นของส่วนทดลองเป็นระยะ 150 มิลลิเมตร ที่ผิวของลวดความร้อนมีการฉาบด้วย พาราฟินเหลว (paraffin liquid) โดยเมื่อลวดดังกล่าวได้รับความร้อนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดความดันไฟฟ้าปรับค่าได้ (GPS-3030D, Good Will Instrument Co., Ltd., Taiwan) พาราฟินเหลวบนผิวลวดจะเกิดการเผาไหม้ทำให้เกิดควันที่มีความคมชัดและเสถียร นอกจากนี้แผงไฟ LED ได้ถูกติดตั้งบริเวณด้านข้างของส่วนการทดลองเพื่อส่องสว่างชิ้นงานให้สามารถเห็นเส้นทางการไหลของอากาศได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมด้านท้ายจะถูกบันทึกโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูง 240 เฟรมต่อวินาทีซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนของส่วนการทดลอง



ภาพที่ 4 แผนผังการศึกษาเส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมด้านท้ายมุมสูง

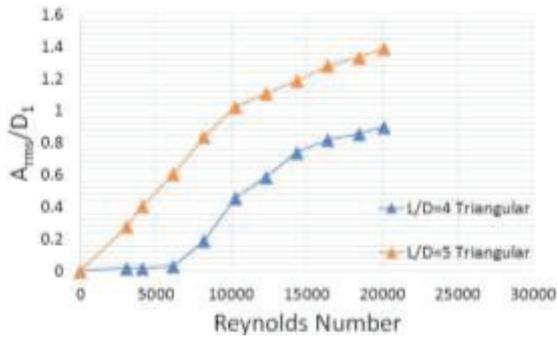
4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่น

ภาพที่ 5, 6 และ 7 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่าง A_{rms}/D_1 กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวของแผ่นอลูมิเนียมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุด้านลมทรงกระบอกด้านหน้า L/D_1 เท่ากับ 4 และ 5 จากผลการทดลองพบว่า ค่าแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายที่มีรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่ากับรูปทรงกระบอกจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหลของอากาศ อย่างไรก็ตามสำหรับวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่ากลับไม่พบการตอบสนองการสั่นในลักษณะดังกล่าวที่ทุกค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียม โดยสาเหตุการเกิดพฤติกรรมดังกล่าวจะทำการศึกษาในหัวข้อถัดไป

ภาพที่ 5 แสดงค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นสำหรับวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่ค่าอัตราความยาวของแผ่นอลูมิเนียมที่ $L/D_1 = 4$ และ 5 ที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 นั้นจะไม่มีการสั่นตบสนองเกิดขึ้นที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 0 ถึง 6164 แต่เมื่อเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศเกินค่าในช่วงดังกล่าว ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอย่าง

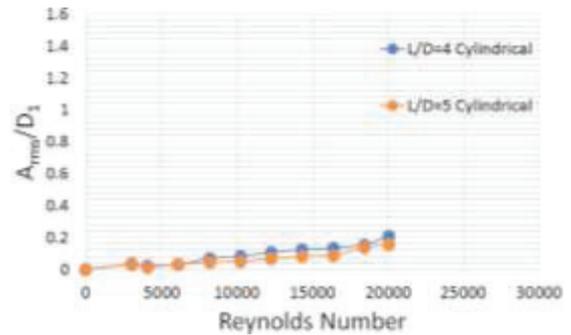
รวดเร็ว จนกระทั่งค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 16389 ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นและค่อยๆ มีค่าคงที่โดยค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นที่จุดสูงสุดจะสามารถพบที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 20077 และมีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นเท่ากับ 0.89 การสั่นตบสนองของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายในลักษณะดังกล่าวยังสามารถพบได้ที่ค่าอัตราส่วนความยาวเท่ากับ 5 ของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าอย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นที่ค่า $L/D_1 = 5$ มีค่าสูงกว่าค่าแอมพลิจูดการสั่นที่ $L/D_1 = 4$ อย่างเห็นได้ชัดโดยที่มีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดเท่ากับ 1.39 ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 20077 อีกทั้งที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 5 เริ่มมีการตอบสนองการสั่นตั้งแต่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 3073 และมีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ดังกล่าว จนกระทั่งมีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 18438 เป็นต้นไป ทั้งนี้สาเหตุที่ค่าแอมพลิจูดการสั่นค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งนั้น อาจจะเป็นผลจากความยาวของแผ่นอลูมิเนียมที่จำกัดจนทำให้อุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายสั่นได้ไม่เต็มที่ อย่างไรก็ตามการจำกัดระยะของแอมพลิจูดการสั่นนั้นช่วยป้องกันไม่ให้อุปกรณ์รับแรงลมสั่นรุนแรงจนสามารถสร้างความเสียหายให้แก่ตัวถูกรอบข้างได้



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่น (A_{rms}/D_1) กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่ L/D_1 เท่ากับ 4 และ 5

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์สำหรับวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงกระบอกที่อัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 และ 5 ถูกแสดงดังภาพที่ 6 จากกราฟดังกล่าวจะพบว่า เมื่อวัตถุรับแรงลมด้านท้ายเป็นรูปทรงกระบอกการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหลของอากาศจะส่งผลให้อุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายเกิดการสั่นด้วยค่าแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นทั้งสองค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียม โดยที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 มีการสั่นตอบสนองเพียงเล็กน้อย และค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างคงที่เมื่อความเร็วการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น โดยสามารถพบค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดเท่ากับ 0.21 ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 20077 อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมจาก 4 เป็น 5 กลับไม่ได้ทำให้ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นเพิ่มขึ้น แต่พบว่ามีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นกลับมีค่าลดลงเล็กน้อย

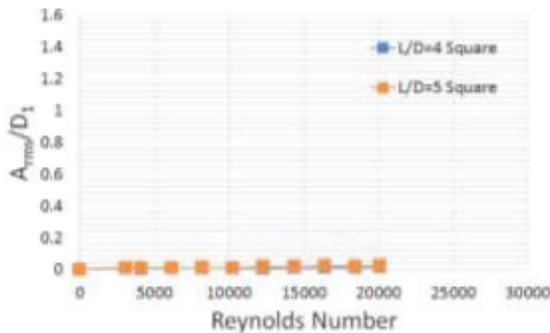
โดยที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 5 จะมีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดเท่ากับ 0.16 ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 20077 อย่างไรก็ตามลักษณะการสั่นตอบสนองของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายรูปทรงกระบอกยังคงมีความคล้ายคลึงกัน ทั้งสองค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียม



ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่น (A_{rms}/D_1) กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงกระบอก ที่ L/D_1 เท่ากับ 4 และ 5

ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุรับแรงลมรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 และ 5 จากผลการทดลองพบว่าวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีการสั่นตอบสนองเพียงเล็กน้อยต่อการไหลผ่านของอากาศ โดยที่จะพบค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นที่น้อยมากเมื่อเทียบกับวัตถุทรงอื่นๆ ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์และค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเดียวกัน โดยอาจจะเรียกได้ว่าวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้นแทบจะไม่มี การสั่นเลยอีกทั้งเมื่อเพิ่มค่าความเร็วการไหลของอากาศและค่าอัตราส่วนความยาวของ

แผ่นอลูมิเนียม ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นก็ได้มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนไม่สามารถหาความแตกต่างได้โดยค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ 0.02 ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 20077 สำหรับค่าความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 และ 5



ภาพที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่น (A_{rms}/D_1) กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ L/D_1 เท่ากับ 4 และ 5

โดยสรุป รูปทรงของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายและความยาวของแผ่นอลูมิเนียมมีผลต่อการสั่นตอบสนองของวัตถุรับแรงลมด้านท้าย จากการทดลองพบว่าวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่ามีการสั่นตอบสนองที่รุนแรงต่อการไหลผ่านของอากาศ ที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 และ 5 โดยการสั่นตอบสนองดังกล่าวมีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น และเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมจาก 4 เป็น 5 ในขณะที่วัตถุรับแรงลมรูปทรงกระบอกมีการสั่นตอบสนองต่อการไหลผ่านของอากาศเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่

เมื่อความเร็วการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นจึงเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ อย่างไรก็ตามหากเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาวการไหลของแผ่นอลูมิเนียมจาก 4 เป็น 5 กลับพบว่าค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นกลับลดลง สุดท้ายวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแทบจะไม่มีมีการสั่นตอบสนองต่อการไหลผ่านของอากาศไม่ว่าที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์หรือที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมใดๆ ก็ตาม

4.2 ผลการจำลองเส้นทางการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายด้วยเทคนิคการใช้ควีน

ภาพที่ 8 แสดงเส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่ารูปทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 ด้วยเทคนิคการใช้ควีน ที่ความเร็วการไหลของอากาศเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาทีหรือค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10243 โดยที่ความเร็วดังกล่าวพฤติกรรมการสั่นตอบสนองในแต่ละรูปทรงของวัตถุรับแรงลมมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดซึ่งจะทำการอธิบายในลำดับถัดไป

โดยภาพที่ 8 (ก) แสดงเส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่ค่าความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 จากผลการทดลองพบว่า อากาศที่ไหลผ่านวัตถุด้านลมด้านหน้าเกิดการแยกตัวออกมา แล้วกลับมารวมตัวกันที่ด้านข้างแผ่นอลูมิเนียมค่อนไปทางบริเวณด้านหน้าของวัตถุรับแรงลมด้านท้าย จากนั้นอากาศที่แยกไหลออกมาจึงไหลไปตามแผ่นอลูมิเนียมจนเข้าปะทะกับวัตถุรับแรงลมด้านท้าย ก่อให้เกิดการหมุนวนของอากาศเกิดขึ้นที่บริเวณด้านข้างของ

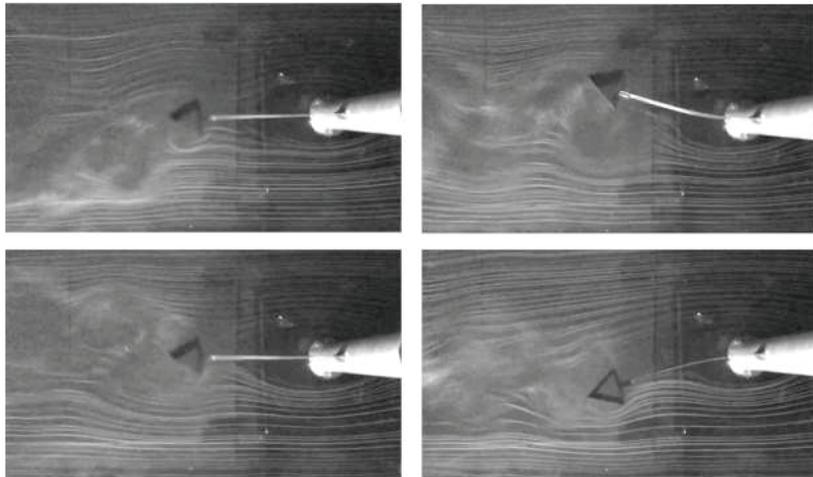
วัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการหมุนวนของอากาศ ณ บริเวณดังกล่าวส่งผลให้เกิดผลต่างความดันเกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวการไหลหลัก ส่งผลให้เกิดแรงผลักดันให้วัตถุรับแรงลมด้านท้ายเกิดการเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลกระแสหลัก เมื่อการเกิดการหมุนวนของอากาศในลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นสลับกลับไปมาระหว่าง 2 ข้างของวัตถุรับแรงลมด้านท้าย จึงเป็นเหตุให้วัตถุรับแรงลมรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าเกิดการสั่นที่รุนแรงดังผลการทดลองข้างต้น

ในขณะที่ภาพที่ 8 (ข) แสดงเส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมรูปทรงกระบอก ที่ค่าความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 โดยอากาศที่ไหลแยกออกมาจากวัตถุด้านลมด้านหน้ายังคงกลับมารวมตัวกันบริเวณเดิมเหมือนกับกรณีของวัตถุรับแรงลมรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า อย่างไรก็ตาม

ก็ตามเมื่ออากาศที่ไหลแยกออกมาปะทะเข้ากับวัตถุรับแรงลมด้านท้าย กลับพบว่าการหมุนวนของอากาศที่เกิดขึ้นกลับเกิดขึ้นบริเวณด้านข้างค่อนข้างไปทางด้านท้ายของวัตถุรับแรงลมด้านท้าย โดยในบริเวณดังกล่าวที่เกิดการหมุนวนของอากาศ ทำให้ผลต่างความดัน เกิดขึ้นในบริเวณด้านข้างไม่เต็มที่ส่งผลทำให้วัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงกระบอกเกิดการสั่นที่ไม่รุนแรงเท่ากับวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า

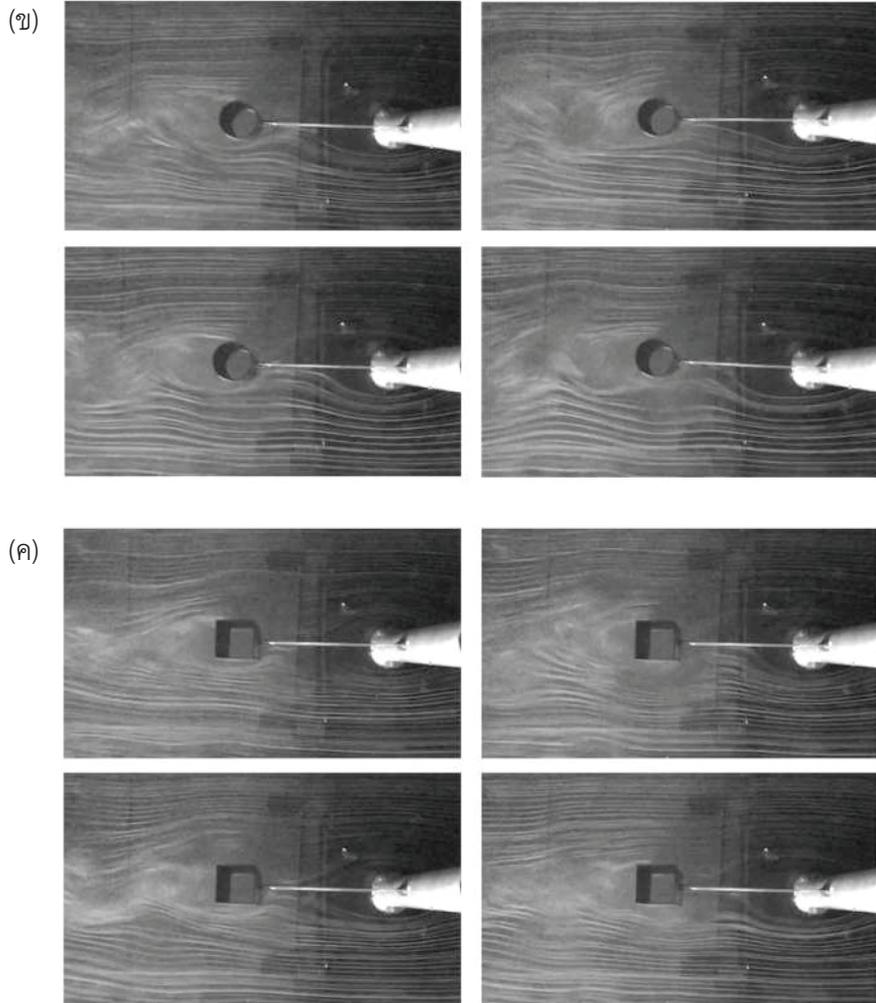
การเกิดการหมุนวนของอากาศบริเวณด้านท้ายของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายนั้นสามารถพบได้ในวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังแสดงในภาพที่ 8 (ค) ซึ่งการเกิดการหมุนวนของอากาศในบริเวณดังกล่าว ส่งผลให้เกิดความต่างของความดันในทิศเดียวกันกับแนวการไหลกระแสหลัก การสั่นที่รุนแรงในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลกระแสหลัก จึงไม่สามารถพบได้ในวัตถุรับแรงลมรูปทรงนี้

(ก)



ภาพที่ 8 เส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมรูปทรงต่างๆ ที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 มีความเร็วการไหลของอากาศเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาทีหรือ $Re = 10243$

(ก) รูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า (ข) รูปทรงกระบอก และ (ค) รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส



ภาพที่ 8 เส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมรูปทรงต่างๆ ที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 มีค่าความเร็วการไหลของอากาศเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาทีหรือ $Re = 10243$

(ก) รูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า (ข) รูปทรงกระบอก และ (ค) รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

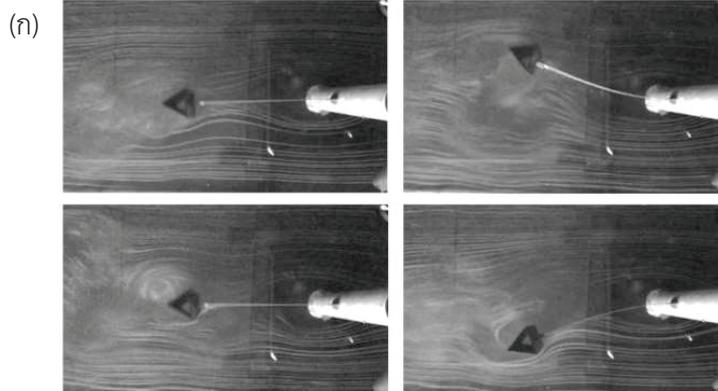
จากการทดลองข้างต้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียม พฤติกรรมการสั่นของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงกันในแต่ละรูปทรงของวัตถุรับแรงลมด้านท้าย อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นกลับมีการเปลี่ยนแปลง โดยในภาพที่ 9 จะแสดง

เส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ค่าความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 5 ด้วยเทคนิคการใช้ควัน ที่ความเร็วการไหลของอากาศเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาทีหรือค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10243 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

โดยในภาพที่ 9 (ก) แสดงเส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ค่าความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 5 จากผลการทดลองพบว่า อากาศที่ไหลแยกออกมาจากวัตถุด้านลมด้านหน้ากลับมารวมตัวกันบริเวณด้านข้างของแผ่นอลูมิเนียม ในระยะจุดกึ่งกลางของแผ่นอลูมิเนียม โดยอากาศที่ไหลแยกออกมานั้นได้ไหลตามแผ่นอลูมิเนียมและเข้าปะทะกับวัตถุรับแรงลมด้านหลัง โดยจะพบว่าอากาศที่หมุนวนบริเวณด้านข้างของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่ค่าอัตราส่วนความยาวเท่ากับ 5 นั้นมีขนาดใหญ่กว่าอากาศที่หมุนวนบริเวณด้านข้างของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ค่าอัตราส่วนความยาวเท่ากับ 4 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 5 มากกว่าที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 สำหรับวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงกระบอกนั้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมจาก 4 เป็น 5 กลับพบว่าบางครั้งไม่สามารถพบการหมุนวนของอากาศเกิดขึ้นในทั้งบริเวณด้านข้างและด้านหลังของวัตถุรับแรงลม

ด้านท้ายดังแสดงในภาพที่ 9 (ข) อย่างไรก็ตามยังคงมีการเกิดการหมุนวนของอากาศบริเวณเดิมเหมือนกับที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 โดยการเกิดการหมุนวนของอากาศเป็นครั้งคราวนี้จึงเป็นสาเหตุหลักให้วัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงกระบอกมีค่าแอมพลิจูดการสั่นที่ค่าความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 5 น้อยกว่าที่ค่าความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4

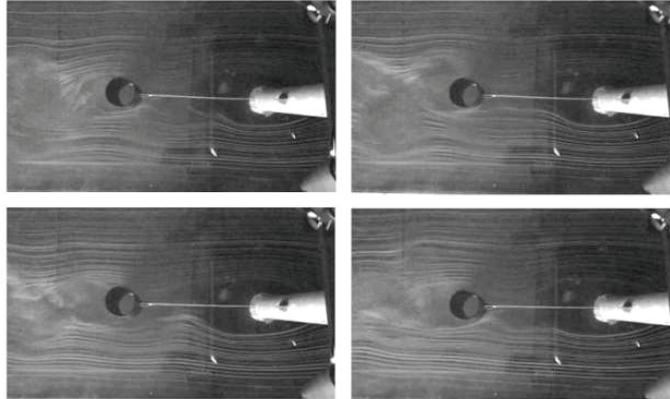
เมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมจาก 4 เป็น 5 สำหรับวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลับพบเพียงการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของบริเวณการรวมตัวของอากาศที่ไหลแยกออกมาจากวัตถุด้านลมด้านหน้าดังแสดงในภาพที่ 9 (ค) โดยอากาศที่ไหลแยกออกมาจากวัตถุด้านลมด้านหน้าจะกลับมารวมตัวกันบริเวณประมาณกึ่งกลางของแผ่นอลูมิเนียมแทนที่จะเป็นบริเวณค่อนข้างทางด้านหน้าของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 5 อย่างไรก็ตามการหมุนวนของอากาศยังคงพบได้ที่บริเวณด้านหลังของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายเช่นเดิม



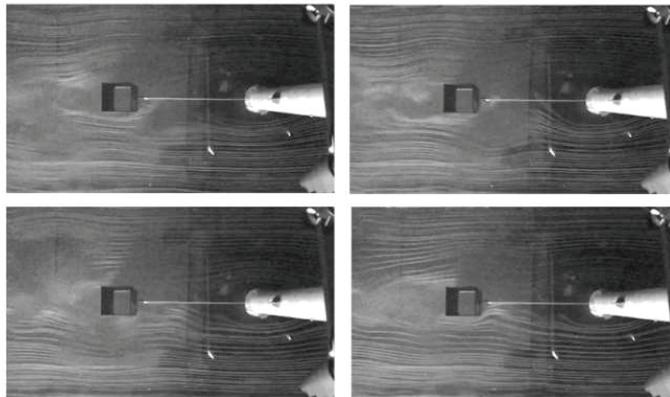
ภาพที่ 9 เส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมรูปทรงต่างๆ ที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 5 มีค่าความเร็วการไหลของอากาศเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาทีหรือ $Re = 10243$

(ก) รูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า (ข) รูปทรงกระบอก และ (ค) รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

(ข)



(ค)



โดยสรุป รูปทรงของวัตถุรับแรงลมด้านท้าย และค่าอัตราส่วนของความยาวของแผ่นอลูมิเนียม ส่งผลต่อบริเวณการเกิดการหมุนวนของอากาศ โดยเมื่อการหมุนวนของอากาศเกิดในทิศตั้งฉากกับกระแสการไหลหลักหรือบริเวณด้านข้างของวัตถุรับแรงลมด้านท้าย จะทำให้เกิดการสั่นที่รุนแรง โดยการเกิดการหมุนวนในลักษณะนี้จะพบได้ในวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าทั้งสอง ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียม แต่เมื่อเป็นวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงกระบอกกลับ พบว่าการหมุนวนของอากาศกลับเกิดขึ้นบริเวณด้านข้างค่อนข้างค่อนไปทางด้านหลังของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายส่งผลให้เกิดการสั่นตบสนองที่ไม่ค่อยรุนแรงมากนัก ในขณะที่เดียวกันวัตถุรับแรงลมด้านท้าย

รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสยอมให้เกิดการหมุนวนของอากาศที่บริเวณด้านหลังของวัตถุรับแรงลม ส่งผลให้แทบจะไม่มี การสั่นตบสนองต่อการไหลผ่านของอากาศสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น

5. สรุปผล

การทดสอบอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายที่มีวัตถุรับแรงลมรูปทรงต่างๆ และมีค่าความยาวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 4 และ 5 ได้ทำการศึกษาในอุโมงค์ลมที่มีความปั่นป่วนต่ำเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นตบสนองของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายต่อการไหลผ่านของอากาศ จากผลการทดลองพบว่ารูปทรงของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายและค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมต่างมีผลต่อค่าอัตราส่วน

แอมพลิจูดการสั่น โดยจะพบว่าวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่ามีการสั่นตอบสนองรุนแรงที่สุด ทั้งสองค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียม โดยที่วัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงระบอบก มีการสั่นตอบสนองไม่รุนแรงเท่ากับของวัตถุรับแรงลมรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า อย่างไรก็ตามกลับไม่พบการสั่นตอบสนองในวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งสองค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียม

จากการจำลองเส้นทางการไหลของอากาศผ่านวัตถุรับแรงลมด้านท้ายโดยใช้เทคนิคค้นพบว่าที่วัตถุรับแรงลมรูปทรงต่างๆ และที่ค่าอัตราส่วนความยาวของแผ่นอลูมิเนียมที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้เกิดการหมุนวนของอากาศซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการสั่นของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายในบริเวณที่แตกต่างกัน โดยที่หากการหมุนวนของอากาศเกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายจะส่งผลให้เกิดการสั่นที่รุนแรง ในทางกลับกันหากเกิดการหมุนวนของอากาศ บริเวณด้านหลังของวัตถุรับแรงลมด้านท้ายจะส่งผลให้เกิดการสั่นตอบสนองเพียงเล็กน้อยหรือว่าการตอบสนองเลย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชุติมา จงอรุณงามแสง และดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์. (2557). ผลกระทบของพลังงานลมต่อความเพียงพอของการผลิตไฟฟ้าวิศวกรรมศาส มก. ปีที่ 27 ฉบับที่ 89 : 69-78
- [2] Allen, J. J., and Smits, A. J., (2001), "Energy harvesting eel". *Journal of Fluids and Structures* Vol. 15. No.3, pp 629-640.
- [3] Ali, M., Arafa, M., and Elaraby, M., (2013), "Harvesting Energy from Galloping Oscillations." *Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol. III, WCE 2013, July 3-5, 2013, London, U.K.*
- [4] Mizushima, J., and Suehiro, N., (2005), "Instability and transition of flow past two tandem circular cylinders", *Physics of Fluids*, Vol. 17. No. 10, pp 104107.
- [5] Abdelkefi, A., Hasanyan, A., Montgomery, J., Hall, D., and Hajj, M. R., (2014), "Incident flow effects on the performance of piezoelectric energy harvesters from galloping vibrations", *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, Vol. 4. No. 2, pp 022002.
- [6] Blevins, R. D., (1977), *Flow-induced vibration*/Robert D. Blevins, Van Nostrand Reinhold Co. Inc., New York.
- [7] Hyung-Jo, J., and Seung-Woo, L., (2011), "The experimental validation of a new energy harvesting system based on the wake galloping phenomenon", *Smart Materials and Structures*, Vol. 20. No. 5, pp 055022.