

การศึกษาผลกระทบการจัดการการไหลต่อการเพิ่มการผลิตกระแสไฟฟ้า ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

An Effect of Flow Arrangement on Power Generation of Energy Harvester

ศรารดี ประเสริฐจตุตถิณี และ ชวลิต กิตติชัยการ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: saravadee.pra@ku.th, fengclk@ku.ac.th

▶ บทคัดย่อ ◀

บทความนี้นำเสนอแนวคิดการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานและการจัดการการไหลของอากาศผ่านชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด การทดลองจะทำในอุโมงค์ลมที่มีระดับความปั่นป่วนต่ำ มีค่าความเร็วการไหลของอากาศในอุโมงค์ลมที่ตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 10,240 ถึง 17,613 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ออกแบบจะประกอบด้วยวัตถุต้านลมรูปทรงกระบอก ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการไหลไปยังวัตถุรับแรงลมด้านหลัง ทำให้วัตถุนี้สั่นและไปตีกระทบกับวัตถุตัวถูกตีให้สั่นต่อเนื่อง แผ่นเพียโซอิเล็กทริกได้ถูกติดตั้งที่วัตถุที่ถูกตีนี้ ทำให้สามารถเปลี่ยนพลังงานการสั่นเป็นพลังงานไฟฟ้าได้จากผลการศึกษาพบว่า การสั่นของตัวที่มีอิทธิพลโดยตรงต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดการสั่นของตัวที่ถูกตีเมื่ออัตราส่วนระยะห่างระหว่างวัตถุต้านลมทรงกระบอกและวัตถุรับแรงลมปริซึมทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุต้านลม ($\frac{L}{D}$) เท่ากับ 2.5 นอกจากนี้ผลการทดลองเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าพบว่า ค่าเฉลี่ยกำลังสองของพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลเพิ่มขึ้น และสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 1,427.75 ไมโครวัตต์ที่อัตราส่วน $\frac{L}{D}$ เท่ากับ 2.5

▶ คำสำคัญ : ◀

การสั่นที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของของไหล; การเก็บเกี่ยวพลังงาน; วัสดุเพียโซอิเล็กทริก; พลังงานลม; อุโมงค์ลม

▶ Abstract ◀

This paper investigates the effect of flow arrangement on the electrical output of a newly designed energy harvesting device. The device consists of a stationary upstream cylinder and a downstream tip body. Electric power is produced when an upstream cylinder causes a flow-induced vibration to its downstream structure that would in turn collide with an object resulting in a continuous vibration. A piezoelectric transducer patch, installed at the collided

object, can thus convert vibration energy to electrical energy. In this study, an experiment was carried out in a low turbulence intensity wind turbine at a flow range of 10,240 to 17,613 Reynolds number by varying the ratio between the distance between upstream cylinder to downstream tip body and the diameter of the upstream cylinder ($\frac{L}{D}$) Based on the results obtained, it was found that vibration had an instantaneous influence on the rate increase of the collided object's vibrating amplitude at an ($\frac{L}{D}$) ratio of 2.5. Furthermore, the results also showed that the root mean square electrical output power was increasing as Reynolds number was increased and a maximum electrical power output of 1,427.75 microwatts was obtained at $\frac{L}{D}$ ratio of 2.5.

Keywords:

flow-induced vibration; energy harvesting; piezoelectric material; wind energy; wind tunnel

1. บทนำ

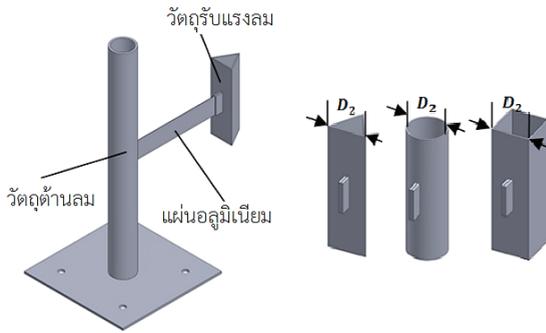
เนื่องจากในปัจจุบันปัญหาด้านมลภาวะทางอากาศ ฝุ่นละอองขนาดเล็กหรือ PM 2.5 ซึ่งเกิดจากอุตสาหกรรม การคมนาคม และโรงงานไฟฟ้าพลังงานฟอสซิล กำลังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนไทย บทความนี้นำเสนอการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานสะอาด โดยการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นอันเกิดจากของไหล ซึ่งหนึ่งในวิธีการแปลงพลังงานทางกลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมคือ การใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และนำมาเก็บสะสมเพื่อที่จะสามารถใช้งานต่อไป [1, 2]

การสั่นอันเกิดจากการเหนี่ยวนำของของไหล (Flow-induced Vibrations) เกิดจากการที่วัตถุที่อยู่ภายใต้การไหลของของไหลนั้นเกิดการสั่น โดยการสั่นนี้ถูกเหนี่ยวนำจากการไหลวนของของไหลที่ไหลผ่านวัตถุอีกชิ้นหนึ่งที่วางอยู่บริเวณด้านหน้า (Wake-induced vibration; WIV) [3, 4]

อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมักจะถูกออกแบบให้ประกอบด้วยตัวรับพลังงานและวัตถุที่ขวางการไหลของของไหลซึ่งมีหลากหลายรูปแบบ โดยการศึกษาเน้นไปที่ผลกระทบของอุปกรณ์จากระยะห่างระหว่าง

วัตถุที่ขวางการไหลและอุปกรณ์รับแรงจากของไหล [5] การศึกษาผลกระทบการจัดการการไหลของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมีปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างวัตถุที่ขวางการไหลและอุปกรณ์รับแรงลม และความเร็วลมในรูปของตัวเลขเรย์โนลด์ที่ถูกทดสอบในอุโมงค์ลม จากแนวคิดของ [6] เมื่อนำวัตถุหลายชิ้นมาเรียงกัน (Tandem) เพื่อขวางการไหล ลักษณะและรูปแบบการไหลของของไหลที่ไหลผ่านวัตถุด้านลมที่ขวางการไหลด้านหน้าจะมีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างวัตถุชิ้นหน้าและวัตถุชิ้นหลัง และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ [7] ได้นำความรู้เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำของการไหลวนของของไหลไปผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

งานวิจัยต่อมาของ [8] ได้ทำการศึกษาหารูปทรงของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงการเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยพบว่า การสั่นตบสนองของอุปกรณ์รับแรงลมด้านท้ายขึ้นอยู่กับทั้งรูปทรงของวัตถุรับแรงลมและความยาวของแผ่นอลูมิเนียม โดยมีวัตถุรับแรงลม 3 รูปแบบ คือ รูปทรงสามเหลี่ยม ด้านเท่า รูปทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่า ดังภาพที่ 1

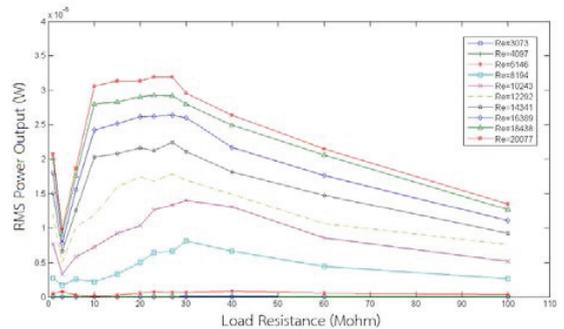


ภาพที่ 1 แบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานและ
วัตถุรับแรงลมรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า
ที่วัตถุรับแรงลมแต่ละรูปร่างต่างๆ

จากผลการศึกษาของ [8] พบว่าวัตถุรับแรงลม
ด้านท้ายรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีค่าอัตราส่วน
แอมพลิจูดการสั่นสูงสุด โดยสามารถผลิตค่าเฉลี่ย
กำลังสองของพลังงานไฟฟ้าในการทดลองได้สูงสุด
มีค่าเท่ากับ 3.195 ไมโครวัตต์ ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์
20,077 ที่ความต้านทานทางไฟฟ้าเท่ากับ 27 ล้านโอห์ม
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังสองของ
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน
กับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าตั้งแต่ 1 ถึง 100
ล้านโอห์ม ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 3,000 ถึง
20,077 ดังภาพที่ 2

งานวิจัยนี้จึงนำวัตถุรับแรงลมด้านท้ายรูปทรง
สามเหลี่ยมด้านเท่ามาเป็นแนวคิดเริ่มต้นในการออกแบบ
อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน โดยประกอบด้วยวัตถุตั้งแนวน
รูปทรงกระบอก ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการไหล
ไปยังวัตถุรับแรงลมด้านหลัง ทำให้วัตถุนี้สั่นและ
ไปตีกระทบกับวัตถุตัวลูกตี ที่มีแผ่นเพียโซอิเล็กทริก
ติดตั้งอยู่ทำให้เกิดการสั่นได้ต่อเนื่อง ดังนั้นงานวิจัยนี้
มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบการจัดการ
การไหลต่อการเพิ่มการผลิตกระแสไฟฟ้าของ

อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นอันเกิด
มาจากการไหลวนของอากาศจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่
ระยะห่างระหว่างวัตถุที่ขวางการไหลและอุปกรณ์
รับแรงลมและความเร็วลมในรูปของตัวเลขเรย์โนลด์
อีกทั้งหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากอุปกรณ์
เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นอันเกิดมาจากการไหล
วนของอากาศ

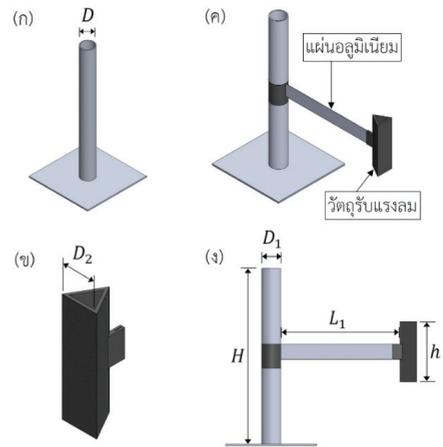


ภาพที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย
กำลังสองของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอุปกรณ์
เก็บเกี่ยวพลังงานกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้า
และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆ

2. วัสดุและอุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน
รูปแบบใหม่ได้ถูกออกแบบโดยประยุกต์แนวคิด
ที่ได้กล่าวไปข้างต้น ดังแสดงในภาพที่ 3 และ 4
โดยชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ถูกออกแบบนั้น
จะประกอบไปด้วยวัตถุตั้งแนวนด้านหน้าเป็นรูปทรง
กระบอกทำมาจากวัสดุอลูมิเนียม ซึ่งมีเส้นผ่าน
ศูนย์กลางของทรงกระบอก (D) เท่ากับ 32 มิลลิเมตร
ถูกยึดอยู่กับที่ทางด้านหน้าเพื่อขวางการไหลของ
ของไหล ในขณะที่ส่วนอุปกรณ์รับแรงลมจะประกอบ
ไปด้วยทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_1)

เท่ากับ 32 มิลลิเมตร และสูง (H) เท่ากับ 30 เซนติเมตร ตามความสูงของส่วนการทดลองในอุโมงค์ลม แผ่นอลูมิเนียมหนาเพียง 0.55 มิลลิเมตร มีความกว้าง 25 เซนติเมตร และความยาว (L_1) เท่ากับ 192 มิลลิเมตร จะถูกยึดติดกับทรงกระบอกทำให้อัตราส่วนระหว่างความยาวของแผ่นอลูมิเนียมกับเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุตันกลม ($\frac{L_1}{D}$) เท่ากับ 6 โดยเป็นความยาวของแผ่นอลูมิเนียมที่เหมาะสมกับความกว้างของส่วนการทดลองภายในอุโมงค์ลมที่ใช้ทำการทดลอง ซึ่งแผ่นอลูมิเนียมบางจะถูกติดตั้งอยู่บริเวณกึ่งกลางของวัตถุตันกลมทรงกระบอกที่ถูกยึดอยู่กับที่ โดยปล่อยให้ปลายของแผ่นอลูมิเนียมอีกด้านหนึ่งเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระในแนวของการสั่นทางขวางและการสั่นแบบบิด วัตถุรับแรงลมจะมีรูปร่างเป็นปริซึมทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ขึ้นรูปจากวัสดุพลาสติกชนิด Polylactic Acid (PLA) โดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ รูปทรงของวัตถุรับแรงลมที่นำมาทดสอบเป็นปริซึมทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยมีความหนา 2.5 มิลลิเมตร มีความสูง (h) เท่ากับ 95 มิลลิเมตร มีความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_2) เท่ากับ 32 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักเท่ากับ 40.7367 กรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ทำให้มีแรงตีกระทบกับตัวถูกตีมากเพียงพอให้เกิดการสั่นและไม่ทำให้เกิดการสั่นแบบบิด (Torsional Vibration) ของแผ่นอลูมิเนียมอีกด้วย โดยวัตถุที่อยู่ด้านท้ายเสาทรงกระบอกทั้งหมดจะเรียกว่า อุปกรณ์รับแรงลม ดังแสดงในภาพที่ 3

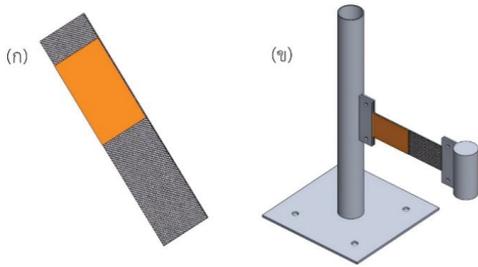


ภาพที่ 3 (ก) วัตถุตันกลมรูปทรงกระบอก

(ข) วัตถุรับแรงลมรูปปริซึมทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า
(ค) ภาพฉายที่มีมิติเท่ากันของแบบอุปกรณ์รับแรงลมของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

(ง) ภาพฉายด้านข้างของแบบอุปกรณ์รับแรงลมของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

อีกส่วนหนึ่งของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจะประกอบด้วย ทรานสดิวเซอร์แบบแผ่นชนิดเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Patch Transducer) รุ่น P-876.A12 จากบริษัท Physik Instrumente (PI), Germany ที่ยึดติดมากับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Plate) ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) ซึ่งยึดติดแน่นกับฐานเหล็กทรงกระบอก เพื่อให้ส่วนปลายด้านหนึ่งของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ยึดติดแน่นอยู่กับที่ เพื่อไม่ให้อุปกรณ์ขยับได้ และปลายอีกด้านหนึ่งจะถูกยึดติดกับแท่งเหล็กทรงกระบอก เพื่อถ่วงน้ำหนักที่มีน้ำหนักเท่ากับ 250 กรัม โดยที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริกนี้จะอยู่ติดกับส่วนที่ยึดไว้กับฐานเหล็กที่ถูกยึดติดแน่นอยู่กับที่ ดังแสดงในภาพที่ 4 (ข)



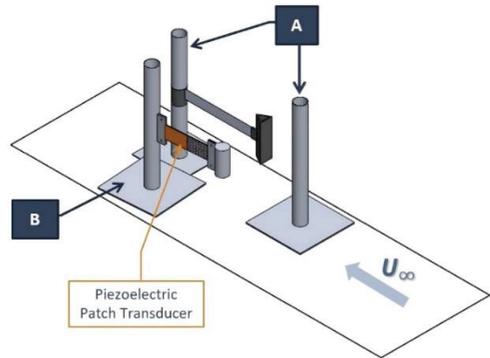
ภาพที่ 4 (ก) ทรานสดิวเซอร์แบบแผ่นชนิดเพียโซอิเล็กทริก รุ่น P-876.A12 ที่ติดกับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (ข) ภาพฉายที่มีมิติเท่ากันของแบบ ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

3. การติดตั้งและการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีส่วนหลักของขั้นตอนการทดลองคือ ส่วนการศึกษาพฤติกรรมของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ประกอบไปด้วย ส่วนรับแรงลมที่ไปตีกระทบกับส่วนอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่มีแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ติดตั้งอยู่ เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าแอมพลิจูดการสั่นของทั้งสองส่วนนั้นได้ค่าสูงสุด และส่วนการศึกษาหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสามารถผลิตได้ในแต่ละค่าตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 10,240 ถึง 17,613

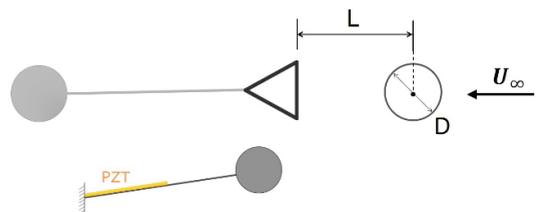
ภาพที่ 5 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในส่วนของการทดลอง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ถูกออกแบบและติดตั้งภายในอุโมงค์ลม วัตถุต้านลมรูปทรงกระบอกและฐานของตัวยึดอุปกรณ์รับแรงลมจะถูกยึดติดให้อยู่กับที่เข้ากับส่วนล่างของส่วนการทดลองของอุโมงค์ลม ปล่อยให้ส่วนของแผ่นอลูมิเนียมและวัตถุรับแรงลมรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระในแนวของการสั่นทางขวาง ส่วนอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่มีแผ่นเพียโซอิเล็กทริก รุ่น P-876.A12 ยึดติดอยู่กับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์นั้น ปลายด้านหนึ่งจะถูก

ยึดติดอยู่กับที่เข้ากับเหล็กทรงกระบอกที่ส่วนล่างของส่วนการทดลองของอุโมงค์ลมเช่นกัน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะมีเหล็กทรงกระบอกถ่วงน้ำหนักที่จะได้รับการตีกระทบจากส่วนอุปกรณ์รับแรงลมดังที่กล่าวไว้ โดยทิศทางของการไหลของอากาศจะเคลื่อนที่เข้ามาปะทะทางด้านวัตถุต้านลมรูปทรงกระบอก



ภาพที่ 5 ชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับศึกษาพฤติกรรมการสั่น ที่ถูกติดตั้งภายในอุโมงค์ลม

ในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการจัดวางตำแหน่งของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน โดยให้อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของวัตถุต้านลมทรงกระบอกและวัตถุรับแรงลมปริซึมทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุต้านลม ($\frac{L}{D}$) เท่ากับ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยการปรับความเร็วการไหลของอากาศ ตั้งแต่ 5.0 ถึง 8.6 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 6 ภาพฉายด้านบนที่แสดงการจัดวางตำแหน่งของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

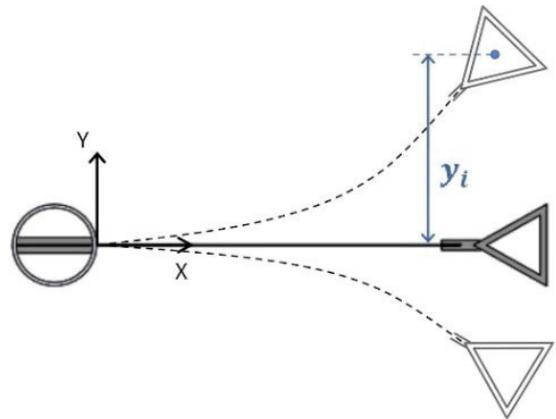
เครื่องวัดความเร็วลมชนิดท่อปีโตต์ (DP-CALC 5815, TSI inc., U.S.A.) ได้ถูกนำมาใช้วัดความเร็วอากาศที่ไหลผ่านในส่วนการทดลองด้านหน้าวัตถุต้านลม และอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานก่อนจะนำออกจากส่วนทดลอง หลังจากนั้นทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวพฤติกรรมการสั่นของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ข้อมูลความเร็วอากาศที่ได้จากเครื่องวัดนั้นจะถูกนำเอาไปคำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์

จากนั้นทำการทดลองและศึกษาพฤติกรรมการสั่นของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานโดยทดลองที่แต่ละความเร็วที่กำหนดจนครบ หลังจากนั้นจึงทำการทดลองโดยการเปลี่ยนตำแหน่งการจับวางชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน กำหนดเงื่อนไขการทดลองสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานดังนี้ ความเร็วการไหลของอากาศเท่ากับ 5.0, 5.6, 6.2, 6.8, 7.4, 8.0 และ 8.6 เมตรต่อวินาที ค่าวนเป็นตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10,240 11,469 12,698 13,926 15,155 16,384 และ 17,613 ตามลำดับ และในแต่ละค่าอัตราส่วน $\frac{L}{D} = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ และ 3.5

ในการศึกษาการสั่นของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนี้จะใช้กล้องความเร็วสูง ซึ่งสามารถบันทึกภาพเคลื่อนไหวได้ 120 เฟรมต่อวินาที บันทึกพฤติกรรมการสั่นของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ภาพเคลื่อนไหวที่บันทึกได้นั้นจะถูกนำไปเข้าโปรแกรมประมวลผลภาพ Tracker ในคอมพิวเตอร์ เพื่อแปลงภาพเคลื่อนไหวของการสั่นของอุปกรณ์เป็นกราฟการสั่นของวัตถุปริซึมทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าของส่วนรับแรงลม และเหล็กถ่วงน้ำหนักที่ถูกยึดกับปลายด้านหนึ่งของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าเฉลี่ยยกกำลังสองของค่าแอมพลิจูดการสั่นของทั้งสองตัว ที่แต่ละตัวเลขเรย์โนลด์ สำหรับค่าเฉลี่ยยกกำลังสองของค่าแอมพลิจูดการสั่นนั้นจะสามารถหาได้จาก

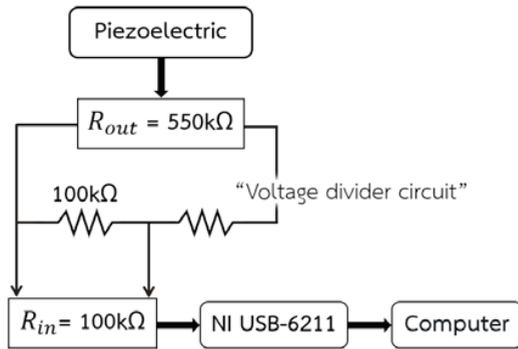
$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2} = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_N^2}{N}} \quad (1)$$

เมื่อ A_{rms} คือค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดการสั่น มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร N แทนค่าด้วยจำนวนตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง และ y_i แทนด้วยระยะทางการเคลื่อนที่ในแกน Y ของวัตถุปริซึมทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าของส่วนรับแรงลมเทียบกับจุดสมดุลของระบบ ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งได้มาจากกราฟการสั่นของวัตถุรับแรงลม



ภาพที่ 7 การวัดระยะแอมพลิจูดของการสั่นของวัตถุรับแรงลมรูปปริซึมทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ความเร็วแต่ละตัวเลขเรย์โนลด์ที่ได้มาจากการทดลองนั้นจะถูกนำมากรองสัญญาณส่งผ่านไปยังตัวความต้านทาน และวงจรลดความดันกระแสไฟฟ้า (Voltage Divider Circuit) ได้ถูกนำมาต่อกับวงจรก่อนที่จะเข้าไปยังชุดเครื่องมือวัดเพื่อลดค่าความดันกระแสไฟฟ้า โดยทำหน้าที่ในการส่งผ่านข้อมูลกระแสไฟฟ้าและค่าพลังงานไฟฟ้างดงกล่าวไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปประมวลผลต่อในโปรแกรม LabVIEW ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แผนผังการต่อวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า
ที่ติดคร่อมระหว่างแผ่นเพียโซอิเล็กทริก
และชุดเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า

การคำนวณหาค่าเฉลี่ยกำลังสองในโปรแกรม
MATLAB เพื่อให้ได้ค่ามาตรฐานทางไฟฟ้าและนำไป
แสดงในรูปกราฟเทียบกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ได้ โดย
ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถ
คำนวณได้โดย

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_N^2}{N}} \quad (2)$$

เมื่อ V_{rms} คือค่าเฉลี่ยกำลังสองของ
ค่าความดันไฟฟ้า V_i คือค่าความดันไฟฟ้าในช่วง
เวลาต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และ N คือจำนวน
ตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

การหาค่าพลังงานไฟฟ้าจากวัสดุเพียโซอิเล็ก-
ทริกนั้นจะสามารถหาได้จาก

$$P_{rms} = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (3)$$

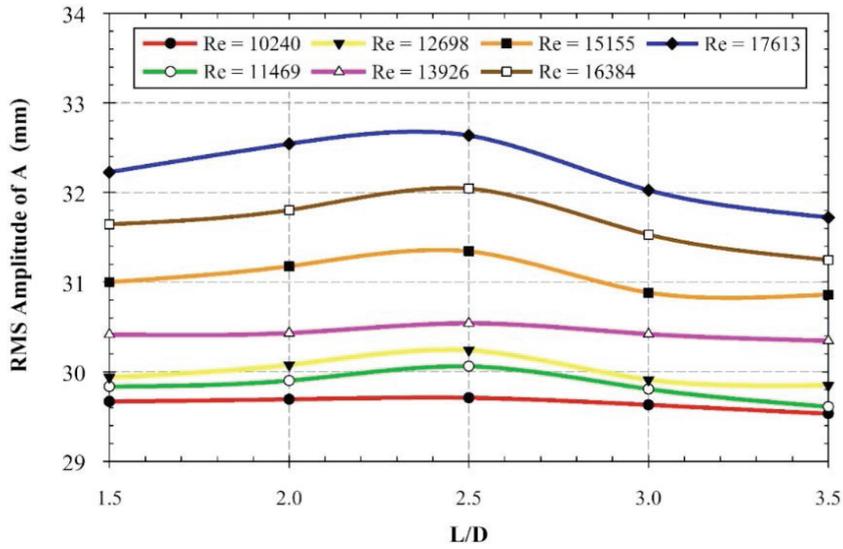
เมื่อ P_{rms} คือค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้ากำลังสอง
มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) V_{rms} แทนด้วยค่าเฉลี่ย
แรงดันไฟฟ้ากำลังสองมีหน่วยเป็น โวลต์ (V) ของ
วัสดุเพียโซอิเล็กทริก นำมาหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง
และ R คือค่าภาระงานทางไฟฟ้าในวงจรสำหรับ
การเก็บเกี่ยวพลังงานมีหน่วยเป็นโอห์ม

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

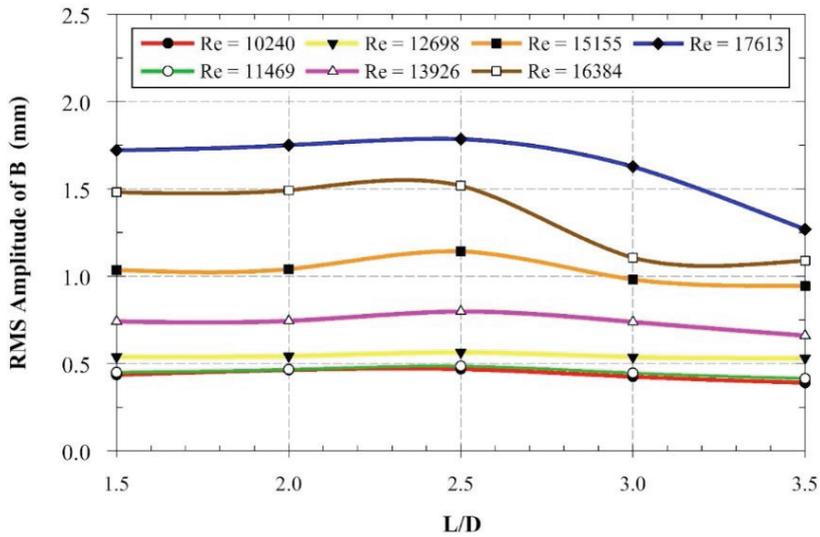
ชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ถูกติดตั้งภายใน
อุโมงค์ลมนั้น มีส่วนหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็น
อุปกรณ์รับแรงลมที่เป็นตัวกระทบ โดยจะเรียกส่วนนี้
ว่าส่วน A และอีกส่วนที่ถูกตีกระทบนั้นเป็นตัวที่มี
แผ่นเพียโซอิเล็กทริกยึดติดอยู่กับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
โดยจะเรียกส่วนนี้ว่าส่วน B

4.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการสั่นของ อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ค่าปัจจัยต่างๆ

หลังจากทำการทดลองโดยการจัดวาง
ชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานตามเงื่อนไขในการทดลอง
จากนั้นทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวพฤติกรรมการสั่น
ของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน เพื่อเปรียบเทียบ
ค่าแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุ A และวัตถุ B จาก
การนำภาพเคลื่อนไหวจากการทดลองไปประมวลผล
ในโปรแกรมประมวลผลภาพ Tracker ทำให้ได้
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังสอง
ของแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุ A และวัตถุ B ของ
ชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุ A ของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน กับอัตราส่วน $\frac{L}{D}$ และตัวเลขเรย์โนลด์ในแต่ละค่า



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุ B ของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน กับอัตราส่วน $\frac{L}{D}$ และตัวเลขเรย์โนลด์ในแต่ละค่า

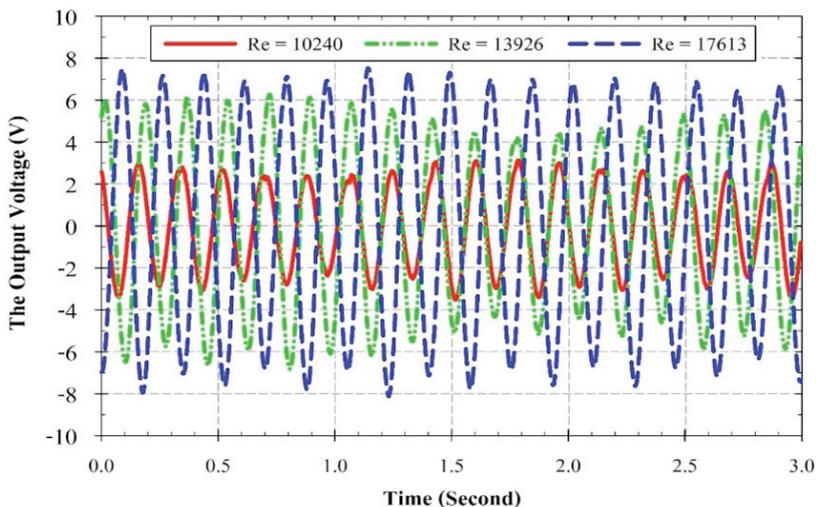
ภาพที่ 9 พบว่าที่อัตราส่วน $\frac{L}{D} = 2.5$ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุ A มีค่าสูงที่สุด โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดการสั่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วการไหลของอากาศหรือค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น โดยพบว่าที่อัตราส่วน $\frac{L}{D} = 2.5$ มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุ A ต่ำสุดเท่ากับ 29.71 มิลลิเมตร ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10,240 และสูงสุดเท่ากับ 32.64 มิลลิเมตร ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 17,613

และจากภาพที่ 10 พบว่าวัตถุ B มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดการสั่นสูงที่สุดเมื่อวัตถุ A มีอัตราส่วน $\frac{L}{D} = 2.5$ เช่นเดียวกับวัตถุ A และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุ B ต่ำสุดเท่ากับ 0.468 มิลลิเมตร ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10,240 และสูงสุดเท่ากับ 1.786 มิลลิเมตรที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 17,613 โดยในแต่ละอัตราส่วน $\frac{L}{D}$ และตัวเลขเรย์โนลด์ ที่เปลี่ยนแปลง ค่าเฉลี่ยกำลังสอง

ของแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุ B นั้นอาจมีค่าที่น้อย แต่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดการสั่นเพิ่มขึ้น ร้อยละ 281.62 เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลเปลี่ยนจาก 10,240 ถึง 17,613 ในขณะที่ค่าแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุ A มีอัตราการเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 9.86 เท่านั้น ซึ่งวัตถุ B มีอัตราการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดการสั่นมากกว่าวัตถุ A อย่างชัดเจนนั้น แสดงว่าความเร็วลมและอัตราส่วน $\frac{L}{D}$ มีอิทธิพลต่อการสั่นของวัตถุ A แต่ไม่มีอิทธิพลต่อการสั่นของวัตถุ B มากนัก การสั่นของวัตถุ B เป็นผลมาจากการถูกตีกระทบจากวัตถุ A มากกว่า

4.2 ผลการศึกษาค่าพลังงานไฟฟ้าที่อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสามารถผลิตได้

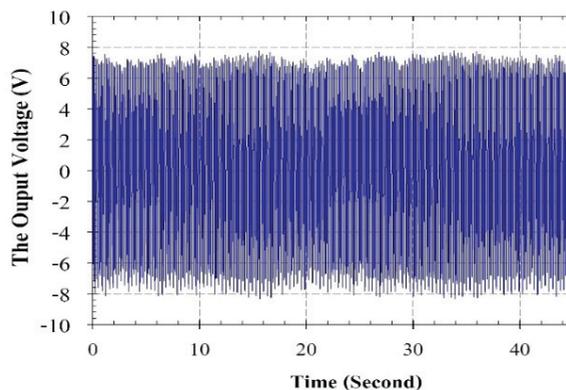
หลังจากการศึกษาพฤติกรรมการสั่นของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน หัวข้อนี้จะทำการศึกษาเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนี้ โดยที่ทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริกสามารถผลิตออกมาได้ เมื่อทำการทดลองตามเงื่อนไขดังที่กล่าวไว้ข้างต้น



ภาพที่ 11 กราฟเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อเวลา ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่อัตราส่วน $L/D = 2.5$ ในแต่ละค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10,240 13,926 และ 17,613

ในภาพที่ 11 ได้เปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อเวลาของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ที่อัตราส่วน $\frac{L}{D} = 2.5$ ในแต่ละความเร็วการไหลของอากาศเท่ากับ 5.0, 6.8 และ 8.6 เมตรต่อวินาทีหรือที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10,240 13,927 และ 17,613 ตามลำดับ โดยได้แสดงในช่วงเวลา 3 วินาที เพื่อให้เห็นความแตกต่างของ

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสามารถผลิตได้ออกมาอย่างชัดเจน จะพบว่าที่อัตราส่วน $\frac{L}{D} = 2.5$ เท่ากัน เมื่อเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศเพิ่มมากขึ้น จะมีผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อเวลาของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความเร็วการไหลของอากาศที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 17,613 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกมามากที่สุด

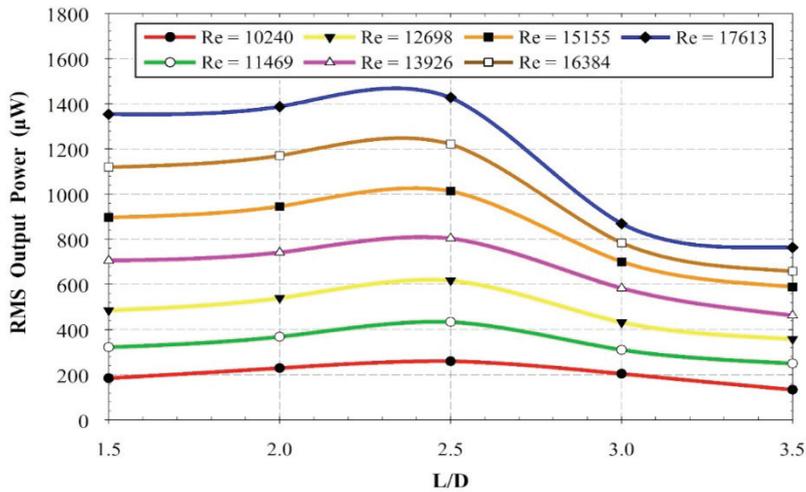


ภาพที่ 12 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อเวลา ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเท่ากับ 550 กิโลโอห์ม ที่มีความเร็วการไหลของอากาศที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 17,613

$$\text{และอัตราส่วน } \frac{L}{D} = 2.5$$

ภาพที่ 12 แสดงตัวอย่างของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากความต้านทานทางไฟฟ้าที่ 550 กิโลโอห์ม จากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ทำการทดสอบในอุโมงค์ลมที่มีความเร็วการไหลของอากาศที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 17,613 โดยค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ได้มาจาก

การทดลองแต่ละค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและค่าความเร็วการไหลของอากาศจะถูกนำไปหาเป็นค่าเฉลี่ยกำลังสองตามสมการที่ 3 ในแต่ละเงื่อนไขนั้นๆ เพื่อนำค่าดังกล่าวไปแสดงแนวโน้มของการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขึ้นนี้



ภาพที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังสองของพลังงานไฟฟ้า ที่ผลิตได้จากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกับอัตราส่วน $\frac{L}{D}$ ที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเท่ากับ 550 กิโลโอห์ม ในแต่ละความเร็วการไหลของอากาศที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆ

ภาพที่ 13 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังสองของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกับอัตราส่วน $\frac{L}{D}$ ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วน $\frac{L}{D} = 2.5$ มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับ 260.05 ไมโครวัตต์ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10,240 และเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1,427.75 ไมโครวัตต์ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 17,613

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปรับระยะการจัดวางอัตราส่วน $\frac{L}{D}$ จะมีผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ที่อัตราส่วน $\frac{L}{D}$ ตั้งแต่ 1.5 ถึง 2.5 จะทำให้ได้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วน $\frac{L}{D}$ ห่างมากขึ้นเท่ากับ 3.0 และ 3.5 พบว่าพลังงานไฟฟ้า

ที่ผลิตได้ลดลงอย่างชัดเจน ที่ตลอดความเร็วการไหลของอากาศ เนื่องจากเมื่ออัตราส่วน $\frac{L}{D}$ เพิ่มมากขึ้นคือระยะห่างระหว่างวัตถุต้นลมทรงกระบอกและวัตถุรับแรงลมมากขึ้นด้วย ทำให้การเหนี่ยวนำการไหลจากวัตถุต้นลมด้านหน้าไม่สามารถเกิดการไหลหมุนวนไปได้ถึงวัตถุรับแรงลมด้านหลัง จึงเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการสั้นน้อยลงนั่นเอง ดังนั้นอัตราส่วน $\frac{L}{D}$ ที่เหมาะสมที่สุดของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานชิ้นนี้เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ออกมาสูงที่สุด ในช่วงที่ศึกษาความเร็วการไหลของอากาศในช่วง 5.0 ถึง 8.6 เมตรต่อวินาทีหรือที่ตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 10,240 ถึง 17,613 มีค่าเท่ากับ 2.5

5. สรุปผล



การทดลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานได้ถูกติดตั้งในอุโมงค์ลมที่มีความปั่นป่วนต่ำ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ค่าปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเร็วการไหลของอากาศหรือค่าตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 10,240 ถึง 17,613 และอัตราส่วน $\frac{L}{D} = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ และ 3.5 จากผลการทดลองพบว่า ส่วน A ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับแรงลมที่เป็นตัวตีกระทบนั้นมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดการสั่นของวัตถุ A มีค่าสูงที่สุดที่อัตราส่วน $\frac{L}{D} = 2.5$ โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดการสั่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วการไหลของอากาศหรือค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่การสั่นของวัตถุ B ได้รับอิทธิพลโดยตรงมาจากแรงของส่วนที่ตีกระทบที่มาจากส่วน A โดยที่วัตถุ B มีอัตราการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดการสั่นมากกว่าวัตถุ A อย่างเห็นได้ชัดจากการศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังสองของพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นและผลิตได้สูงที่สุดที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 17,613 ที่อัตราส่วน $\frac{L}{D} = 2.5$ มีค่าเท่ากับ 1427.75 ไมโครวัตต์ ดังนั้นแนวคิดการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานรูปแบบใหม่ที่มีตัวตีและตัวถูกตีนี้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้ามากกว่ารูปแบบเดิมของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมาก

6. เอกสารอ้างอิง



- [1] Bryant M. and Garcia E. (2011). Modeling and Testing of a Novel Aeroelastic Flutter Energy Harvester. *Journal of Vibration and Acoustics*, 133(1): 011010.
- [2] Allen J. J. and Smits A. J. (2001). Energy harvesting eel. *Journal of Fluids and Structures*, 15: 629-640.
- [3] Assi G.R.S. (2014). Wake-induced vibration of tandem cylinders of different diameters. *Journal of Fluids and Structures*, 50: 329-339.
- [4] Huera-Huarte F.J. and Gharib M. (2011). Vortex-and wake-induced vibrations of a tandem arrangement of two flexible circular cylinders with far wake interference. *Journal of Fluids and Structures*, 27(5): 824-828.
- [5] Matsumoto M., et al. (2006). Fundamental Study on the Efficiency of Power Generation System by Use of the Flutter Instability. In: *Proceedings of the ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference*, Vancouver, BC, Canada, pp. 277-286.
- [6] Igarashi T. (1981). Characteristics of the Flow around Two Circular Cylinders Arranged in Tandem: 1st Report. *Bulletin of JSME*, 24(188): 323-331.
- [7] Abdelkefi A., et al. (2014). Incident flow effects on the performance of piezoelectric energy harvesters from galloping vibrations. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 4 (2): 022002.
- [8] Uttayopas P. and Kittichaikarn C. (2019). Effects of Downstream Structures on Aero Elastic Energy Harvesters From Wake-Induced Vibration. *Journal of Fluids Engineering*, 141(7): 071103.