

ความถี่กำธรของระบบการเคลื่อนที่ของลำน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์รูปตัว U สำหรับการใช งานเพื่อสูบน้ำ

Resonance frequency of water oscillation in U-tube displacer system and its application on water pumping

การุญ พังสุวรรณรักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: karoon@sut.ac.th , โทรศัพท์: (044) 224554, โทรสาร: (044) 224613

บทคัดย่อ

การเคลื่อนที่ของลำน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์รูปตัว U สามารถนำมาเป็นพลังงานต้นกำลังเพื่อให้ระบบเกิดงานขึ้น สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ควบคุมกลไกการเคลื่อนที่ของลำน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์คือท่อปรับความถี่ ซึ่งการเคลื่อนที่ของลำน้ำเรียกว่าการแกว่งนั้นจำเป็นต้องอาศัยหลักการกำธรของคลื่นลำน้ำในท่อปรับความถี่ที่มีปลายด้านหนึ่งเปิดสู่บรรยากาศ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาท่อปรับความถี่ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้ระบบเกิดการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีปลายของท่อเปิดสู่บรรยากาศ และอีกด้านต่อเข้ากับด้านล่างของท่อดิสเพลสเซอร์รูปตัว U วัตถุประสงค์ในการต่อท่อปรับความถี่เข้ากับระบบเพื่อให้เกิดการแกว่งของลำน้ำ หรือเกิดการกำธรเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติมากที่สุด เป็นผลทำให้ได้พลังงานสูงสุดในรูปของขนาดและความถี่

งานวิจัยนี้ได้สร้างชุดตัวตรวจวัดความถี่ขึ้นลงของลำน้ำในท่อปรับความถี่ โดยทำการสร้างชุดตรวจวัดในแบบขนาดจริงขึ้นจากการใช้แผ่นทองแดงหุ้มท่อปรับความถี่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร ความสูงเท่ากับ 60 เซนติเมตร มีระยะห่างของการหุ้มทองแดง 0.25 เซนติเมตร ท่อปรับความถี่ยาว 130 เซนติเมตร ชุดตรวจวัดความถี่นี้ได้อาศัยหลักการของคาปาซิทีฟทรานดิวเซอร์ เพื่อนำไปแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ด้วยวงจร RC และวงจรกรองสัญญาณแบบพาสก่อนส่งไปยังชุดแสดงผลชนิด Real time Oscilloscope ในส่วนของการประยุกต์ใช้งาน ได้ต่อปมแบบอนุกรมร่วมกับท่อด้านล่างของดิสเพลสเซอร์รูปตัว U เพื่อนำการเคลื่อนที่ของลำน้ำเปลี่ยนเป็นงาน

ผลการทดสอบวัดค่าความถี่สูงสุดหรือความถี่ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 1.25 Hz ระดับของน้ำในท่อปรับความถี่อยู่ในช่วงกว้าง 40-70 เซนติเมตร ปริมาณการสูบน้ำสูงสุด 175 ลิตรต่อชั่วโมงที่ระดับความสูง 1 เมตร และประสิทธิภาพการสูบน้ำเท่ากับ 0.0114 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีป้อนพลังงานความร้อนเกรดต่ำช่วงอุณหภูมิ 500 °-700 °C จากการวิจัยเราพบว่าเมื่อการแกว่งของน้ำที่ระดับความถี่ธรรมชาติสามารถให้ปริมาณน้ำที่สูบได้มากที่สุดกับระยะการแกว่งของน้ำสูงสุด ดังนั้นขนาดของท่อปรับความถี่ควรมีขนาดเล็กเพื่อให้ระยะของการแกว่งของน้ำสูง

คำหลัก: ท่อปรับความถี่ ท่อดิสเพลสเซอร์รูปตัว U ความถี่กำธร คาปาซิทีฟทรานดิวเซอร์และ ปมแบบอนุกรม

Abstract

Water oscillation in the displacer with U-tube shape is able to induce an energy form in order for a benefit work. One significant thing to relevantly control the mechanism of the water movement is a tuning line. A behavior of the frequency resonance is necessary for water stroke at the highest level in the tuning line. In this work, the study is aimed at the tuning line, which is an important component of the U-tube displacer in order to gain a good performance. One end of the tuning line is open-air but the other end is coupled at the bottom of the U-tube displacer. This design objective is simply to induce to oscillate water becoming the resonance frequency. This results in the maximum energy in term of amplitude and frequency.

In this work, the frequency sensor was produced for measuring the water oscillation in the tuning line. It is made from the copper stripe plate around 60 cm. covering the long tuning line around 130 cm. and the diameter of 1.25 cm. The gap of the copper plate putting over is of 0.25 cm. The frequency sensor exploits the concept of capacitive transducer for transformation to sinusoidal signal by the use of RC circuit and Pi filter circuit. Subsequently, the sinusoidal signal was monitored at the real time oscilloscope. In the application of pumping water, the pump series coupling was connected to the bottom of the U-tube displacer

The experimental results show the resonance frequency of 1.25 Hz in this system. The water stroke is in the wide range of 40-70 cm. The pumped water has the maximum of 175 liter/hr. at the pump height of 1 m. Its efficiency is of 0.0114% when the low grade energy is inputted in the range of 500^o-700^oC. The results are indicated that the highest stroke at the resonance frequency is able to obtain the maximum of the pumped water. Therefore the design of tuning line would have small size in the result of the high water stroke.

Keywords: tuning line, U-tube displacer, resonance frequency, capacitive transducer and series pumping.

1. บทนำ

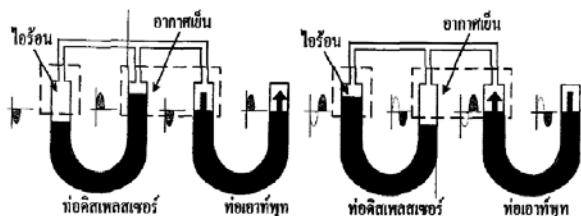
การนำการเคลื่อนที่ของลำน้ำมาเป็นพลังงานต้นกำลัง เพื่อให้ระบบเกิดงานขึ้น กลไกการเคลื่อนที่ของลำน้ำหรือเรียกว่าการแกว่งนั้นจำเป็นต้องอาศัยหลักการการรบกวนของคลื่นลำน้ำในท่อปลายเปิด ส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้ระบบเกิดการ ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพคือท่อปรับความถี่ [1-2] ซึ่งมีปลายของท่อเปิดสู่บรรยากาศ และอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับด้านล่างของท่อดิสเพลสเซอร์ เพื่อให้เกิดการแกว่งของลำน้ำหรือเกิดการการรบกวนเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติมากที่สุด ซึ่งเป็นผลทำให้ได้พลังงานสูงสุดในรูปของขนาด และความถี่ของคลื่นลำน้ำมากที่สุด

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวตรวจจับความถี่ขึ้นลงอย่างง่ายของลำน้ำในท่อปรับความถี่ โดยอาศัยหลักการของคาปาซิทีฟทรานส์ดิวเซอร์ เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุเปลี่ยนแปลง ซึ่งหมายถึงลำน้ำในท่อจูนนิ่งเปลี่ยนแปลงแล้วค่าคาปาซิแตนซ์จะเปลี่ยนแปลง เนื่องจากค่ารีแอ็กแตนซ์มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อให้ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าคงที่ ลักษณะดังกล่าวนี้เป็นพฤติกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งเพราะสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพและพลังงานขาออกได้

2. หลักการทำงาน

2.1 การแกว่งของของไหลในเครื่องยนต์ลูกสูบเหลว

การทำงานของเครื่องยนต์ลูกสูบเหลวมีหลักการเช่นเดียวกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดที่มีโครงสร้างแบบแกมมาแสดงดังรูปที่ 1 โดยสมมติน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์แกว่งจากชุดตัว U ด้านหนึ่งกลับไปยังอีกด้านหนึ่งโดยมีตำแหน่งศูนย์ตายบนในปลายด้านเย็นและตำแหน่งศูนย์ตายล่างในปลายด้านร้อน ซึ่งมีอากาศเป็นมวลในท่อปิดที่อยู่เหนือระดับน้ำของท่อดิสเพลสเซอร์ด้านร้อน ดังนั้นอากาศส่วนมากจึงร้อนเกิดความดันสูงขึ้นเกิดแรงกระทำกับน้ำในท่อเอาท์พุททำให้เกิดการเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบ น้ำในท่อดิสเพลสเซอร์จะแกว่งกลับไปในอีกด้านหนึ่ง



รูปที่ 1 พื้นฐานการทำงานของเครื่องยนต์ลูกสูบเหลว

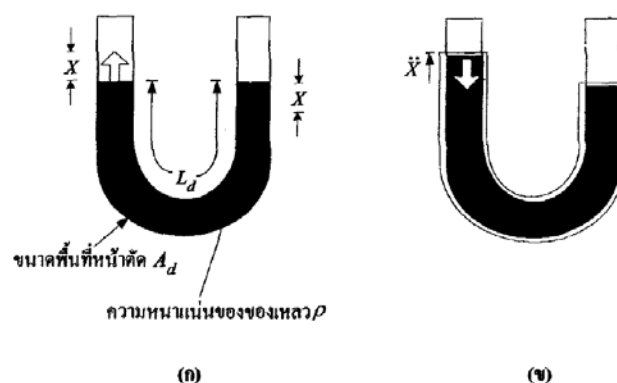
2.2 การปรับระดับของลำน้ำในท่อเอาท์พุท

ในระบบที่มีการแกว่งถ้าค่าความถี่นั้นเปลี่ยนแปลงตามความดันในระบบแล้วจะเกิดการแกว่งของของเหลวในท่อเอาท์พุทที่มีระยะสูงสุด ซึ่งการแกว่งในระยะนี้จะมีค่าความถี่เท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับระดับลำน้ำของท่อเอาท์พุทรูปตัว U ให้เหมาะสมกับความถี่ที่เครื่องทำงานเมื่อน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์รูปตัว U มีการแกว่งไปมาในท่อ น้ำในท่อเอาท์พุทก็จะมีการแกว่งไปด้วย พลังงานที่ได้นั้นจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศในเครื่องยนต์ลูกสูบเหลว

2.3 ความถี่ของลำน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์

การที่จะให้เกิดขนาดระยะการแกว่งสูงสุดของลำน้ำนั้น น้ำควรจะมีการสูญเสียของการไหลน้อยที่สุด ดังนั้นได้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นโดยพิจารณาการแกว่งของน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์เพียงส่วนเดียวและสมมติให้ปลายท่อทั้งสองในแนวตั้งเปิดสู่บรรยากาศ ในรูปที่ 2 (ก) แสดงน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์ในระดับสมดุลที่มีความยาวของลำน้ำตามแนวท่อเท่ากับ L_d ซึ่งในความ

เป็นจริงแล้วปลายท่อทั้งสองไม่ได้เปิดสู่บรรยากาศแต่มีความดันของไอร้อนที่ปลายท่อทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน เมื่อระบบเริ่มทำงานซึ่งมีการแกว่งของน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์แล้วที่ผิวน้ำของปลายด้านหนึ่งถูกยกขึ้นจากระดับสมดุลเป็นระยะ X เป็นผลทำให้ระดับน้ำที่ปลายท่ออีกด้านหนึ่งลดต่ำลงในระดับที่เท่ากันแสดงในรูปที่ 2 (ข) ในขณะนี้ที่ปลายท่อด้านซ้ายนั้นลำน้ำมีมากกว่าปลายอีกด้านหนึ่งเท่ากับ $2XA_d\rho$ และมีความดันสูงขึ้นจากจุดเดิมเท่ากับ $2X\rho g$ และมีผลของแรงเท่ากับ $2XA_d\rho g$ และมวลของลำน้ำในท่อเท่ากับ $A_d\rho L_d$



รูปที่ 2 (ก) น้ำในท่อดิสเพลสเซอร์ในระดับสมดุล

(ข) ระดับการยกขึ้นของน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์จากรูปที่ 2 การเคลื่อนที่จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\sum F = ma \quad (1)$$

$$2XA_d\rho g = -(A_d\rho L_d)\ddot{X} \quad (2)$$

$$(A_d\rho L_d)\ddot{X} + 2XA_d\rho g = 0 \quad (3)$$

$$\ddot{X} + \left[\frac{2g}{L_d} \right] X = 0 \quad (4)$$

ในสมการที่ (4) เป็นสมการการแกว่งแบบฮาร์มอนิกส์โดยไม่มีการหน่วงจะได้ความเร่งแปรผันโดยตรงกับการเปลี่ยนตำแหน่ง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์

$$\ddot{X} + \omega^2 X = 0 \quad (5)$$

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความถี่ธรรมชาติเชิงมุมของการแกว่ง

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{L_d}} \quad (6)$$

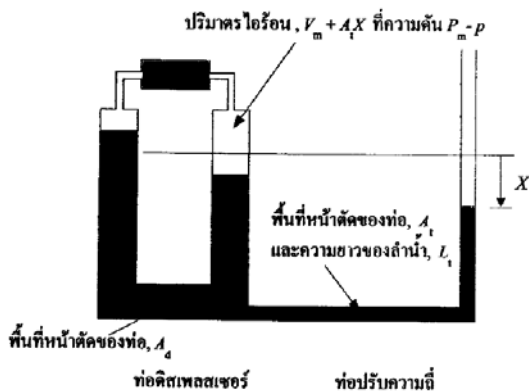
หรือแสดงในเทอมของความถี่ธรรมชาติ

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L_d}} \quad (7)$$

ในทางปฏิบัติ C.D. West [1] แนะนำการใช้ L_d อยู่ระหว่าง 0.3 m - 3 m ซึ่งจะส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติอยู่ระหว่าง 0.4 Hz - 1.3 Hz

2.4 ความถี่ของลำน้ำในท่อปรับความถี่

สำหรับการทำงานของเครื่องยนต์ลูกสูบเหลี่ยม การต่อท่อปรับความถี่ได้ 2 ชนิดคือการต่อแบบกระบอกสูบรวม และกระบอกสูบแยก แต่ผลการวิจัยพบว่า การต่อท่อปรับความถี่แบบกระบอกสูบรวมมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบกระบอกสูบแยก [3] สำหรับการวิจัยนี้ศึกษาลักษณะการต่อท่อปรับความถี่แบบกระบอกสูบรวมแสดงหลักการดังรูปที่ 3 โดยพิจารณาที่ความยาวของลำน้ำ L_t และขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ A_t โดยที่ปลายท่อด้านหนึ่งเปิดสู่บรรยากาศและอีกปลายด้านหนึ่งต่อโดยตรงกับท่อดิสเพลสเซอร์



รูปที่ 3 การต่อท่อปรับความถี่แบบกระบอกสูบรวม ขณะที่มีการเคลื่อนที่ของระดับน้ำ

จากกฎข้อที่ 2 สมการการเคลื่อนที่ของนิวตันจะได้ความสัมพันธ์ของความถี่เชิงมุม [1,4]

$$\omega = \sqrt{\frac{P_m A_t}{\rho L_t V_m} + \frac{(1 + A_t/2A_d)g}{L_t}} \quad (8)$$

สามารถแสดงความสัมพันธ์ในเทอมของความถี่ธรรมชาติได้

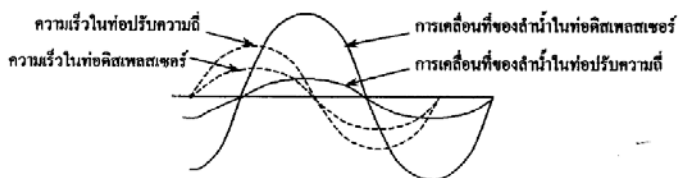
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_m A_t}{\rho L_t V_m} + \frac{(1 + A_t/2A_d)g}{L_t}} \quad (9)$$

การไหลไปกลับของลำน้ำระหว่างในท่อปรับความถี่ และในท่อดิสเพลสเซอร์นั้นสามารถกล่าวถึงได้ในลักษณะโหมดการกระตุ้น [2] แบ่งเป็น 2 แบบคือ โหมดการเคลื่อนที่ของลำน้ำอันเนื่องมาจากความดันของอากาศที่ตกลงในน้ำ และโหมดการเคลื่อนที่ของลำน้ำอันเนื่องมาจากกำลังของน้ำในระบบของมันเอง จากโครงสร้างการต่อท่อปรับความถี่แบบกระบอกสูบรวม พลังงานถูกส่งถ่ายจากด้านท่อปรับความถี่ไปยังท่อดิสเพลสเซอร์ส่งผลให้เส้นการไหลของทั้งสองมีเฟสตรงกัน พิจารณารูปที่ 4 เส้นการไหลของความเร็วของน้ำในท่อปรับความถี่และท่อดิสเพลสเซอร์ในรูปของคลื่นไซน์พบว่าความเร็วของน้ำในท่อปรับความถี่มีค่าสูงกว่าในดิสเพลสเซอร์ การเคลื่อนที่ของลำน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์ในสภาวะคงที่เป็น

$$S_d = A \sin \omega \quad (10)$$

สำหรับการกระตุ้นจากการเคลื่อนที่ของน้ำในท่อปรับความถี่เป็น

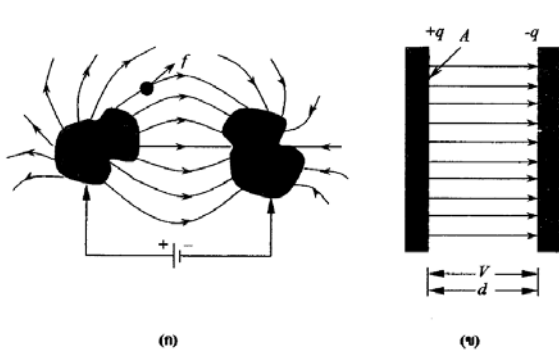
$$F_t = B \sin \omega + C \sin(\omega - 90^\circ) \quad (11)$$



รูปที่ 4 เส้นการไหลของความเร็วและระดับของน้ำที่ไหลในท่อปรับความถี่และท่อดิสเพลสเซอร์

2.5 การออกแบบชุดวัดความถี่

เมื่อพิจารณาแผ่นตัวนำสองชนิดที่ถูกวางห่างกัน และทำการต่อแบตเตอรี่เข้าไปดังรูปที่ 5 แผ่นตัวนำทั้งสองได้รับประจุตรงข้ามจำนวนเท่ากัน แผ่นที่ถูกประจุด้วยขั้วลบจะได้รับอิเล็กตรอนขณะที่แผ่นที่ถูกประจุด้วยขั้วบวกจะสูญเสียหรือให้อิเล็กตรอน ถ้าปลดแบตเตอรี่ออกแผ่นตัวนำทั้งสองถูกแยกออกจากกันในสุญญากาศมันยังคงมีประจุตลอดไป



รูปที่ 5 (ก) ประจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

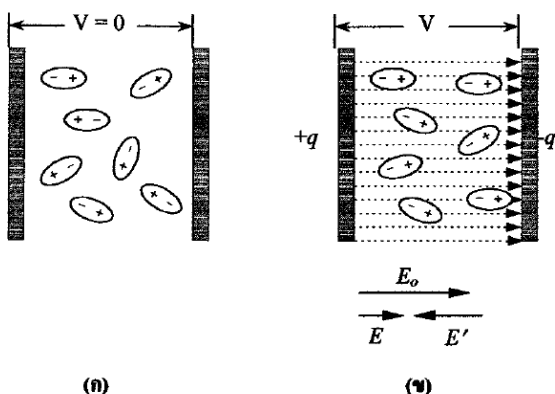
(ข) ภาพตัดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในแบบขนานกันของแผ่นตัวนำ

ดังนั้นชุดแผ่นตัวนำทั้งสองซึ่งเก็บประจุไฟฟ้าไว้ได้เรียกว่าตัวเก็บประจุ C แสดงได้ในเทอมของประจุ q และแรงดันไฟฟ้า v เป็น

$$C = \frac{q}{V} \quad (12)$$

ในทำนองเดียวกันค่าคาปาซิแตนซ์ในแบบที่มีโครงสร้างในรูปที่ 5 (ข) ความสัมพันธ์ในเทอมของระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำซึ่งภายในสูญญากาศที่มีค่าสภาพยอม ϵ_0 เท่ากับ $8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ ซึ่งใช้ออกแบบทรานซิสเตอร์แบบคาปาซิทีฟ

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (13)$$



รูปที่ 6 (ก) ทิศทางของไดโพลแบบอิสระปราศจากการป้อนสนามไฟฟ้าภายนอก

(ข) ทิศทางของไดโพลวางตามแนวแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าภายนอก

พิจารณารูปที่ 6(ก) ที่มีไดโพลเล็กตริกของน้ำเป็นตัวกลางระหว่างแผ่นตัวนำ ในขณะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกนั้นโมเมนต์ของไดโพลเล็กตริกต่าง ๆ นั้นจะมีไดโพลโมเมนต์ถาวรในขณะที่ไดโพลเล็กตริกอื่นในรูปที่ 6(ข) ถูกโพลาไรซ์เนื่องจากมีสนามไฟฟ้าภายนอกมากกระทำซึ่งทิศทางของไดโพลจะวางแนวเดียวกันกับเส้นสนามไฟฟ้าในไดโพลแต่ละตัวจะสร้างสนามไฟฟ้าในตัวมันเองขึ้น E' ซึ่งมีอำนาจในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าภายนอก E_0 เป็นผลทำให้เกิดผลของการรวมตัวไดโพลขึ้นและเกิดสนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุนั้นอ่อนลงในที่สุด

$$E = E_0 + E' \quad (14)$$

สนามไฟฟ้าที่ลดลงนี้ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมค่าน้อยๆที่ตัวเก็บประจุ

$$C = \kappa \frac{q}{V_0} = \kappa C_0 \quad (15)$$

สำหรับตัวเก็บประจุในแบบแผ่นตัวนำขนานกัน

$$C = \frac{\kappa \epsilon_0 A}{d} \quad (16)$$

เมื่อ κ คือค่าคงที่ไดโพลเล็กตริกของวัสดุในการทดลองนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากวัตถุตัวนำสองตัวในเทอมของตัวแปรทางเรขาคณิตเป็น

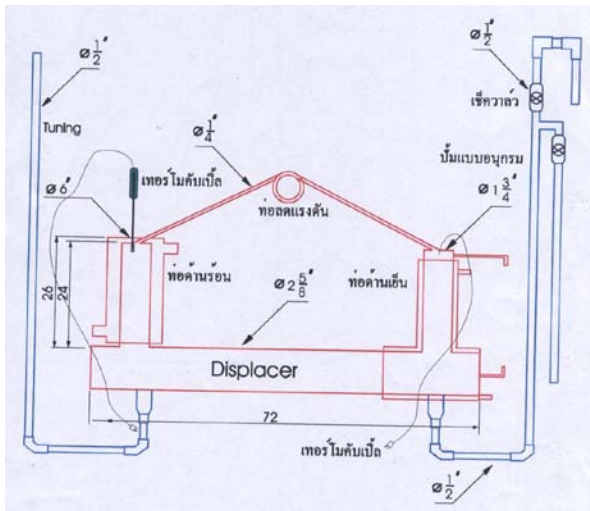
$$C = \epsilon_0 \kappa G \quad (17)$$

เมื่อ G ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุตัวนำ ดังนั้นในสมการเชิงเส้นนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปในระหว่างวัตถุตัวนำทั้งสอง

3. วิธีการทดลอง

3.1 โครงสร้างเครื่องยนต์ลูกสูบเหลว

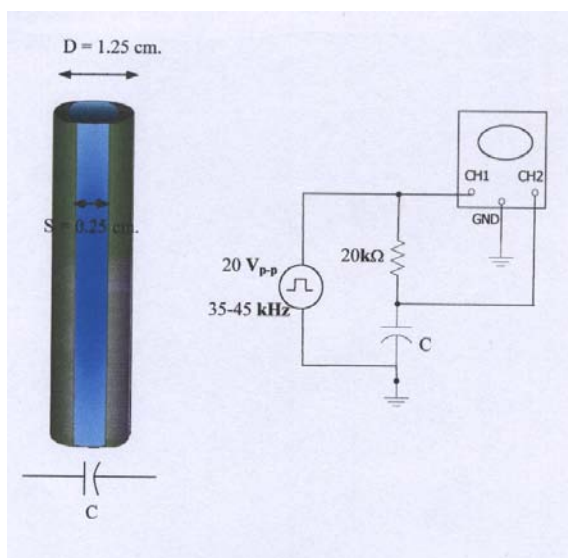
โครงสร้างเครื่องยนต์ลูกสูบเหลวสำหรับ งานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 7 โครงสร้างนี้ประกอบด้วยปลายท่อด้านหนึ่งของท่อปรับความถี่ต่อร่วมกับปลายท่อด้านล่างของดิสเพลสเซอร์ด้านเย็น สำหรับการประยุกต์เพื่อสูบน้ำ ได้มีการต่อท่อปั๊มแบบอนุกรมร่วมกับท่อดิสเพลสเซอร์อีกด้านหนึ่ง



รูปที่ 7 โครงสร้างเครื่องยนต์ลูกสูบเหลวสำหรับการทดลองนี้

3.2 การออกแบบชุดวัดความถี่

- การออกแบบคาปาซิทีฟทรานสดิวเซอร์



รูปที่ 8 โครงสร้างของคาปาซิทีฟและการต่อวงจร RC การทดลองนี้ ได้ออกแบบตัวตรวจวัดระดับน้ำที่เปลี่ยนไปในระหว่างวัตถุตัวนำทั้งสอง โดยถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ตามหลักการของสมการที่ (17) วัตถุตัวนำนี้ได้เลือกใช้แผ่นทองแดงหุ้มท่อปรับความถี่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 cm. และความยาวของท่อ 130 cm. มีระยะห่างของการหุ้มทองแดงเท่ากับ 0.25 cm. ความสูงเท่ากับ 60 cm. แสดงดังรูปที่ 8 เพื่อวัดระดับน้ำที่เคลื่อนที่ขึ้นลงในท่อ

ส่วนค่าคาปาซิเตนซ์ที่วัดได้จะผ่านวงจร RC เพื่อแสดงคุณสมบัติการเก็บประจุและคายประจุ

- วงจรวัดการเคลื่อนที่ของลำน้ำในท่อปรับ

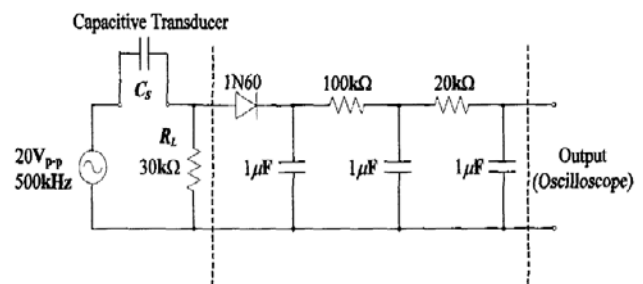
ความถี่

เมื่อค่าไดอิเล็กทริก κ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเชิงเส้นกับระดับน้ำภายในท่อมักทำให้ค่ารีแอกแตนซ์

X_C แปลงผกผันตามอย่างเป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (18)

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi f (\epsilon_0 \kappa G)} \quad (18)$$

ในทำนองเดียวกันค่ารีแอกแตนซ์ในวงจรอนุกรม RC มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า V_R จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ทำการวัดสัญญาณ peak to peak ของแรงดันไฟฟ้า $V_{R(p-p)}$ ที่ระดับน้ำในท่อแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามระดับของลำน้ำที่อยู่ในเทอมของ $V_{R(p-p)}$ นั้นยังไม่ได้เป็นปริมาณที่ต้องการ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงมีวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองสัญญาณแบบพาย (π - section filter) เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของยอดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในเทอมของเวลาดังรูปที่ 9



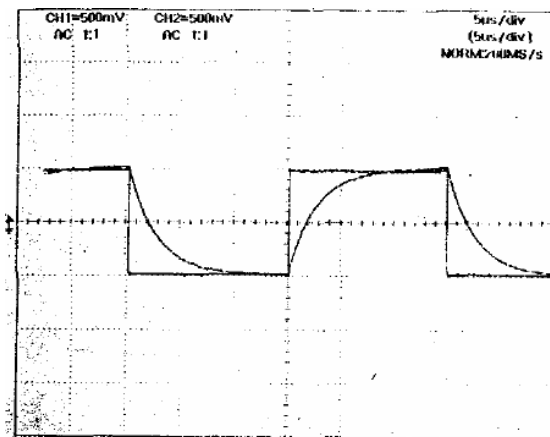
รูปที่ 9 วงจรวัดความถี่การแกว่งของลำน้ำในท่อปรับความถี่จากวงจรกรองสัญญาณแบบพาย

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์

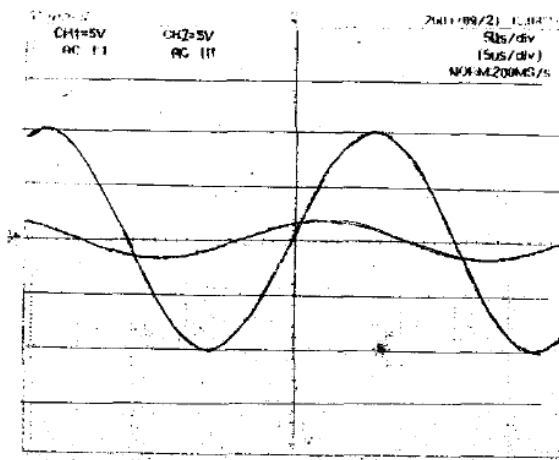
จากโครงสร้างรูปที่ 8 ได้ทำการวัดคุณสมบัติการสะสมและการคายประจุไฟฟ้า โดยการวัดแรงดันตกคร่อมคาปาซิทีฟทรานสดิวเซอร์ ที่สร้างขึ้นผลที่ได้ดังกล่าววัดจากเครื่องวัด Precision LCR Meter ของ Hewlett Packard 4284A แสดงดังรูปที่ 10

จากผลกราฟรูปที่ 10 พบว่าชุดตรวจวัดที่สร้างขึ้นนี้มีอัตราการสะสมและการคายประจุที่ 100 %

อีกทั้งได้ทำการวัดความแตกต่างของมุมเฟส ระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมท่อปรับความถี่ (V_C) และ



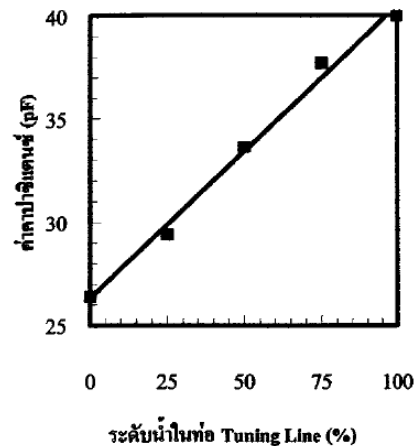
รูปที่ 10 ผลการวัดคุณสมบัติการเก็บและการคายประจุไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบคาปาซิทีฟที่สร้างขึ้น



รูปที่ 11 ผลการวัดความแตกต่างของมุมเฟสระหว่าง V_C และ V_R

V_R ที่ตัวความต้านทานไฟฟ้า $20\text{ k}\Omega$ ด้วยเครื่องมือวัด Real Time Oscilloscope ของ Tektronix รุ่น CFG 250 แสดงผลดังรูปที่ 11 จากผลกราฟสามารถคำนวณหาความต่างเฟสได้เท่ากับ 65° ที่ระดับน้ำในท่อสูงสุด ค่าความต่างเฟสนี้สามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติของความเป็นฉนวนได้ดี ในขณะเดียวกันได้ทดลองวัดค่าคาปาซิแตนซ์ด้วย LCR Meter ที่มีน้ำในท่อที่ระดับแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 12 จากกราฟพบ

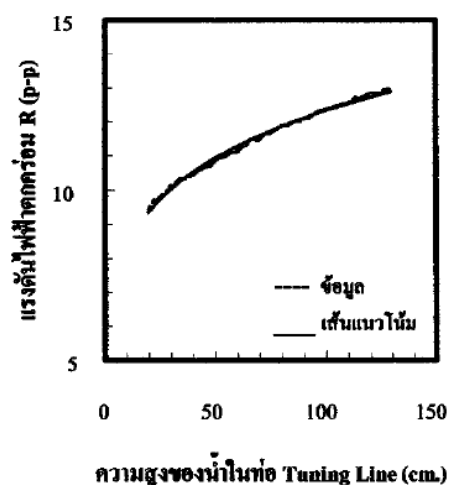
ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าคาปาซิแตนซ์กับระดับน้ำในท่อจุนึ่ง ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการที่ (17)



รูปที่ 12 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาปาซิแตนซ์ของท่อปรับความถี่และระดับความสูงของน้ำในท่อ

ในการทดลองได้ทำการวัดแรงดันไฟฟ้า $V_{R(p-p)}$ ที่ระดับน้ำในท่อแตกต่างกัน โดยใช้ท่อปรับความถี่ที่มีความสูง 130 cm . วัดทุกระดับที่เพิ่มขึ้นและวัดซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง จากผลการวัดนำมาพล็อตกราฟได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 13 ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นสมการแนวโน้ม แบบเส้นโค้งควอดราติก สอดคล้องกับวงจรไฟฟ้า ที่มีความสัมพันธ์ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_S แสดงดังสมการที่ (19)

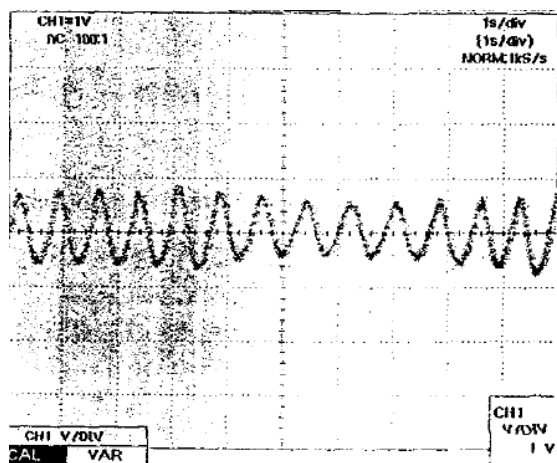
$$V_S = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \quad (19)$$



รูปที่ 13 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมกับความสูงของน้ำในท่อจุนึ่ง

เมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ พบว่า การวัดบางช่วงมีลักษณะเป็นขั้นบันไดเล็ก ๆ ที่เกิดจากการขาดความแม่นยำในการปรับระดับน้ำในท่อให้คงที่ขณะทำการวัด แต่การวัดซ้ำกัน 5 ครั้งได้ช่วยลดความผิดพลาดได้

จากการติดตั้งชุดตรวจจับความถี่การแกว่งของลำน้ำในท่อปรับความถี่โดยอาศัยหลักการคาปาซิทีฟทรานสดิวเซอร์ และวงจรกรองสัญญาณแบบพาส เราสามารถวัดความถี่สูงสุดของระบบได้ในเทอมของระยะการแกว่งของลำน้ำในท่อ แสดงผลการวัดดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลการวัดความถี่สูงสุดของการแกว่งของน้ำในท่อปรับความถี่

จากผลการวัดพบว่าค่าความถี่สูงสุดหรือความถี่ธรรมชาติของเครื่องยนต์ลูกสูบเหล่านี้มีค่าเท่ากับ 1.25 Hz หรือคาบเวลา T เท่ากับ 0.8 sec. ได้ปริมาณการสูบน้ำสูงสุด 175 ลิตรต่อชั่วโมงที่ระดับความสูง 1 เมตร และประสิทธิภาพการสูบน้ำเท่ากับ 0.0114 เปอร์เซนต์ ในกรณีป้อนพลังงานความร้อนเกรดต่ำช่วงอุณหภูมิ 500 °-700°C อีกทั้งยังพบว่าความถี่ธรรมชาติเกิดขึ้นที่ระยะการแกว่งสูงสุดด้วย ดังนั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อปรับความถี่ควรทำการออกแบบให้มีขนาดเล็ก

5. สรุปผลการทดลอง

ได้มีการศึกษาพฤติกรรมของการแกว่งของลำน้ำในท่อปรับความถี่ของเครื่องยนต์ลูกสูบเหลว โดยการทดลองนี้ได้สร้างชุดตัวตรวจจับความถี่ขึ้นลงของลำน้ำใน

ท่อปรับความถี่โดยอาศัยหลักการของ คาปาซิทีฟทรานสดิวเซอร์ เพื่อนำไปแปลงเป็นสัญญาณ ไฟฟ้ารูปคลื่นขาคี่ด้วยวงจร RC และวงจรกรองสัญญาณแบบพาสก่อนส่งไปยังชุดแสดงผล อีกทั้งได้มีการประยุกต์เพื่อสูบน้ำโดยการต่อปั๊มแบบอนุกรมร่วมกับท่อด้านล่างของคิสเพลสเซอร์รูปตัว U เพื่อนำการเคลื่อนที่ของลำน้ำเปลี่ยนเป็นงาน ได้ปริมาณการสูบน้ำสูงสุด 175 ลิตรต่อชั่วโมงที่ระดับความสูง 1 เมตร และประสิทธิภาพการสูบน้ำเท่ากับ 0.0114 เปอร์เซนต์ ในกรณีป้อนพลังงานความร้อนเกรดต่ำช่วงอุณหภูมิ 500 °-700°C

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C.D.West,1983,Liquid Piston Stirling Engine,Van Nostrand Reinhold Company:New York
- [2] Fauvel,O.R., C.D.West,1990,Excitation of Displacer Motion in A Fluidyne:Analysis and Experiment,In Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference;Vol.5;Publish by IEEE Service Center, Piscataway,NJ,USA,p.336-341
- [3] การุญ พังสุวรรณรักษ์ (25 45). เครื่องยนต์ฟลูอิดไดน์กรณีศึกษาการต่อท่อจูนนิ่งคอลัมน์แบบกระบอกสูบรวมและกระบอกสูบแยก ,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16
- [4] Fauvel,O.R.,Walker G.,1990,Excitation of A Fluidyne Tuning Line , In Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference;Vol.5;Publish by IEEE Service Center, Piscataway,NJ,USA,p.315-318