ETM-36

คุณลักษณะของคลื่นความดันในท่อกรณีติดตั้งหม้อพักชนิดสะท้อนคลื่นเสียง

Pressure Wave Characteristics in Pipe Installing Reflective Silencer

ปรีชา ขันติโกมล[1*]

[1] ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน (RTER) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: preecha@rmuti.ac.th โทรศัพท์: 080-4705287

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาเชิงทดลองคุณลักษณะของคลื่นความดันในท่อตรงกรณีติดตั้งหม้อพักไอเสียชนิดสะท้อนคลื่นเสียง อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยท่อตรงเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 43 mm ยาว 6 m ทำการติดตั้งหม้อพักไอเสียชนิดสะท้อนคลื่นเสียงของรถยนต์ขนาด 2500 cc ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อ ในการศึกษาจะทำการเปรียบเทียบผลของคลื่นความดันในท่อกรณีไม่ติดตั้งและติดตั้งหม้อพัก คลื่นความดันที่ปล่อยเข้าระบบท่อเป็นแบบลูกเดียวที่มีความดันปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 1-3 bar ทำการวัดความดันสถิต ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความดันชนิดความดันแตกต่าง ผลการศึกษาพบว่าลักษณะของความดันเมื่อออกจากกระบอกสูบสู่ระบบท่อจะมีขนาดลดลงมาอย่างมาก เนื่องจากผลของความเสียดทานและผลจากการไหลออกจากกระบอกสูบสู่ท่อ แอมปลิจูดของคลื่นความดันจะลดลงตามความยาวท่อและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของความเสียดของท่อในขณะเดียวกัน ความดันในท่อจะเพิ่มขึ้นตามความดันในระบอกสูบ มีการสะท้อนกลับในลักษณะกลับเฟส ที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เมื่อติดตั้งหม้อพักไอเสียชนิดสะท้อนคลื่นเสียง คลื่นความดันจะมีการสะท้อนกลับเฟสที่มีลักษณะเดียวกับท่อปลายเปิด ส่วนที่สะท้อนกลับเพิ่มขึ้นตามความดันในท่อที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณความดันที่หม้อพักดูดซับไว้ พบว่ามีปริมาณมากกว่า 50% แสดงให้เห็นว่าหม้อพักไอเสียชนิดสะท้อนคลื่นเสียงส่งผลให้คลื่นมีการสะท้อนกลับทำให้จำนวนลูกคลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการซ้อนทับและหักล้างกันของแอมปลิจูดของคลื่นความดันอย่างมีนัยสำคัญ

คำหลัก: คลื่นความดัน; หม้อพักไอเสีย; แอมปลิจูดความดัน; ความเสียดทาน

Abstract

This article present the experimental study of pressure wave characteristic in the straight pipe installed a reflective silencer. Experimental equipment consists of a 43 mm inner diameter and 6 m length straight pipe installing a reflected silencer of 2500 cc engine exhaust system at the center of the pipe. The pressure in pipe with and without silencer was compared. The single pulse pressure was supplied to the pipe system, which were varied from 1-3 bar cylinder pressure. The static pressures along the pipe were measured by differential pressure sensor. The results showed that the pressure in pipe released from the cylinder reduced in a large amount due to the friction and out flow effect of the cylinder. The pressure amplitude of pressure wave decreases along the pipe due to the pipe friction. And the pressure in pipe increases with the cylinder pressure. The pressure wave was reflected with negative phase that the magnitude was lower than the atmospheric pressure. In the case of installing the reflective silencer, the pressure wave reflects like the open end of the pipe. The amplitude of

reflective pressure due to the silencer increases with the cylinder pressure. Consideration of the absorptive pressure wave of the silencer, the amplitude was decreased more than 50%. It indicated that the silencer reflect the pressure wave back to the upstream side to increase the number of wave leading to the effect of enhance and decrease the amplitude of pressure wave significantly.

***Keywords**:* Pressure wave; Silencer; Pressure amplitude; Friction

1. บทนำ

หม้อพักไอเสียเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบไอเสียเครื่องยนต์ ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานของหม้อพักไอเสียจะมีผลต่อระดับการกระจายเสียงของเครื่องยนต์และมีผลต่อการสูญเสียกำลังของเครื่องยนต์ด้วย มีนักวิจัย [1,2,3,4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับหม้อพักไอเสียของรถยนต์หรือเครื่องยนต์สันดาปภายใน [1] ซึ่งเป็นจุดสำคัญของหม้อพักไอเสียรถยนต์เชิงพาณิชย์ด้วย ปกติแล้วก็มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและยากในการวิเคราะห์ [1] เพื่อที่จะแก้ปัญหาเกี่ยวกับหม้อพักไอเสียแบบดั้งเดิมเช่น เรื่องของการลดเสียงในช่วงความถี่ต่ำ ความถี่สูงและความต้านทานไอเสีย [2,3] จึงได้มีการศึกษาทั้งวิธีการสร้างแบบจำลองและการทดลอง [4] จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสนามการไหลภายในและสนามเสียงของหม้อพักไอเสียมีความซับซ้อนมาก ประสิทธิภาพการทำงานของหม้อพักไอเสียมีผลกระทบไม่เพียงแค่ลดเสียงของเครื่องยนต์แต่ยังมีผลกระทบต่อทั้งระบบและนอกจากนั้นยังมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์อีกด้วย

โดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้วิธีทางความถี่ (Frequency domain) [1,2,3,4] เพื่อออกแบบหม้อพักไอเสียซึ่งได้จากการลองผิดลองถูกและจากประสบการณ์ มีเป้าหมายเพื่อลดความดังเสียงของเครื่องยนต์เพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้คำนึงถึงผลของความดันในระบบท่อไอเสีย ซึ่งความดันมีผลต่อของสมรรถนะของเครื่องยนต์เป็นอย่างมาก ต่อมาได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับผลของความดันที่ชื่อว่า Wave action method เป็นทฤษฎีพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของคลื่นความดัน [4,5] นอกจากนั้นยังนำไปศึกษาการออกแบบหม้อพักไอเสียโดยนำมาวิเคราะห์ระบบท่อร่วมไอดีและท่อไอเสีย นอกจากนั้นได้มีการศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นความดันในกรณีติดตั้งหม้อพักไอเสียและไม่ติดตั้งหม้อพักไอเสีย ทั้งวิธีสร้างแบบจำลองและวิธีการทดลอง [6] พบว่าคลื่นความดันมีลักษณะการเพิ่มและลดในลักษณะที่แตกต่างกันซึ่งมีผลต่อการคายไอเสียออกจากเครื่องยนต์ และมีนักวิจัย ยังได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นความดันขนาดใหญ่ หนึ่งลูกผ่านหม้อพักแบบเฮล์มโฮลต์ซ [7] โดยการปล่อยคลื่นความดันขนาดใหญ่จากเครื่องกำเนิดคลื่นความดันแบบวาล์วเปิดอย่างรวดเร็วตามแนวนอน (Fast Action Valve Type-H) ผ่านระบบท่อเข้าสู่หม้อพักแบบเฮล์มโฮลต์ซ แล้วปล่อยสู่บรรยากาศ ผลการทดลองพบว่า คลื่นความดันมีค่าลดต่ำลงเมื่อระยะทางตามแนวท่อเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานผิวและเกิดการสะท้อนของคลื่นที่รูเจาะของหม้อพักและปลายท่อ

2. ทฤษฎี

2.1 คุณลักษณะของคลื่นความดัน

คลื่นความดัน (Pressure wave) มีการจำแนกออกเป็นสองชนิดคือ คลื่นความดันที่มีขนาดเล็กหรือคลื่นเสียง (Acoustic waves) และคลื่นที่มีความดันขนาดใหญ่หรือคลื่นแอมปลิจูดจำกัด (Finite amplitude waves) แต่ละชนิดของคลื่นยังสามารถจำแนกออกเป็นสองแบบด้วยกันคือ คลื่นความดันอัด (Compression wave) ดังรูปที่ 1 (a) และ คลื่นความดันขยาย (Expansion wave) ดังรูปที่ 1 (b) การเคลื่อนที่ของคลื่นความดันจะประกอบด้วยตัวแปรความเร็วสองตัวคือ ความเร็วคลื่น (α) และความเร็วอนุภาคแก๊ส (c) คุณลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นความดันยังขึ้นอยู่กับความดันของแก๊ส (P) ความดันบรรยากาศ (P_0) อุณหภูมิของแก๊ส (T) และอุณหภูมิบรรยากาศ (T_0) ซึ่ง Earnsaw [5] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาค และความดันดังสมการที่ (1) เมื่อ γ คืออัตราส่วนค่าความร้อนจำเพาะของแก๊ส สำหรับอากาศมีค่าเท่ากับ 1.4

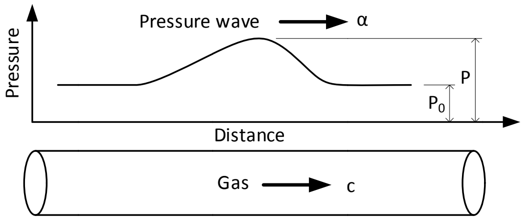
$$c = a_0\left(\frac{2}{\gamma-1}\right)\left[\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}-1\right] \qquad (1)$$

สำหรับความเร็วของคลื่นความดันจะมีค่าเท่ากับผลรวมของความเร็วของอนุภาค (c) และความเร็วเสียง (a) ดังสมการที่ (2)

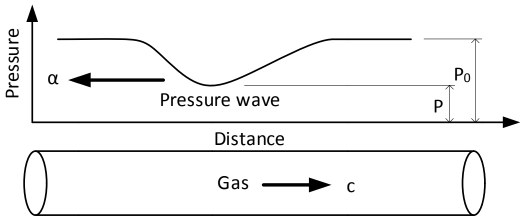
$$\alpha = c + a \qquad (2)$$

เมื่อ

$$a = \sqrt{\gamma RT} \qquad (3)$$



(a)

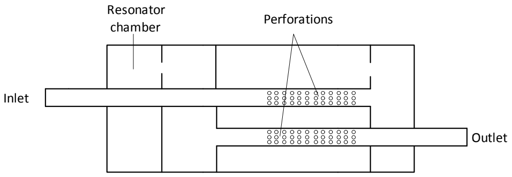


(b)

รูปที่ 1 คลื่นความดัน: (a) คลื่นความดันอัด (b) คลื่นความดันขยาย

2.2 หม้อพักชนิดสะท้อนคลื่นเสียง

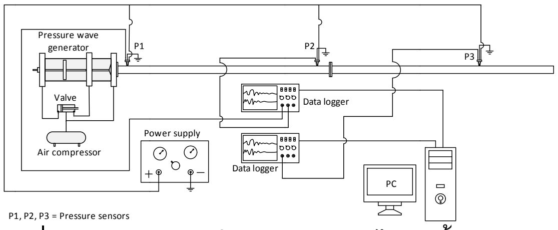
รูปที่ 2 แสดงกายภาพของหม้อพักชนิดสะท้อนคลื่นเสียง (Reflective silencer) ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้คือ สะท้อนคลื่นเสียงกลับไปยังแหล่งต้นกำเนิดเสียง และทำหน้าที่ลดพลังงานของคลื่นเสียงลง ซึ่งจะส่งผลการลดลงของพลังงานในระบบด้วย ดังนั้นหม้อพักไอเสียจึงส่งผลต่อพลังงานการไหลของก๊าซในระบบท่อ



รูปที่ 2 กายภาพของหม้อพักชนิดสะท้อนคลื่นเสียง

3.อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 3 และ 4 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองกรณีไม่ติดตั้งและติดตั้งหม้อพักไอเสียตามลำดับ ชุดอุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย เครื่องกำเนิดคลื่นความดันชนิดหนึ่งลูกขนาดความจุกระบอกสูบ 625 cm^3 ซึ่งมีความจุเท่ากับหนึ่งสูบของเครื่องยนต์สี่สูบขนาด 2500 cm^3 มีวาล์วเปิดปิดลักษณะเช่นเดียวกับวาล์วไอดีรถยนต์ ควบคุมการปิดปิดด้วยชุดนิวแมติกส์ ใช้ท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 43 mm ยาว 6 m ติดตั้งเชื่อมต่อตรงกับกระบอกสูบ ใช้เซนเซอร์ MPX5500DP วัดความดันชนิด ณ ตำแหน่งออกจากกระบอกสูบ 0.1 m (P1), 2.5 m (P2) และ 5.9 m (P3) ดังรูปที่ 3 สำหรับกรณีติดตั้งหม้อพัก ดังรูปที่ 4 จะทำการติดตั้งหม้อพักชนิดสะท้อนคลื่นเสียง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางท่อ ทำการวัดความดันสถิตย์ 5 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งออกจากกระบอกสูบ 0.1 m (P1) ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างอุปกรณ์กำเนิดคลื่นความดันและหม้อพัก (P2) ตำแหน่งก่อนเข้าหม้อพัก 0.5 m (P3) ออกจากหม้อพัก 0.1 m (P4) และ ตำแหน่งห่างจากทางออก 1.5 m (P5) ในการดำเนินการทดลอง จะทำการอัดอากาศเข้าสู่กระบอกสูบให้ได้ความดันตามที่ต้องการได้แก่ 1, 2, และ 3 bar ด้วยเครื่องอัดอากาศ ทำการเปิดวาล์วกระบอกสูบด้วยอุปกรณ์นิวแมติกส์และปิดทันทีเพื่อให้เกิดคลื่นความดันหนึ่งลูกที่เคลื่อนเข้าสู่ระบบท่อ แล้วทำการวัดความดันสถิตแบบ Real time เพื่อศึกษาลักษณะของลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในระบบท่อ



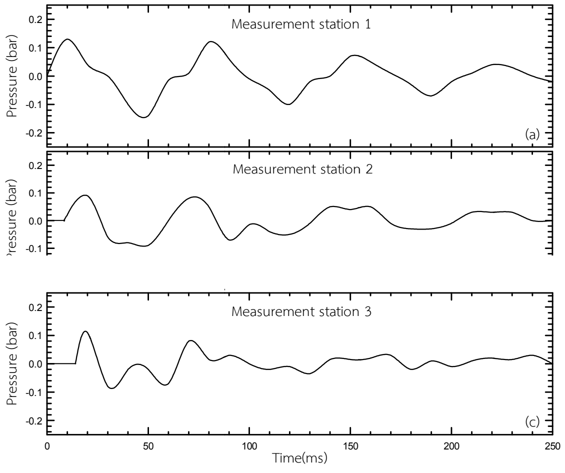
รูปที่ 3 แผนผังอุปกรณ์การทดลองกรณีไม่ติดตั้งหม้อพักไอเสีย

รูปที่ 4 แผนผังอุปกรณ์การทดลองกรณีติดตั้งหม้อพักไอเสียชนิดสะท้อนคลื่นเสียง

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

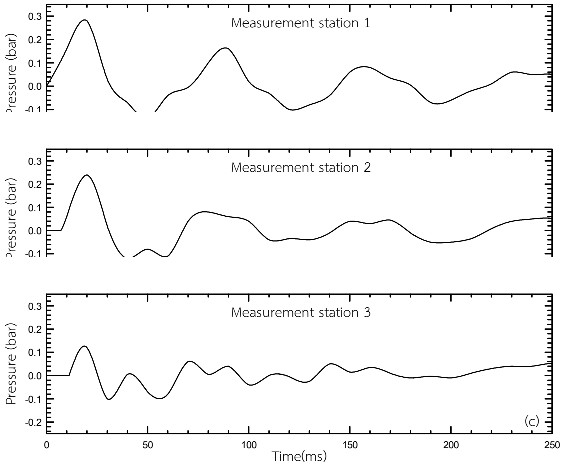
รูปที่ 5 ถึง 7 แสดงลักษณะของคลื่นความดันในท่อตรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 43 mm ยาว 6 m เมื่อ

อัดความดันในกระบอกสูบเท่ากับ 1, 2 และ 3 bar ตามลำดับ โดยทำการวัดความดันสถิตย์ ณ ตำแหน่งที่ 1 ห่างจากกระบอกสูบ 0.1 m ตำแหน่งที่ 2 ห่างจากตำแหน่งที่ 1 ระยะ 2.9 m และ ตำแหน่งที่ 3 ห่างจากตำแหน่งที่ 2 ระยะ 2.9 m เมื่อพิจารณารูปที่ 5 ณ ตำแหน่งวัดที่ 1 (ห่างจากกระบอกสูบ 0.1 m) เมื่อทำการปล่อยคลื่นความดันกระบอกสูบ 1 bar คลื่นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 310 m/s พบว่า มีค่าแอมพลิจูดความดัน 0.14 bar ซึ่งลดลงไปประมาณ 10 เท่า ดังรูปที่ 5(a) เนื่องจากการสูญเสียจากวาล์วเข้าสู่ระบบท่อและเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปยังปลายเปิดของท่อคลื่นจะสะท้อนกลับมาในลักษณะกลับเฟส มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เมื่อพิจารณาตำแหน่งวัดที่ 2 คลื่นจะเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งนี้ใช้เวลา 9 ms ความดันลดลงไปเป็น 0.12 bar ซึ่งเกิดจากการสูญเสียความเสียดทานภายในท่อ ณ ตำแหน่งวัดที่ 2 จะเห็นคลื่น 2 ลูกซ้อนทับกันอยู่คือคลื่นลูก B กับ C ดังรูปที่ 5(b) เป็นคลื่นลูกเดียวกันเคลื่อนที่สวนทางกันในเฟสเดียวกันและมีค่าแอมพลิจูดที่ลดลงไปเป็น 0.08 bar เมื่อพิจารณาตำแหน่งวัดที่ 3 รูปที่ 5(c) คลื่นลูกแรกจะเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งนี้ใช้เวลา 14 ms ความดันลดลงไปเป็น 0.1 bar จะเห็นได้ว่าลักษณะของคลื่นลูกที่สองและสามจะเคลื่อนที่ออกจากกันอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากระยะทางและเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่น

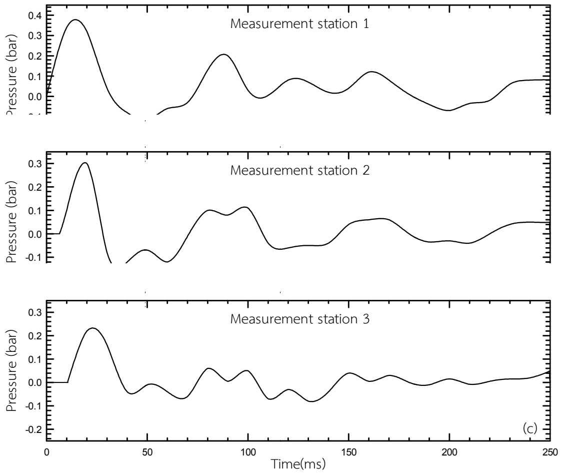


รูปที่ 5 คลื่นความดันในท่อตรง ที่ความดันในกระบอกสูบ 1 บาร์

เมื่อนำคลื่นความดันที่ 1 บาร์ มาเปรียบเทียบกับคลื่นความดัน 2 bar 3 bar (รูปที่ 5 ถึง รูปที่ 7) พบว่าลักษณะของคลื่นความดัน มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าแอมปลิจูดของคลื่นจะไม่เท่ากัน โดยที่ค่าแอมพลิจูดของคลื่นความดัน 2 bar มีค่าแอมพลิจูดสูงกว่า 1 bar 50% และ 3 bar สูงกว่า 1 bar 63%



รูปที่ 6 คลื่นความดันในท่อตรง ที่ความดันในกระบอกสูบ 2 บาร์



รูปที่ 7 คลื่นความดันในท่อตรง ที่ความดันในกระบอกสูบ 3 บาร์

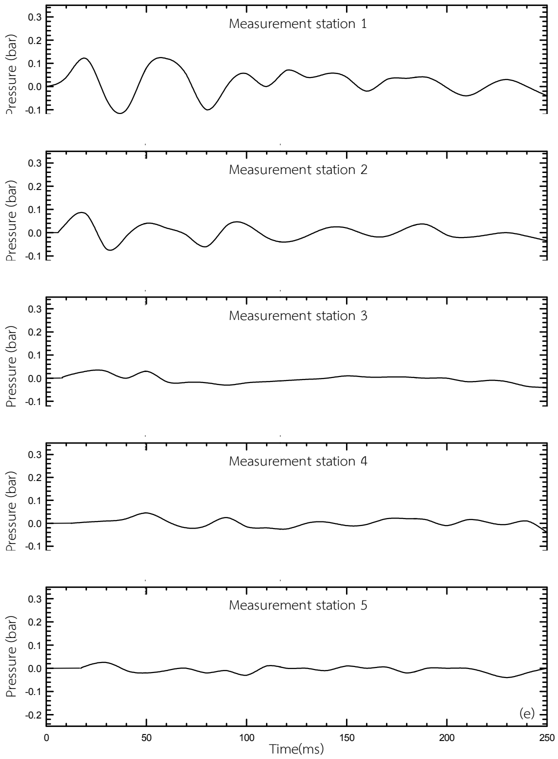
รูปที่ 8 ถึง 10 แสดงลักษณะของคลื่นความดันในท่อตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 43 mm ยาว 6.34 m กรณีมีการติดตั้งหม้อพัก Type A เมื่ออัดความดันในกระบอกสูบ 1, 2 และ 3 bar ตามลำดับ โดยทำการวัดความดันสถิต ณ ตำแหน่งที่ 1 (ห่างจากกระบอกสูบ 0.1 m) ตำแหน่งที่ 2 ห่างจากตำแหน่งที่ 1 ระยะ 2 m และ

ETM-36

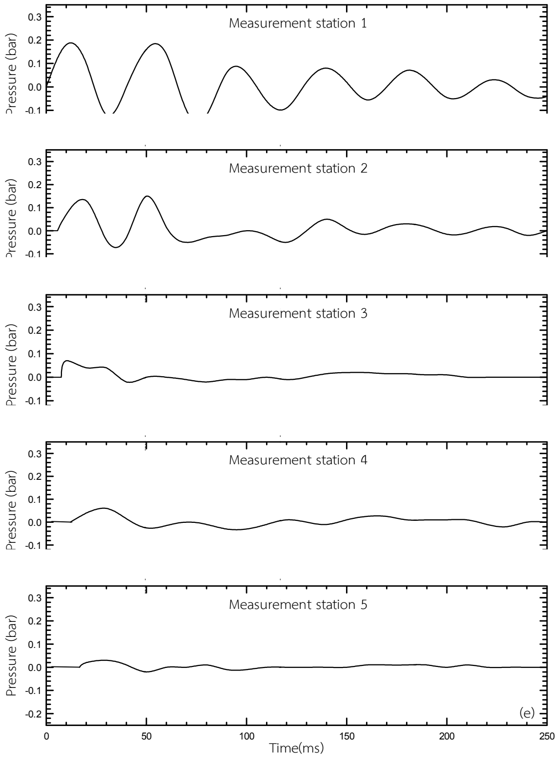
ตำแหน่งที่ 3 ห่างจากตำแหน่งที่ 2 ระยะ 0.7 m ตำแหน่งที่ 4 ห่างจากตำแหน่งที่ 3 ระยะ 1.1 m และ ตำแหน่งที่ 5 ห่างจากตำแหน่งที่ 4 ระยะ 1.1 m เมื่อพิจารณารูปที่ 8 ณ ตำแหน่งวัดที่ 1 (ห่างจากกระบอกสูบ 0.1 m) เมื่อทำการปล่อยคลื่นความดันกระบอกสูบ 1 bar คลื่นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 344 m/s พบว่าคลื่นลูกแรก มีค่าแอมพลิจูดความดัน 0.12 bar ซึ่งลดลงไปประมาณ 10 เท่า ดังรูปที่ 8(a) เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปยังปลายเปิดของท่อคลื่นจะสะท้อนกลับมา 57% ในลักษณะกลับเฟส ดังคลื่นลูกที่สองซึ่งความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เมื่อพิจารณาตำแหน่งวัดที่ 2 (รูปที่ 8(b)) คลื่นลูกแรก จะเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งนี้ใช้เวลา 5.8 ms ความดันลดลงไปเป็น 0.1 bar เมื่อพิจารณาตำแหน่งวัดที่ 3 (รูปที่ 5.4 (c)) ซึ่งเป็นตำแหน่งก่อนเข้าหม้อพัก คลื่นลูกแรก จะเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งนี้ใช้เวลา 7.8 ms ความดันลดลงไปเป็น 0.04 bar เนื่องจากหม้อพักแสดงพฤติกรรมเหมือนท่อปลายเปิดคลื่นจึงสะท้อนในลักษณะกับเฟสและเกิดการหักล้างกันคลื่นจึงมีค่าลดลง พิจารณาตำแหน่งวัดที่ 4 และ 5 คลื่นลูกแรก หลังจากเคลื่อนที่ผ่านหม้อจะมีค่าแอมพลิจูดลดลงเท่ากับ 0.03 และ 0.02 บาร์ ตามลำดับ เนื่องจากหม้อพัก ได้ดูดซับคลื่นความดันไว้ประมาณ 50% เมื่อพิจารณาคลื่นลูกที่สองพบว่าคลื่นที่สะท้อนกับมาจะค่าความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ และในรูปที่ 8(c) คลื่นลูกที่สองจะมีค่าความดันลดลง เนื่องจากคลื่นเกิดการหักล้างกันจึงทำให้มีความดันใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ

เมื่อเปรียบเทียบกับความดันที่ 2 bar และ 3 bar ดังรูปที่ 9 และ 10 พบว่าลักษณะของคลื่นความดันมีรูปร่างที่คล้ายกัน แต่ค่าแอมปลิจูดของคลื่นจะไม่เท่ากัน โดยที่ค่าแอมพลิจูดของคลื่นความดัน 2 bar ในคลื่นลูก A มีค่าเท่ากับ 0.19 bar ซึ่งสูงกว่า 1 bar 36% และ 3 bar สูงกว่า 1 bar 57%

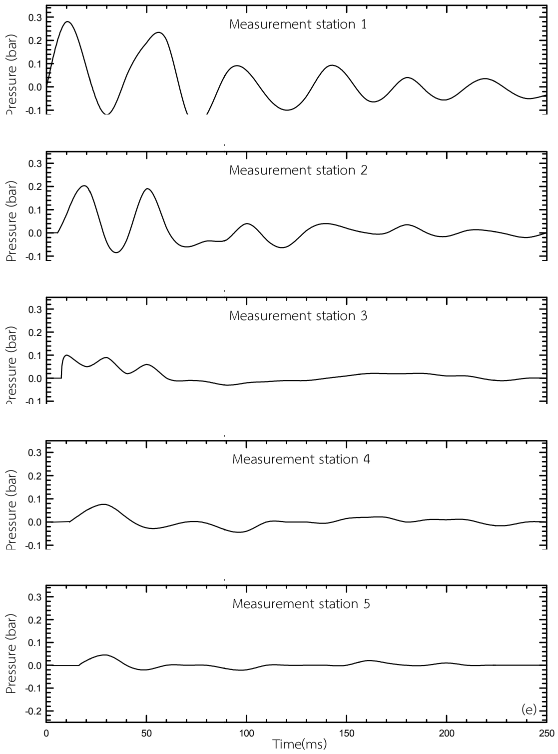
รูปที่ 11 และ 12 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับและสะท้อนกลับของคลื่นความดันเนื่องจากผลของหม้อพักชนิดสะท้อนคลื่นเสียง ซึ่งมีแนวโน้มลดลงตามความดันกระบอกสูบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากหม้อพักที่มีลักษณะที่ซับซ้อน และการสะท้อนภายในของหม้อพัก



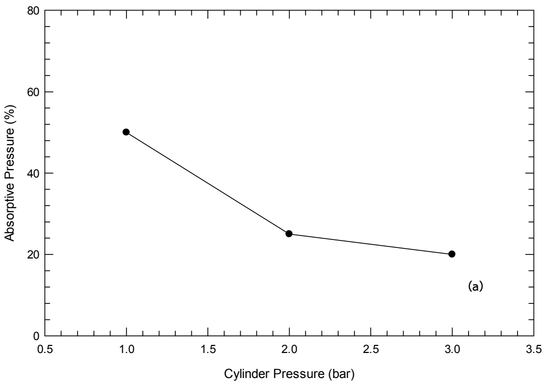
รูปที่ 8 คลื่นความดันในท่อตรง กรณีที่ติดตั้งหม้อพักที่ความดันในกระบอกสูบ 1 บาร์



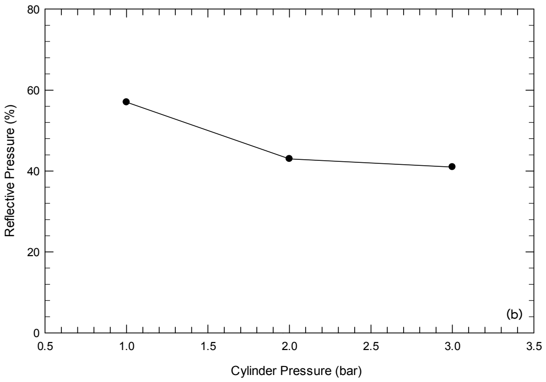
รูปที่ 9 คลื่นความดันในท่อตรง กรณีที่ติดตั้งหม้อพักที่ความดันในกระบอกสูบ 2 บาร์



รูปที่ 10 คลื่นความดันในท่อตรง กรณีที่ติดตั้งหม้อพักที่ความดันในกระบอกสูบ 3 บาร์



รูปที่ 11 ความดันดูดซับนื่องจากหม้อพัก



รูปที่ 12 ความดันสะท้อนกลับเนื่องจากหม้อพัก

5.สรุปผล

การศึกษาการศึกษาเชิงทดลองคลื่นความดันหนึ่งลูกในระบบท่อกรณีติดตั้งหม้อพักชนิดสะท้อนเสียง มีการศึกษาเปรียบเทียบกับระบบท่อตรงกรณีไม่ติดตั้งหม้อพัก สามารถสรุปได้ดังนี้

1. มีการสูญเสียความดันอย่างมาก เมื่อคลื่นความดันเคลื่อนที่ออกจากกระบอกสูบสู่ท่อ

2. แอมปลิจูดของคลื่นความดันลดลงตามความยาวท่อและระยะเวลา เนื่องจากผลของความเสียดทานและการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อน

3. จำนวนลูกคลื่นด้านขาเข้าเมื่อติดตั้งหม้อพักไอเสียมีจำนวนเพิ่มขึ้น 2 เท่าของกรณีไม่ติดตั้งหม้อพัก และลักษณะการสะท้อนคลื่นเสียงของหม้อพัก แสดงพฤติกรรมเสมือนท่อปลายเปิด แต่มีการสูญเสียความดันมากกว่า

4. คลื่นความดันเมื่อคลื่นที่ผ่านหม้อพักไอเสียจะมีการลดขนาดแอมปลิดจูดอย่างมากและจะมีการสิ้นสูญอย่างรวดเร็วจากการสะท้อนของหม้อพักไอเสีย

6.เอกสารอ้างอิง

[1] Panigrahi S N, Munjal M L. (2007). A generalized scheme for analysis of multifarious commercially used mufflers, Applied Acoustics, Vol. 68, pp. 660–681

[2] Shao Y L. (2011) .A study on exhaust muffler using a mixture of counter-phase counteract and split-gas rushing, Proc. Eng., Vol. 15, pp. 4409-4413

[3] Yasuda T, Wu C, Nakagawa N and Nagamura K. (2013). Studies on an automobile muffler with the

acoustic characteristic of low-pass filter and Helmholtz resonator, Appl Acoust., Vol. 74 (1), pp. 49-57

[4] Mimani A and Munjal M L. (2011). Transverse plane wave analysis of short elliptical chamber mufflers: An analytical approach. J. Sound Vib., 330(7): 1472-1489.

[5] Banister F K and Mucklow G F. (1948). Wave Action Following Sudden Release of Compressed Gas from Cylinder, Proceeding Institution of Mechanical Engineering's, Vol.159, pp. 269-300

[6] Kandylas I P, Stamatelos A M. (1999), Engine Exhaust System Design Based on Heat Transfer Computation, Energy Conversion & Management, Vol. 40, pp. 1057-1072

[7] Wallace F J. (1954). Wave Action in Diffusers for Pipe System Scavenging Two-Stroke Engines, Engineering, Vol.178, pp. 524-528

[8] วิกรม จันทร์วรชัยกุล. (2536). ศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นความดันขนาดใหญ่หนึ่งลูกผ่านหม้อพักแบบเฮล์มโฮลต์ซ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 87-88