

การประยุกต์ใช้สัญญาณอคูสติกอิมิชชันเพื่อตรวจสอบสถานะของ เครื่องยนต์แก๊สโซลีน

Application of Acoustic Emission Signal for Condition Monitoring of Gasoline Engine

ศิริพงษ์ แสงสารพันธ์¹ พรชัย นิเวศน์รังสรรค์²

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250 โทรศัพท์ 0-2763-2600 โทรสาร 0-2763-2700

¹ siripong@tni.ac.th

² pornchai@tni.ac.th

บทคัดย่อ

การตรวจสอบสภาพเครื่องยนต์แก๊สโซลีนมีการใช้หัววัดการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจสอบสภาพ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้มักจะถูกบดบังด้วยคลื่นความถี่ต่ำ (<1000 Hz) ในช่วงการทำงานของชิ้นส่วนและกลไกต่าง ๆ ของเครื่องจักรกล การประยุกต์ใช้สัญญาณอคูสติกอิมิชชันสามารถช่วยให้เห็นกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนได้ชัดเจนขึ้น การศึกษานี้จะใช้หัววัดอคูสติกอิมิชชันเพื่อตรวจสอบการทำงานของกลไกที่สำคัญของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน Suzuki 4 จังหวะ 4 สูบ 16 วาล์ว 1600 CC เช่น การทำงานของวาล์วไอดีและไอเสีย ที่เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ เช่น เครื่องยนต์ทำงานปกติ ระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสียผิดปกติ และการทำงานของหัวฉีดผิดปกติ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระ และมีภาระ 10 Nm และ 20 Nm ผลการศึกษพบว่าการใช้สัญญาณอคูสติกอิมิชชันสามารถใช้ตรวจสอบกระบวนการทำงานที่สำคัญของเครื่องยนต์และยังสามารถใช้ทำนายเงื่อนไขการทำงานของเครื่องยนต์ที่ทำงานปกติ และทำงานผิดปกติที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ได้ดีกว่าสัญญาณการสั่นสะเทือน

คำสำคัญ: สัญญาณอคูสติกอิมิชชัน, การตรวจสอบสภาพ, เครื่องยนต์แก๊สโซลีน, สัญญาณการสั่นสะเทือน

ABSTRACT

A gasoline engine condition monitoring uses an accelerometer to monitor engine. Typically, detected vibration signal is included considerable noise (<1000 Hz) that related to moving parts and mechanisms of rotating machine. The use of acoustic emission signal can help to clearly identify various processes in the gasoline engine cycle. This study was used acoustic emission sensor to investigate mechanisms of 4-stroke, 4-cylinder, Suzuki gasoline engine with capacity of 1600 cc such as the operation of intake and exhaust valves, clearance intake and exhaust valve faults and injector faults when engine was running with no load and load of 10 and 20 Nm. It is found that acoustic emission signal can be used to monitor engine operations and also can be used to predict various simulated engine conditions of normal and abnormal engines with better result than vibration signal.

Keywords: Acoustic emission, condition monitoring, gasoline engine, vibration signal

1) บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีในเครื่องยนต์ได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพขึ้นอย่างมาก ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ก็มีความซับซ้อนมากขึ้นทำให้บางครั้งไม่สามารถทำการซ่อมแซมหรือบำรุงได้ตรงจุดอย่างทันท่วงที อันเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เครื่องยนต์เกิดการสึกหรอเพิ่มเติมในจุดที่บกพร่องและไม่ได้รับการแก้ไข การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีที่ให้ผลที่ค่อนข้างแม่นยำ เช่น OBD (ON BOARD DIAGNOSIS) ก็ไม่ค่อยได้รับความนิยมตามอู่ซ่อมบำรุงต่าง ๆ เนื่องจากเครื่อง OBD มีราคาแพงและยุ่งยากในการเชื่อมต่อ จำเป็นต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือ นอกจากนี้ OBD ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ความผิดปกติจากชิ้นส่วนจักรกลและมีข้อจำกัดค่อนข้างมากในรถยนต์รุ่นเก่าที่ไม่ได้สร้างเพื่อรองรับการตรวจสอบแบบ OBD

การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อให้การวิเคราะห์ผลการทำงานของเครื่องยนต์นั้นเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว แนวคิดของการศึกษานี้จะใช้หลักการของสัญญาณอคูสติกอิมิชชันมาวิเคราะห์ความผิดปกติของเครื่องยนต์ สัญญาณที่บันทึกได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนมุมเฟสเพื่อหาการวิเคราะห์นั้นแม่นยำ

2) การตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์

อคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission) เป็นปรากฏการณ์จากการแผ่คลื่นพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงภายในของวัตถุที่ไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลังที่แผ่ออกมานั้นมีความถี่อยู่ในช่วง 0.1 - 1 MHz ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ สัญญาณอคูสติกอิมิชชันนี้สามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุได้ เช่น การตรวจสอบการแตกร้าวในโลหะ การตรวจสอบรอยร้าวของท่อ การตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์ เป็นต้น การตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์มีการพัฒนาวิธีการตรวจสอบด้วยหัววัดต่าง ๆ เช่น ไมโครโฟน หัววัดการสั่นสะเทือน หัววัดอคูสติกอิมิชชัน หัววัดความดันและอุณหภูมิ เป็นต้น งานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้หัววัดต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบเครื่องยนต์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ Gu and Ball [1-2] ได้ประยุกต์ใช้สัญญาณเสียงที่บันทึกจากไมโครโฟนเพื่อตรวจสอบการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ 4

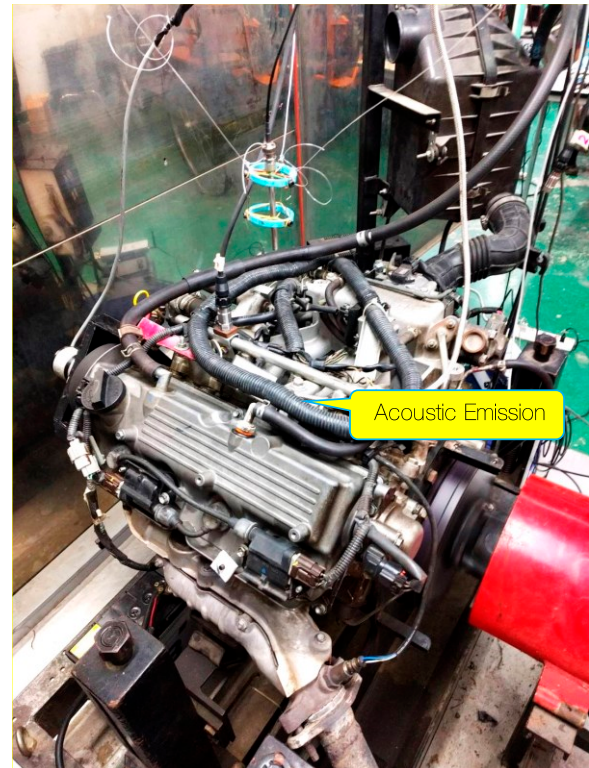
จังหวะ ความจุ 2500 cc จากการศึกษาพบว่า กระบวนการการทำงานของเครื่องยนต์นั้นจะปรากฏความถี่ของเสียงช่วง 1kHz-20kHz ออกมาเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (continuous wavelet transform) พบว่าหากเครื่องยนต์ทำงานผิดปกติ ผลการแปลงเวฟเลต ของคลื่นเสียงจะเปลี่ยนแปลงไป การประยุกต์ใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจสอบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน 4 จังหวะ 1 สูบ ความจุกระบอกสูบ 125 cc ซึ่งเป็นเครื่องยนต์มอเตอร์ไซด์ [3] ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถใช้ตรวจสอบกระบวนการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียได้อย่างชัดเจน และเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นที่วาล์วเช่น ระยะห่างของวาล์วลดลงจากค่าปกติจะส่งผลให้สัญญาณการสั่นสะเทือนลดต่ำลงอย่างชัดเจน สัญญาณอนุสติกอิมพัลส์ได้มีการประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบกระบวนการทำงานหัวฉีดน้ำมันของเครื่องยนต์ดีเซลเทอร์โบ 4 สูบ 4 จังหวะ ความจุกระบอกสูบ 4000 cc [4] ผลการศึกษาพบว่าสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์สามารถใช้บันทึกกระบวนการฉีดน้ำมันและกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้ตามจังหวะการทำงานของแต่ละกระบอกสูบตามลำดับ 1-3-4-2 นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์ยังสามารถอธิบายกระบวนการที่เกิดขึ้นในหัวฉีดได้ดีกว่าสัญญาณการสั่นสะเทือน การประยุกต์ใช้สัญญาณอนุสติกอิมพัลส์เพื่อตรวจสอบเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ 8 สูบ กำลังสูงสุดประมาณ 3.8 MW ที่ความเร็วรอบ 600 rpm ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วต่ำที่ใช้ในเรือเดินสมุทร [5] การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์สามารถบันทึกกระบวนการจุดระเบิด การเผาไหม้ กระบวนการเปิดและปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย รวมถึงกระบวนการคายไอเสียออกจากห้องเผาไหม้ เนื่องจากเครื่องยนต์มีขนาดค่อนข้างใหญ่จึงทำให้สัญญาณที่บันทึกได้สามารถแสดงถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบอกสูบได้ชัดเจน

การศึกษานี้จะประยุกต์ใช้สัญญาณอนุสติกอิมพัลส์เพื่อตรวจสอบการทำงานของเครื่องแก๊สโซลีนโดยการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ที่สภาวะต่าง ๆ เช่น เครื่องยนต์ทำงานปกติ เครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะผิดปกติเมื่อระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสียผิดไปจากค่าปกติ และหัวฉีดผิดปกติ สัญญาณอนุสติกอิมพัลส์บนโดเมนเพลซอห์เวียจะใช้เปรียบเทียบกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์ที่สภาวะปกติและผิดปกติ

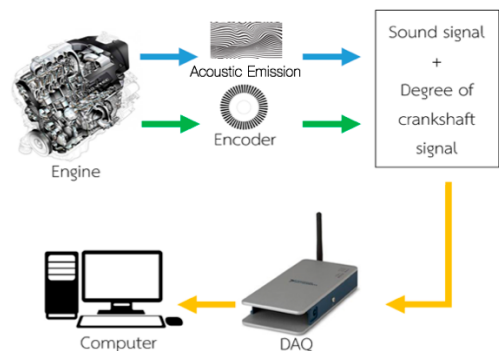
3) การทดลอง

การศึกษานี้จะใช้เครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4 จังหวะ ยี่ห้อซูซูกิ ขนาดความจุ 1600 cc เครื่องยนต์นี้จะใช้จำลองสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่สภาวะปกติ และสภาวะการทำงานที่ผิดปกติของวาล์วไอดีไอเสีย และหัวฉีด ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ สัญญาณอนุสติกอิมพัลส์จะถูกวัดจากหัววัดอนุสติกอิมพัลส์ซึ่งติดตั้งอยู่บนเสื้อสูบที่ตำแหน่งระหว่างกระบอกสูบที่ 2 และกระบอกสูบที่ 3 ตามรูปที่ 1 สัญญาณความเร็วรอบและสัญญาณองศาการทำงานจะถูกบันทึกจากเอ็นโคเดอร์ที่ติดตั้งที่เพลาลูกเบี้ยว สัญญาณอนุสติกอิมพัลส์และสัญญาณเอ็นโคเดอร์ที่ได้จะถูกแปลงเป็นข้อมูลคอมพิวเตอร์โดยอุปกรณ์ DAQ (Data acquisition device) และจัดเก็บเป็นไฟล์โดยโปรแกรม LabVIEW ดังรูปที่ 2 สัญญาณที่บันทึกได้จะเป็นกราฟบนโดเมนเวลาที่ถูกแทนนบนเป็นเวลาใน

หน่วยวินาที และแทนตั้งเป็นแอมพลิจูดของสัญญาณในหน่วยโวลต์ สัญญาณบนโดเมนเวลานี้จะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณบนโดเมนมุมเพลซอห์เวียด้วยสัญญาณความเร็วรอบเพื่อความสะดวกต่อการจำแนกกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์



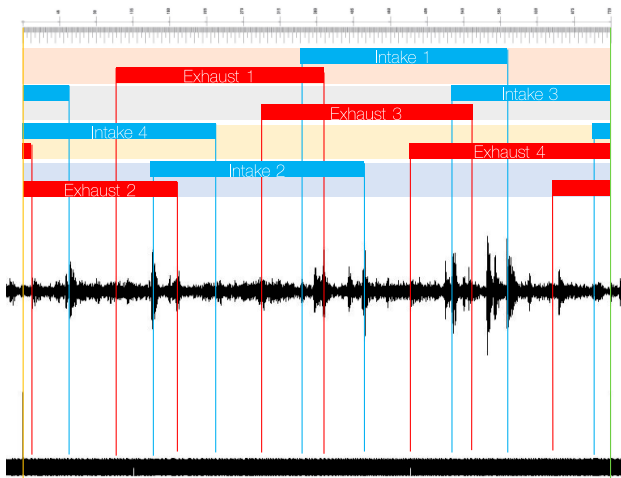
รูปที่ 1 ตำแหน่งของหัววัดอนุสติกอิมพัลส์



รูปที่ 2 ระบบการจัดเก็บข้อมูลจากหัววัดต่าง ๆ

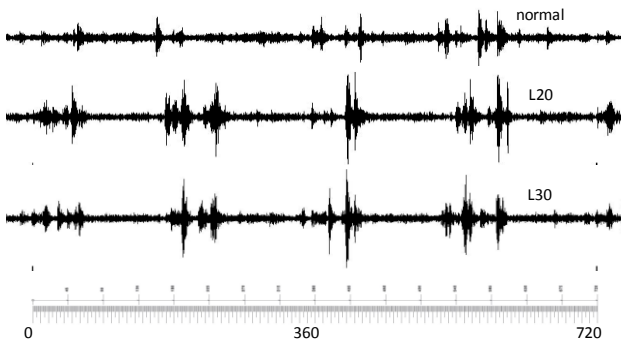
4) ผลการทดลอง

ตัวอย่างสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์บนโดเมนเวลาขณะเครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะปกติ (Normal) แสดงดังรูปที่ 3 สัญญาณนี้ยังแสดงลำดับการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียแต่ละกระบอกสูบของเครื่องยนต์ที่มีลำดับการทำงานคือ 1-3-4-2 ซึ่งสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์จะปรากฏเหตุการณ์ที่ตรงกันกับช่วงเวลาที่ว่าวาล์วไอดีและไอเสียของแต่ละกระบอกสูบทำงานตามลำดับ กระบวนการทำงานของวาล์วที่เกิดขึ้นคาดว่าเกิดมาจากการกระแทกระหว่างเพลาลูกเบี้ยว และหมวกวาล์วในขั้นตอนการเปิดของวาล์ว และเกิดจากการกระแทกของขอบวาล์วและบ่าวาล์วในขั้นตอนการปิดของวาล์ว



รูปที่ 3 สัญญาณอนุสติกอิมพัลส์บนโดเมนเวลาที่สภาวะปกติและกระบวนการทำงานของวาล์วต่าง ๆ

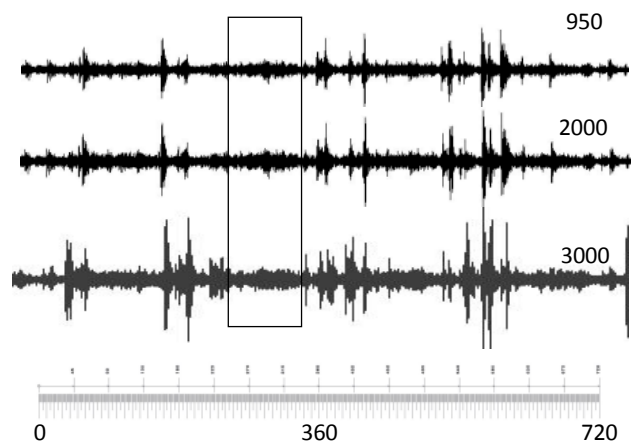
สัญญาณบนโดเมนเวลาจะถูกแปลงเป็นสัญญาณบนโดเมนมุมเฟลาข้อเหวี่ยงเพื่อความสะดวกของการเปรียบเทียบกระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ตัวอย่างสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์ขณะเครื่องยนต์ทำงานปกติและภายใต้ภาระ ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบประมาณ 2000 rpm แสดงดังรูปที่ 4 สัญลักษณ์ L20 และ L30 แทนด้วยภาระที่ 20 และ 30 Nm ตามลำดับ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานภายใต้ภาระที่เพิ่มขึ้นพบว่า สัญญาณที่บันทึกได้จากกระบวนการทำงานของวาล์วจะมีขนาดแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น



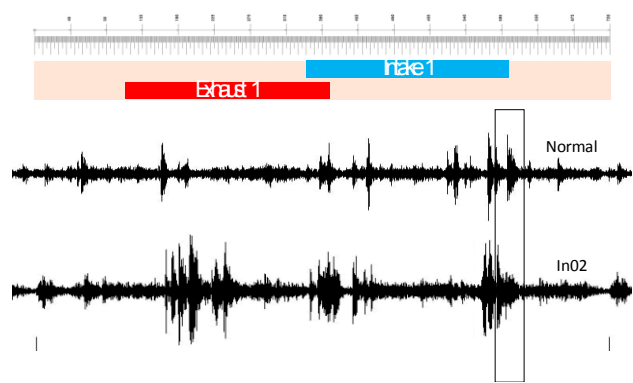
รูปที่ 4 ตัวอย่างสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์ขณะที่ทำงานแบบมีภาระและไม่มีการ

เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น 950, 2000 และ 3000 rpm ตามลำดับ พบว่าสัญญาณที่บันทึกได้ดังรูปที่ 5 จะมีขนาดแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นคล้ายคลึงกับสัญญาณที่บันทึกได้จากเครื่องยนต์ทำงานภายใต้ภาระที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4 แต่สัญญาณทั้งสองกรณีจะแตกต่างกันที่เหตุการณ์ที่อยู่ระหว่างการเปิดและปิดของวาล์ว (สัญญาณที่อยู่ในรอบสี่เหลี่ยม) เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น สัญญาณในส่วนนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งคาดว่าจะเป็นการกระบวนการเคลื่อนที่ของลูกสูบในกระบอกสูบ

ตัวอย่างสัญญาณเนื่องจากความผิดปกติของวาล์วไอดีที่มีระหว่างช่วงของวาล์วเพิ่มขึ้นผิดปกติเทียบกับค่ามาตรฐาน ระยะห่างของวาล์วไอดีของกระบอกสูบที่ 1 จะมีระยะห่างเพิ่มขึ้นเป็น 0.2 mm ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าสัญญาณการปิดของวาล์วไอดีมีการเปลี่ยนแปลงไป (สัญญาณที่อยู่ในรอบสี่เหลี่ยม) ตำแหน่งการปิดของวาล์วเพี้ยนไป

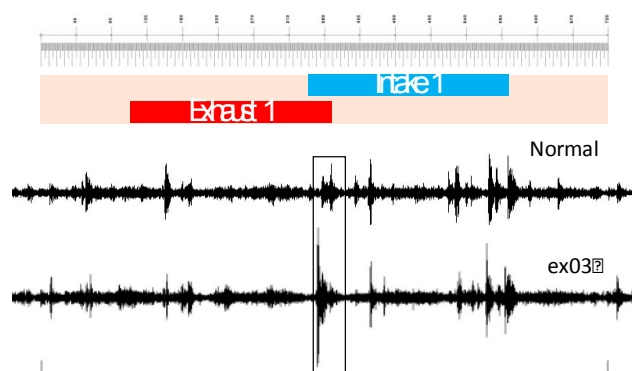


รูปที่ 5 ตัวอย่างสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ



รูปที่ 6 ตัวอย่างสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์ที่เงื่อนไขปกติและเงื่อนไขวาล์วไอดีผิดปกติ

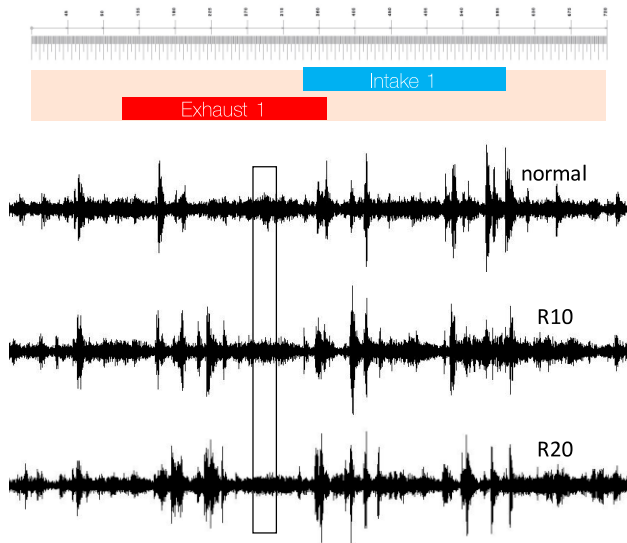
ตัวอย่างสัญญาณการจำลองความผิดปกติที่วาล์วไอเสียแสดงดังรูปที่ 7 วาล์วไอเสียจะถูกปรับตั้งระยะห่างของวาล์วให้เพิ่มขึ้นและมากกว่าค่ามาตรฐาน จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่อยู่ในรอบสี่เหลี่ยมจะเป็นสัญญาณที่เกี่ยวกับการปิดของวาล์วไอเสียซึ่งสัญญาณที่บันทึกได้วาล์วจะปิดเร็วขึ้นกว่าปกติ ผลการทดลองที่ได้คล้ายคลึงกับผลการทดลองของไอดีผิดปกติ



รูปที่ 7 ตัวอย่างสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์ระหว่างสภาวะปกติและจำลองความผิดปกติที่วาล์วไอเสีย

ตัวอย่างสัญญาณการจำลองความผิดปกติที่หัวฉีดของกระบอกสูบที่ 1 ด้วยการเพิ่มความต้านทานที่หัวไฟฟ้าของหัวฉีด 10 และ 20 โอห์ม (สัญญาณ R10 และ R20 ตามลำดับ) เพื่อจำกัดให้กระแสที่ใช้ในการเปิดและปิดหัวฉีดให้น้อยลง สัญญาณที่บันทึกได้โดยเฉพาะที่รอบ

สี่เหลี่ยม พบว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ตัวอย่างสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ที่สภาวะปกติและจำลองความผิดปกติที่หัวฉีด

5) สรุป

สัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ที่บันทึกจากเครื่องยนต์ทดสอบด้วยหัวฉีดอคูสติกอิมพัลส์ที่ติดตั้งบนเสื้อสูบ สามารถใช้จำแนกกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ เช่น สัญญาณที่เกิดจากการเปิดและปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย สัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่เสียดสีของลูกสูบและกระบอกสูบ สัญญาณการทำงานของหัวฉีด เป็นต้น สัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ที่เกี่ยวกับการทำงานของวาล์วจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องทำงานภายใต้ภาระ หรือความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่นสำหรับชุดทดลองเครื่องยนต์และไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณอาจารย์วชิรวิทย์ สงสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับระบบการเก็บสัญญาณ และขอขอบคุณอาจารย์พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ ที่ให้คำปรึกษาตลอดการทำการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Gu, W. Li, A. Ball, and A. Y. . Leung, "The Condition Monitoring of Diesel Engines Using Acoustic Measurements Part 1: Acoustic Characteristics of the Engine and Representation of the Acoustic Signals," *SAE Technical Papers*, Mar. 2000.
- [2] F. Gu, A. Ball, and W. Li, "The Condition Monitoring of Diesel Engines Using Acoustic Measurements-Part 2: Fault Detection and Diagnosis," *SAE Technical Papers*, Mar. 2000.

- [3] S. Klinchaeam and P. Nivesrangsarn, "Condition monitoring of valve clearance fault on a small four strokes petrol engine using vibration signals," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 32, pp. 619-625, Dec. 2010.
- [4] J. D. Gill, R. L. Reuben, J. A. Steel, M. W. Scaife and J. Asquith, "A study of small HSDI diesel engine fuel injection equipment faults using acoustic emission," in *Proceedings of the 24th European Conference on Acoustic Emission Testing*, France, 2000, pp. 281-286.
- [5] A. K. Frances, J. D. Gill, R. L. Reuben and J. A. Steel, "A study of the variability of acoustic emission signals from a medium size marine diesel engine under service conditions," in *Proceedings of the 16th International Congress, Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, Sweden, 2003, pp. 503-512.