

การตรวจสอบสถานะเครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4 จังหวะด้วยการวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณการสั่นสะเทือน

Condition Monitoring of a 4-Stroke, 4-Cylinder, Petrol Engine Using Frequency Analysis Technique on Vibration Signals

จิรพงศ์ สุชาติพิทย์* และ พรชัย นิเวศน์รังสรรค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น 1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250

*ติดต่อ: E-mail, Tel: 02-763-2600 ต่อ 2905, 2910 Fax: 02-7632600 ต่อ 2900

บทคัดย่อ

เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ได้มีการประยุกต์ใช้ตรวจสอบเครื่องจักรกลและชิ้นส่วนหมุนหลายประเภท เทคนิคนี้มีการใช้อย่างแพร่หลายในการตรวจสอบเบร้งและเฟือง สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถใช้ตรวจวัดปรากฏการณ์ทางกลและของไหลซึ่งเกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ การศึกษานี้จะจำลองการตรวจสอบสถานะเครื่องยนต์ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากบริเวณฝาสูบและรางหัวฉีด เครื่องยนต์ที่ใช้เป็นเครื่องยนต์เบนซินซูซูกิ 4 จังหวะ 4 กระบอกสูบ ขนาดความจุ 1600 CC การศึกษานี้จะจำลองการทำงานของเครื่องที่สถานะเครื่องยนต์ปกติ ระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสียผิดปกติ และ หัวฉีดทำงานผิดปกติ เช่น หัวฉีดไม่ทำงาน ความต้านทานที่คอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม เครื่องยนต์ที่ทดสอบจะทำงานแบบไม่มีภาระที่รอบประมาณ 800 - 1000 rpm จากผลการศึกษาพบว่า การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถทำนายสถานะความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับวาล์วและหัวฉีดได้ ความถี่หลักที่เกี่ยวข้องกับการทำงานทางกลของหัวฉีดอาจจะเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำกว่า 2000 Hz ในขณะที่กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการไหลอาจจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงที่มากกว่า 2000 Hz แต่ผลการวิเคราะห์ที่วาล์วยังไม่ชัดเจนนัก การศึกษาต่อไปจำเป็นต้องปรับปรุงและพัฒนาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการศึกษากับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น ๆ เพื่อใช้ทำนายสถานะของเครื่องยนต์ได้แม่นยำและถูกต้องมากขึ้น

คำหลัก: การตรวจสอบสถานะการทำงาน, สัญญาณการสั่นสะเทือน, เครื่องยนต์เบนซิน, เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่

Abstract

Vibration signal analysis technique has been applied to monitor machine and various rotating parts. This technique has been used to monitor ball bearing and gear. Vibration signal can be used to discover mechanical and fluid flow phenomena in the engine cycle. This study was to simulate condition monitoring of petrol engine using vibration signal which was recorded from the cylinder head and fuel injector rail. The engine used in this study was 4-stroke, 4-cylinder, Suzuki petrol engine with capacity of 1600 CC. This study was simulated with various conditions such as normal, inlet valve clearance of inlet and exhaust valve faults, unplugged injector, injector coil faults via adding resistors of 10 and 20 ohms. The testing engine was run with no load at speed of approximately 800-1000 rpm. It is found that the use of frequency domain analysis technique could be used to predict clearance valve and injector faults. The main frequency dominant associated with mechanical processes of injector was below 2000 Hz and the frequencies of above 2000 Hz might be associated with fluid flow activities. The further study is needed to improve vibration signal analysis based on frequency domain including comparison of other analysis techniques in order to monitor engine more accuracy.

Keywords: Condition monitoring, Vibration signal, Petrol engine, Frequency domain analysis technique

1. บทนำ

เครื่องยนต์เป็นเครื่องจักรกลหมุนชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในครัวเรือน อาคารสำนักงาน อาคารพักอาศัย เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม การใช้เครื่องยนต์ในงานอุตสาหกรรมมักใช้ในงานผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าต่าง ๆ หรือใช้ในการสำรองไฟฉุกเฉิน ซึ่งสภาพของเครื่องยนต์จะมีความสำคัญมาก หากเครื่องยนต์เกิดการขัดข้องขึ้นในช่วงที่กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเกิดปัญหาอาจจะส่งผลให้เกิดผลกระทบและความเสียหายที่รุนแรงได้ต่อกระบวนการผลิตได้ ดังนั้น การทราบถึงสภาพของเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลอื่น ๆ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ซึ่งจะทำให้การวางแผนการซ่อมบำรุงเครื่องยนต์ทำได้ง่ายขึ้น และลดปัญหาการเสียหายที่รุนแรงของเครื่องยนต์

วิธีการตรวจสอบเครื่องยนต์มีหลายวิธี วิธีพื้นฐานที่ช่างซ่อมทั่วไปใช้คือ การตรวจสอบสภาพของเครื่องยนต์โดยใช้ประสาทสัมผัส เช่น การสัมผัสหรือฟังเสียงซึ่งเป็นเทคนิคที่ต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบเอง วิธีที่นิยมใช้ในการตรวจวัดเครื่องจักรกลหมุนทั่วไปคือ การตรวจวัดด้วยสัญญาณจากเซนเซอร์หรือหัววัดต่าง ๆ ได้มีงานวิจัยที่นำมาประยุกต์เพื่อตรวจสอบเครื่องยนต์โดยใช้หัววัดติดตั้งที่ผิวภายนอกของตัวเครื่องยนต์ เช่น หัววัดการสั่นสะเทือน หัววัดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น หรือ หัววัดที่ต้องติดตั้งเข้าไปในเครื่องยนต์ สัญญาณที่ได้จากหัววัดต่าง ๆ จะเป็นสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามกระบวนการทางกลและทางของไหลที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ที่ทดสอบ การตรวจสอบเครื่องยนต์ด้วยหัววัดการสั่นสะเทือนมีการประยุกต์ใช้ตรวจสอบทั้งเครื่องยนต์เบนซิน และเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งสามารถใช้ตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ได้

การใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจวัดความผิดปกติของวาล์วไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ 1 สูบ ได้มีการศึกษาโดย ทรงพลและพรชัย [1] สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถแสดงการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียได้อย่างชัดเจนและสามารถบอกความผิดปกติที่เกิดขึ้นในสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ การใช้สัญญาณอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเพื่อตรวจสอบการทำงานของปั๊มหัวฉีดได้มีการศึกษาโดย Gill และคณะ [2] สัญญาณอุณหภูมิ

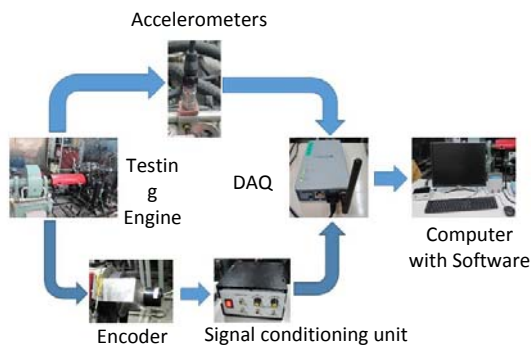
ของน้ำมันสามารถแสดงกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ 4 จังหวะ 4000 cc ได้ นอกจากนี้เมื่อความดันในปั๊มหัวฉีดลดลง สัญญาณอุณหภูมิของน้ำมันที่ปั๊มหัวฉีดที่แตกต่างจากสภาวะปกติ การตรวจสอบการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยสัญญาณเสียงที่บันทึกจากไมโครโฟนได้มีการศึกษาโดย Gu และ คณะ [3-4] สัญญาณเสียงที่บันทึกได้จากเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ 4 จังหวะ สามารถใช้ทำนายสภาวะของเครื่องยนต์ที่เสื่อมน้อยผิดปกติ ความผิดปกติของอัตราส่วนการอัด ความผิดปกติของความดันเริ่มต้นการทำงานของหัวฉีด และการรั่วภายในของน้ำมัน การศึกษานี้ยังพบว่าสัญญาณเสียงที่ต่ำกว่า 10kHz จะถูกรบกวนด้วยสัญญาณอื่นเนื่องจากการรบกวนของห้อง

สัญญาณที่ตรวจวัดมาจากหัววัดจะประกอบไปด้วยกระบวนการทางกลและทางของไหลในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์เช่น การจุดระเบิด การเผาไหม้ การทำงานของวาล์วไอดีและไอเสีย เป็นต้น สัญญาณสามารถที่จะวิเคราะห์ได้โดยประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ และค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณต่าง ๆ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่ารากกำลังสอง ค่าความถี่ ค่าความแปรปรวน ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่า crest factor เป็นต้น [1] การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนยังมีการใช้วิธีการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ เช่น การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลหมุนทั่วไป [5-7]

งานวิจัยในอดีตเครื่องยนต์ยังมีกลไกไม่ซับซ้อนนัก แต่ปัจจุบันเครื่องยนต์มีกลไกการทำงานที่ซับซ้อนขึ้น งานวิจัยนี้จึงจะประยุกต์ใช้หัววัดการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจสอบวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ และเพื่อตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์เช่น ความผิดปกติของระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสีย ความผิดปกติของหัวฉีดเช่น หัวฉีดไม่ทำงาน ความดันน้ำมันที่คอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม เป็นต้น สัญญาณการสั่นสะเทือนจะทำการวิเคราะห์เฉพาะสัญญาณการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสีย และสัญญาณการทำงานของหัวฉีดด้วยการวิเคราะห์ความถี่

2. การทดลอง

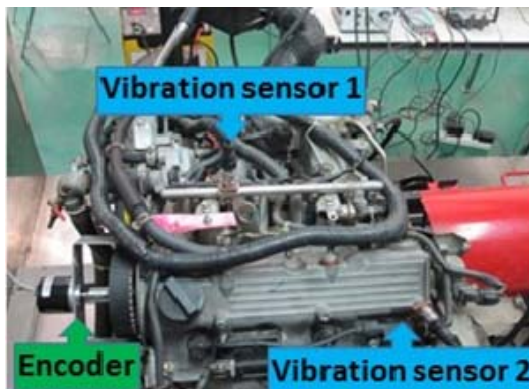
อุปกรณ์การทดลองของการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 1
อุปกรณ์มีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

- เครื่องยนต์เบนซิน ยี่ห้อซูซูกิ รุ่น G16A 4 สูบ 4
จังหวะ 16 วาล์ว ขนาดความจุ 1600 CC ติดตั้งอยู่บน
Dyno test

- หัววัดการสั่นสะเทือน (Accelerometers) 2 ตัว
- เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)
- อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ
- ชุดเก็บข้อมูล (Data Acquisition Card, DAQ)
- คอมพิวเตอร์ (Computer) และซอฟต์แวร์



รูปที่ 2 ตำแหน่งติดตั้ง Encoder และหัววัดการ
สั่นสะเทือน

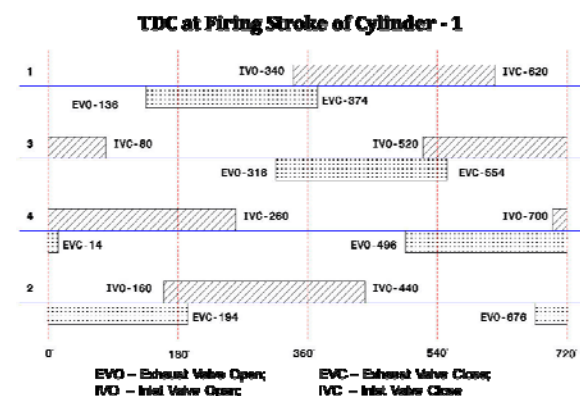
Encoder จะถูกติดตั้งที่เพลาลูกเบี้ยวเพื่อใช้บันทึก
สัญญาณรอบการทำงานของวัฏจักรเครื่องยนต์ ซึ่งเพลาลูก
เบี้ยวหมุนครบ 1 รอบเท่ากับ 720° สัญญาณที่ได้จาก
Encoder นี้จะให้ 1 พัลส์ต่อ 1 วัฏจักรเครื่องยนต์
ตำแหน่ง 0° ของ Encoder คือ ตำแหน่งจุดศูนย์ตายบน
(TDC) ของลูกสูบที่ 1 ที่จังหวะจุดระเบิด (Firing stroke)
หัววัดการสั่นสะเทือนจะใช้ 2 ตัว ตัวแรกจะติดตั้งที่บน
รางหัวฉีดที่อยู่ระหว่างหัวฉีดที่ 1 และ 2 ฝาสูบ ตัวที่สอง

จะติดตั้งที่บนฝาสูบระหว่างกระบอกสูบที่ 3 และ 4 หัววัด
ทุกชนิดจะต่อกับชุดปรับปรุงสัญญาณ และต่อเข้าอุปกรณ์
เก็บข้อมูลดังรูปที่ 2 สัญญาณทั้งหมดจะถูกบันทึกพร้อม
กันและบันทึกเป็นไฟล์เพื่อวิเคราะห์ภายหลัง สัญญาณทุก
ชนิดจะถูกบันทึกด้วยอัตราสุ่มเท่ากับ 25600 ต่อวินาทีต่อ
ช่องสัญญาณ ขณะที่เครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบ
ประมาณ 800 – 1000 รอบต่อนาทีโดยไม่มีภาระ
เงื่อนไขการจำลองของเครื่องยนต์สรุปได้ดังนี้

- การจำลองความผิดปกติที่หัวฉีดสูบที่ 4 (INJ4) ซึ่ง
ประกอบด้วยเงื่อนไข INJ4 ไม่ทำงาน ความต้านทานที่
คอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม โดยความ
ต้านทานเดิมเท่ากับ 12.7 โอห์ม และการเพิ่มความ
ต้านทานให้คอยล์เป็น 22.7 โอห์ม และ 32.7 โอห์ม ซึ่ง
แทนด้วยสัญลักษณ์ INJ4 Unplugged, INJ4 R10 และ
INJ4 R20 ตามลำดับ

- การจำลองความผิดปกติที่วาล์วไอดี (IV) กระบอก
สูบที่ 4 โดยระยะห่างปกติเท่ากับ 0.13 – 0.17 mm ให้
ระยะห่างของวาล์วไอดีกับกระเบื้องกดวาล์วเป็น 0.27
mm ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ IV4 Fault

- การทำงาน จำลองความผิดปกติที่วาล์วไอเสีย (EV)
สูบที่ 4 โดยระยะห่างปกติเท่ากับ 0.23 – 0.27 mm ให้
ระยะห่างของวาล์วไอเสียกับกระเบื้องกดวาล์วเท่ากับ
0.38 mm แทนด้วยสัญลักษณ์ EV4 Fault



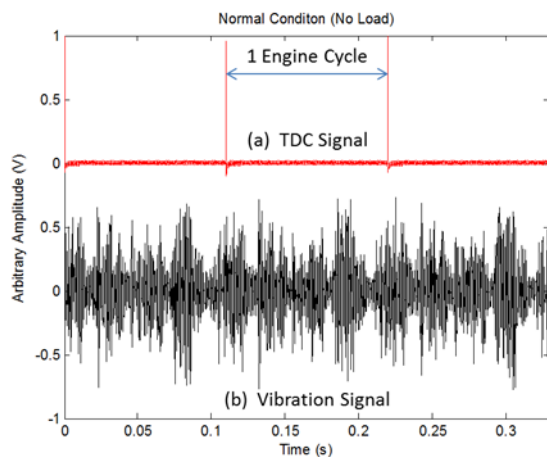
รูปที่ 3 ตำแหน่งการเปิดปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย

ตำแหน่งการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียของ
เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3 สัญลักษณ์
แทนวาล์วไอเสียเปิดและปิด และวาล์วไอดีเปิดและปิด
แทนด้วย EVO, EVC, IVO และ IVC ตามลำดับ ตำแหน่ง
การทำงานของวาล์วจะวัดเทียบกับมุมเพลาลูกเบี้ยวของ

TDC กระบอกลูกที่ 1 ที่จังหวัดจระเข้ สัญญาณที่
บันทึกได้ทั้งหมดจะเทียบกับมูเพลาข้อเหวี่ยงนี้

3. ผลการทดลอง

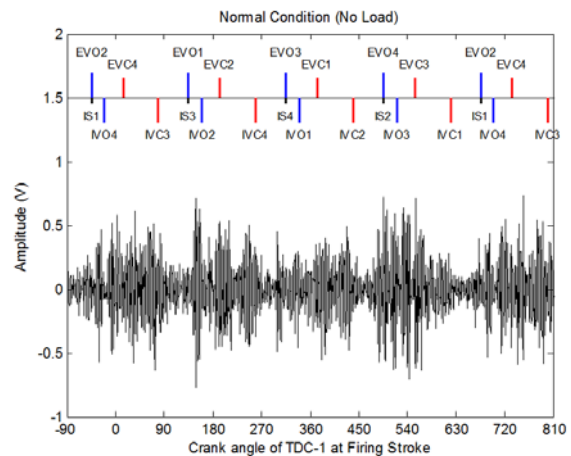
ตัวอย่างสัญญาณการสันสะเทือนและสัญญาณ TDC แสดงดังรูปที่ 5 สัญญาณ TDC จะให้ 1 พัลส์ต่อ 1 รอบ การทำงานของเครื่องยนต์ สัญญาณดังรูปที่ 5(a) เป็น สัญญาณที่เครื่องยนต์ทำงานครบ 3 รอบ สัญญาณ สันสะเทือนแสดงดังรูปที่ 5(b) เป็นสัญญาณที่เกิดจาก กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์เช่น การเปิด ปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย การเคลื่อนที่ของลูกสูบ การ เผาไหม้ เป็นต้น สัญญาณการสันสะเทือนที่บันทึกได้จะ ระบุตำแหน่งของกระบวนการต่าง ๆ ได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาเป็นสัญญาณบน โดเมนมุมเพลาคือจะช่วยให้ระบุกระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ได้ง่ายกว่า ตัวอย่าง สัญญาณบนโดเมนมุมเพลาคือจะแสดง ตำแหน่งการ ทำงานของวาล์วไอดีและไอเสีย และตำแหน่งเริ่มทำงาน ของหัวเทียน (แทนด้วยสัญลักษณ์ IS) แสดงดังรูปที่ 6 สัญญาณดังรูปที่ 6 จะสามารถระบุตำแหน่งการทำงาน ตามกระบวนการในวัฏจักรของเครื่องยนต์ได้ง่ายกว่า



รูปที่ 5 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณ TDC ที่บันทึกจากเครื่องยนต์

ตัวอย่างสัญญาณการสั้นสะเทือนบนโดเมนมุมเพลลา
 ข้อเหวี่ยงที่บันทึกจากหัววัดที่ติดตั้งบนฝาสูบที่เงื่อนไขการ
 จำลองต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 7 ค่าแอมพลิจูดของแต่ละ
 สัญญาณจะถูกคำนวณหาค่าสัมบูรณ์เพื่อความสะดวกต่อ
 การแสดงผล กระบวนการที่สามารถระบุได้ในรูปที่ 7 จะ
 เป็นการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียของกระบอกสูบที่

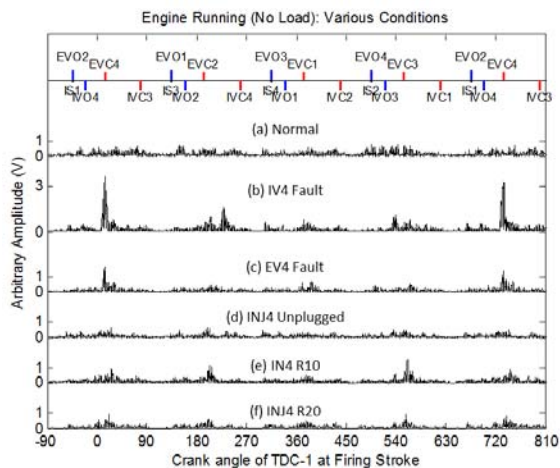
4 เช่น เนื่องจากหัววัดการสั่นสะเทือนได้ติดตั้งใกล้กับ
กระบอกสูบที่ 4 สัญญาณ EVO4, EVC4, IVO4 และ
IVC4 จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ 496° , 14° , 700° ,
และ 260° เทียบกับ TDC-1 ของจังหวะจุดระเบิด
ตามลำดับ เงื่อนไขการผิดปกติที่วาล์วไอดีดังรูปที่ 7(b)
จะมีสัญญาณที่ตำแหน่งประมาณ EVC4 ชัดเจนมาก ซึ่ง
อาจเกิดมาจากการเสริมกันของแอมพลิจูดของ IVO4 ที่
เลื่อนตำแหน่งการเปิดมาใกล้กับตำแหน่ง EVC4 ที่
ประมาณ 14° ส่วนสัญญาณ IVC4 ก็มีการทำงานที่เร็วขึ้น
ความผิดปกติโดยการจำลองระยะห่างของวาล์วให้เพิ่มขึ้น
จากปกติที่ 0.17 mm เป็น 0.27 mm จะทำให้วาล์วไอดี
เปิดช้าแต่ปิดเร็วขึ้น ซึ่งสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึก
ได้ก็เป็นไปตามกระบวนการที่เกิดขึ้น ความผิดปกติของ
ระยะห่างของวาล์วไอเสียแสดงดังรูปที่ 7(c) สัญญาณ
EVC4 จะมีแอมพลิจูดสูงกว่าสัญญาณที่กระบวนการอื่น ๆ
ส่วนสัญญาณการผิดปกติของการทำงานหัวฉีดดังรูปที่
7(d)-7(f) พบว่ามีสัญญาณของวาล์วไอดีไอเสียของ
กระบอกสูบ 3 และ 4 ปรากฏในสัญญาณ



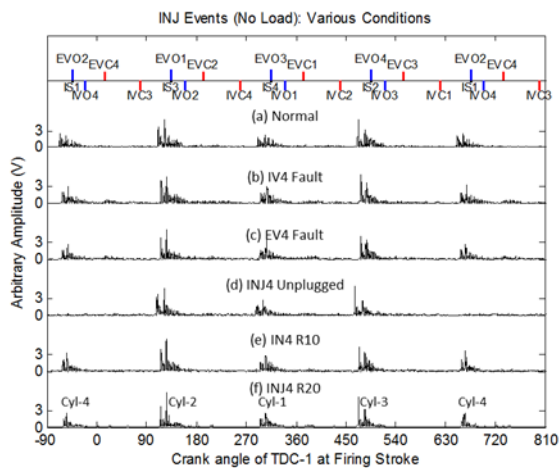
รูปที่ 6 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนบนบดเมนมุม
เพลาช่อเหวี่ยง

สัญญาการทำงานของหัวฉีดที่บันทึกจากหัววัดการ
 สั่นสะเทือนที่ติดตั้งบริเวณรางหัวฉีดระหว่างหัวฉีดที่ 1
 และ 2 แสดงดังรูปที่ 8 สัญญาณ INJ1, INJ2 และ INJ3 ที่
 แต่ละเงื่อนไขการจำลองจะคล้ายคลึงกัน สัญญาณ INJ4
 ที่ทำการจำลองพบว่า ถ้าหัวฉีดที่ 4 ไม่ทำงานสัญญาณ
 INJ4 จะไม่ปรากฏในสัญญาณ แต่ถ้าเพิ่มความต้านทาน
 ให้กับคอยล์หัวฉีดที่ 4 สัญญาณจะมีแอมพลิจูดที่ลดลง
 สัญญาณ INJ4 ที่เงื่อนไขปกติ และความต้านทานของ
 คอยล์เพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม แสดงดังรูปที่ 9

ตำแหน่งการเริ่มทำงานของหัวฉีดเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขการจำลอง ซึ่งที่สภาวะปกติหัวฉีดจะเริ่มต้นทำงานที่ตำแหน่งประมาณ 650° แต่เมื่อคอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้นเป็น 22.7 และ 32.7 โอห์ม ตำแหน่งเริ่มทำงานจะเลื่อนไปที่ตำแหน่ง 658° และ 660° ตามลำดับ



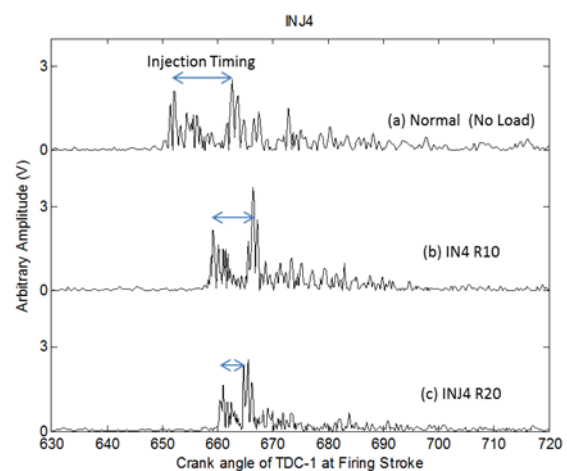
รูปที่ 7 สัญญาณการสันสะเทือน ขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ



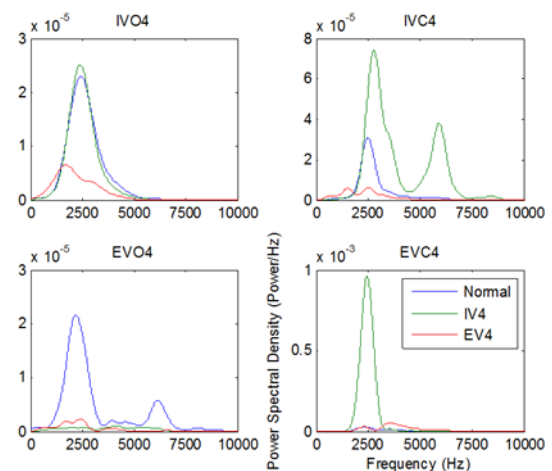
รูปที่ 8 สัญญาณการทำงานหัวฉีดขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ

การวิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือนบนโดเมนความถี่สามารถใช้ตรวจสอบสัญญาณการทำงานของหัวฉีดเช่น สัญญาณ IVO4, IVC4, EVO4 และ EVC4 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์หาค่า Power spectral density (PSD) ของแต่ละสัญญาณโดยการทำวินโดว์สัญญาณในรูปที่ 7 เฉพาะสัญญาณการทำงานของวาล์วที่ต้องการจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เท่านั้น ค่า PSD ที่ได้จากการ

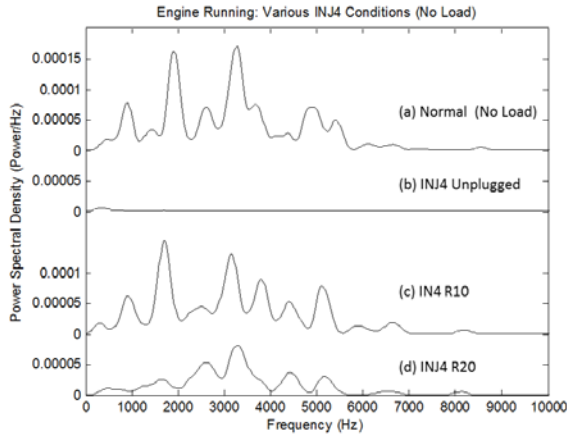
วิเคราะห์สัญญาณ IVO4, IVC4, EVO4 และ EVC4 แสดงที่สภาวะปกติ วาล์วไอดีและไอดีเสียผิดปกติแสดงดังรูปที่ 10 ความถี่ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวาล์วมีความถี่เกิดขึ้น 2 ช่วงคือ ประมาณ 1000-5000 Hz และ 5000-7500 Hz ค่า PSD ของสัญญาณ IVO4 จะปรากฏเฉพาะความถี่ช่วงแรกเท่านั้น ส่วนค่า PSD ของสัญญาณ IVC4, EVO4 และ EVC4 จะมีความถี่เกิดขึ้นทั้งสองช่วงและจะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงเมื่อเกิดการผิดปกติที่วาล์ว แต่ผลการวิเคราะห์ห้ยังสรุปได้ไม่ชัดเจนนักยังจำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความถูกต้อง



รูปที่ 9 สัญญาณสันสะเทือนของหัวฉีดที่ 4 ที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ขณะเครื่องยนต์ทำงานโดยไม่มีภาระ



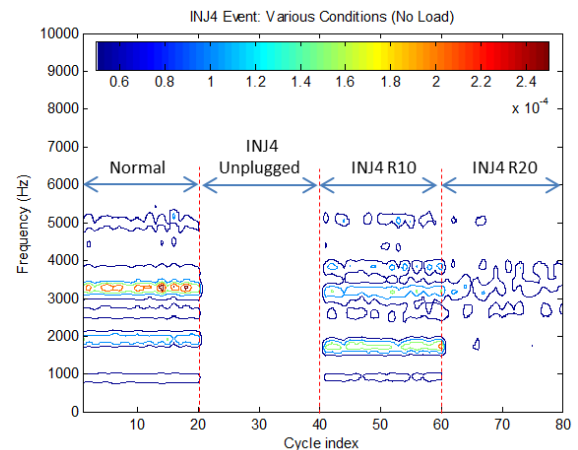
รูปที่ 10 PSD ของสัญญาณการทำงานของวาล์วไอดีและไอดีเสียขณะเครื่องยนต์ทำงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ



รูปที่ 11 PSD ของสัญญาณ INJ4 ที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ขณะเครื่องทำงานแบบไม่มีภาระ

การวิเคราะห์ค่า PSD ของสัญญาณ INJ 4 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระแสดงดังรูปที่ 11 ความถี่ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของหัวฉีดแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ 800-2000 Hz, 2000-4000 Hz และ 4000-6000 Hz ค่า PSD จะมีค่าลดลงเมื่อความต้านทานที่คอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น และถ้าค่าความต้านทานที่คอยล์เพิ่มเป็น 32.7 โอห์ม จะทำให้ความถี่ช่วงแรกและช่วงสุดท้ายจะมีค่าแอมพลิจูดน้อยลง กราฟคอนทัวร์ที่แสดงการเปรียบเทียบค่า PSD ของสัญญาณ INJ 4 จำนวน 20 ค่าของแต่ละเงื่อนไขการจำลองแสดงดังรูปที่ 12 ระดับสีที่ปรากฏในกราฟคือค่า PSD ของสัญญาณ กราฟคอนทัวร์จะแบ่งออกเป็น 4 ช่วงที่เป็นผลการวิเคราะห์ค่า PSD ของแต่ละเงื่อนไขการจำลองของหัวฉีดดังนี้ 1-20, 21-40, 41-60 และ 61-80 จะแทนผลการวิเคราะห์ที่หัวฉีดปกติ หัวฉีดไม่ทำงาน ความต้านทานที่คอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม ตามลำดับ การใช้กราฟคอนทัวร์จะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติที่หัวฉีด เมื่อหัวฉีดปกติทำงานจะมีความถี่เกิดขึ้นทั้งสามช่วง แต่ถ้าหัวฉีดไม่ทำงานความถี่ทุกช่วงจะไม่ปรากฏ เมื่อความต้านทานของคอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้นพบว่าความถี่ทั้งสามช่วงจะมีแอมพลิจูดลดลง และเมื่อคอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้น 20 โอห์มความถี่จะปรากฏในช่วงที่ 2 และ 3 เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ปรากฏในรูปที่ 12 คาดว่าความถี่ช่วง 800-2000 Hz น่าจะเกี่ยวกับการเปิดปิดของวาล์ว เมื่อคอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้นหัวฉีดจะเปิดน้อยลงจึงทำให้สัญญาณส่วนนี้มีแอมพลิจูดน้อยลงตามสัญญาณดังรูปที่ 9 ส่วนการลดลงของความถี่ช่วงที่ 2 และ 3 น่าจะเกี่ยวข้อง

กับกระบวนการฉีดน้ำมันของหัวฉีดซึ่งค่า PSD มีค่าน้อยลง และเมื่อค่าความต้านทานของคอยล์หัวฉีดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้วาล์วที่หัวฉีดเปิดน้อยลง เปิดช้าขึ้น และปิดที่ตำแหน่งเดิม กระบวนการฉีดน้ำมันที่เกิดขึ้นจะน้อยลงทำให้สัญญาณมีแอมพลิจูดน้อยลงจึงทำให้ค่า PSD แต่ละช่วงความถี่น้อยลงด้วย



รูปที่ 12 กราฟคอนทัวร์ PSD ของสัญญาณ INJ4 ที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ

5. สรุปผลการทดลอง

หัววัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งที่ฝาสูบและรางหัวฉีดบนเครื่องยนต์แก๊สโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะ 1600 CC สามารถใช้ตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ สัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาเมื่อนำมาแปลงเป็นสัญญาณบนโดเมนมุมเพลอาซอเหวี่ยงจะทำให้สามารถระบุกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ได้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะกระบวนการทำงานของวาล์วไอดีและไอดีเสีย การทำงานของหัวฉีด เป็นต้น การวิเคราะห์สัญญาณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สามารถใช้วิเคราะห์กระบวนการการทำงานของหัวฉีดและวาล์วไอดีและไอดีเสียได้ ซึ่งจะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความถี่เมื่อหัวฉีดหรือวาล์วมีความผิดปกติเกิดขึ้น การศึกษาต่อไปยังจำเป็นต้องพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแหล่งที่มาของสัญญาณ วิธีการวิเคราะห์สัญญาณที่ใช้ และการทดลองที่เงื่อนไขอื่น ๆ ที่เครื่องยนต์ทำงานแบบมีภาระ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่นที่อนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ สถานที่ ในการทำวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Klinchaeam, S. and Nivesrangsan, P. (2010), Condition monitoring of valve clearance fault on a small four strokes petrol engine using vibration signals, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, Vol. 32(6), Nov.-Dec. 2010, pp. 619-625.
- [2] Gill, J. D., Reuben, R. L., and Steel, J. A. (2000), "A study of small HSDI diesel engine fuel injection equipment faults using acoustic emission," *Proceedings of the 24th European Conference on Acoustic Emission Testing*, EWGAE, France, pp.281-286.
- [3] Gu, F., Li, W., Ball, A. D., and Leung, A. Y. T. (2000), "The condition monitoring of diesel engines using acoustic measurements, Part 1: Acoustic characteristics of the engine and representation of the acoustic signals," *SAE 2000 World Congress, Session: Noise & Vibration*, Detroit, USA (SP-1514), pp. 51-57.
- [4] Ball, A. D., Gu, F., and Li, W. (2000), "The condition monitoring of diesel engines using acoustic measurements, Part 2: Fault detection and diagnosis," *SAE 2000 World Congress, Session: Noise & Vibration*, Detroit, USA (SP-1514), pp. 57-64.
- [5] Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B, Tavakoli-Hashjin, T. Mohtasebi, S.S. (2012), Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and petro diesel fuel blends, *Fuel*, Vol. 102, pp. 414-422
- [6] วชิรวิทย์ สงสุวรรณ และ พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ (2555) การตรวจสอบพัดลมอัดอากาศด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณอนุสติกลิมิชั่น *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 จังหวัดเชียงราย* หน้า 1-6

- [7] Heng R.B.W. and Nor M.J.M. (1998). Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition, *Applied Acoustics*, Vol.53, No.1-3, pp.211-226.