

การตรวจสอบสถานะเครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4 จังหวะด้วยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางสถิติ ของสัญญาณการสั่นสะเทือน

Condition Monitoring of a 4-Stroke, 4-Cylinder, Petrol Engine Using Statistical Parameter Analysis of Vibration Signals

วิศิษฐ์ สองเมือง*, และ พรชัย นิเวศน์รังสรรค์

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

*ติดต่อ: wisit@tni.ac.th, Tel: 02-763-2600 ต่อ 2905, 2910 Fax: 02-7632600 ต่อ 2900

บทคัดย่อ

การศึกษานี้จะศึกษาการตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4 จังหวะ ขนาดความจุ 1600 CC ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน เครื่องยนต์ถูกจำลองสถานะการทำงานของเครื่องยนต์เมื่อไม่มีภาระ ที่สภาวะปกติ สภาวะความผิดปกติของระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสีย และสภาวะการทำงานที่ผิดปกติของหัวฉีดเช่น หัวฉีดไม่ทำงาน ค่าความต้านทานของคอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม โดยเซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือน 2 ตัวจะติดตั้งที่ฝาสูบและรางหัวฉีด การบันทึกสัญญาณขณะเครื่องยนต์จะทำงานที่รอบประมาณ 800 - 1000 รอบต่อนาที ผลการทดลองพบว่า สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถนำมาตรวจสอบกระบวนการ การทำงานต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ได้ การแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาเป็นสัญญาณบนโดเมนมุมเพลลาข้อเหวี่ยงจะทำให้สามารถอธิบายกระบวนการต่าง ๆ ตามวัฏจักรการทำงาน ของเครื่องยนต์ได้ง่ายขึ้น สัญญาณการสั่นสะเทือนยังสามารถใช้อธิบายรายละเอียดการทำงานของหัวฉีดที่ปกติและผิดปกติซึ่งทำให้ทราบตำแหน่งและช่วงเวลาการทำงานของแต่ละหัวฉีด การวิเคราะห์สัญญาณด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ สามารถใช้วิเคราะห์ค่าต่าง ๆ เช่น ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความเบ้ และค่าความโด่ง ค่าพารามิเตอร์แต่ละค่าไม่สามารถแยกสถานะของหัวฉีดได้ครบทั้งหมดยกเว้นค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์เท่านั้น การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่าเช่น ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์เทียบกับค่าความโด่ง ทำให้สามารถแยกสภาวะการทำงานของหัวฉีดได้ชัดเจนกว่าการใช้พารามิเตอร์ทางสถิติเพียงค่าเดียว การศึกษาต่อไปยังจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการวิเคราะห์สัญญาณ และการจำลองสถานะของเครื่องยนต์เพิ่มเติมเพื่อให้วิธีการตรวจสอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

คำหลัก: การตรวจสอบสถานะการทำงาน, สัญญาณการสั่นสะเทือน, เครื่องยนต์เบนซิน, การวิเคราะห์สัญญาณ, การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางสถิติ

Abstract

This study is to monitor conditions of a 4-stroke, 4-cylinder, petrol engine with capacity of 1600 cc using vibration signals. Various engine conditions with no load were simulated such as normal, clearance intake and exhaust valve faults, unplugged injector and injector coil faults by adding resistors of 10 and 20 ohms. Two accelerometers were attached on cylinder head and injector rail. Vibration signals were records with the TDC signal from engine running at speed of approximately 800 - 1000 rpm. The result shows that vibration signals could be used to monitor various processes in the engine cycle. It is also found that the crank angle domain signal could be used to easily identify various processes in the engine cycle. Again, vibration signals could be used to reveal processes in normal and faulty injector conditions such as starting position and injection duration of each injector. The statistical parameter analysis technique was applied to determine absolute mean, standard deviation, skewness and kurtosis from injector signals. The use of each parameter could not be identified all injector conditions except absolute mean value. The comparison of two parameters such

as absolute mean and kurtosis was able to identify all injector conditions which was clearer than the use of single parameter. The further study is necessary to develop signal analysis techniques and to simulate other engine conditions with load in order to improve accuracy of condition monitoring of engine using vibration signals.

Keywords: Condition monitoring, Vibration signal, Petro engine, Signal analysis, Statistical parameter analysis

1. บทนำ

การตรวจสอบสถานะของเครื่องจักรกลและชิ้นส่วนหมุนด้วยการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนได้มีการใช้งานในเครื่องจักรกลหลายประเภทเช่น เทอร์โบดีเซล เครื่องยนต์ คอมเพรสเซอร์ แบริง เพ็อง เป็นต้น สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถนำมาใช้วิเคราะห์กระบวนการหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องจักรกลได้ เมื่อเครื่องยนต์ผ่านการใช้งานที่นานจะก่อให้เกิดความสึกหรอ ความผิดปกติ ความเสียหาย เชื้อเพลิงบางชนิดทำให้เครื่องยนต์เกิดความผิดปกติได้เร็วขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์เพื่อช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้ การตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์ที่จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความผิดปกติของเครื่องยนต์ได้ สามารถทำได้หลายวิธี งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องยนต์ด้วยวิธีสัญญาณต่าง ๆ เช่น การสั่นสะเทือนเสียง อัลตราโซนิคส์ สเตนเกจ เป็นต้น

งานวิจัยที่ผ่านมาในการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซินมีการประยุกต์ใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจสอบสภาพความผิดปกติต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ เช่น ความผิดปกติของระยะห่างในไอดีและวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์เบนซินสี่จังหวะขนาดเล็ก [1] สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากเครื่องยนต์ดีเซลถูกวิเคราะห์และใช้ประเมินสภาพของเครื่องยนต์ การตรวจสอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นวิธีการหนึ่งที่เป็นไปได้และมีประสิทธิภาพในประเมินสภาพของดีเซลเครื่องยนต์ที่ทำงานผิดปกติ [2]

การประยุกต์ใช้ไมโครโฟนเพื่อบันทึกสัญญาณเสียงเพื่อใช้วิเคราะห์หาตำแหน่งของแหล่งที่มาของเสียงและการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบแบบแถวเรียง ผลการศึกษาพบว่าระบบโซ่ไทมิ่งทำให้เกิดเสียงดังและการสั่นสะเทือนที่รุนแรง [3] สัญญาณอคูสติกอิมิชัน (Acoustic Emission) ได้มีการประยุกต์ใช้ตรวจสอบสภาพเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กโดย Wu และคณะ [4]

การประมวลผลสัญญาณโดยปรับและแยกที่มาของสัญญาณอคูสติกอิมิชันแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งสามารถแยกสัญญาณรบกวนของกระบอกสูบที่อยู่ติดกับกระบอกสูบที่ทำการตรวจสอบ วิธีการนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยสัญญาณอคูสติกอิมิชัน สำหรับการตรวจสอบสภาพของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณจากกระบอกสูบที่ทำงานปกติซึ่งอยู่ติดกัน

การประยุกต์การตรวจสอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์อากาศยานได้มีการศึกษาโดย Zhang และคณะ [5] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์อากาศยาน และการวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกี่ยวข้องกับโรเตอร์ ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาและสามารถแยกคุณลักษณะของความผิดปกติได้อย่างมีประสิทธิภาพ การตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องยนต์เป็นเรื่องที่ยาก เนื่องจากขณะที่เครื่องยนต์ทำงานจะมีสัญญาณจำนวนมากที่เกิดขึ้นพร้อมกัน การวิเคราะห์สัญญาณก็มีความยุ่งยากเพราะต้องแยกให้ได้ว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นแต่ละช่วงเวลาเป็นสัญญาณของอุปกรณ์ใด และต้องเลือกใช้เทคนิคในการวิเคราะห์สัญญาณที่เหมาะสม

การศึกษานี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาการตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4 จังหวะ ขนาดความจุ 1600 CC ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จากเครื่องยนต์ขณะทำงานแบบไม่มีภาระที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ เช่น ความผิดปกติของระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสีย ความผิดปกติของหัวฉีดเช่น หัวฉีดไม่ทำงาน ความต้านทานที่คอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา ถูกแปลงเป็นสัญญาณบนโดเมนมุมเพลกซ์เพื่อใช้วิเคราะห์กระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์

และการวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติจะประยุกต์ใช้ในการศึกษานี้ด้วย

2. การประมวลผลสัญญาณ

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากเครื่องยนต์จะเป็นสัญญาณบนโดเมนเวลาที่สามารถใช้วิเคราะห์กระบวนการทำงานของเครื่องยนต์ต่าง ๆ ได้ [1-6] เช่น การเปิดปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย การทำงานของหัวฉีด เป็นต้น แต่ทั้งนี้ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีประสบการณ์และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์เป็นอย่างดี การวิเคราะห์สัญญาณการทำงานของเครื่องยนต์นิยมใช้การวิเคราะห์บนมุมเพลลาซอเหวียง ซึ่งจะทำให้การระบุกระบวนการที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ได้ง่าย การทำงานของเครื่องยนต์นิยามกำหนดมุม 0° ที่ ศูนย์ตายบน (TDC) ของกระบอกสูบที่ 1 ที่จังหวะจุดระเบิด ซึ่งเมื่อเครื่องยนต์ทำงานครบ 1 วัฏจักรองศาเพลลาซอเหวียงเท่ากับ 720° กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะวัดเทียบกับค่ามุมดังกล่าวนี้ สัญญาณการสั่นสะเทือนยังสามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นฐานทั่วไป เช่น การวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ของสัญญาณเช่น ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่ารากกำลังสอง (RMS) เป็นต้น การวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, STD) ค่าความเบ้ (Skewness, Skew) ความความโด่ง (Kurtosis, Kurt) เป็นต้น การศึกษานี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ ซึ่งสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์จะทำการหาค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณก่อน แล้วจึงวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติต่างๆ ถ้า n = จำนวนข้อมูลที่วิเคราะห์ สมการที่ใช้สรุปได้ดังนี้

$$\text{Absolute value, } X_i = |x_i| \quad (1)$$

$$\text{Absolute Mean, } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2)$$

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (3)$$

$$\text{Skew} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\text{STD}} \right)^3 \quad (4)$$

$$\text{Kurt} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\text{STD}} \right)^4 \quad (5)$$

การศึกษานี้จะใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากหัวฉีดเพื่อใช้ในการทำนายสถานะของหัวฉีดที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ

3. การทดลอง

การศึกษานี้จะใช้เครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4 จังหวะ ยี่ห้อซูซูกิ ขนาดความจุ 1600 CC เงื่อนไขการจำลองสถานะการทำงานของเครื่องยนต์ประกอบด้วย สถานะปกติ ความผิดปกติที่ระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสีย และสถานะการทำงานที่ผิดปกติของหัวฉีดเช่น หัวฉีดไม่ทำงาน ความต้านทานของคอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม ในตำแหน่งการติดตั้งในรูปที่ 1 เครื่องยนต์ที่จำลองทำงานภายใต้สถานะไม่มีภาระและมีรอบการทำงานช่วงประมาณ 800-1000 รอบต่อนาที สถานะการทำงานของเครื่องยนต์มีเงื่อนไขดังนี้

- การจำลองความผิดปกติที่วาล์วไอดี (IV) สูบที่ 4 ให้ระยะห่างของวาล์วไอดีกับกระด็องกดวาล์ว = 0.27 mm โดยระยะห่างปกติคือ 0.13 - 0.17 mm แทนด้วยสัญลักษณ์ IV4 Fault

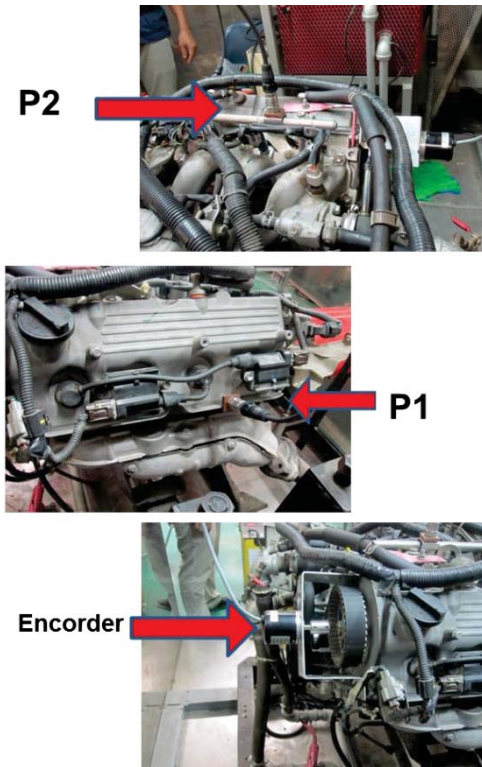
- การจำลองความผิดปกติที่วาล์วไอเสีย (EV) สูบที่ 4 ให้ระยะห่างของวาล์วไอดีกับกระด็องกดวาล์ว = 0.38 mm โดยระยะห่างปกติคือ 0.23 - 0.27 mm แทนด้วยสัญลักษณ์ EV4 Fault

- จำลองความผิดปกติที่หัวฉีดสูบที่ 4 ด้วยหัวฉีดไม่ทำงาน การเพิ่มความต้านทาน 10 และ 20 โอห์มเป็น 22.7 โอห์มและ 32.7 โอห์ม โดยค่าความต้านทานเดิมคือ 12.7 โอห์ม แทนด้วยสัญลักษณ์ INJ4 Unplugged, INJ4 R10, และ INJ4 R20

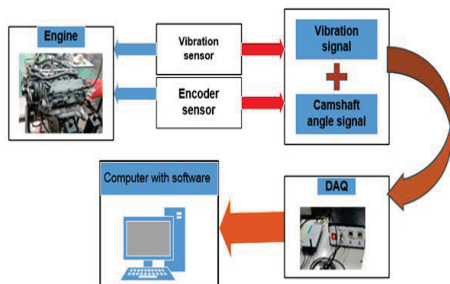


รูปที่ 1 ตำแหน่งการติดตั้งตัวต้านทานขนาด 10 และ 20 โอห์มเพื่อการจำลองความผิดปกติที่หัวฉีดสูบที่ 4

สัญญาณการสั่นสะเทือน 2 สัญญาณถูกวัดจากเซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งที่ฝาสูบระหว่างกระบอกสูบ 3 และ 4 และหัววัดที่ติดตั้งบนรางหัวฉีดที่ใกล้กับหัวฉีด 1 ส่วนสัญญาณตำแหน่งศูนย์ตายบน (TDC) จะตรวจวัดมาจาก Encoder ที่ติดตั้งอยู่ที่เพลลาของลูกเบี้ยวซึ่งจะให้สัญญาณ 1 พัลส์ต่อวัฏจักรเครื่องยนต์ 1 รอบ ตำแหน่งติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนและ Encoder แสดงดังรูปที่ 2 โดยสัญญาณทั้งหมดจะต่อเข้ากับอุปกรณ์ขยายสัญญาณ อุปกรณ์เก็บข้อมูลและคอมพิวเตอร์พร้อมซอฟต์แวร์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 สัญญาณทั้งหมดจะถูกบันทึกที่ความถี่ 25600 Hz และจัดเก็บเป็นไฟล์เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป



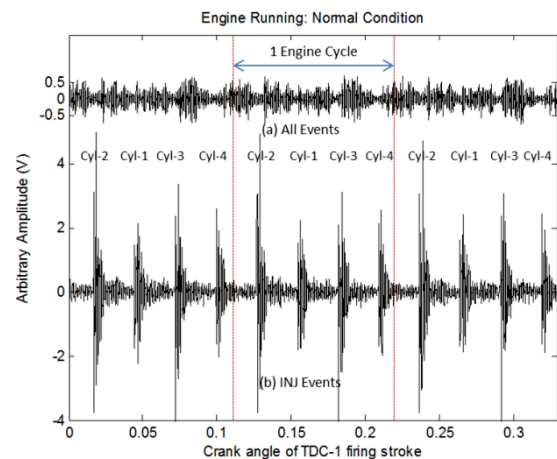
รูปที่ 2 ตำแหน่งหัววัดการสั่นสะเทือนและ Encoder



รูปที่ 3 ระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูล

4. ผลการทดลอง

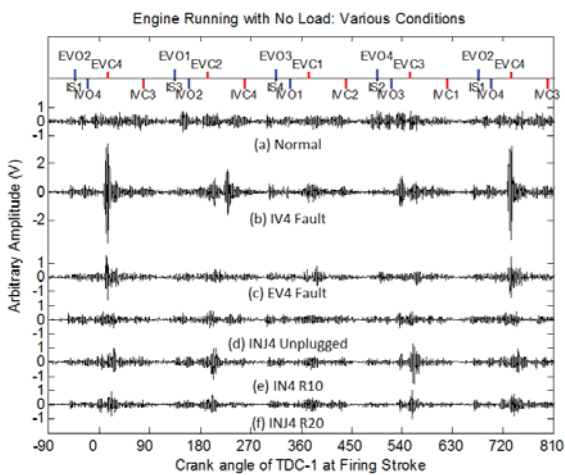
ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จากเครื่องยนต์จำลองขณะทำงานที่ความเร็วรอบประมาณ 1000 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4 สัญญาณเป็นสัญญาณที่มีแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดและแกนนอนเป็นเวลา ที่บันทึกจากเครื่องยนต์ที่ทำงานครบ 3 วัฏจักร สัญญาณในรูปที่ 4(a) บันทึกจากหัววัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งบนฝาสูบที่อยู่ระหว่างกระบอกสูบ 3 และ 4 สัญญาณที่บันทึกได้แสดงถึง กระบวนการทำงานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ เช่น การเปิดปิดของวาล์วไอดีไอเสีย การไหลเข้าออกของอากาศ การเผาไหม้ และกระบวนการต่าง ๆ ของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ในเครื่องยนต์ ส่วนสัญญาณในรูปที่ 4(b) เป็นสัญญาณการทำงานของหัวฉีดที่บันทึกจากหัววัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งอยู่บนรางหัวฉีดใกล้กับหัวฉีดของกระบอกสูบที่ 1 ลำดับการทำงานของหัวฉีดตามสัญญาณที่บันทึกได้คือ หัวฉีดที่ 2-1-3-4 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนที่สภาวะปกติ

การวิเคราะห์กระบวนการของเครื่องยนต์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาจะกระทำลำบาก เนื่องจากการทำงานของเครื่องยนต์จะสอดคล้องกับตำแหน่งของมุมเพลลาข้อเหวี่ยง ดังนั้นสัญญาณที่บันทึกได้ จะทำการแปลงให้อยู่บนมุมเพลลาข้อเหวี่ยง ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของกระบวนการทำงานต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ขณะทำงานโดยไม่มีภาระที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ เทียบกับมุมเพลลาข้อเหวี่ยงแสดงดังรูปที่ 5 สัญญาณที่บันทึกได้มีแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดและแกนนอนเป็นมุมเพลลาข้อเหวี่ยงที่มุม 0° คือตำแหน่งจุดศูนย์ตายบนของกระบอกสูบที่ 1 (TDC Cyl-1) ที่จังหวะจุดระเบิด

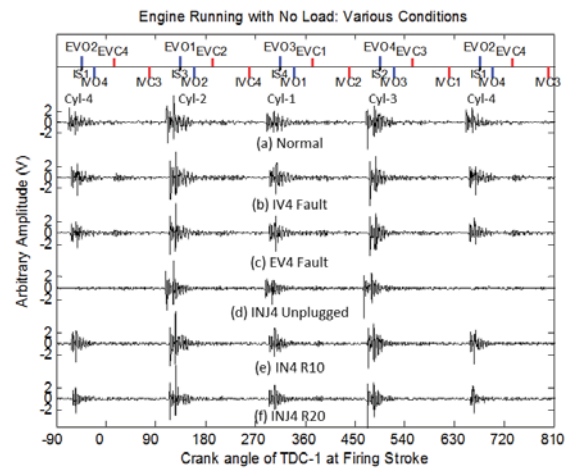
สัญญาณที่แสดงเป็นสัญญาณที่บันทึกได้จากการทำงานของเครื่องยนต์ครบ 1 วัฏจักร หรือ 720° ซึ่งประกอบด้วยเงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ เช่น เครื่องยนต์ทำงานปกติ ระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสียของกระบอกสูบที่ 4 ผิดปกติ หัวฉีดของกระบอกสูบที่ 4 ไม่ทำงาน และหัวฉีดทำงานผิดปกติ สัญญาณที่เงื่อนไขต่าง ๆ จะบันทึกจากเครื่องยนต์ขณะทำงานที่ความเร็วรอบประมาณ 800-1000 รอบต่อนาที กระบวนการการทำงานของเครื่องยนต์แสดงที่ด้านบนของรูปที่ 5 โดยการเปิดและปิดของวาล์วไอดีแทนด้วยสัญลักษณ์ IVO และ IVC สัญลักษณ์การเปิดและปิดของวาล์วไอเสียแทนด้วย EVO และ EVC สัญลักษณ์ IS แทนด้วยตำแหน่งการจุดระเบิดของหัวเทียน ส่วนตัวเลขท้ายสัญลักษณ์แทนด้วยกระบอกสูบ



รูปที่ 5 สัญญาณการสันสะเทือนที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ขณะเครื่องยนต์ทำงานโดยไม่มีภาระ

สัญญาณการทำงานที่สภาวะปกติดังรูปที่ 5(a) จะประกอบไปด้วยกระบวนการทำงานต่าง ๆ ที่แต่ละกระบอกสูบของเครื่องยนต์เช่น การเปิดปิดของวาล์วไอดีไอเสีย การเผาไหม้ การเคลื่อนที่ขึ้นลงของลูกสูบ เป็นต้น กระบวนการเหล่านี้หากมีพลังงานเพียงพอก็สามารถตรวจวัดได้ด้วยหัววัดการสันสะเทือน สัญญาณที่เงื่อนไขระยะห่างของวาล์วไอดีผิดปกติดังรูป 5(b) จะพบสัญญาณที่แอมพลิจูดสูงอยู่ที่ประมาณตำแหน่ง EVC4 แค้นขีดที่สุด เนื่องจากหัววัดการสันสะเทือนติดตั้งอยู่ระหว่างกระบอกสูบ 3 และ 4 ดังนั้นสัญญาณที่บันทึกได้จึงสามารถบันทึกกระบวนการการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียที่เกิดขึ้นในกระบอกสูบที่ 4 ได้ชัดเจน วาล์วไอดี

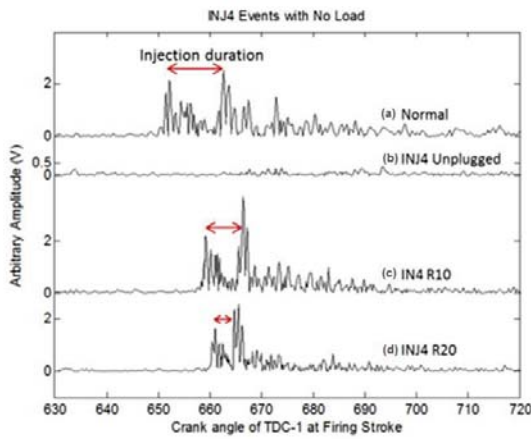
ดีมีการปรับระยะห่างของวาล์วจากสภาวะปกติที่ 0.17 mm เป็นสภาวะผิดปกติที่ 0.27 mm ดังนั้นการทำงานของวาล์วไอดีที่สภาวะผิดปกตินี้จะเปิดช้าและปิดเร็วขึ้นซึ่งอาจทำให้สัญญาณ IVO4 เลื่อนไปยังตำแหน่งของ EVC4 พอติ จึงทำให้สัญญาณที่ได้เป็นการรวมกันของสัญญาณ IVO4 และ EVC4 ในขณะที่เดียวกันสัญญาณ IVC4 จะปิดเร็วขึ้น เมื่อเทียบกับสัญญาณที่เครื่องยนต์ปกติ สัญญาณการทำงานของวาล์วไอเสียผิดปกติที่เกิดจากการตั้งระยะห่างของวาล์วไอเสียจากสภาวะปกติที่ 0.28 mm เป็นสภาวะผิดปกติที่ 0.38 mm แสดงดังรูปที่ 5(c) พบว่าจะเห็นสัญญาณ EVC4 ชัดเจนกว่ากระบวนการอื่น ส่วนสัญญาณการทำงานผิดปกติของหัวฉีดจะไม่สามารถเห็นความผิดปกติในรูปที่ 5(d)-5(f) จะเห็นเฉพาะการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียของกระบอกสูบที่ 3 และ 4 เท่านั้น



รูปที่ 6 สัญญาณการสันสะเทือนของหัวฉีดที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระ

สัญญาณการสันสะเทือนของการทำงานหัวฉีดที่เงื่อนไขต่าง ๆ เทียบกับมุมเพลาช้อเหวี่ยงแสดงดังรูปที่ 6 การทำงานของหัวฉีดที่กระบอกสูบ 2-1-3-4 จะเริ่มทำงานที่ประมาณ 110° , 290° , 470° และ 650° เทียบกับมุมเพลาช้อเหวี่ยงของกระบอกสูบที่ 1 สัญญาณการทำงานของหัวฉีดที่ปกติของแต่ละกระบอกสูบจะมีลักษณะคล้ายกัน แต่ถ้าหัวฉีดทำงานผิดปกติเช่น หัวฉีดไม่ทำงานดังรูปที่ 6(d) จะไม่มีสัญญาณหัวฉีดเกิดขึ้น ถ้าหัวฉีดผิดปกติมีความต้านทานเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์มจากสภาพปกติจะทำให้สัญญาณผิดปกติดังรูปที่ 6(e) และ 6(f) ตามลำดับ แต่จะเห็นรายละเอียดไม่ชัดเจนนัก

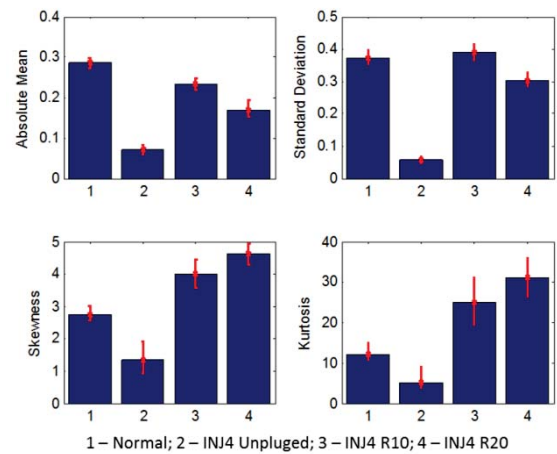
สัญญาณการทำงานเฉพาะหัวฉีดกระบอกสูบที่ 4 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 7 สัญญาณหัวฉีดที่แสดงเป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้จากการคำนวณหาค่าสมบูรณ์ของแอมพลิจูด สัญญาณหัวฉีดที่สภาวะปกติจะทำงานประมาณมุมเพลลาข้อเหวี่ยงที่ 650° - 663° ดังรูปที่ 7 (a) เมื่อหัวฉีดไม่ทำงานจะไม่พบเห็นสัญญาณของหัวฉีด ดังรูปที่ 7(b) เมื่อหัวฉีดผิดปกติหรือมีความต้านทานที่ตัวหัวฉีดเพิ่มขึ้นจากปกติ 10 และ 20 โอห์มจะทำให้ได้สัญญาณการทำงานของหัวฉีดดังรูปที่ 7(c) และ 7(d) ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อความต้านทานที่หัวฉีดเพิ่มขึ้นจะทำให้หัวฉีดทำงานช้าลงและระยะเวลาทำงานสั้นลง โดยสังเกตจากการเริ่มทำงานที่ตำแหน่งมุมเพลลาข้อเหวี่ยงประมาณ 658° - 666° และ 660° - 665°



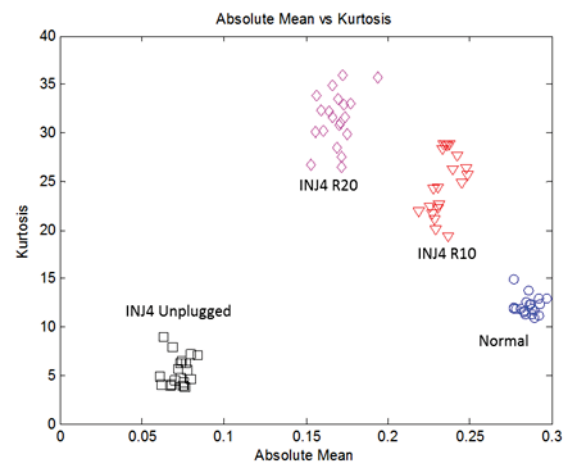
รูปที่ 7 สัญญาณการสั่นสะเทือนของหัวฉีดกระบอกสูบที่ 4 ที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ

สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถใช้ตรวจสอบการทำงานของกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ได้แต่ผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการวิเคราะห์สัญญาณและการตรวจสอบเครื่องยนต์ การตรวจสอบสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางสถิติเช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความเบ้ และค่าความโด่ง ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับใช้วิเคราะห์สัญญาณ การศึกษานี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์สถิติเพื่อใช้เปรียบเทียบสภาวะของ INJ4 สัญญาณ INJ4 ดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณที่บันทึกได้และค่าพารามิเตอร์สถิติทั้งหมดจะคำนวณจากสัญญาณจำนวน 20 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ แผนภูมิแท่งดังรูปที่ 8 จะใช้เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์แต่ละ

ค่าที่เงื่อนไขต่าง ๆ ของการทำงานของหัวฉีด และเส้นสีแดงแสดงถึงค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความโด่งและค่าความเบ้จะไม่สามารถใช้ประเมินสภาพของหัวฉีดได้ครบทุกเงื่อนไขเช่น เครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะปกติและสภาวะ INJ4 R10 พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกันจนแยกไม่ออก ส่วนค่าความเบ้และความโด่งพบว่าเครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะ INJ4 R10 และ INJ4 R20 ไม่สามารถแยกเงื่อนไข ค่าสถิติที่ใช้ทำนายได้มีเพียงค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์เพียงค่าเดียวที่สามารถใช้ประเมินสภาพของหัวฉีดได้



รูปที่ 8 แผนภูมิค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณ INJ4 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์และค่าความโด่งของสัญญาณ INJ4 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ

การวิเคราะห์ด้วยค่าทางสถิตินั้นผู้ประเมินก็ยังจำเป็นต้องกำหนดขอบเขตของค่าทางสถิติเป็นช่วง ๆ

ตามสภาพของหัวฉีด ซึ่งต้องอาศัยข้อมูลการทำงานของเครื่องยนต์ และประสบการณ์ของผู้ประเมินเพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสม การวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่าสามารถช่วยเพิ่มความสามารถ และความสะดวกในการประเมินสภาพของหัวฉีด ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่า เช่น ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์และค่าความโค้ง แสดงดังรูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้งสองสามารถใช้แบ่งเงื่อนไขของหัวฉีดได้อย่างชัดเจนออกเป็น 4 กลุ่มตามเงื่อนไขของการจำลองซึ่งทำให้ง่ายต่อการประเมินผลสภาพของหัวฉีดอย่างชัดเจน

5. สรุปผลการทดลอง

การตรวจสอบการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาสามารถตรวจวัดกระบวนการทางกลและทางของไหลในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ได้ แต่การระบุกระบวนการต่าง ๆ ต้องแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาให้เป็นสัญญาณบนมุมเพลลาข้อเหวี่ยงจะทำให้ระบุกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่า เช่น การเปิดปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย การทำงานของหัวฉีด เป็นต้น การใช้เทคนิคการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางสถิติสามารถใช้วิเคราะห์สภาวะของกระบวนการการทำงานในเครื่องยนต์ได้ ดังตัวอย่างการวิเคราะห์การทำงานของหัวฉีดที่เงื่อนไขต่าง ๆ การใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติเพียงค่าเดียวอาจประเมินสภาวะของหัวฉีดได้แต่ไม่ชัดเจน การใช้การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่าเช่น ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์และค่าความโค้งสามารถแยกกลุ่มเงื่อนไขการจำลองออกเป็นกลุ่ม ๆ อย่างชัดเจน การศึกษาต่อไปยังต้องลองประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์นี้กับกระบวนการการทำงานอื่น ๆ ในสภาวะที่เครื่องยนต์ทำงานแบบมีภาระ และเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ 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] Wang, F. and Duan, S. (2011), Fault Diagnosis of Diesel Engine Using Vibration Signals, International Conference on Internet Computing & Information Services (ICICIS), Part II, CCIS 135, pp. 285-290.

[3] Xi, J., Feng, Z., Wang, G. and Wang, F. (2015), Vibration and Noise Source Identification Methods for a Diesel Engine, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 29(1), pp. 181-189.

[4] Wu, W., Lin, T.R., and Tan, A.C.C. (2015), Normalization and Source Separation of Acoustic Emission Signals for Condition Monitoring and Fault Detection of Multi-Cylinder Diesel Engine, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 64-65, pp. 479-497.

[5] Zhang, C., Wang, K. and Zhao, P. (2014), A Feature Extraction Method for Aircraft Engine Rotor Vibration Diagnosis, The Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT), Procedia Engineering, Vol. 99, pp. 1576-1581.

[6] Chomphan S. (2013), Vibration Analysis of Gasoline Engine Faults, American Journal of Applied Sciences, Vol. 10(10), pp. 1166-1171.