

การศึกษากระบวนการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วย
เทคนิคการวิเคราะห์ความถี่

จิรพงศ์ สุขาทิพย์

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีการศึกษา 2560

THE STUDY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE OPERATION USING VIBRATION SIGNAL
BASED ON FREQUENCY ANALYSIS TECHNIQUE

Jirapong Sukatip

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2017

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

จิรพงศ์ สุขาทิพย์ : การศึกษากระบวนการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยใช้
สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความถี่. อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์, 52 หน้า.

เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ได้มีการประยุกต์ใช้ในการ
ตรวจสอบเครื่องจักรกลและชิ้นส่วนหมุนหลายประเภทเช่น แบร็งและเฟือง สัญญาณการสั่นสะเทือน
สามารถใช้ตรวจวัดปรากฏการณ์ทางกลและของไหลที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์
การศึกษานี้จะจำลองการตรวจสอบสถานะเครื่องยนต์ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากหัววัด
ที่ติดตั้งบริเวณฝาสูบและรางหัวฉีด ของเครื่องยนต์เบนซินซูซูกิ 4 จังหวะ 4 กระบอกสูบ 16 วาล์ว
ขนาดความจุ 1600 CC การศึกษาการทำงานของเครื่องที่สถานะเครื่องยนต์ปกติ ระยะห่างของวาล์ว
ไอดีและไอเสียผิดปกติ และหัวฉีดทำงานผิดปกติ เช่น หัวฉีดไม่ทำงาน ความต้านทานที่คอยล์หัวฉีด
เพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม โดยใช้สถานะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2500 รอบต่อนาที เป็น
สถานะที่สามารถใช้ตรวจสอบการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ได้ครบทุกกรณี

จากผลการศึกษาพบว่า การใช้การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ด้วย
เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วสามารถทำนายสถานะความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหัวฉีด วาล์วไอดีและ
วาล์วไอเสียได้ ความถี่หลักที่เกี่ยวข้องกับการทำงานทางกลของหัวฉีดและวาล์วไอดีและไอเสียจะ
เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำกว่า 3000 Hz ในขณะที่กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการไหลจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูง
ช่วง 3000 – 6000 Hz การใช้การเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณหัวฉีดและวาล์วไอดีและไอเสีย
ช่วงความถี่ทั้งสองจะใช้แยกเงื่อนไขการจำลองได้ และการใช้กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์
แบบเร็วของสัญญาณหัวฉีดและวาล์วไอดีและไอเสียสามารถใช้แสดงขนาดผลการแปลงฟูเรียร์ของ
ความถี่ทั้งสองช่วงที่เกี่ยวข้องกับแต่ละเงื่อนไขการจำลองความผิดปกติของเครื่องยนต์ การศึกษา
ต่อไปจำเป็นต้องปรับปรุงและพัฒนาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ พร้อม
ทั้งเปรียบเทียบผลการศึกษา กับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น ๆ เพื่อใช้ทำนายสถานะการทำงานของ
เครื่องยนต์ได้แม่นยำและถูกต้องมากขึ้น

บัณฑิตวิทยาลัย
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

JIRAPONG SUKATIP : THE STUDY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE OPERATION USING VIBRATION SIGNAL BASED ON FREQUENCY ANALYSIS TECHNIQUE. ADVISOR : ASST.PROF. DR. PRONCHAI NIVESRANGSAN , 52 PP.

Vibration signal analysis technique has been applied to monitor machine and various rotating parts such as ball bearing and gear. Vibration signal can be used to identify mechanical and fluid flow phenomena in the engine cycle. This study was to simulate condition monitoring of petrol engine using vibration signals which were recorded from accelerometers attached on the cylinder head and fuel injector rail of the test engine. The engine used in this study was 4-stroke, 4-cylinder, 16-valve, Suzuki petrol engine with capacity of 1600 CC. This study was simulated with various conditions such as normal, valve clearance of inlet and exhaust valve faults, and various injector faults of unplugged injector, injector coil faults via adding resistors of 10 and 20 ohms. The running engine condition with no load and speed of 2500 rpm was set to demonstrate the condition monitoring of all simulated fault conditions.

It is found that the use of frequency domain analysis technique based on Fast Fourier Transform (FFT) could be used to predict injector and clearance inlet and exhaust valve faults. The main frequency contents associated with mechanical processes of injector and inlet and exhaust valves were below 3000 Hz and the frequencies of 3000 - 6000 Hz might be associated with fluid flow activities. The comparison of the power of injector signal and inlet and exhaust valve signals of both frequency bands could be used to identify various simulated conditions. Also, contour plot of magnitude of FFT of injector signal and inlet and exhaust valve signals could be used to show the difference of magnitude of both frequency bands related to each simulated engine fault condition. The further study is needed to improve vibration signal analysis based on frequency domain including comparison of other analysis techniques in order to monitor running engine condition more accuracy.

Graduate School

Student's Signature.....

Field of Engineering of Technology

Advisor's Signature

Academic Year 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ กรุณาเสียเวลาอันมีค่าของท่าน มาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแนวทางและการพัฒนาในการทำวิจัย ตลอดจนสอนขั้นตอนการดำเนินวิจัยตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. เสถียรพงศ์ หุยนันท์ ที่ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนินน้อย และ ดร. วัชรินทร์ หนูทอง (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอบคุณเพื่อนๆ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามใน ณ ที่นี้ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดียิ่งจากทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

จิรพงศ์ สุขาทิพย์

TNI

THAI - JAPAN
NICHII INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์.....	4
2.2 การตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องยนต์.....	11
2.3 การวิเคราะห์สัญญาณ.....	14
3 วิธีการดำเนินงาน.....	19
3.1 การทดลอง.....	19
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย.....	26
4.1 การวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือน.....	26
4.2 ผลการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา	27
4.3 ผลการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนมุมเพลาคือ.....	27
4.4 ผลการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่.....	31
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	43
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
บรรณานุกรม.....	48
ประวัติย่อผู้วิจัย	52

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สรุปแผนและระยะเวลาการดำเนินงาน	3
3.1 เงื่อนไขการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ที่สภาวะต่างๆ	25



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ [1].....	4
2.2	ลักษณะวาล์วแบบ DOHC และ SOHC [2].....	6
2.3	ปัญหาของวาล์ว [3]	6
2.4	Valve Timing Diagram [4]	7
2.5	ตำแหน่งการเปิดปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย	8
2.6	หลักการเบื้องต้นของระบบ EFI [5].....	8
2.7	ส่วนประกอบของหัวฉีด [6].....	9
2.8	ลักษณะการฉีดเชื้อเพลิงเบนซิน	10
2.9	ตัวอย่างสัญญาณการสันสเทือนและสัญญาณ TDC ที่บันทึกจากเครื่องยนต์ [12].....	12
2.10	แผนภาพการเกิดสัญญาณออสซิลโลมิทซ์ [11].....	13
2.11	ตัวอย่างสัญญาณการสันสเทือนของเครื่องยนต์เบนซินขณะทำงานที่สภาวะปกติ	15
3.1	เครื่องยนต์ที่มีการติดตั้งกับชุดทดสอบพร้อมผู้ควบคุม.....	19
3.2	หัววัดการสันสเทือน.....	20
3.3	ตัวเข้ารหัส (Encoder).....	20
3.4	ชุดปรับปรุงสัญญาณ.....	21
3.5	National Instruments data acquisition.....	21
3.6	คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม.....	22
3.7	ชุดความต้านทานที่เพิ่มให้คอยล์หัวฉีด.....	22
3.8	ตำแหน่งติดตั้งหัววัดการสันสเทือนกับเครื่องยนต์.....	23
3.9	ตำแหน่งติดตั้ง (Encoder) กับเครื่องยนต์.....	24
3.10	การเชื่อมต่ออุปกรณ์.....	24
4.1	ตัวอย่างสัญญาณการสันสเทือนและสัญญาณ TDC ที่บันทึกจากเครื่องยนต์.....	26
4.2	ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณ.....	27
4.3	ตัวอย่างสัญญาณการสันสเทือนบนโดเมนมุมเพลอาซอเหวี่ยง.....	28
4.4	ตัวอย่างสัญญาณหัวฉีดที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ที่ 1500 รอบต่อนาที	29
4.5	ตัวอย่างสัญญาณการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียที่เงื่อนไขต่าง ๆ ที่ 1500 RPM.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ช่วงสัญญาณการสั่นสะเทือนของสัญญาณ INJ1, IVO1, IVC1, EVO1 และ EVC1 ที่ใช้ในการวิเคราะห์	31
4.7 ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ INJ1 ขณะเครื่องทำงานแบบไม่มีภาระ ที่ความเร็วรอบ 1500 RPM ที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ	32
4.8 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของการทำงานหัวฉีดจำลองแบบไม่ฉีดและฉีดน้ำมัน	32
4.9 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ INJ1 ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่สภาวะเครื่องยนต์ แบบไม่มีภาระที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ	34
4.10 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ INJ1 ที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่สภาวะเครื่องยนต์ ภายใต้ภาระ 10 N*m ที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ	34
4.11 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ INJ1 ที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่สภาวะเครื่องยนต์ แบบมีภาระ 20 N*m ที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ	35
4.12 กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลง FFT ของสัญญาณ INJ1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบ ไม่มีภาระที่ 2500 RPM ที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ	36
4.13 ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ IV1 ขณะเครื่องทำงานที่ความเร็วรอบ 2,500 RPM แบบไม่มีภาระ ที่เงื่อนไขระยะตั้งวาล์วไอดีปกติและผิดปกติ.....	37
4.14 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ IV1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2,500 RPM แบบไม่มีภาระ ที่เงื่อนไขการตั้งระยะวาล์วไอดีปกติและผิดปกติ.....	38
4.15 กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ IV1 ขณะเครื่องยนต์ทำงาน ที่ 2,500 RPM แบบไม่มีภาระ ที่เงื่อนไขระยะตั้งวาล์วไอดีปกติและผิดปกติ.....	39
4.16 ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ EV1 ขณะเครื่องทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2500 RPM ที่เงื่อนไขการจำลองของระยะตั้งวาล์วไอเสียปกติและผิดปกติ.....	40
4.17 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ EV1 ขณะเครื่องทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2500 RPM ที่เงื่อนไขการจำลองของระยะตั้งวาล์วไอเสียปกติและผิดปกติ.....	41
4.18 กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ EV1 ขณะเครื่องยนต์ ทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2,500 RPM ที่เงื่อนไขระยะตั้งวาล์วไอเสียปกติและผิดปกติ ...	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องยนต์เป็นเครื่องจักรกลหมุนชนิดหนึ่ง (Rotating Machine) ที่มีการใช้งานกันโดยทั่วไปในงานอุตสาหกรรม ในปัจจุบันเครื่องยนต์เป็นปัจจัยที่สำคัญในชีวิตประจำวันของคนโดยทั่วไป การใช้เครื่องยนต์ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักจะใช้งานผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้ในการสำรองไฟฉุกเฉิน ซึ่งสภาพของเครื่องยนต์จะมีความสำคัญมาก จึงจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบการทำงานของเครื่องยนต์ ว่าถึงเวลาที่จะต้องมีการซ่อมบำรุงแล้วหรือยัง ซึ่งการซ่อมบำรุงตามระยะเวลาหรือการบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) อาจจะได้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีมากนักและมีค่าใช้จ่ายสูง เพราะเมื่อถึงระยะเวลายังจะทำการซ่อมบำรุง จึงจำเป็นที่จะต้องมีการซ่อมบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive maintenance) เพราะอุปกรณ์อาจจะมีการเสียหายก่อนหรือหลังระยะเวลา การที่เครื่องยนต์เกิดการเสียหายก่อนระยะเวลายังจะทำให้เกิดผลต่อกระบวนการผลิต ทำให้การผลิตมีความล่าช้าเพราะต้องรอซ่อมเครื่องยนต์ก่อน ถ้าถึงระยะเวลาในการซ่อมบำรุงแล้วมีการตรวจพบว่าอุปกรณ์ยังไม่มี ความเสียหายสามารถใช้งานได้ปกติ ก็จะทำให้เราสามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงลงได้ และวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ตรวจสอบได้คือ การเฝ้าระวังด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน

การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์มีความสำคัญมาก หากเครื่องยนต์เกิดการขัดข้องขึ้นในช่วงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม อาจส่งผลให้เกิดผลกระทบและความเสียหายที่รุนแรงได้ต่อกระบวนการผลิตได้ ดังนั้นการทราบถึงสภาพของเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลอื่น ๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งจะทำให้การวางแผนการซ่อมบำรุงเครื่องยนต์ทำได้ง่ายขึ้น และลดปัญหาการเสียหายที่รุนแรงของเครื่องยนต์ วิธีการตรวจสอบเครื่องยนต์มีหลายวิธี วิธีพื้นฐานที่ช่างซ่อมทั่วไปใช้คือ การตรวจสอบสภาพของเครื่องยนต์โดยใช้ประสาทสัมผัส เช่นการสัมผัสหรือฟังเสียงซึ่งเป็นเทคนิคที่ต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบเอง วิธีที่นิยมใช้ในการตรวจวัดเครื่องจักรกลหมุนทั่วไปคือการตรวจวัดด้วยสัญญาณจากเซนเซอร์หรือหัววัดต่าง ๆ ได้มีงานวิจัยที่นำมาประยุกต์เพื่อตรวจสอบเครื่องยนต์โดยใช้หัววัดติดตั้งที่ผิวภายนอกของตัวเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่สร้างความเสียหายให้กับเครื่องยนต์ เครื่องยนต์จะอยู่ในสภาพเดิมที่มาจากโรงงานมากที่สุด เช่น การใช้หัววัดการสั่นสะเทือน หัววัดอุณหภูมิอิมพัลส์ ไมโครโฟน เป็นต้น สัญญาณที่ได้จากหัววัดต่าง ๆ จะเป็นสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามกระบวนการทางกลและทางของไหลที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ที่ทดสอบ การตรวจสอบเครื่องยนต์ด้วยหัววัด

การสั่นสะเทือนมีการประยุกต์ใช้ตรวจสอบทั้งเครื่องยนต์เบนซิน และเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งสามารถใช้ตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ได้

การวิเคราะห์สัญญาณมีเทคนิคหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ ได้แก่ ค่าความแปรปรวน ค่าเฉลี่ย ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง เป็นต้น การวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ของสัญญาณ ได้แก่ ค่าความต่ำสุด-สูงสุด ค่าเฉลี่ยกำลังสอง ค่าพลังงาน เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในบางกรณีอาจไม่สามารถประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรกลหมุนได้ชัดเจน การประยุกต์เทคนิคการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) ที่ใช้การแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปของสัญญาณโดเมนความถี่ เพื่อให้ทราบถึงสเปกตรัมของความถี่ของสัญญาณที่เกิดขึ้น

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ โดยใช้สัญญาณการสั่นสะเทือน และใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของความถี่ของสัญญาณเพื่อทำนายความผิดปกติของเครื่องยนต์

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการตรวจสอบสภาพเครื่องยนต์เบนซินด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่

1.3 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ด้วยความถี่ของสัญญาณ เพื่อที่จะใช้ทำนายความผิดปกติของเครื่องยนต์มีเงื่อนไขดังนี้

1.3.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลอง ยี่ห้อซูซูกิ รุ่น G16A ขนาด 1,600 ซีซี แบบ 4 สูบ 4 จังหวะ 16 วาล์ว ทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 800, 1,500, 2,000 และ 2,500 รอบต่อนาที มีการจำลองความผิดปกติดังต่อไปนี้

- การทำงานแบบไม่มีภาระ มีภาระที่ 10 และ 20 นิวตัน-เมตร
- ค่าความต้านทานที่หัวฉีดปกติ 12.7 โอห์ม เพิ่มขึ้นเป็น 22.7 และ 32.7 โอห์ม
- ระยะห่างวาล์วไอดีปกติ 0.15 มม. ผิดปกติที่ 0.2 มม.
- ระยะห่างวาล์วไอเสียปกติ 0.25 มม. ผิดปกติที่ 0.3 มม.

1.3.2 การศึกษาใช้หัววัดการสั่นสะเทือน ตัวเข้ารหัส อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ชุดเก็บข้อมูล คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์

1.3.3 การวิเคราะห์สัญญาณใช้เทคนิคบนโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT)

1.4.1 สามารถระบุความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ด้วย Fast Fourier Transform (FFT)

1.4.2 สามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรหมุนประเภทอื่นได้

1.4.3 ได้เห็นแนวทางของการนำเทคนิคการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาเป็นชุดตรวจสอบเครื่องจักรหมุนในอนาคต

ตารางที่ 1.1 สรุปแผนและระยะเวลาการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปี 2559												ปี 2560			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง																
2. ดัดตั้งอุปกรณ์และทำการทดลอง																
3. เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล																
4. นำเสนอผลงาน																
5. ศึกษาทฤษฎีและเก็บข้อมูล(เพิ่มเติม)																
6. วิเคราะห์ข้อมูล																
7. สรุปผลการทดลอง																

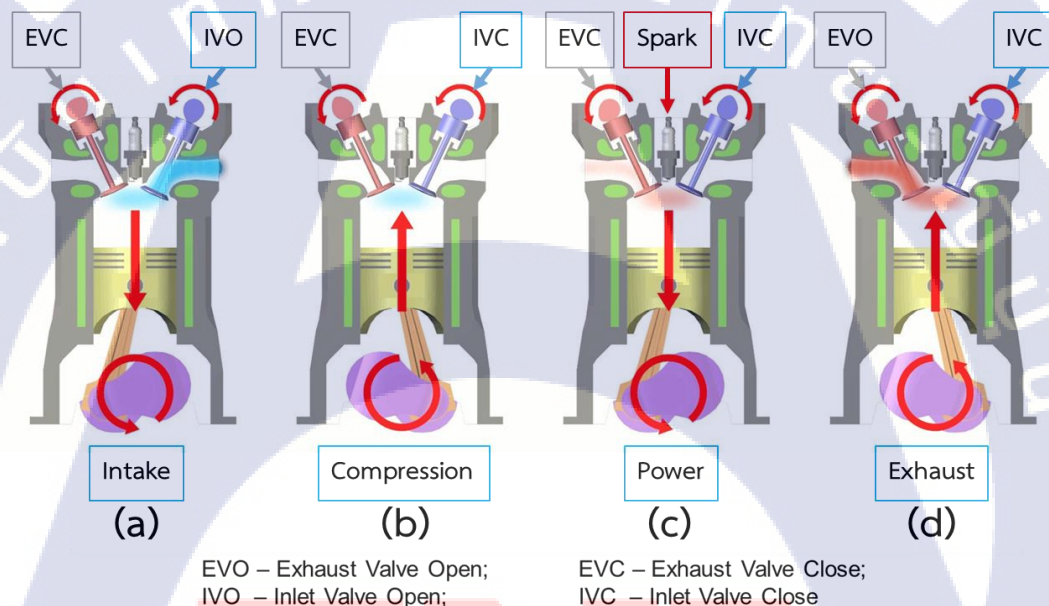
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์

2.1.1 เครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4 จังหวะ

จังหวะการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ คือ จังหวะดูด จังหวะอัด จังหวะกำลัง และจังหวะคาย ทั้ง 4 จังหวะการทำงานของเครื่องยนต์จะเกิดขึ้นจากการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง 2 รอบ ลูกสูบมีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง รวมกัน 4 ครั้ง จะได้งานของเครื่องยนต์ 1 ครั้ง หรือที่เรียกว่า 1 วัฏจักรการทำงาน [1] ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ [1]

- จังหวะดูด (Intake)

จังหวะดูดเริ่มต้นจากการที่ลูกสูบอยู่ด้านบนของกระบอกสูบหรือจุดศูนย์ตายบน (Top dead center : TDC) เคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างหรือจุดศูนย์ตายล่าง (Bottom dead center : BDC) ลิ้นไอดีเปิด เพื่อดูดไอดี (ไอดี : ส่วนผสมน้ำมันเบนซินกับอากาศ) เข้าไปในกระบอกสูบจนลูกสูบเคลื่อนที่ลงสู่ศูนย์ตายล่าง ลิ้นไอดีจึงอยู่ในตำแหน่งปิด โดยในจังหวะนี้ลิ้นไอเสียจะยังคงปิดอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.1(a)

- จังหวะอัด (Compression)

จังหวะอัดลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่างขึ้นสู่ศูนย์ตายบนของกระบอกสูบ เพื่ออัดไอดีที่ถูกดูดเข้ามาภายในกระบอกสูบจากจังหวะดูด ส่งผลทำให้ภายในกระบอกสูบมีอัตราส่วนการอัดสูงขึ้นประมาณ 1 : 6 ถึง 1 : 10 ความดันประมาณ 6.0 – 10.0 กก./ซม². ในจังหวะนี้ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียอยู่ในตำแหน่งปิดทั้งคู่ แสดงดังรูปที่ 2.1(b)

- จังหวะกำลัง (Power)

ก่อนลูกสูบเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายบนเล็กน้อย จะเกิดประกายขึ้นที่หัวเทียน ทำให้เกิดการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงขึ้นภายในกระบอกสูบ ในจังหวะนี้เป็นจังหวะที่ทำงานออกมา หลังจากนั้นลูกสูบก็จะเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบนลงสู่ศูนย์ตายล่าง โดยในจังหวะนี้วาล์วไอดีอยู่ในตำแหน่งปิดและวาล์วไอเสียเริ่มเปิด เพื่อระบายไอเสียที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบ แสดงดังรูปที่ 2.1(c)

- จังหวะคาย (Exhaust)

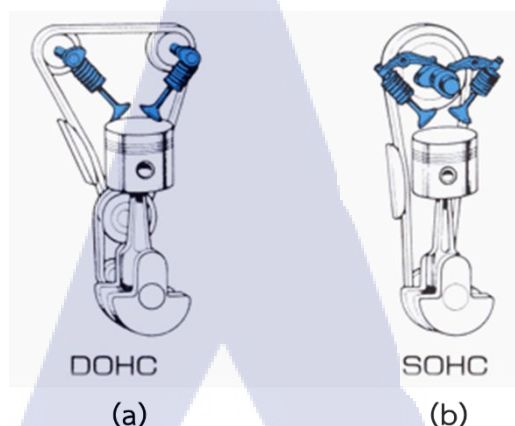
จังหวะคายเป็นการทำงานต่อจากจังหวะกำลัง เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบนลงสู่ศูนย์ตายล่างเนื่องจากการได้รับแรงกระแทกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง จากนั้นลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของกระบอกสูบเพื่อไล่ไอเสียออกผ่านทางลิ้นไอเสีย เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายบนวาล์วไอเสียก็จะปิด วาล์วไอดีก็จะอยู่ในตำแหน่งเริ่มเปิดอีกครั้ง เพื่อเข้าสู่จังหวะดูดใหม่อีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 2.1(d)

2.1.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของวาล์วไอดีและวาล์วไอเสีย

วาล์ว หรือ ลิ้น เปิด - ปิด ไอดี ไอเสีย เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในชั้นของฝาสูบเครื่องยนต์ โดยแบ่ง วาล์วไอดี - ไอเสียเป็น 2 ฝั่ง คือ ฝั่งด้านไอดี และฝั่งด้านไอเสีย

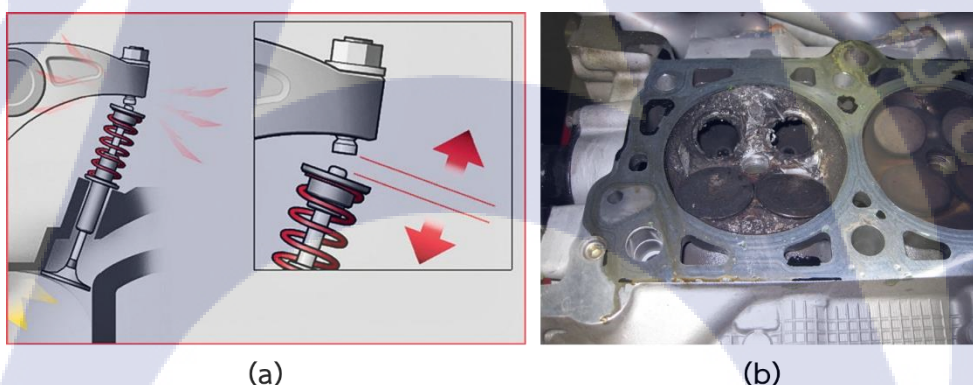
วาล์วแบบ DOSC (Double Over Head Camshaft) แสดงดังรูปที่ 2.2(a) เป็นระบบขับเคลื่อนวาล์วที่ใช้เพลาลูกเบี้ยว (Camshaft) สองอันติดตั้งอยู่ด้านบนของฝาสูบทำหน้าที่ ปิดและเปิดวาล์ว ทั้งวาล์วไอดีและไอเสียต่างก็ใช้เพลาลูกเบี้ยวแยกกันในการควบคุมการทำงานนั่นเอง โดยการทำงานจะออกแบบให้ความเร็วของเพลาลูกเบี้ยวเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็ว เพลาช่อเหวี่ยง และเพลาลูกเบี้ยวแบบนี้ไม่ต้องใช้กระเดื่องกดจะใช้แบบ SOHC

วาล์วแบบ SOHC (Single Over Head Camshaft) แสดงดังรูปที่ 2.2(b) เป็นระบบขับเคลื่อนวาล์วที่อาศัยเพียงแค่เพลาลูกเบี้ยวเพียงอันเดียว ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งวาล์วไอดีและไอเสีย การทำงานเมื่อเพลาลูกเบี้ยวหมุนไปก็จะไปแตะกับ กระเดื่องกดลิ้น (Rocker Arms) จึงจะไปบังคับปิดและเปิดวาล์วตามจังหวะการทำงาน



รูปที่ 2.2 ลักษณะวาล์วแบบ DOHC และ SOHC [2]

ลักษณะปัญหาของวาล์วกับบ่าวาล์วมีอยู่ 2 ลักษณะ คือวาล์วยัน กับวาล์วห่าง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ต้องมีการตรวจเช็คปรับตั้งระยะวาล์ว ทั้งไอดี และไอเสีย

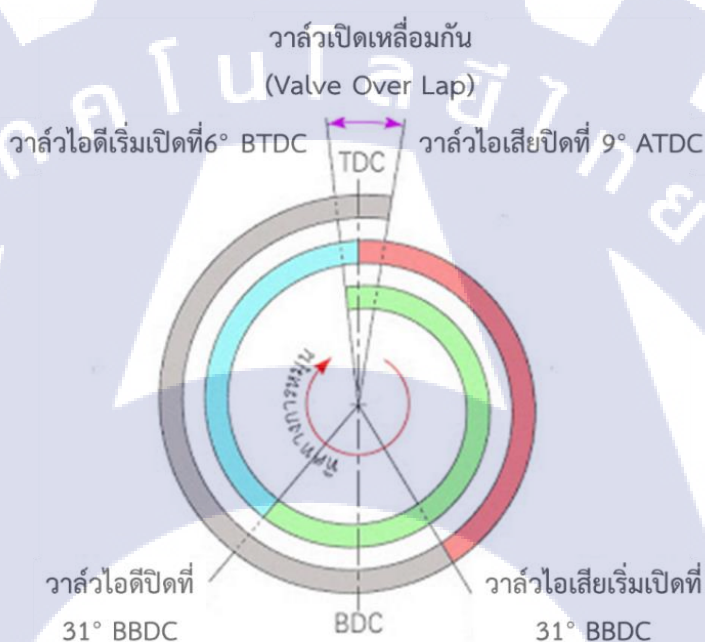


รูปที่ 2.3 ปัญหาของวาล์ว [3]

- วาล์วห่าง เครื่องยนต์จะมีเสียงดัง แด็กๆๆ เหมือนเครื่องยนต์เขก สาเหตุการเกิดวาล์วห่าง ไม่ว่าจะเป็นทางด้าน ไอดี หรือไอเสีย ผิดปกติ คือทำให้วาล์วเปิดช้า ปิดเร็ว ดังรูปที่ 2.3(a)
- วาล์วยัน เครื่องยนต์สั่น รถไม่มีกำลัง วาล์วปิดไม่สนิท ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้กับทั้งวาล์วไอดี และวาล์วไอเสีย ถ้าวาล์วไอดียัน จะมีไอดีเหลือหลังจากการจุดระเบิด ไหลออกจากห้องเผาไหม้ทางด้านวาล์วไอเสีย และถ้าวาล์วยันจน ก้านวาล์วคดงอ เมื่อลูกสูบยกตัวสูงสุด หัวลูกสูบอาจไปชนกับหัววาล์วที่ดันลงในห้องเผาไหม้จนดันให้ก้านวาล์วขึ้นไปชนกับ เพลาลูกเบี้ยว จนก้านวาล์วคดงอ และชุดกวดวาล์วเสียหายไม่ว่าจะเป็นชุดกระเดื่องกวดวาล์ว ชุดถ้วยกวดวาล์ว หรือชุดที่ใช้แผ่นชิมวาล์ว ขึ้นอยู่กับแต่ละรุ่นของรถที่ใช้อุปกรณ์ในการกด เปิด-ปิด วาล์ว ไอดี ไอเสีย ดังรูปที่ 2.3(b)

โอกาสในการเกิดความเสียหายกับ วาล์วและบ่าวาล์ว จะเกิดทางด้าน ไอเสีย ได้ง่ายกว่าทางด้านไอดี เนื่องจากวาล์วทางด้านไอเสีย รับความร้อนจากการเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิสูง

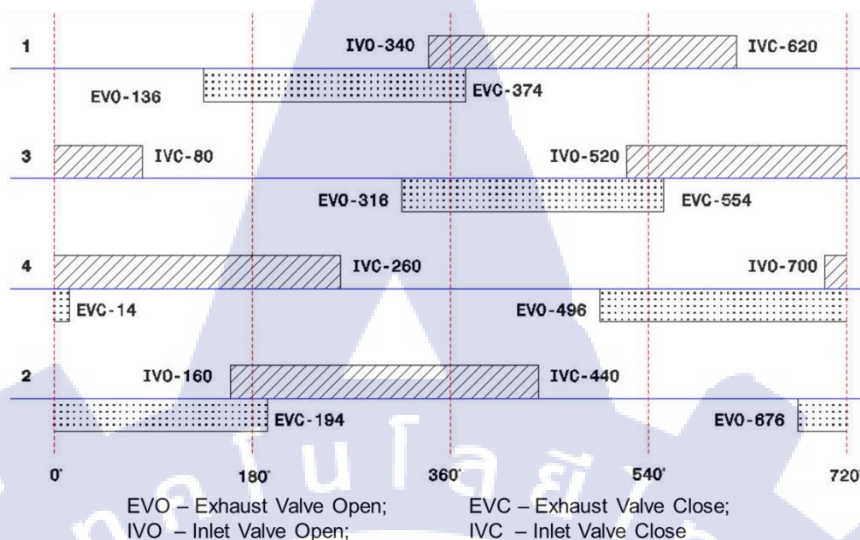
เมื่อเพลาลูกเบี้ยว หมุนไปจนถึงตำแหน่งขึ้นอยู่กักระยะห่างของกระต่องกวาล์วกับก้านวาล์ว ลูกเบี้ยวก็จะทำหน้าที่ดันกระต่องกวาล์วซึ่งมีลักษณะคล้ายม้ากระดก เมื่อปลายอีกฝั่งหนึ่งยกขึ้นอีกฝั่งหนึ่งก็จะทำหน้าที่กดลง เพื่อไปกดก้านวาล์วให้เปิดออกเพื่อนำไอดีเข้ามาในห้องเผาไหม้ และทำหน้าที่คายของฝั่งไอเสีย ตัวอย่าง Valve Timing Diagram ของเครื่องยนต์เบนซินแสดงดังรูปที่ 2.4 และองศาการทำงานของวาล์วที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามบริษัทผู้ผลิตรถยนต์



รูปที่ 2.4 Valve Timing Diagram [4]

ตำแหน่งการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 2.5 สัญลักษณ์แทนวาล์วไอเสียเปิดและปิด และวาล์วไอดีเปิดและปิดแทนด้วย EVO, EVC, IVO และ IVC ตามลำดับ ตำแหน่งการทำงานของวาล์วจะวัดเทียบกับมุมเพลาลูกเบี้ยวของ TDC กระบอกสูบที่ 1 ที่จังหวะจุดระเบิด สัญลักษณ์ที่บันทึกได้ทั้งหมดจะเทียบกับมุมเพลาลูกเบี้ยวของ TDC

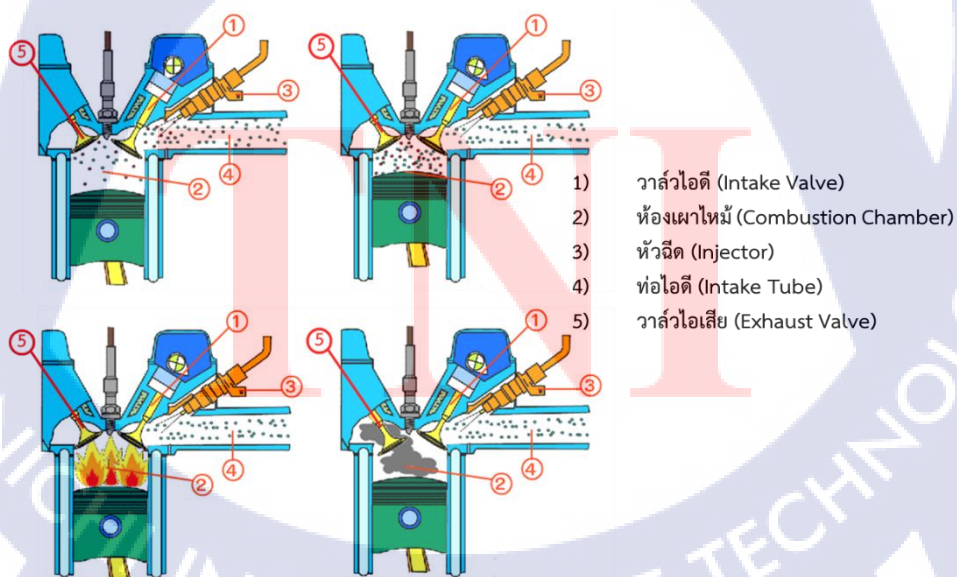
TDC at Firing Stroke of Cylinder - 1



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งการเปิดปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย

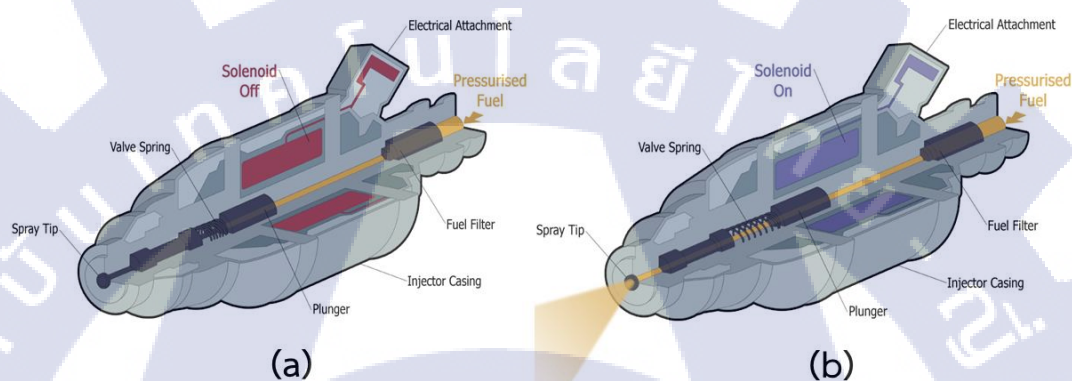
2.1.3 หลักการทำงานเบื้องต้นของหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์

ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic fuel injection System) หรือที่เรียกกันว่า ระบบ EFI แสดงดังรูปที่ 2.6 เป็นระบบการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ โดยใช้หัวฉีดที่มีการควบคุมการทำงานด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือ ECU [5]



รูปที่ 2.6 หลักการเบื้องต้นของระบบ EFI [5]

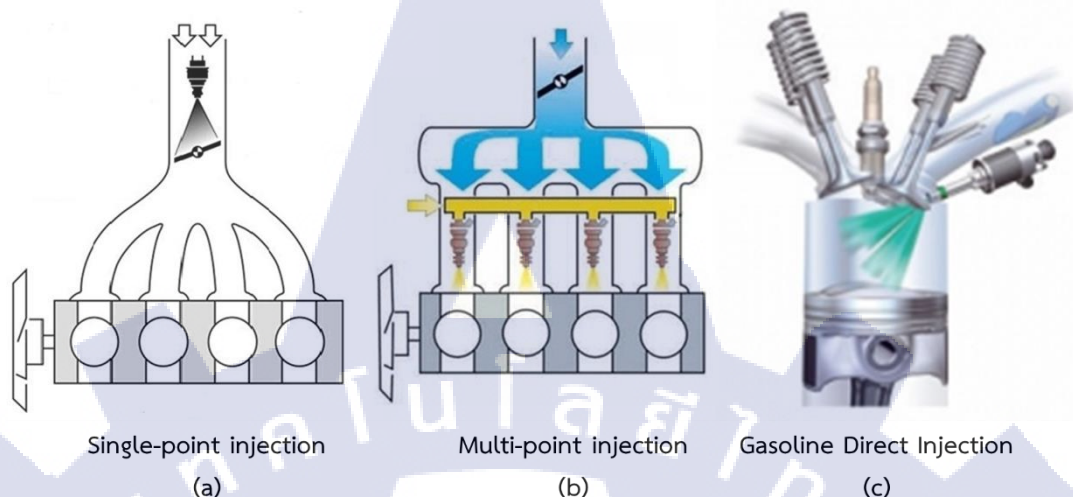
น้ำมันเชื้อเพลิงจากถังจะถูกส่งผ่านกรองน้ำมัน ไปยังหัวฉีดซึ่งติดตั้งไว้ที่ท่อไอดีของแต่ละสูบโดยใช้ปั๊มไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.6 เมื่อสัญญาณไฟฟ้าจากคอมพิวเตอร์ป้อนเข้าหัวฉีด น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความดันประมาณ 2.5 บาร์ (bar) จะถูกฉีดเข้าไปผสมกับอากาศในท่อไอดี แล้วถูกดูดเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ สำหรับปริมาณน้ำมันที่ถูกฉีดออกมาจะมากหรือน้อย จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการป้อนไฟฟ้าเข้าหัวฉีด กล่าวคือ ถ้ามีสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้าหัวฉีดนาน ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกฉีดออกมามาก หัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง (Injector) แสดงดังรูปที่ 2.7 จะทำการฉีดน้ำมันออกไปเป็นฝอย โดยได้รับการควบคุมการฉีดมาจาก ECU โดยใช้ชุดลวดโซลินอยด์ [6]



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของหัวฉีด [6]

การทำงานของหัวฉีด หัวฉีดถูกกระตุ้นการทำงานด้วยไฟฟ้า กล่าวคือ ในขณะที่มีน้ำมันเชื้อเพลิงจากท่อน้ำมัน เข้ามาสู่ตัวหัวฉีด จะมีแรงดันน้ำมันมารออยู่ในหัวฉีดแล้ว แต่น้ำมันไม่สามารถเคลื่อนตัวผ่านออกไปภายนอกหัวฉีดได้ เพราะวาล์วขนาดเล็ก (เข็มวาล์วหัวฉีด) ได้ปิดกั้นทางออกเอาไว้ ตัววาล์วนี้ จะยึดกับแกนเลื่อนขดลวดไฟฟ้า และจะมีโซลินอยด์ขนาดเล็ก ติดตั้งอยู่ภายในหัวฉีดด้วย แสดงดังรูปที่ 2.7(a) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านเข้ามาภายในหัวฉีด จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดึงแกนเข็มวาล์วหัวฉีด ให้ถอยหลัง ที่ปลายเข็มหัวฉีด จึงเกิดเป็นช่องขนาดเล็ก น้ำมันเชื้อเพลิงที่มารออยู่ในหัวฉีด จึงเคลื่อนตัวผ่านทางช่องนี้ พุ่งออกไปเป็นเกล็ดฝอย แสดงดังรูปที่ 2.7(b) ซึ่งเมื่อหมดกระแสไฟฟ้าแล้ว เข็มวาล์วหัวฉีด ก็จะเคลื่อนตัวไปอุดรูทางออก ของน้ำมันเชื้อเพลิงไว้เช่นเดิม

ตำแหน่งที่ตั้งและวิธีการฉีดของระบบหัวฉีด



รูปที่ 2.8 ลักษณะการฉีดเชื้อเพลิงเบนซิน

1) ติดตั้งบริเวณช่องวาล์วปีกผีเสื้อ (Throttle body) การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงจะฉีดเข้าช่องวาล์วปีกผีเสื้อ (Throttle body injection) หรือที่เรียกว่า TBI การฉีดลักษณะนี้ เป็นการผสมน้ำมันกับอากาศ ที่บริเวณช่องวาล์วปีกผีเสื้อ และส่วนผสมดังกล่าว จะเคลื่อนตัวไปตามท่อไอดี แต่ละตำแหน่งสูบ การทำงานลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า การฉีดแบบจุดเดียว (Single-point injection) [7] แสดงดังรูปที่ 2.8(a)

2) ติดตั้งใกล้กับวาล์วไอดี (Port injection) หัวฉีดจะติดตั้ง ยื่นเข้าไปที่ช่องไอดี ใกล้กับวาล์วไอดี ก่อนถึงห้องเผาไหม้ หัวฉีดจะทำการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงผสมกับอากาศ ส่วนผสมที่เกิดขึ้น จะอยู่ใกล้กับทางเข้าห้องเผาไหม้ หัวฉีดจะติดตั้งประจำอยู่ ณ ตำแหน่งนี้ทุกกระบอกสูบ จึงเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า การฉีดแบบหลายจุด (Multi-point injection) [8] แสดงดังรูปที่ 2.8(b) การฉีดประจำแต่ละกระบอกสูบนี้ จะตัดปัญหา ส่วนผสมที่ไม่เท่ากันในแต่ละกระบอกสูบไปได้ ซึ่งทำให้เครื่องยนต์ทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น เป็นแบบที่ใช้ในเครื่องยนต์ปัจจุบัน

3) แบบฉีดเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง (Gasoline Direct Injection) [9] หัวฉีดจะติดตั้งให้ฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปในกระบอกสูบแสดงดังรูปที่ 2.8(c) ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องยนต์ดีเซล ช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์กว่าสองแบบแรก

2.2 การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์

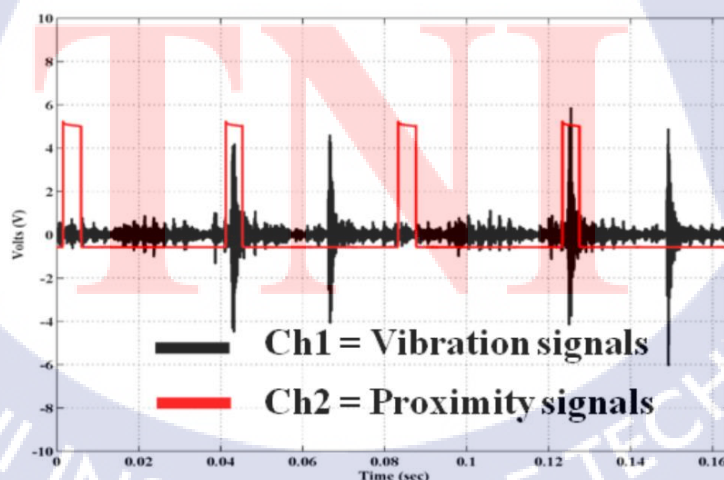
ในปัจจุบันรถยนต์เป็นปัจจัยที่สำคัญในชีวิตประจำวันของคนโดยทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นการใช้ในการสัญจร ใช้ในการทำงานเกษตรกรรม ส่วนสำคัญของรถส่วนหนึ่งก็คือเครื่องยนต์ และเครื่องยนต์ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักจะใช้ในงานผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้ในการสำรองไฟฉุกเฉิน การที่เครื่องยนต์เกิดการเสียหายก่อนระยะเวลาจะทำให้เกิดผลต่อการใช้สัญจรและกระบวนการผลิต ทำให้การสัญจรและการผลิตมีความล่าช้าเพราะต้องรอซ่อมเครื่องยนต์ก่อน ถ้าถึงระยะเวลาในการซ่อมบำรุงแล้วมีการตรวจพบว่าอุปกรณ์ยังไม่มี ความเสียหายสามารถใช้งานได้ปกติ ก็จะทำให้เราสามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงลงได้ ซึ่งสภาพของเครื่องยนต์จะมีความสำคัญมาก จึงจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบการทำงานของเครื่องยนต์ ว่าถึงเวลาที่จะต้องมีการซ่อมบำรุงแล้วหรือยัง ซึ่งการซ่อมบำรุงตามระยะเวลาหรือการบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) อาจจะได้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีมากนักและมีค่าใช้จ่ายสูง เพราะเมื่อถึงระยะเวลายังจะทำการซ่อมบำรุง จึงจำเป็นที่จะต้องมีการซ่อมบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive maintenance) เพราะอุปกรณ์อาจจะมีการเสียหายก่อนหรือหลังระยะเวลา

การซ่อมบำรุงให้มีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบเชิงพยากรณ์ โดยทั่วไปทางเลือกที่มีการใช้ในปัจจุบันคือการใช้เครื่องตรวจสอบเครื่องยนต์ OBD (On-Board Diagnostics) การตรวจสอบด้วย OBD จึงเกี่ยวข้องกับทั้ง Hardware และ Software โดยหากมองในแง่ของการวิเคราะห์และเก็บข้อมูล OBD คือฟังก์ชันหนึ่งของ ECU โดยเป็นฟังก์ชันรองจาก การควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่แล้ว เช่น เครื่องยนต์ ABS เบาะ การทรงตัว อุปกรณ์เสริมต่าง ๆ OBD เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่แสดงถึงความผิดปกติ (Malfunction Indicator Light : MIL) โดยจะคอยตรวจจับ input หรือสัญญาณจากเซนเซอร์ต่าง ๆ เมื่อค่า input ต่าง ๆ ผิดไปจากที่วิศวกรได้ออกแบบไว้เกินขอบเขตที่กำหนดในช่วงเวลาหนึ่ง รวมถึงคอยตรวจสอบ output ผลการควบคุมด้วยเพื่อให้มั่นใจว่าทุกอย่างอยู่ในการควบคุม แต่การตรวจสอบความผิดปกติทางแมคคานิค OBD ไม่สามารถตรวจสอบได้ จึงทำให้ทางเลือกด้านการตรวจสอบสัญญาณด้วยเซนเซอร์หรือหัววัดต่างๆ เข้ามาเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบ ได้มีงานวิจัยที่นำมาประยุกต์เพื่อตรวจสอบเครื่องยนต์โดยใช้หัววัดติดตั้งที่ผิวภายนอกของตัวเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่สร้างความเสียหายให้กับเครื่องยนต์ เครื่องยนต์จะอยู่ในสภาพเดิมที่มาจากโรงงานมากที่สุด เช่น การใช้หัววัดการสั่นสะเทือน หัววัดอุณหภูมิไอเสีย ไมโครโฟน เป็นต้น

2.2.1 การตรวจสอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน

โรงงานอุตสาหกรรมมีเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมักเป็นเครื่องจักรกลหมุน เมื่อใช้งานไปย่อมเกิดการสึกหรอชำรุด ดังนั้นจึงต้องมีระบบการบำรุงรักษาที่ดี และสามารถตรวจสอบสภาพการใช้

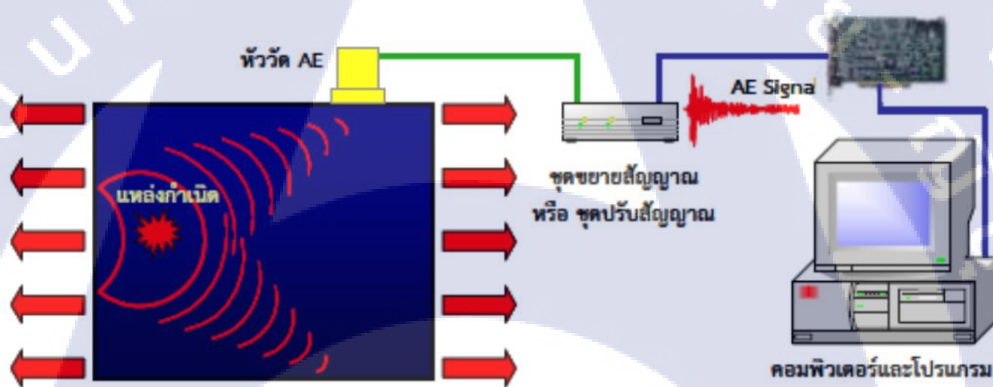
งานของเครื่องจักรได้อย่างแม่นยำ เพื่อสามารถกำหนดเวลาได้อย่างเหมาะสมในการบำรุงรักษาเป็นผลดีทางด้านการผลิต การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งที่บ่งบอกถึงความผิดปกติในเครื่องจักรหากสามารถบ่งชี้จุดเสียหายในเครื่องจักรจากสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ย่อมเป็นผลดีต่อระบบการบำรุงรักษา [10] หัววัดการสั่นสะเทือนเป็นหัววัดที่นิยมใช้ในการตรวจสอบเครื่องจักร และการประมวลผลสัญญาณที่ตรวจวัดได้นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณ ซึ่งผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องมีพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์สัญญาณที่เกี่ยวกับเครื่องจักรกลที่ตรวจสอบเป็นพิเศษจึงสามารถประเมินสภาพของเครื่องจักรกลได้ถูกต้อง [11] งานวิจัยที่ใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบ ตัวอย่างเช่น การใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจวัดความผิดปกติของวาล์วไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์เบนซินขนาดเล็ก 4 จังหวะ 1 สูบ สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถแสดงการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียได้อย่างชัดเจนและสามารถบอกความผิดปกติที่เกิดขึ้นในสัญญาณการสั่นสะเทือน [12] การใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจวัดความผิดปกติของเครื่องยนต์ดีเซล 6 สูบ 4 จังหวะ โดยสัญญาณที่ถูกบันทึกและวิเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการซ่อมบำรุง การศึกษานี้พบว่าโดยใช้อัตราส่วนผสมของน้ำมันที่ต่างกันทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้มีความแตกต่างกัน สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จะสอดคล้องกับกราฟ พลังงาน - แรงบิด ของเครื่องยนต์เสมอ [13] และทำให้รู้ว่าความถี่ต่ำที่อยู่ในช่วงของ 2 kHz เป็นความถี่ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรั่วไหลของการเผาไหม้และความถี่สูงในช่วง 5kHz - 7kHz เกิดขึ้นจากการกระแทกของลูกสูบกับกระบอกสูบ [14] นอกจากนี้การใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจจับความผิดปกติของเครื่องจักรกลหมุนอื่น ๆ ได้มีการประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการทำงานของแบริ่ง [10] ตรวจสอบสถานะการทำงานของพัดลม [11] และตรวจสอบความผิดปกติของเกียร์ [15]



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณ TDC ที่บันทึกจากเครื่องยนต์ [12]

2.2.2 การตรวจสอบด้วยสัญญาณอคูสติกอิมิชชัน

อคูสติกอิมิชชันเป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นยืดหยุ่น (Elastic wave) ชั่วขณะเกิดขึ้นเนื่องจากการปลดปล่อยพลังงานภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภาพดังรูปที่ 2.10 คลื่นอคูสติกอิมิชชันนี้มีพฤติกรรมทางฟิสิกส์เหมือนคลื่นทั่วไปคือ คลื่นสามารถเกิดการสะท้อน การหักเห การเปลี่ยนโหมด และการลดลงของแอมพลิจูดของคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปในวัสดุ คลื่นชนิดนี้สามารถตรวจวัดได้จากหัววัดอคูสติกอิมิชชัน สัญญาณอคูสติกอิมิชชันที่ตรวจจับได้จะมีความซับซ้อนมากขึ้นอยู่กับเส้นทางการเคลื่อนที่และรูปร่างของชิ้นงาน [11] สัญญาณอคูสติกอิมิชชันได้มีการประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล ที่เงื่อนไขปกติ ความผิดปกติของอัตราส่วนการอัด ความผิดปกติของความดันเริ่มต้นการทำงานของหัวฉีด และการรั่วภายในของน้ำมัน [16, 17] และสัญญาณอคูสติกอิมิชชันยังมีการประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบการทำงานของปั๊มหัวฉีดด้วย [18]



รูปที่ 2.10 แผนภาพการเกิดสัญญาณอคูสติกอิมิชชัน [11]

2.2.3 การตรวจสอบด้วยสัญญาณเสียง

การใช้สัญญาณเสียงที่ตรวจวัดจากไมโครโฟนได้มีการประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกลหมุน การใช้สัญญาณเสียงจะมีข้อด้อยที่สัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อมที่ปนเข้ามา ดังนั้นการตรวจวัดด้วยสัญญาณเสียงจะมีขั้นตอนการวัดที่ยากกว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนหรือสัญญาณอคูสติกอิมิชชัน ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการใช้สัญญาณเสียงเพื่อตรวจสอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์และเปรียบเทียบผลที่ได้กับสัญญาณการสั่นสะเทือน [19] ผลการศึกษาพบว่า การทำงานของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบและแบบโรตารีที่เงื่อนไขการทำงานปกติ และเกิดความเสียหายที่ชิ้นส่วนประกอบของคอมเพรสเซอร์ เช่น วาล์วด้านดูด วาล์วด้านส่ง ลูกสูบ หรือแหวนยางกันรั่ว เป็นต้น พบว่าสัญญาณเสียงที่บันทึกมาจากไมโครโฟนและฮาร์ดการ์ดที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ สามารถนำมาใช้

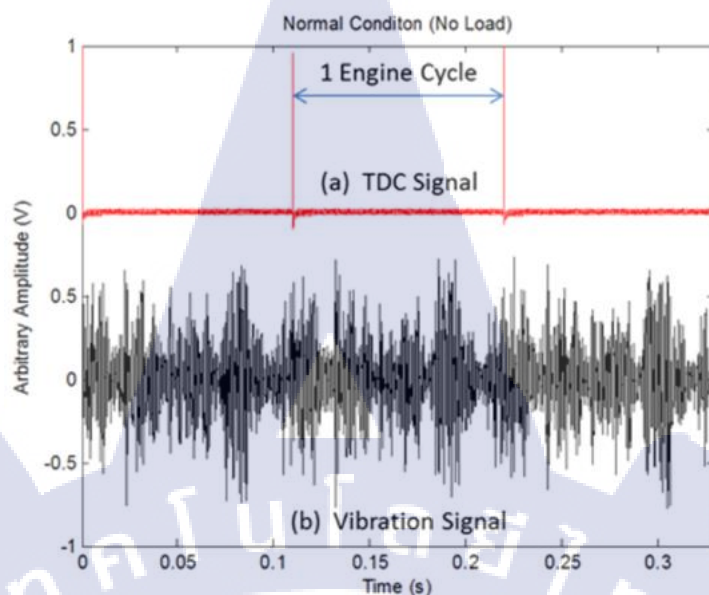
ตรวจสอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์ได้ใกล้เคียงกับสัญญาณการสั่นสะเทือน สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาหรือโดเมนมุมเพลาคือห้วง พบว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจะให้รายละเอียดที่ชัดเจนกว่าสัญญาณเสียง แต่สำหรับการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ ทั้งสัญญาณเสียงและสัญญาณการสั่นสะเทือนจะให้ผลของความถี่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

2.3 การวิเคราะห์สัญญาณ

ในปัจจุบันได้มีการใช้เทคนิคการตรวจจับสัญญาณมาใช้ในการตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องยนต์ การตรวจจับสัญญาณจะใช้หัววัดต่าง ๆ เช่น หัววัดคูลสติกอิมิชัน ไมโครโฟน หัววัดการสั่นสะเทือน เป็นต้น โดยทั่วไปสัญญาณที่ตรวจวัดได้จะเป็นสัญญาณบนโดเมนเวลา ซึ่งบางครั้งการใช้เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาอาจไม่สามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นได้ในเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลที่ตรวจสอบ จึงได้ทำการประยุกต์วิธีการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่โดยสัญญาณสัญญาณที่อยู่บนโดเมนเวลาจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ การวิเคราะห์สัญญาณสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณทั่วไปทั้งบนโดเมนเวลาและบนโดเมนความถี่ เช่น การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางสถิติต่างๆ ของสัญญาณ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความแปรปรวน และค่าความถี่ โดยค่าที่คำนวณเหล่านี้อาจมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมของเครื่องจักรที่ศึกษา หรือการวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) จะทำให้ทราบองค์ประกอบความถี่ที่สำคัญซึ่งมักจะเกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ [11] การศึกษานี้จะเน้นที่เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีการประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์ หรือเครื่องจักรกลหมุนต่าง ๆ เพื่อใช้ทำนายสภาวะที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลที่ตรวจสอบ

2.3.1 การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จะอยู่บนโดเมนเวลาที่มีแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดและแกนนอนเป็นเวลาซึ่งมีหน่วยเป็นโวลต์และวินาทีตามลำดับ ตัวอย่างสัญญาณที่บันทึกได้จากหัววัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งบนฝาสูบของเครื่องยนต์ขณะทำงานครบ 3 วัฏจักรของเครื่องยนต์ สัญญาณที่ตรวจวัดได้มีความซับซ้อนซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลานิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเช่น ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่ารากกำลังสอง ค่ายอดถึงยอด (Peak-to-Peak) เป็นต้น และค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณเช่น ค่าสัมบูรณ์เฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความแปรปรวน ค่าความแปรปรวน ค่าความถี่ เป็นต้น งานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้เทคนิคเหล่านี้มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์เบนซินขณะทำงานที่สภาวะปกติ

การประยุกต์ใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจวัดการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 6 สูบ 4 จังหวะ ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นน้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซลที่อัตราผสมต่าง ๆ โดยการบันทึกและวิเคราะห์สัญญาณก่อนและหลังการซ่อมบำรุง [13] สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จากเครื่องยนต์ตามแนวแกน x, y และ z จะถูกคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณคือ ค่ารากกำลังสอง การศึกษานี้พบว่าอัตราส่วนผสมของน้ำมันที่ต่างกันทำให้ค่ารากกำลังสองจะมีค่าแตกต่างกัน และผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนก่อนและหลังซ่อมบำรุงพบว่ามีค่าลดลง

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาได้มีการประยุกต์ใช้ตรวจสอบการความผิดปกติของระยะห่างวาล์วไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์เบนซินขนาดเล็ก 4 จังหวะ 1 สูบ ความจุ 125 cc [12] สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถแสดงการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียได้อย่างชัดเจนและสามารถบอกความผิดปกติที่เกิดขึ้น สัญญาณการสั่นสะเทือนจะถูกประมวลผลด้วยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณคือ ค่าพลังงานของสัญญาณ โดยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จะถูกคำนวณค่าสัมบูรณ์และแปลงเป็นโดเมนเฟลาซซ์หรือเฟสก่อนที่จะวิเคราะห์ค่าพลังงานของแต่ละช่วงการเปิดและปิดของวาล์วไอดีและไอเสียที่ตำแหน่ง 0° - 90° , 180° - 270° , 450° - 540° , and 630° - 720° สำหรับการทำงานของวาล์วไอดีเปิด วาล์วไอเสียปิด วาล์วไอเสียเปิด และวาล์วไอดีปิดตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าค่าพลังงานที่เกี่ยวข้องกับช่วงการทำงานของวาล์วสามารถใช้ประเมินความผิดปกติของระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสียได้

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนยังมีการใช้การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ 2 ค่าทำให้การประเมินสภาพของเครื่องจักรกลได้ดีขึ้น วิธีการนี้ได้มีการประยุกต์ใช้ทำนายสภาพของพัดลมอัดอากาศจำลองที่สภาวะปกติ ใบพัดลมไม่สมดุล การเยื้องศูนย์ของเพลลา การหลอมคลอนของฐานพัดลม และการชำรุดของแบริ่ง [20] การศึกษานี้ใช้วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์สถิติต่าง ๆ และสรุปไว้ว่าการใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติเพียงค่าเดียวจะสามารถประเมินสภาพได้บางกรณี แต่การใช้การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ 2 ค่าเช่น ค่าความเบ้และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะทำให้การประเมินสภาพทำได้แม่นยำขึ้น

2.3.2 การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่

สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่เช่น การแปลงฟูเรียร์ [10] การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว การวิเคราะห์ Power spectrum density (PSD) ของสัญญาณ เป็นต้น การแปลงฟูเรียร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาสเปกตรัมของฟังก์ชันที่ไม่เป็นรายคาบ (Aperiodic function) โดยจะแปลงฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่องทางด้านเวลาดังสมการที่ 2.1 เป็นฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่องทางด้านความถี่ดังสมการที่ 2.2

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(i\omega_0) e^{i\omega_0 t} d\omega_0 \quad (2.1)$$

$$F(i\omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega_0 t} dt \quad (2.2)$$

เมื่อ	$F(i\omega_0)$	เป็น	Fourier Transform ของ $f(t)$
	$f(t)$	เป็น	Inverse Fourier Transform ของ $F(i\omega_0)$

การแปลงฟูเรียร์เร็ว หรือ FFT คือ วิธีการแปลงสัญญาณที่อยู่ในโดเมนเวลาให้อยู่ในโดเมนความถี่ เนื่องจากวิธีการคำนวณ Discrete Fourier Transform (DFT) ใช้เวลามากในการคำนวณ คือ ต้องทำการบวกจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด N ครั้ง และคูณจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมดอีก N ครั้ง รวมแล้วต้องทำการคำนวณทั้งหมด N^2 ครั้ง ดังนั้น จึงมีการคิดวิธีการแปลงฟูเรียร์เร็ว โดยการพัฒนาจาก DFT โดยใช้การคำนวณเพียง $N \log_2 N$ ครั้งเท่านั้น การหา FFT ข้อมูลจะต้องมีจำนวนเป็น 2^N โดย N เป็นจำนวนเต็มด้วย

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของพลังงานที่เป็นฟังก์ชันของความถี่จะนิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ Power Spectrum Density (PSD) ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Power/Hz หรือ Energy/Hz ซึ่งค่า PSD แทนด้วย $\phi\omega$ คำนวณได้จากสมการ

$$\phi\omega = |x(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \right|^2 \quad (2.3)$$

ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยโดเมนความถี่ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์เร็ว เช่น การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 6 สูบ 4 จังหวะ [13] งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าความถี่ที่ปรากฏจะเกี่ยวข้องกับการทำงานของลูกสูบ การทำงานของวาล์ว และความเร็วรอบของเครื่องยนต์ งานวิจัยนี้ได้ยกตัวอย่างการวิเคราะห์ความถี่คือ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที หรือ 20 Hz ความถี่ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการเผาไหม้จะเท่ากับ 60 Hz และความถี่ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียจะเท่ากับ 120 Hz เป็นต้น นอกจากนี้งานวิจัยที่ใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจสอบเครื่องจักรกลหมุนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ PSD ได้มีการประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบสภาพของพัดลม [20] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิค PSD ทำให้สามารถประเมินสภาพของพัดลมได้โดยองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่สภาวะปกติจะแตกต่างสภาวะที่ผิดปกติต่าง ๆ

2.3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่น ๆ

สัญญาณการสั่นสะเทือนยังสามารถประยุกต์ใช้วิธีวิเคราะห์อื่น ๆ เช่น การแปลงฮิลเบิร์ตและฟังก์ชันคลุ่ม งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคเหล่านี้เพื่อตรวจสอบสภาวะของแบริ่งที่เงื่อนไขต่าง ๆ โดยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดมาจากแบริ่งจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการแปลงฮิลเบิร์ต ร่วมกับการแปลงฟูเรียร์เร็ว [10] ทำให้ทราบองค์ประกอบความถี่ที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายของแบริ่งที่ทดสอบ และสรุปได้ว่าวิธีการดังกล่าวนี้สามารถใช้ประเมินสภาพของแบริ่งได้ การประยุกต์ใช้การแปลงฮิลเบิร์ตเพื่อวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนจากเครื่องยนต์ดีเซล [14] ผลการแปลงฮิลเบิร์ตจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์เร็วทำให้ทราบองค์ประกอบความถี่ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำงานทางกลและทางของไหลในเครื่องยนต์ การศึกษานี้สรุปไว้ว่า ความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงความถี่ 2 kHz เนื่องจากการรั่วไหลของการเผาไหม้และพลังงานส่วนใหญ่จะกระจายตัวในพื้นที่ความถี่สูงกว่า 5kHz ~ 7kHz ซึ่งเกิดจากการเกิดการตบของลูกสูบ ขณะที่ความถี่ของพลังงานจะลดลงเนื่องจากการเพิ่มของการรั่วไหลจากการเผาไหม้

สัญญาณที่ตรวจวัดมาจากหัววัดการสั่นสะเทือนจะประกอบไปด้วยกระบวนการทางกลและทางของไหลในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์เช่น การจุดระเบิด การเผาไหม้ การทำงานของวาล์วไอดีและไอเสีย การเคลื่อนที่ของกระบอกสูบ เป็นต้น สัญญาณสามารถที่จะวิเคราะห์ได้โดยประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ และค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณต่าง ๆ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่ารากกำลังสอง ค่าความถี่ ค่าความเบ้ ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่า crest factor เป็นต้น [12] ซึ่งบางครั้งการใช้ค่าพารามิเตอร์เพียงค่าเดียวอาจไม่สามารถทำนายสภาพของเครื่องยนต์ได้ การศึกษานี้จะประยุกต์ใช้การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยการใช้วิธีการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่เช่น การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลหมุนทั่วไป [11, 18] และน่าจะเป็นวิธีการอีกวิธีหนึ่งที่สามารถอธิบายและประเมินสภาพการทำงานของเครื่องยนต์ได้



TNI

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 การทดลอง

การศึกษานี้ใช้เครื่องยนต์เบนซินซูซูกิ 4 สูบ 4 จังหวะ 16 วาล์ว ความจุกระบอกสูบ 1600 cc สัญญาณการสั่นสะเทือนจะถูกวัดด้วยหัววัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) พร้อมสัญญาณความเร็วรอบที่ตรวจวัดด้วยตัวเข้ารหัส (Encoder) ที่เงื่อนไขการจำลองสภาวะการทำงานแบบต่าง ๆ สัญญาณที่บันทึกจะต่อเข้ากับชุดปรับปรุงสัญญาณ (Signal conditioning unit) ให้สัญญาณอยู่ในระดับที่เหมาะสม สัญญาณจะถูกเก็บบันทึกด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data acquisition device) และบันทึกเป็นไฟล์ด้วยโปรแกรม LabVIEW สัญญาณทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษานี้จะใช้เครื่องยนต์ดีเซลซูซูกิ รุ่น G16A ขนาด 1,600 ซีซี แบบ 4 สูบ 4 จังหวะ 16 วาล์ว ที่ต่อกับชุดไดนามิเตอร์ดังรูปที่ 3.1

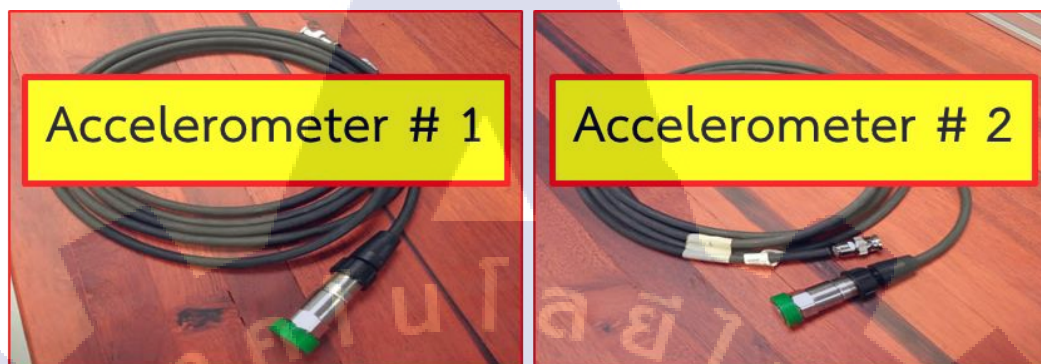


รูปที่ 3.1 เครื่องยนต์ที่มีการติดตั้งกับชุดทดสอบพร้อมตู้ควบคุม

3.2.2 หัววัดการสั่นสะเทือน

เป็นหัววัดแรงสั่นสะเทือนแบบความเร่ง ใช้ในการวัดชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ทางกลแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ภายในประกอบไปด้วยผลึกเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงและจ่ายพลังงานในรูปของแรงดันไฟฟ้า

ออกมา ในการทดลองนี้อุปกรณ์ที่ใช้วัดการสั่นสะเทือนยี่ห้อ IMI รุ่น 6031C01 ซึ่งมีช่วงในการวัด 0.5 - 10000 Hz ดังรูปที่ 3.2 การศึกษานี้จะใช้หัววัดนี้ 2 ตัว โดยติดตั้งที่ตำแหน่งรางหัวฉีด และฝาสูบของเครื่องยนต์



รูปที่ 3.2 หัววัดการสั่นสะเทือน

3.2.3 ตัวเข้ารหัส

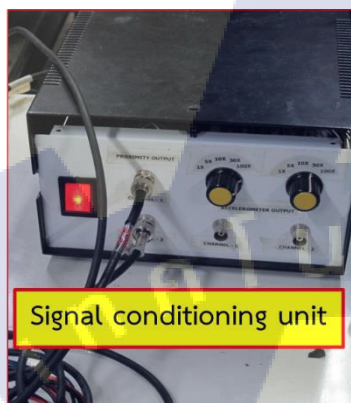
ตัวเข้ารหัสเป็นเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ในการเข้ารหัส จากการหมุนรอบตัวเองเป็นแบบเชิงมุม (Angular) และแปลงออกมาเป็นรหัสของสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบของพัลส์ (Pulse) ซึ่งการทดลองนี้ใช้ Encoder = 1024 Pulse/rev ยี่ห้อ PM รุ่น PR-01 DC 5-30 V. ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวเข้ารหัส (Encoder)

3.2.4 ชุดปรับปรุงสัญญาณ (Signal conditioning unit)

ชุดปรับปรุงสัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงสัญญาณจากตัวเข้ารหัสให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.4(ก) ส่วนหัววัดการสั่นสะเทือนจะใช้ชุดปรับปรุงสัญญาณ NI 9234 ดังรูปที่ 3.4(ข)



(ก) ชุดที่พัฒนาสำหรับตัวเข้ารหัส



(ข) NI 9234 สำหรับหัววัดการสั่นสะเทือน

รูปที่ 3.4 ชุดปรับปรุงสัญญาณ

3.2.5 อุปกรณ์เก็บข้อมูล

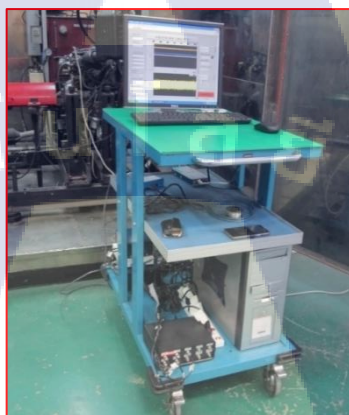
อุปกรณ์เก็บข้อมูลเป็นตัวที่ใช้เก็บข้อมูลด้วยการวัดทางไฟฟ้าที่ส่งมาจาก หัววัดการสั่นสะเทือนและชุดแปลงสัญญาณ และทำการส่งต่อข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ การทดลองนี้ใช้ NI DAQ รุ่น NI cDAQ9191 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 National Instruments data acquisition

3.2.6 คอมพิวเตอร์

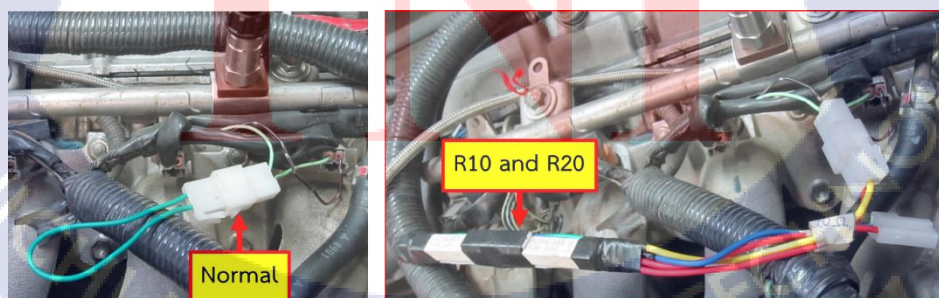
คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้เก็บข้อมูลและประมวลผลสัญญาณ หัววัดและอุปกรณ์ต่อเชื่อมต่าง ๆ จะต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์และใช้โปรแกรม LabVIEW สำหรับเก็บสัญญาณทั้งหมดเป็นไฟล์เพื่อวิเคราะห์ภายหลัง ดังรูปที่ 3.6 ส่วนการวิเคราะห์สัญญาณทั้งหมดจะกระทำบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลแบบเมทริกซ์ แสดงผลเป็นตัวเลขและกราฟ รวมทั้งการพัฒนาและแก้ไขทำได้ง่ายและสะดวกกว่าโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 3.6 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม

3.2.7 ความต้านทาน

การจำลองการผิตปกติที่หัวฉีดจะจำลองโดยการเพิ่มความต้านทานของคอยล์หัวฉีดจากค่าปกติที่ 12.7 โอห์มดังรูปที่ 3.7(a) การจำลองเงื่อนไขคอยล์ผิตปกติจะเพิ่มความต้านทานขนาด 10 และ 20 โอห์ม ทำให้ความต้านทานรวมของคอยล์มากกว่าค่ามาตรฐาน ชุดความต้านทานที่เพิ่มจะต่อพ่วงเข้ากับปลั๊กหัวฉีดดังรูปที่ 3.7(b)



(a) ปกติ

(b) ความต้านทาน 10 และ 20 โอห์ม

รูปที่ 3.7 ชุดความต้านทานที่เพิ่มให้คอยล์หัวฉีด

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

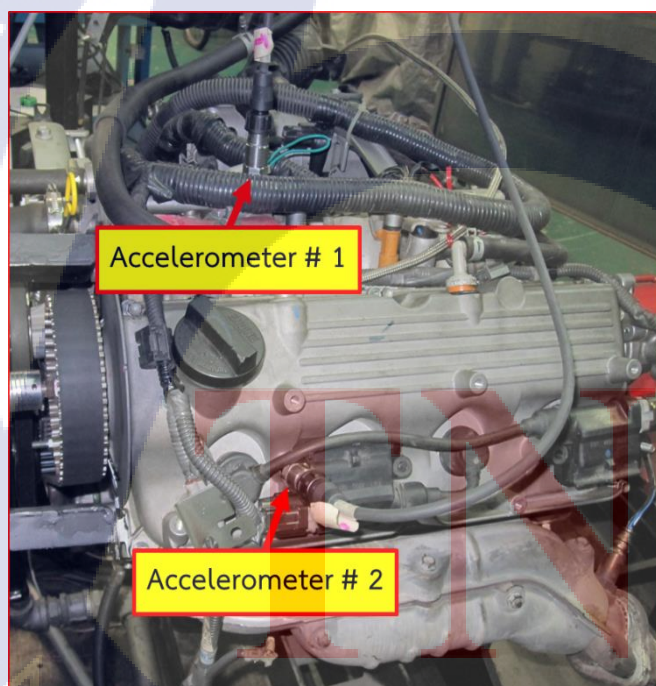
เตรียมเครื่องยนต์ให้มีความสมบูรณ์ และทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบ ดังขั้นตอนต่อไปนี้

3.3.1 เครื่องยนต์

ทำการติดตั้งเครื่องยนต์บนชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ (Engine Dynamometer) ซึ่งมีอุปกรณ์วัดแรงบิดแบบใช้การเหนี่ยวนำหรือเอ็ดดี้เคอร์เรนท์ไดนาโมมิเตอร์ ชุดทดสอบนี้สามารถในการวัด ความเร็วรอบ แรงบิด และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น

3.3.2 หัววัดการสั่นสะเทือน

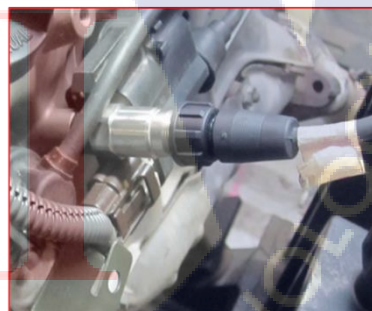
การทดลองนี้มีการติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) จำนวน 2 ตัว ดังรูปที่ 3.8(a) ตัวแรกติดตั้งที่รางหัวฉีดระหว่างสับที่ 1 กับ 2 ดังรูปที่ 3.8(b) ตัวที่สองติดตั้งที่ฝาสูบระหว่างสับที่ 1 กับ 2 ดังรูปที่ 3.8(c)



(a) การติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือน



(b) หัววัดการสั่นสะเทือนตัวที่ 1

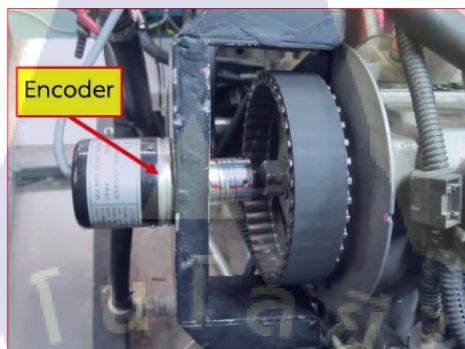


(c) หัววัดการสั่นสะเทือนตัวที่ 2

รูปที่ 3.8 ตำแหน่งติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนกับเครื่องยนต์

3.3.3 ตัวเข้ารหัส

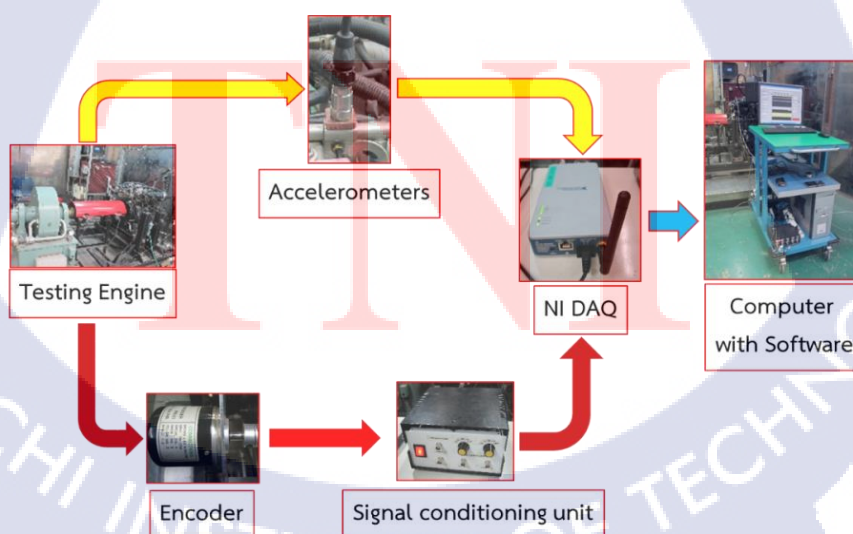
การทดลองนี้ตัวเข้ารหัสได้ทำการติดตั้งที่เพลาลูกเบี้ยว การหมุน 1 รอบของเพลาลูกเบี้ยว เท่ากับ 1 วัฏจักรของเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งติดตั้ง (Encoder) กับเครื่องยนต์

3.3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์

หัววัดและอุปกรณ์จะต่อเชื่อมกันดังรูปที่ 3.10 สัญญาณที่บันทึกจากการทดลองมีทั้งหมด 4 สัญญาณซึ่งประกอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน 2 ช่องสัญญาณ และสัญญาณจากตัวเข้ารหัส 2 สัญญาณเป็นสัญญาณตำแหน่งจุดศูนย์ตายบนหรือสัญญาณวัตรอบ และสัญญาณองศาบนเพลาลูกเบี้ยว ส่วนอุปกรณ์เก็บข้อมูลจะต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง WIFI และโปรแกรม LabVIEW จะใช้ควบคุมอุปกรณ์เพื่อเก็บข้อมูลเป็นไฟล์



รูปที่ 3.10 การเชื่อมต่ออุปกรณ์

3.3.5 เงื่อนไขการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์

การศึกษานี้จะทำการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ เช่น เครื่องยนต์ทำงานปกติ หัวฉีดผิดปกติที่คอยล์ และระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสียผิดปกติ โดยมีรายละเอียดของแต่ละเงื่อนไขดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ที่สภาวะต่างๆ

ลำดับ	การทำงาน	เงื่อนไข	สภาวะ	สัญลักษณ์
1	หัวฉีดสูบที่ 1 (INJ1)	12.7 โอห์ม	ความต้านทานปกติ	INJ1 Normal
		22.7 โอห์ม	เพิ่มความต้านทาน 10 โอห์ม	INJ1 R10
		32.7 โอห์ม	เพิ่มความต้านทาน 20 โอห์ม	INJ1 R20
		ไม่ทำงาน	ถอดปลั๊กหัวฉีดสูบที่ 1	INJ1 Unplugged
2	วาล์วไอดีสูบที่ 1 (IV1)	0.15 มม.	วาล์วไอดีสูบที่ 1 เปิด ระยะห่างปกติ	IVO1 Normal
			วาล์วไอดีสูบที่ 1 ปิด ระยะห่างปกติ	IVC1 Normal
		0.2 มม.	วาล์วไอดีสูบที่ 1 เปิด ระยะห่างผิดปกติ	IVO1 Fault
			วาล์วไอดีสูบที่ 1 ปิด ระยะห่างผิดปกติ	IVC1 Fault
3	วาล์วไอเสียสูบที่ 1 (EV1)	0.25 มม.	วาล์วไอเสียสูบที่ 1 เปิด ระยะห่างปกติ	EVO1 Normal
			วาล์วไอเสียสูบที่ 1 ปิด ระยะห่างปกติ	EVC1 Normal
		0.3 มม.	วาล์วไอเสียสูบที่ 1 เปิด ระยะห่างผิดปกติ	EVO1 Fault
			วาล์วไอเสียสูบที่ 1 ปิด ระยะห่างผิดปกติ	EVC1 Fault

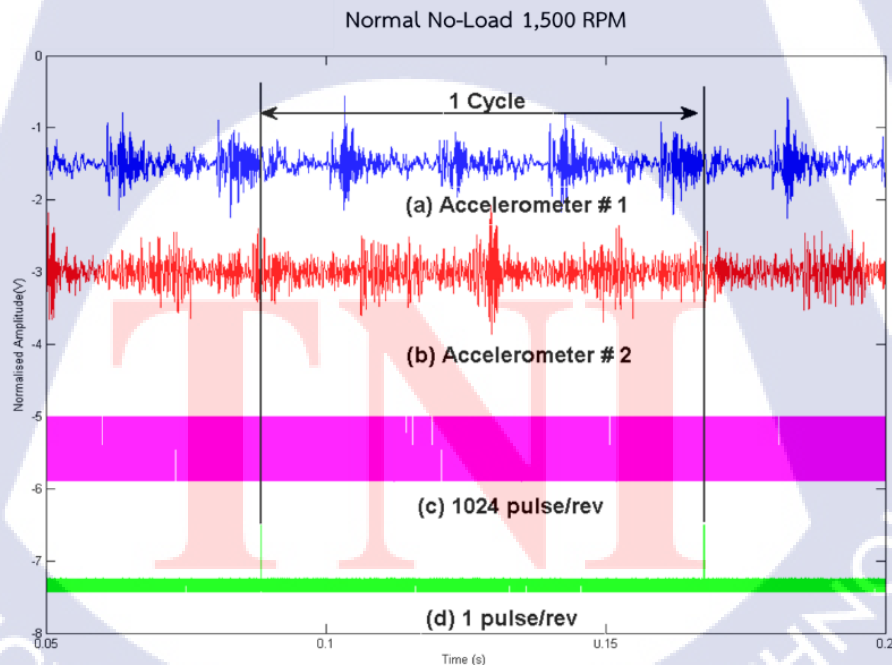
สัญญาณการสันดาปและสัญญาณของตัวเข้ารหัสจะถูกบันทึกพร้อมกันด้วยอัตราสุ่มที่ 51200 ข้อมูลต่อวินาที ที่จำนวนข้อมูลเท่ากับ 100000 ข้อมูลต่อสัญญาณ สัญญาณทั้งหมดจะบันทึกที่แต่ละเงื่อนไขการจำลองที่เครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบประมาณ 800, 1500, และ 2500 รอบต่อนาที และเครื่องยนต์จะทำงานภายใต้เงื่อนไขไม่มีภาระ และมีภาระที่ 10 และ 20 N*m ตามลำดับ การจำลองแต่ละกรณีจะถูกบันทึกที่ข้อมูลประมาณ 50 ไฟล์

บทที่ 4

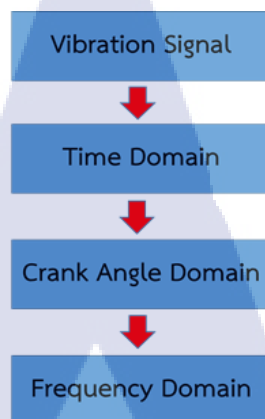
ผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือน

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้หัววัดที่ติดตั้งบนรางหัวฉีดและฝาสูบของเครื่องยนต์ทดสอบจะอยู่ในรูปของสัญญาณบนโดเมนเวลา มีแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดในหน่วยโวลต์ และแกนนอนเป็นเวลาในหน่วยวินาที ดังรูปที่ 4.1(a) และ รูปที่ 4.1 (b) วิธีการวิเคราะห์ที่จะใช้ในการศึกษานี้มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.2 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จะระบุตำแหน่งของกระบวนการต่าง ๆ ได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาเป็นสัญญาณบนโดเมนมุมเพลทข้อเหวี่ยงจะทำให้สามารถระบุกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์เบนซินได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้การใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่และเป็นวิธีที่นิยมใช้เครื่องจักรกลหมุนเช่น แบร็งก์ เฟือง ปัม เป็นต้น จะนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์สัญญาณเพื่อทำนายสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ รายละเอียดของผลการวิเคราะห์จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณ TDC ที่บันทึกจากเครื่องยนต์



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณ

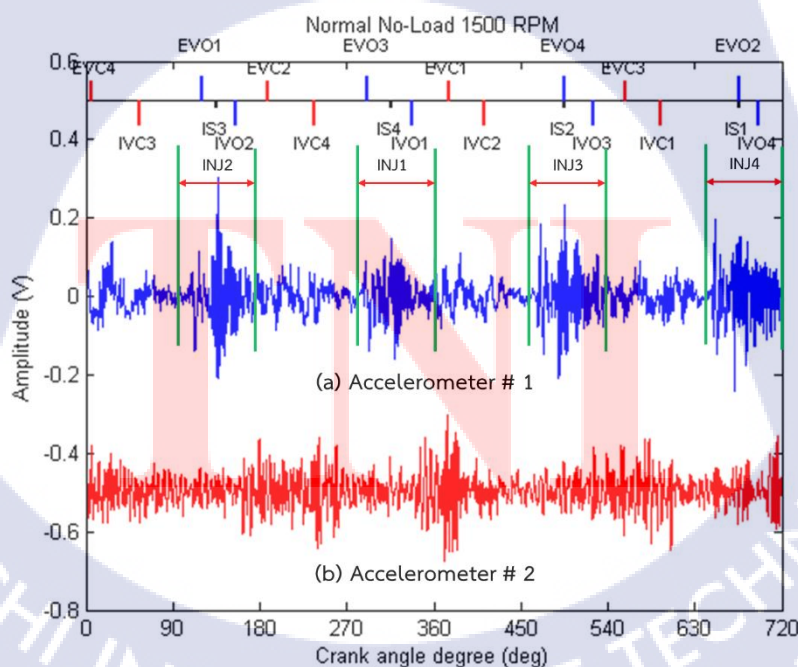
4.2 ผลการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา

ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณ TDC แสดงดังรูปที่ 4.1 เป็นสัญญาณที่เครื่องยนต์ทำงานครบ 1 รอบ สัญญาณการสั่นสะเทือนดังรูปที่ 4.1(a) เป็นสัญญาณที่บันทึกจากหัววัดที่ติดตั้งที่รางหัวฉีดระหว่างสูบที่ 1 และ 2 ซึ่งคาดว่าเกิดจากการทำงานของหัวฉีดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกลของกลไกที่เคลื่อนที่และกระบวนการของของไหลในหัวฉีด สัญญาณที่บันทึกได้จะแบ่งออกเป็น 2 เหตุการณ์คือ ตอนวาล์วหัวฉีดเปิด และวาล์วหัวฉีดปิด โดยช่วงวาล์วปิดจะเห็นแอมพลิจูดของสัญญาณที่สูงกว่า สัญญาณสั่นสะเทือนดังรูปที่ 4.1(b) เป็นสัญญาณที่เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์เช่น การเปิดปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย การเคลื่อนที่ของลูกสูบ การเผาไหม้ เป็นต้น สัญญาณจาก Encoder มี 2 สัญญาณ คือ ส่วนแรกเป็นสัญญาณที่เป็น 1024 พัลส์ต่อ 1 รอบการทำงานดังรูปที่ 4.1(c) และส่วนที่สองเป็นสัญญาณ TDC จะให้ 1 พัลส์ต่อ 1 รอบการทำงานของเครื่องยนต์ สัญญาณดังรูปที่ 4.1(d) สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จะระบุตำแหน่งของกระบวนการต่าง ๆ ได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาเป็นสัญญาณบนโดเมนมุมเพลอาซอเหวี่ยงโดยใช้สัญญาณดังรูปที่ 4.1(d) เป็นสัญญาณอ้างอิงจะทำให้สามารถระบุกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์เบนซินได้ง่ายขึ้น

4.3 ผลการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนมุมเพลอาซอเหวี่ยง

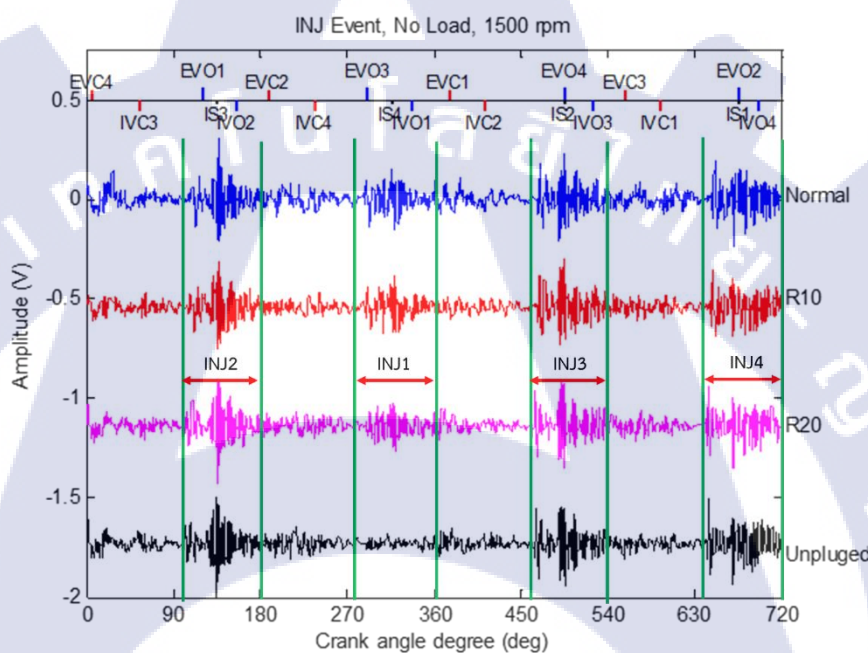
สัญญาณบนโดเมนมุมเพลอาซอเหวี่ยงจะทำให้ระบุกระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ได้ง่ายกว่า ตัวอย่างสัญญาณบนโดเมนมุมเพลอาซอเหวี่ยงที่แสดงผลเทียบกับแผนผังการทำงานของวาล์วแสดงดังรูปที่ 4.3 สัญญาณดังกล่าวบันทึกจากหัววัดที่ติดตั้งที่รางหัวฉีดระหว่างสูบที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 4.3(a) และหัววัดที่ติดตั้งที่ฝาสูบระหว่างสูบ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 4.3(b)

ขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ความเร็วประมาณ 1500 รอบต่อนาที โดยเหตุการณ์ของกระบวนการทำงานของวาล์วและตำแหน่งเริ่มทำงานของหัวเทียนสูบต่าง ๆ แสดงอยู่ด้านบนของรูป ตำแหน่งการเปิดและปิดของวาล์วไอดี (แทนด้วยสัญลักษณ์ IVO และ IVC) ตำแหน่งการเปิดและปิดของวาล์วไอเสีย (แทนด้วยสัญลักษณ์ EVO และ EVC) และตำแหน่งเริ่มทำงานของหัวเทียน (แทนด้วยสัญลักษณ์ IS) ส่วนตัวเลขท้ายสัญลักษณ์แทนด้วยกระบอกสูบใด ๆ สัญญาณการทำงานของหัวฉีดสูบต่าง ๆ จะเห็นสัญญาณหัวฉีดทำงานเป็นช่วง ๆ ตามลำดับการทำงานของเครื่องยนต์ สัญญาณหัวฉีดดังรูปที่ 4.3(a) จะมีลำดับการฉีดดังนี้คือ INJ2, INJ1, INJ3, และ INJ4 ตามลำดับ ซึ่งมีช่วงองศาทำงานคือ 100° - 180° , 280° - 360° , 460° - 540° และ 640° - 720° ตามลำดับ ส่วนสัญญาณการทำงานของวาล์วของสูบต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.3(b) จะเห็นเหตุการณ์ชัดเจนที่มีแอมพลิจูดสูงจะอยู่ในช่วงของวาล์วไอเสียทำงานในจังหวะปิด เหตุการณ์ EVC1 จะมีแอมพลิจูดสูงและชัดเจน ซึ่งคาดว่าน่าจะอยู่ใกล้กับตำแหน่งหัววัดที่ติดตั้ง ส่วนเหตุการณ์ EVC2, EVC3 และ EVC4 ยังสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดได้ แต่แอมพลิจูดจะลดลงและไม่ชัดเจนนัก การศึกษานี้จะศึกษาการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียที่สูบที่ 1 สัญญาณการทำงานของวาล์วไอดีของสูบที่ 1 คือ IVO1 จะเปิดที่ตำแหน่ง 320° - 350° และ IVC1 ปิดที่ตำแหน่ง 585° - 615° ส่วนการทำงานของวาล์วไอเสียสูบที่ 1 คือ EVO1 จะเปิดที่ตำแหน่ง 105° - 135° และ EVC1 ปิดที่ตำแหน่ง 350° - 380° ตำแหน่งการทำงานของวาล์วเหล่านี้จะใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



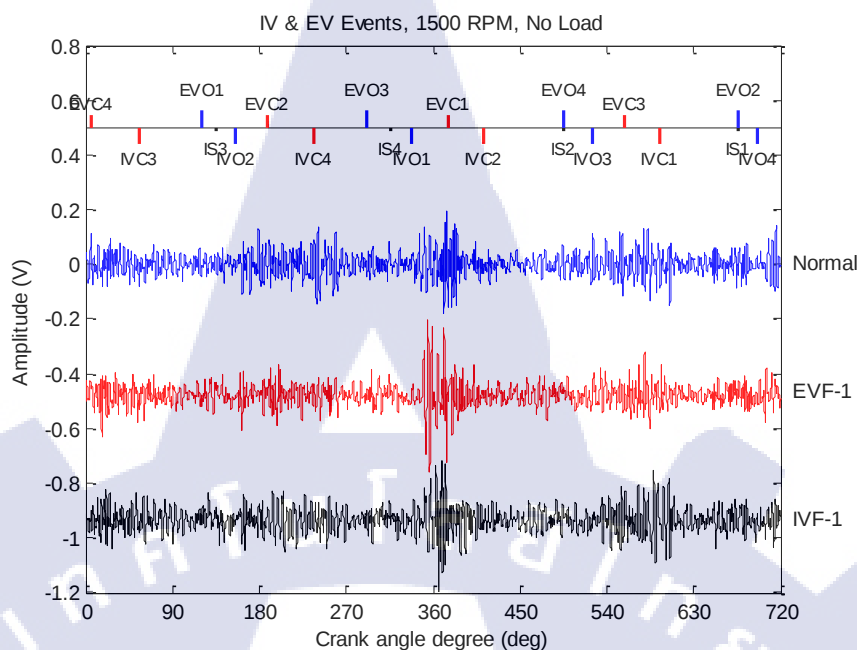
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนมุมเพลอาข้อเหวี่ยง

ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของหัวฉีดสูบที่ 1 หรือ INJ1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ 1500 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขปกติ คอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม และหัวฉีดไม่ทำงานซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ Normal, R10, R20 และ Unplugged ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.4 สัญญาณ INJ1 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ จะทำงานช่วงประมาณมุมเพลาคือ $280^{\circ} - 360^{\circ}$ แอมพลิจูดของสัญญาณจะลดลงตามความผิดปกติที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสัญญาณหัวฉีดปกติ ส่วนสัญญาณ INJ2, INJ3 และ INJ4 จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิม



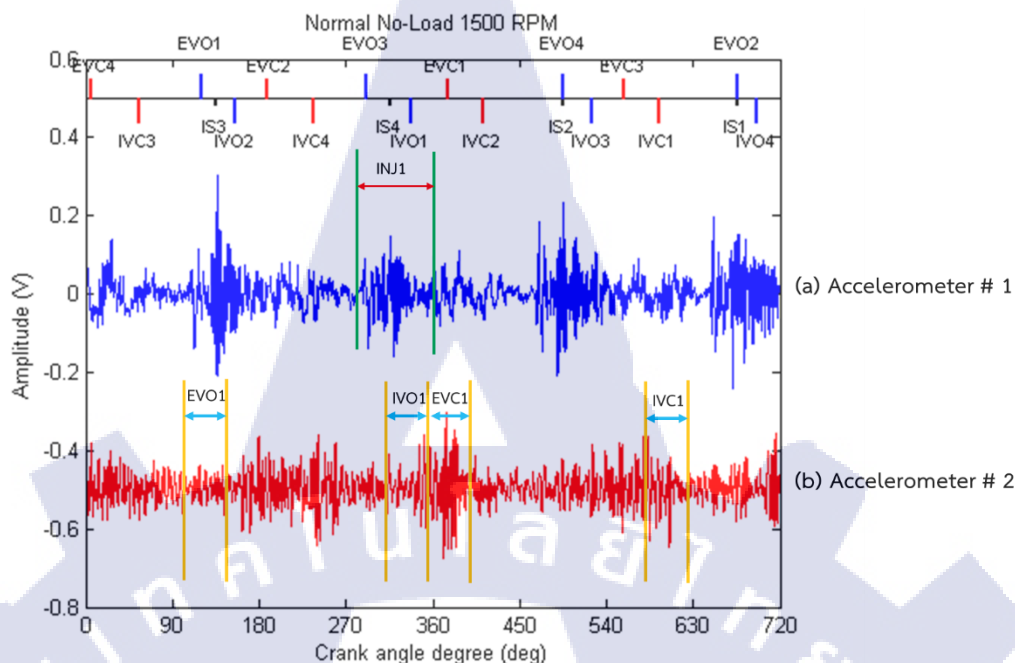
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างสัญญาณหัวฉีดที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ที่ 1500 รอบต่อนาที

ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ 1500 รอบต่อนาที ที่เงื่อนไขการจำลองเช่น เครื่องยนต์ปกติ ระยะตั้งวาล์วไอดีสูบที่ 1 ผิดปกติ ระยะตั้งวาล์วไอเสียสูบที่ 1 ผิดปกติ แทนด้วย Normal, IVF-1, EVF-1 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5 เมื่อวาล์วไอดีและไอเสียมีความผิดปกติเกิดขึ้นที่ระยะตั้งวาล์วที่มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานจะทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนมีขนาดแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นรวมทั้งเกิดการเลื่อนของเหตุการณ์เล็กน้อย ทั้งนี้จะมีสาเหตุจากเมื่อระยะตั้งวาล์วเพิ่มขึ้นจะทำให้ตำแหน่งการเปิดและปิดเปลี่ยนแปลงไปคือ เปิดช้าและปิดเร็วขึ้น และอาจเกิดจากการทำงานเลื่อมกันของวาล์วไอดี 2 วาล์วในแต่ละสูบ และวาล์วไอเสียที่มี 2 วาล์วต่อสูบเช่นกัน



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างสัญญาณการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียที่เงื่อนไขต่าง ๆ ที่ 1500 RPM

การวิเคราะห์โดยใช้การเปรียบเทียบสัญญาณบนโดเมนเวลาอาจจะทำให้ไม่สามารถแยกเงื่อนไขการจำลองของแต่ละเงื่อนไขได้ชัดเจนนัก การศึกษานี้จึงได้เสนอวิธีวิเคราะห์สัญญาณการสันสถานะบนโดเมนความถี่ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลหมุน การศึกษานี้ได้ทำการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการทำงานของหัวฉีด วาล์วไอดี และไอเสียของกระบอกสูบที่ 1 และการวิเคราะห์สัญญาณจะทำการแยกกระบวนการต่าง ๆ ของเครื่องยนต์โดยใช้สัญญาณบนโดเมนมุมเพลาคือห้วง สัญญาณ INJ1, IVO1, IVC1, EVO1, และ EVC1 จะวิเคราะห์ในช่วงมุมเพลาคือห้วงระหว่าง 280° - 360° , 320° - 350° , 585° - 615° , 105° - 135° , และ 350° - 380° ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 ช่วงสัญญาณต่าง ๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ทั้งหมด 100 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ ผลการวิเคราะห์จะแสดงในหัวข้อถัดไป



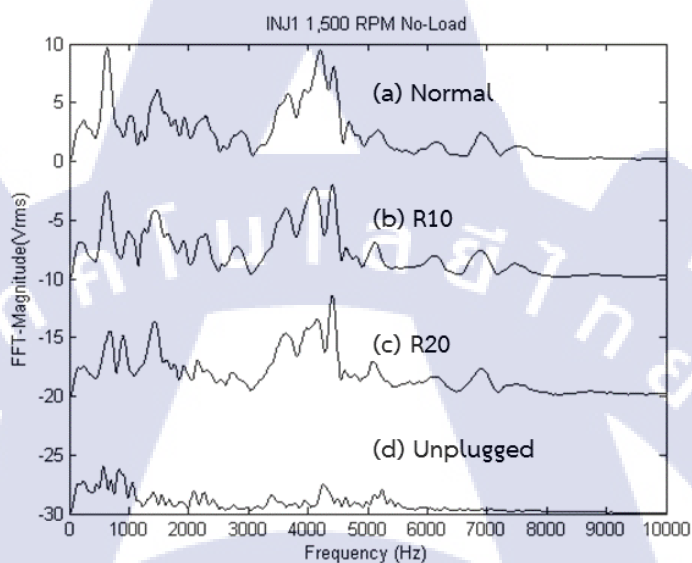
รูปที่ 4.6 ช่วงสัญญาณการสั่นสะเทือนของสัญญาณ INJ1, IVO1, IVC1, EVO1 และ EVC1 ที่ใช้ในการวิเคราะห์

4.4 ผลการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่

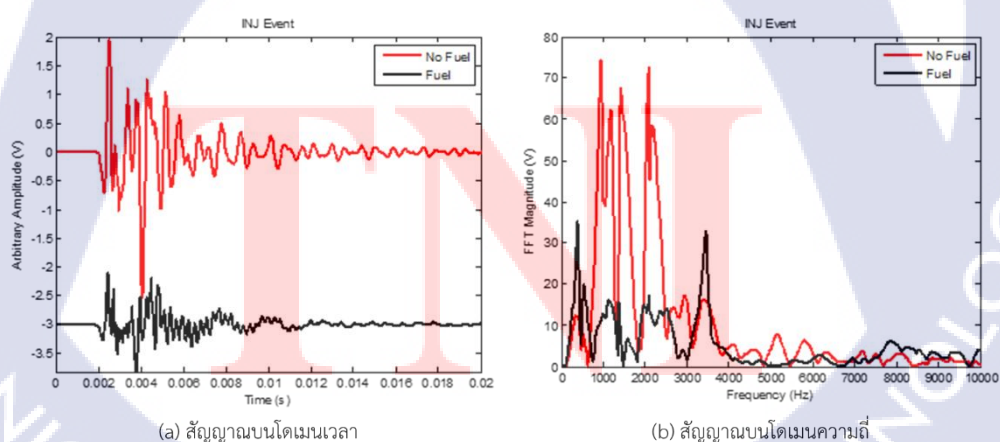
4.4.1 สัญญาณการสั่นสะเทือนการทำงานของหัวฉีด

สัญญาณ INJ1 ของหัวฉีดดังรูปที่ 4.4 เป็นสัญญาณที่บันทึกการจำลองหัวฉีดขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ 1500 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขหัวฉีดสูบที่ 1 คอยล์หัวฉีดมีความต้านเพิ่มอีก 10 และ 20 โอห์ม และหัวฉีดไม่ทำงานแทนด้วยสัญญาณ Normal, R10, R20 และ Unplugged จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยมีแกนตั้งเป็นผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วมีหน่วยเป็น รากกำลังสองของโวลต์ (V_{rms}) ส่วนแกนนอนจะเป็นความถี่ในหน่วย Hz ผลการวิเคราะห์พบว่าสัญญาณหัวฉีดประกอบด้วยความถี่ 2 ช่วงคือความถี่ช่วง 0 – 3000 Hz ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นความถี่ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของกลไกของหัวฉีด และความถี่ช่วง 3000 – 6000 Hz น่าจะเป็นความถี่ที่เกิดจากการไหลของของไหล เป็นต้น ขนาดของผลการแปลงจะมีขนาดลดลงตามความผิดปกติของหัวฉีดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลของการจำลองการทำงานของหัวฉีดโดยไม่มีและมีการฉีดน้ำมัน เพื่อศึกษาความถี่ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณการสั่นสะเทือนซึ่งพบว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของการทำงานของหัวฉีดที่ไม่ฉีดน้ำมันจะเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำ และสัญญาณการทำงานของหัวฉีดที่มีการฉีดน้ำมันจะมีสัญญาณความถี่สูงและต่ำผสมกันแสดงดังรูปที่ 4.8(a) เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณดังกล่าวด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วพบว่า

สัญญาณการสั่นสะเทือนจะเกี่ยวข้องกับความเร็ว 2 ช่วงดังรูปที่ 4.8(b) คือ ช่วงต่ำกว่า 3000 Hz ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกลของหัวฉีด และช่วง 3000 – 6000 Hz น่าจะเกี่ยวกับกระบวนการของของไหลคือการฉีดน้ำมัน และสามารถพบเห็นในสัญญาณการสั่นสะเทือนของการทำงานของหัวฉีดที่เครื่องยนต์ทำงานจริงที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ



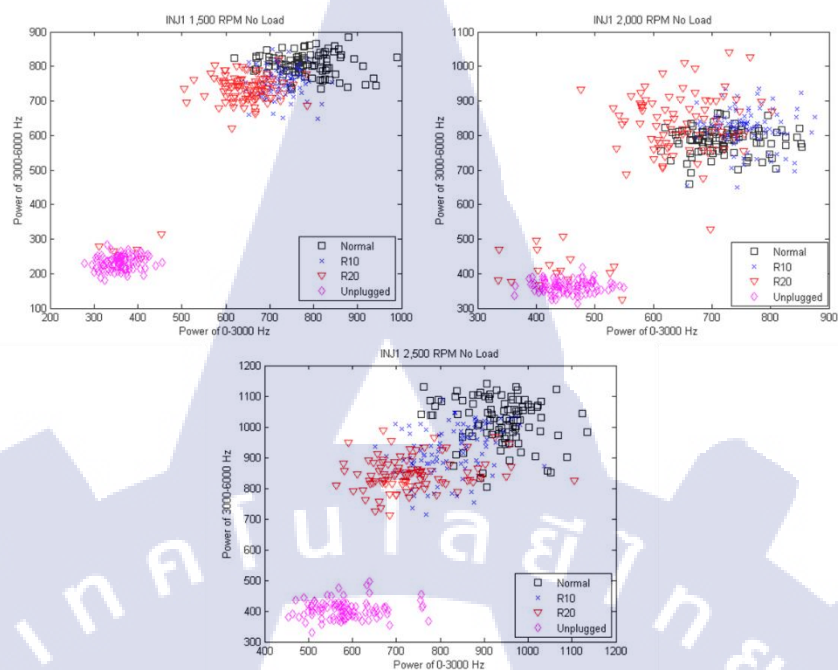
รูปที่ 4.7 ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ INJ1 ขณะเครื่องทำงานแบบไม่มีภาระ ที่ความเร็วรอบ 1500 RPM ที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ



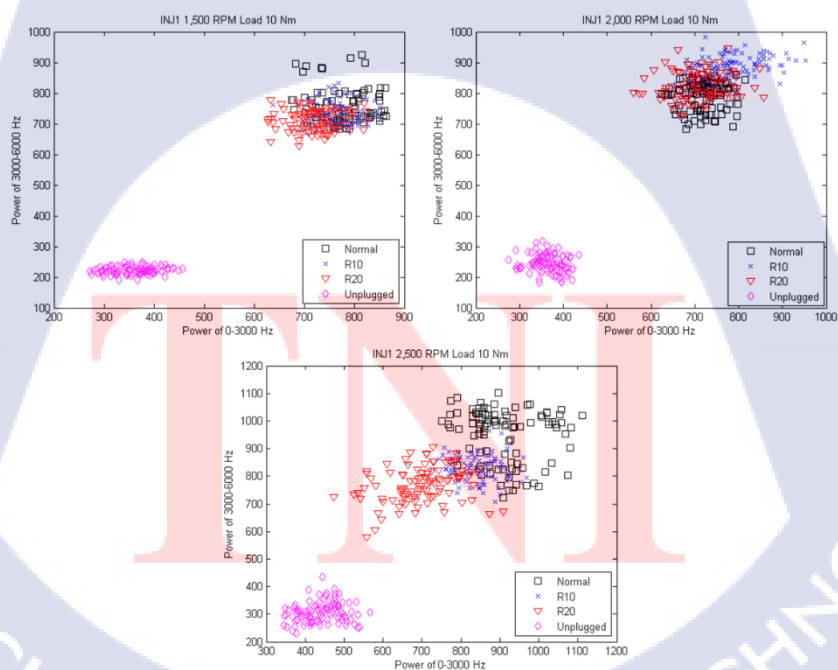
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของการทำงานของหัวฉีดจำลองแบบไม่ฉีดและฉีดน้ำมัน

ผลการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วสามารถใช้ตรวจสอบการทำงานของหัวฉีดได้ แต่ทั้งนี้ผู้ใช้จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณถึงจะสามารถอธิบายผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่ศึกษาได้ การศึกษานี้ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนจะประกอบด้วยความถี่ 2 ช่วงดังที่กล่าวในหัวข้อข้างต้น ความถี่ที่เกิดขึ้นทั้งสองช่วงจะมีรูปแบบไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากกระบวนการที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์จริงมีความซับซ้อนและประกอบด้วยหลายกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกลและทางของไหล ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ของการศึกษานี้จะใช้ค่ากำลังซึ่งคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความถี่ของแต่ละช่วงความถี่ที่พิจารณา อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยกราฟความถี่เพียงอย่างเดียวบางครั้ง หรือการใช้ค่าพารามิเตอร์เพียงค่าเดียวอาจจะแยกความแตกต่างของแต่ละเงื่อนไขการจำลองไม่ชัดเจน ดังนั้นการใช้การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ 2 ค่าจึงถูกนำมาใช้เพื่อแยกเงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ คือ ค่ากำลังของช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 3000 Hz และความถี่ช่วง 3000-6000 Hz

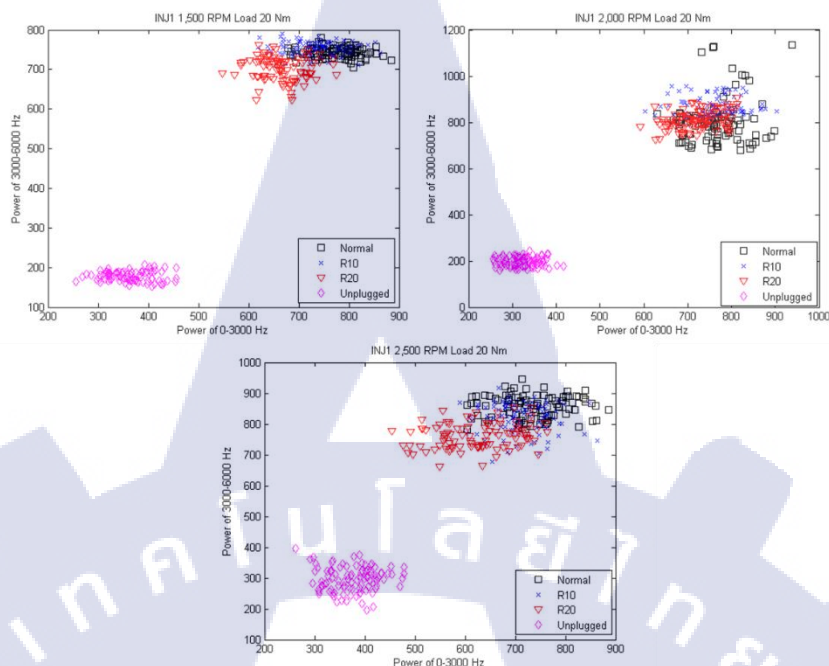
ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังทั้งสองช่วงความถี่ของสัญญาณ INJ1 ที่เงื่อนไขการจำลองหัวฉีดคือ หัวฉีดปกติ คอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม และหัวฉีดไม่ทำงานแทนด้วยสัญลักษณ์ Normal, R10, R20 และ Unplugged ตามลำดับ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ 1500, 2000 และ 2500 รอบต่อนาทีโดยไม่มีภาระ ภายใต้ภาระ 10 Nm และ 20 Nm แสดงดังรูปที่ 4.9 – รูปที่ 4.11 ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ INJ1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบ 1500, 2000 และ 2500 RPM พบว่าผลการเปรียบเทียบที่เครื่องยนต์ทำงานทุกช่วงความเร็วที่เงื่อนไขไม่มีภาระและมีภาระจะสามารถแบ่งชัดเจนเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มแรกเป็นเงื่อนไขของหัวฉีดไม่ทำงานและกลุ่มที่สองเป็นเงื่อนไขการจำลองที่เหลือ เมื่อพิจารณาเฉพาะกลุ่มที่สองจะพบว่าจะสามารถแยกเงื่อนไขการจำลองเป็นกลุ่มได้แต่บางส่วนขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2500 รอบต่อนาทีแบบไม่มีภาระดังรูปที่ 4.9 และภายใต้ภาระ 10 Nm ดังรูปที่ 4.10 ส่วนที่เงื่อนไขภาระ 20 Nm ดังรูปที่ 4.11 พอจะแยกได้แต่ไม่ชัดเจนกว่าสองเงื่อนไขดังกล่าว การตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องยนต์ที่อยู่ในรถยนต์ด้วยการเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ทำงานตามที่กำหนดทำได้ยาก แต่การตรวจสอบด้วยสภาวะที่เครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระทำได้ง่ายกว่า ดังนั้นการศึกษานี้จะใช้การจำลองที่ความเร็วรอบการทำงานของเครื่องยนต์ที่ 2,500 RPM ที่สภาวะเครื่องยนต์แบบไม่มีภาระในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการศึกษาดัง ๆ กับเงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ในเครื่องยนต์



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ INJ1 ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่สภาวะเครื่องยนต์แบบไม่มีภาระที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ

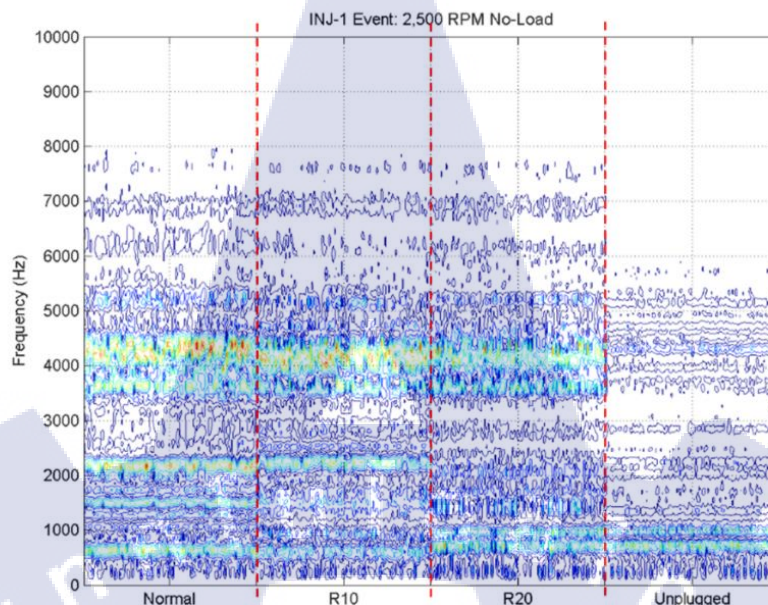


รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ INJ1 ที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่สภาวะเครื่องยนต์ภายใต้ภาระ 10 N·m ที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ INJ1 ที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่สภาวะเครื่องยนต์แบบมีภาระ 20 N·m ที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ

กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ของสัญญาณ INJ1 ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2,500 RPM ที่เงื่อนไขการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์แบบไม่มีภาระที่สภาวะปกติ (Normal) ความต้านทานที่คอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 10 โอห์ม (R10) ความต้านทานที่คอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 20 โอห์ม (R20) และหัวฉีดไม่ทำงาน (Unplugged) แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยที่แกนตั้งเป็นค่าความถี่ในหน่วย Hz ส่วนแกนนอนเป็นเงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ที่ 100 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ต่อเงื่อนไขการจำลอง ส่วนสีที่แตกต่างแสดงถึงขนาดของผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วซึ่งขนาดจะขึ้นอยู่กับสเกลสีจากสีน้ำเงินไปสีแดงหรือจากน้อยไปมาก เส้นประจะแสดงถึงเส้นแบ่งของเงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ความถี่ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของหัวฉีดจะเกิดขึ้น 2 ช่วงดังที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้าคือความถี่ที่เกิดในช่วง 0 - 3000 Hz เมื่อเครื่องยนต์ทำงานปกติจะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงเกิดขึ้นเนื่องมาจากการทำงานของกลไกของหัวฉีด และแอมพลิจูดจะลดต่ำลงเมื่อคอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้น และแอมพลิจูดมีค่าต่ำมากเมื่อมีการถอดปลั๊กหัวฉีด ส่วนความถี่ในช่วง 3000 - 6000 Hz ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการฉีดน้ำมันที่เป็นกระบวนการทางของไหล จะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงที่สภาวะปกติและจะมีค่าลดลงตามเงื่อนไขการจำลองความผิดปกติที่หัวฉีด และแอมพลิจูดมีค่าต่ำมากเมื่อหัวฉีดไม่ทำงาน แต่ในทุกเงื่อนไขจะปรากฏความถี่ที่ต่ำกว่า 1000 Hz คาดว่าน่าจะมาจากกระบวนการอื่น ๆ ในเครื่องยนต์ที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งติดตั้งของหัววัด



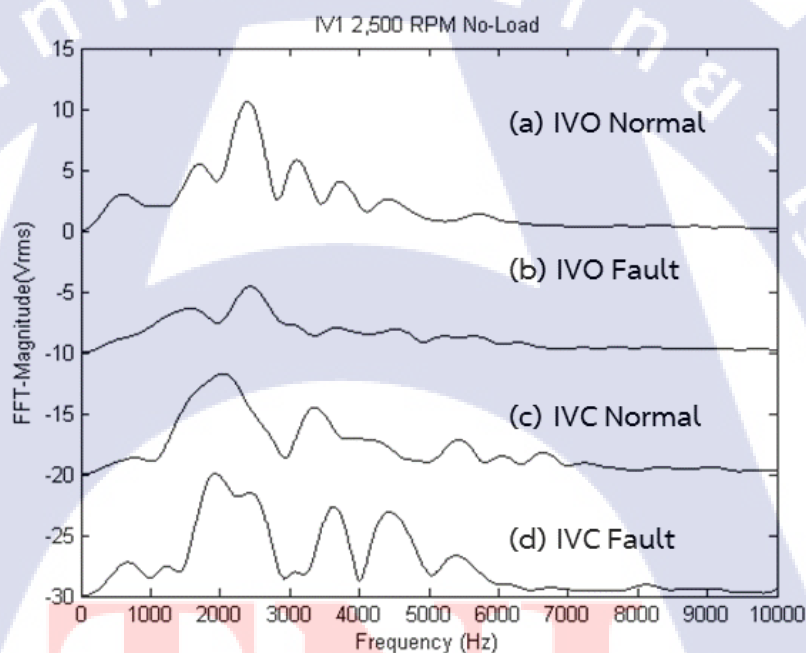
รูปที่ 4.12 กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลง FFT ของสัญญาณ INJ1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2500 RPM ที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ

4.4.2 สัญญาณการสันสเทือนการทำงานของวาล์วไอดี

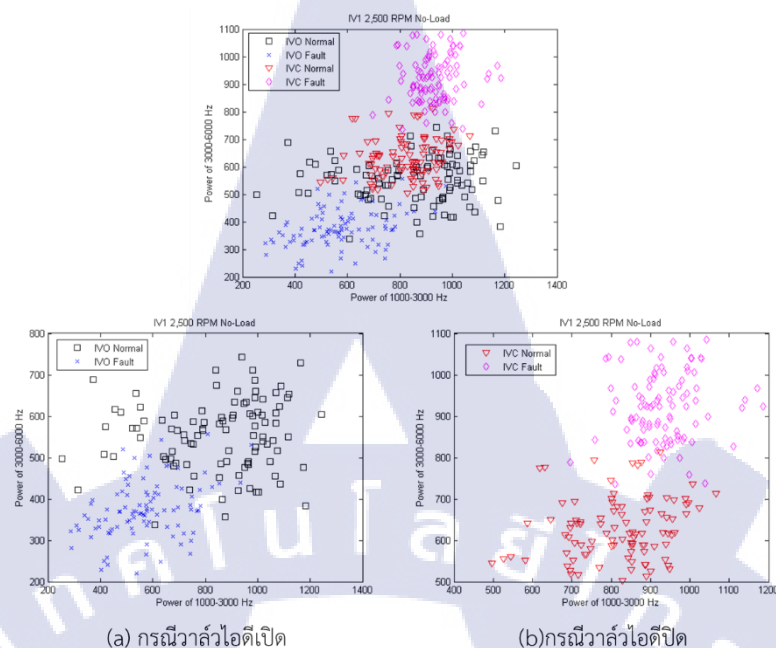
ผลการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณจากวาล์วไอดีของสูบที่ 1 (IV1) ที่ความเร็วรอบ 2,500 RPM แบบไม่มีภาระแสดงดังรูปที่ 4.13 ที่เงื่อนไขการทำงานที่ปกติของวาล์วไอดีสูบที่ 1 ขณะเปิด (IVO Normal) โดยระยะตั้งวาล์วไอดีที่ปกติเท่ากับ 0.15 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.13(a) การทำงานที่ผิดปกติของวาล์วไอดีสูบที่ 1 ขณะเปิด (IVO Fault) โดยระยะตั้งวาล์วไอดีที่ผิดปกติเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.13(b) การทำงานที่ปกติของวาล์วไอดีสูบที่ 1 ขณะปิด (IVC Normal) แสดงดังรูปที่ 4.13(c) และการทำงานที่ผิดปกติของวาล์วไอดีสูบที่ 1 ขณะปิด (IVC Fault) แสดงดังรูปที่ 4.13(d) พบว่าสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นจะมีอยู่ 2 ช่วงคือ ความถี่ช่วง 1000 – 3000 Hz ซึ่งน่าจะเกี่ยวข้องกับการกระแทกของเพลาลูกเบี้ยวกับกระต็องกวาล์ว และบ่าวาล์ว ในช่วงการเปิดและปิดของวาล์ว ส่วนความถี่ช่วง 3000 – 6000 Hz น่าจะเกี่ยวข้องกับการบวมการของของไหลเช่น การไหลของส่วนผสมอากาศและน้ำมันผ่านทางช่องไอดี

ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วจะถูกนำมาคำนวณและเปรียบเทียบค่ากำลังของแต่ละช่วงความถี่ การเปรียบเทียบค่ากำลังของช่วงความถี่ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังจะมีแกนตั้งเป็น ค่ากำลังของการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วที่ช่วงความถี่ 3000 – 6000 Hz ส่วนแกนนอนจะเป็นค่ากำลังของการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วที่ช่วงความถี่ 1000 – 3000 Hz ผลการ

เปรียบเทียบพบว่า การใช้การเปรียบเทียบค่ากำลังทั้งสองทุกเงื่อนไขการจำลองของวาล์วไอดีสูบที่ 1 สามารถแยกเงื่อนไขการจำลองออกได้เป็นกลุ่มแต่ไม่ครบทุกเงื่อนไข กลุ่มของข้อมูลที่สามารถแยกได้ชัดเจนคือ เงื่อนไข IVO Fault และ IVC Fault ส่วนข้อมูลที่ไม่สามารถแยกได้คือ เงื่อนไข IVO Normal และ IVC Normal หากพิจารณาเฉพาะแต่ละเหตุการณ์การทำงานของวาล์วไอดีเช่น เหตุการณ์วาล์วไอดีเปิด (IVO) ดังรูปที่ 4.14(a) หรือ วาล์วไอดีปิด (IVC) ดังรูปที่ 4.14(b) พบว่า ข้อมูลสามารถแยกออกเป็นกลุ่มได้ชัดเจนโดยกรณีของ IVO Fault จะมีค่ากำลังของทั้งสองช่วงความถี่ที่น้อยลง ส่วนกรณีของ IVC Fault จะมีค่ากำลังของทั้งสองช่วงความถี่ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทำงานของวาล์วไอดีจังหวะปิด สัญญาณการสั่นสะเทือนจะมีแอมพลิจูดที่สูงกว่าจังหวะวาล์วไอดีเปิด

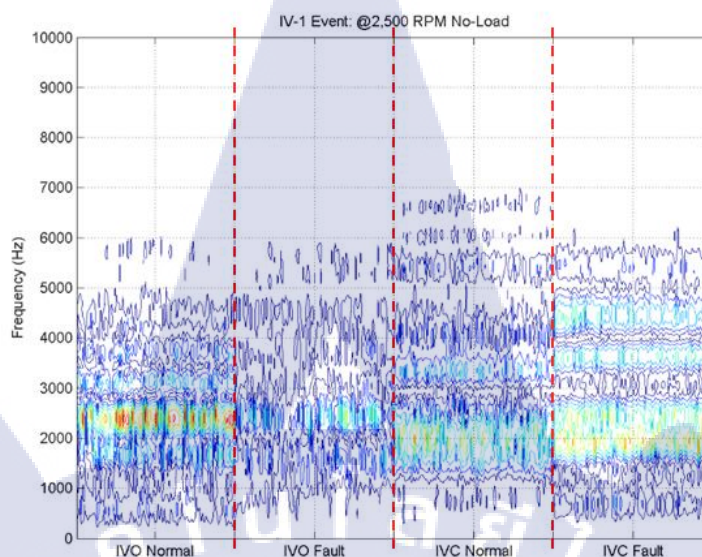


รูปที่ 4.13 ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ IV1 ขณะเครื่องทำงานที่ความเร็วรอบ 2,500 RPM แบบไม่มีภาระ ที่เงื่อนไขระยะตั้งวาล์วไอดีปกติและผิดปกติ



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ IV1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2,500 RPM แบบไม่มีภาระ ที่เงื่อนไขการตั้งระยะวาล์วเปิดปกติและผิดปกติ

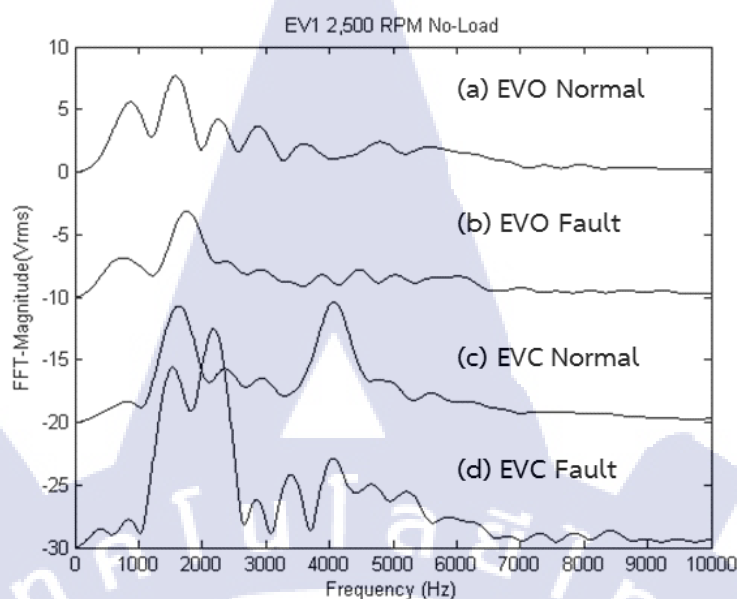
กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วของสัญญาณการทำงานของวาล์วไอดีสูบที่ 1 จังหวะเปิดและปิด ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2500 รอบต่อนาที ที่เงื่อนไขการจำลองการทำงานของวาล์วไอดีในสถานะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.15 กราฟคอนทัวร์จะมีแกนตั้งเป็นความถี่ในหน่วย Hz และแกนนอนเป็นเงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ เช่น EVO Normal, EVO Fault, EVC Normal, และ EVC Fault โดยแต่ละเงื่อนไขจะใช้ผลการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วแต่ละเงื่อนไขที่ 100 วิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์ ระดับสีที่แตกต่างจากน้ำเงินไปแดงแสดงถึงผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วจากค่าน้อยไปค่ามาก และเส้นประแสดงถึงเส้นแบ่งเงื่อนไขการจำลอง การเปรียบเทียบทุกเงื่อนไขพร้อมกันจะอธิบายได้ไม่ชัดเจนนัก เมื่อแยกพิจารณาเฉพาะกรณีของ IVO Normal และ IVO Fault พบว่าความถี่ที่เกิดในช่วง 1000 - 3000 Hz ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานขณะที่วาล์วไอดีเปิดที่สถานะปกติจะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงกว่าสถานะที่ผิดปกติ และความถี่ที่สูงกว่า 3000 Hz พบว่า IVO Normal จะมีแอมพลิจูดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำงานของวาล์วไอดีสูงกว่า ซึ่งอาจเกิดจากระยะตั้งวาล์วที่เพิ่มขึ้นจะทำให้จังหวะวาล์วเปิดช้ากว่าปกติส่งผลให้กระบวนการทำงานต่าง ๆ น้อยลงกว่าปกติ ขณะวาล์วไอดีปิดที่สถานะ IVC Fault จะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงกว่า IVC Normal ทั้งสองช่วงความถี่อย่างชัดเจน ซึ่งคาดว่าน่าจะมาจากการกระแทกของวาล์วในจังหวะวาล์วปิดที่แรงกว่าค่าปกติและการไหลของของไอเสียที่ไหลผ่านวาล์วไอดีที่แรงขึ้นจากการปิดของวาล์วที่เร็วขึ้น



รูปที่ 4.15 กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ IV1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2,500 RPM แบบไม่มีภาระ ที่เงื่อนไขระยะตั้งวาล์วไอดีปกติและผิดปกติ

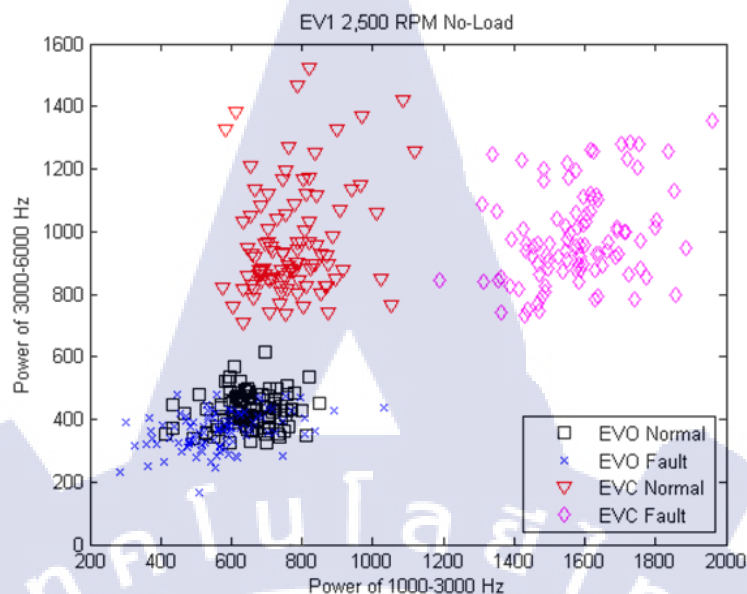
4.3 สัญญาณการสันสะเพื่อนการทำงานของวาล์วไอเสีย

ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณจากวาล์วไอเสียของสูบที่ 1 (EV1) ที่ความเร็วรอบ 2,500 RPM แบบไม่มีภาระแสดงดังรูปที่ 4.16 โดยมีเงื่อนไขการทำงานที่ปกติของวาล์วไอเสียขณะเปิด (EVO Normal) ดังรูปที่ 4.16(a) การทำงานที่ผิดปกติของวาล์วไอเสียขณะเปิด (EVO Fault) ดังรูปที่ 4.16(b) การทำงานที่ปกติของวาล์วไอเสียขณะปิด (EVC Normal) ดังรูปที่ 4.16(c) และการทำงานที่ผิดปกติของวาล์วไอเสียขณะปิด (EVC Fault) ดัง รูปที่ 4.16 (d) กราฟผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วจะมีแกนตั้งเป็นผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วในหน่วยรากกำลังสองของโวลต์ และความถี่เป็นแกนนอนในหน่วย Hz พบว่าสัญญาณการทำงานของวาล์วไอเสียจะประกอบด้วยความถี่ที่เกิดขึ้นจะมีอยู่ 2 ช่วง คือ ความถี่ช่วง 1000 – 3000 Hz ซึ่งสัญญาณส่วนนี้น่าจะเกิดจากการกระทบของเพลาลูกเบี้ยวกับกระตือองควาล์ว และบ่าวาล์วของวาล์วไอเสีย และความถี่ช่วง 3000 - 6000 Hz ซึ่งคาดว่าน่าจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางของไหลเช่น การไหลของไอเสียออกจากห้องเผาไหม้ผ่านวาล์วไอเสีย ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วแสดงให้เห็นว่าการทำงานของวาล์วไอเสียที่ระยะตั้งวาล์วผิดปกติขณะปิด หรือ IVC Fault จะมีขนาดแอมพลิจูดช่วงความถี่ต่ำค่อนข้างสูง เนื่องจากระยะตั้งวาล์วที่ผิดปกติมีค่าเท่ากับ 0.3 mm ซึ่งมากกว่าค่าปกติที่ 0.25 mm จึงทำให้แรงกระทบของวาล์วไอเสียกับบ่าวาล์วมีความแรงมากกว่าค่าปกติ



รูปที่ 4.16 ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ EV1 ขณะเครื่องทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2500 RPM ที่เงื่อนไขการจำลองของระยะตั้งวาล์วไอเสียปกติและผิดปกติ

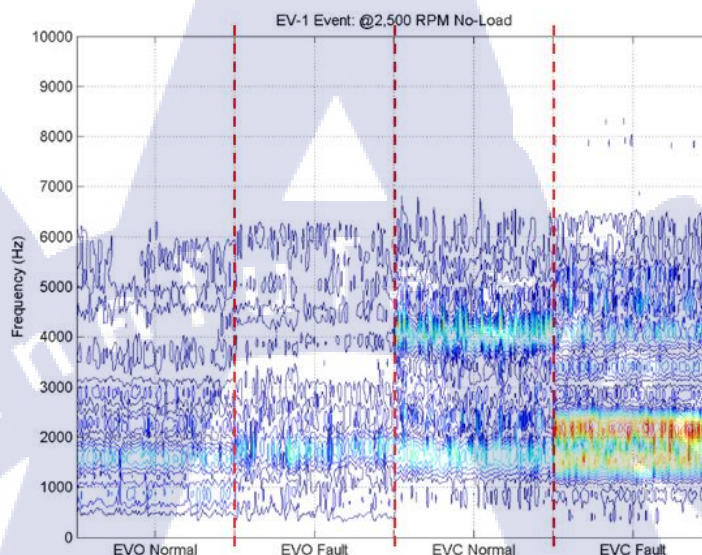
การเปรียบเทียบค่ากำลังของการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณการทำงานของวาล์วไอเสียขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2500 รอบต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 4.17 โดยสัญลักษณ์ EVO Normal, EVO Fault, EVC Normal และ EVC Fault แทนด้วยเงื่อนไขการจำลองเหตุการณ์การทำงานของวาล์วไอเสียเปิดปกติ วาล์วไอเสียเปิดผิดปกติ วาล์วไอเสียปิดปกติ และวาล์วไอเสียปิดผิดปกติ ตามลำดับ กรณีที่เครื่องยนต์ทำงานปกติจะมีระยะตั้งวาล์วไอเสียที่ 0.25 mm เมื่อเครื่องยนต์ทำงานผิดปกติจะมีระยะตั้งวาล์วไอเสียที่ 0.30 mm กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังจะมีแกนตั้งเป็นค่ากำลังของการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วในช่วงความถี่ 3000 – 6000 Hz ส่วนแกนนอนจะเป็นค่ากำลังของการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วในช่วงความถี่ 1000 – 3000 Hz เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่ากำลังทั้งสองช่วงความถี่ของการจำลองการทำงานของวาล์วไอเสียทุกเงื่อนไขที่ 100 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์พบว่า ค่ากำลังสามารถใช้แยกเงื่อนไขการจำลองออกเป็น 3 กลุ่มคือ EVC Normal, EVC Fault และ กลุ่มที่สามที่เงื่อนไข EVO Normal และ EVO Fault จะรวมกันจนแยกไม่ออก ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังทั้งสองช่วงความถี่จะสามารถใช้แยกได้เฉพาะเงื่อนไขการทำงานของวาล์วไอเสียขณะปิดเท่านั้นเนื่องจากเมื่อวาล์วไอเสียผิดปกติจะทำให้สัญญาณที่บันทึกได้ขณะวาล์วไอเสียปิดมีขนาดแอมพลิจูดที่ขึ้นในช่วงความถี่ต่ำ (1000 – 3000 Hz) สูงขึ้นจึงทำให้ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังช่วงความถี่ต่ำมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ส่วนผลการวิเคราะห์ค่ากำลังช่วงความถี่สูงจะมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณ EV1 ขณะเครื่องทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2500 RPM ที่เงื่อนไขการจำลองของระยะตั้งวาล์วไอเสียปกติและผิดปกติ

กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วของสัญญาณการทำงานของวาล์วไอเสียสูบที่ 1 จังหวะเปิดและปิด ขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2500 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขการจำลองการทำงานของวาล์วไอเสียในสถานะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.18 กราฟคอนทัวร์จะมีแกนตั้งเป็นความถี่ในหน่วย Hz และแกนนอนเป็นเงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ เช่น EVO Normal, EVO Fault, EVC Normal, และ EVC Fault โดยแต่ละเงื่อนไขจะใช้ผลการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วแต่ละเงื่อนไขที่ 100 วิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์ ระดับสีที่แตกต่างจากน้ำเงินไปแดงแสดงถึงผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วจากค่าน้อยไปค่ามาก และเส้นประแสดงถึงเส้นแบ่งเงื่อนไขการจำลอง เมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีของ EVO Normal และ EVO Fault พบว่าความถี่ที่เกิดในช่วง 1000 - 6000 Hz ไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนซึ่งสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบค่ากำลังดังรูปที่ 4.17 ส่วนกรณีของ EVC Normal และ EVC Fault จะสามารถมองเห็นความแตกต่างของกราฟคอนทัวร์ทั้งในช่วงความถี่ 1000 - 3000 Hz และ ช่วงความถี่ 3000 - 6000 Hz อย่างชัดเจน ผลของระยะตั้งวาล์วไอเสียที่ผิดปกติ 0.3 mm มีค่าสูงกว่าค่าปกติที่ 0.25 mm ทำให้สัญญาณช่วงความถี่ 1000 - 3000 Hz มีค่าแอมพลิจูดที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนทำให้จังหวะวาล์วปิดเกิดการกระแทกที่รุนแรงขึ้นจึงทำให้ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วมีค่าสูงขึ้นด้วย ส่วนช่วงความถี่สูง 3000 - 6000 Hz จะเห็นว่าเมื่อระยะตั้งวาล์วไอเสียผิดปกติจะส่งผลให้วาล์วเปิดช้าและปิดเร็วขึ้น ช่วงความถี่สูงซึ่งคาดว่าจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการของ

ของไอเสียจะมีปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นน้อยกว่าที่เงื่อนไขวาล์วไอเสียปกติอย่างชัดเจน การใช้กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วทำให้สามารถเห็นแนวโน้มของสัญญาณการทำงานของวาล์วไอเสียเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น



รูปที่ 4.18 กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ EV1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2,500 RPM ที่เงื่อนไขระยะตั้งวาล์วไอดีปกติและผิดปกติ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษากระบวนการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความถี่ ใช้ตรวจสอบกับเครื่องยนต์ยี่ห้อซูซูกิ รุ่น G16A เป็นเครื่องยนต์แกสโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะ 1600 CC มีการติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนที่รางหัวฉีดและฝาสูบระหว่างสูบที่ 1 และ 2 สามารถใช้ตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการทำงานของเครื่องยนต์ได้ โดยใช้สภาวะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ 2500 รอบต่อนาทีเป็นสภาวะที่สามารถใช้ตรวจสอบการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ได้ครบทุกกรณี การแปลงสัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาเป็นสัญญาณบนโดเมนมุมเพลาคือข้อเหวี่ยง จะทำให้สามารถระบุกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ได้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะกระบวนการทำงานของวาล์วไอดีและไอดีเสีย การทำงานของหัวฉีด เป็นต้น การวิเคราะห์สัญญาณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วสามารถใช้วิเคราะห์กระบวนการการทำงานของหัวฉีดและวาล์วไอดีและไอดีเสียได้ ซึ่งจะทำให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความถี่เมื่อหัวฉีดหรือวาล์วมีความผิดปกติเกิดขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 สัญญาณการสั่นสะเทือนการทำงานของหัวฉีด

การตรวจสอบการทำงานของหัวฉีดสูบที่ 1 ที่เงื่อนไขปกติ ความต้านทานคอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 10 โอห์ม และ 20 โอห์ม และหัวฉีดไม่ทำงาน ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

- ความถี่ของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของหัวฉีดแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ 0 – 3000 Hz และ 3000 – 6000 Hz ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกลในหัวฉีด และกระบวนการทางของไหลที่เกี่ยวกับการฉีดน้ำมัน ตามลำดับ
- ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณหัวฉีดจะมีค่าแอมพลิจูดที่ลดลงเมื่อความผิดปกติที่หัวฉีดเพิ่มขึ้น การเพิ่มความต้านทานให้คอยล์หัวฉีดจะทำให้คอยล์หัวฉีดยกตัวน้อยลงซึ่งจะทำให้หัวฉีดเปิดช้าและปิดเร็วขึ้น ส่งผลให้แอมพลิจูดของสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของหัวฉีดมีค่าน้อยลง

- การใช้การเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณหัวฉีดช่วงความถี่ 0 – 3000 Hz และ 3000 – 6000 Hz สามารถใช้แสดงแนวโน้มความผิดปกติของหัวฉีดตามเงื่อนไขการจำลองของหัวฉีดได้โดยแอมพลิจูดทั้งสองช่วงความถี่จะลดลงตามความผิดปกติของหัวฉีดที่เพิ่มขึ้น
- การใช้กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณหัวฉีดเพื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขการจำลองสามารถใช้แสดงแนวโน้มความผิดปกติของหัวฉีดที่เพิ่มขึ้นได้โดยแอมพลิจูดทั้งสองช่วงความถี่จะลดลงตามความผิดปกติของหัวฉีดที่เพิ่มขึ้น

5.1.2 สัญญาณการสันสะเทือนการทำงานของวาล์วไอดี

การตรวจสอบการทำงานของวาล์วไอดีสูกที่ 1 ที่เงื่อนไข IVO Normal, IVO Fault, IVC Normal และ IVC Fault โดยวาล์วไอดีปกติและผิดปกติจะมีระยะตั้งวาล์วที่ 0.15 mm และ 0.2 mm ตามลำดับ สัญญาณการสันสะเทือนการทำงานของวาล์วที่บันทึกได้จะวิเคราะห์ใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

- ความถี่ของสัญญาณการสันสะเทือนที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวาล์วไอดีแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ 1000 – 3000 Hz และ 3000 – 6000 Hz ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกลของการทำงานของวาล์วไอดีเช่น การกระแทกของวาล์วและบ่าวาล์วในจังหวะปิด และ กระบวนการทางของไหลของไอดีเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ตามลำดับ
- ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณการทำงานของวาล์วไอดีจะเกี่ยวข้องกับระยะตั้งวาล์ว ถ้าระยะตั้งวาล์วไอดีที่เพิ่มขึ้นจากค่าปกติจะทำให้ตำแหน่งการเปิดวาล์วไอดีช้าลงและปิดเร็วขึ้น ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ IVO จะมีค่าแอมพลิจูดที่ลดลงเมื่อระยะตั้งวาล์วไอดีผิดปกติหรือมีระยะเพิ่มขึ้น ส่วนผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ IVC จะมีค่าแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะตั้งวาล์วผิดปกติหรือมีระยะเพิ่มขึ้น
- การใช้การเปรียบเทียบค่ากำลังของช่วงความถี่ 1000 – 3000 Hz และ 3000 – 6000 Hz สามารถใช้แสดงแนวโน้มความผิดปกติของวาล์วไอดีตามเงื่อนไขการจำลองของวาล์วไอดีได้โดยต้องแยกพิจารณาเฉพาะแต่ละสัญญาณเช่น สัญญาณ IVO หรือ สัญญาณ IVC โดยสัญญาณ IVO จะมีค่ากำลังของช่วงความถี่ทั้งสองต่ำกว่าสัญญาณ IVC
- การใช้กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วเพื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขการจำลองสามารถใช้แสดงแนวโน้มความผิดปกติของวาล์วไอดีได้ โดยต้องแยกพิจารณาเฉพาะแต่ละสัญญาณเช่น สัญญาณ IVO หรือ สัญญาณ IVC กราฟคอนทัวร์ของสัญญาณ IVO และ IVC จะเห็นความแตกต่างเมื่อเกิดความผิดปกติที่ระยะตั้งวาล์วไอดี

5.1.3 สัญญาณการสันสะเทือนการทำงานของวาล์วไอเสีย

การตรวจสอบการทำงานของวาล์วไอเสียสลับที่ 1 ที่เงื่อนไข EVO Normal, EVO Fault, EVC Normal และ EVC Fault โดยวาล์วไอเสียปกติและผิดปกติจะมีระยะตั้งวาล์วที่ 0.25 mm และ 0.3 mm ตามลำดับ สัญญาณการสันสะเทือนการทำงานของวาล์วที่บันทึกได้จะวิเคราะห์ใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

- ความถี่ของสัญญาณการสันสะเทือนที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวาล์วไอเสียแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ 1000 – 3000 Hz และ 3000 – 6000 Hz ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวาล์วไอเสียเช่น การกระแทกของวาล์วและบ่าวาล์วในจังหวะปิด และ กระบวนการทางของไหลของไอเสียออกจากห้องเผาไหม้ผ่านวาล์วไอเสีย ตามลำดับ

- ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณการทำงานของวาล์วไอเสียจะเกี่ยวข้องกับระยะตั้งวาล์ว ถ้าระยะตั้งวาล์วไอเสียที่เพิ่มขึ้นจากค่าปกติจะทำให้ตำแหน่งการเปิดวาล์วไอเสียช้าลงและปิดเร็วขึ้น ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ EVO ที่ระยะตั้งวาล์วไอเสียปกติและผิดปกติมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่วนผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณ EVC จะมีค่าแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะตั้งวาล์วผิดปกติหรือมีระยะเพิ่มขึ้น

- การใช้การเปรียบเทียบค่ากำลังของสัญญาณไอเสียช่วงความถี่ 1000 – 3000 Hz และ 3000 – 6000 Hz สามารถใช้แสดงแนวโน้มความผิดปกติของวาล์วไอเสียได้โดยพิจารณาเฉพาะสัญญาณ EVC โดยสัญญาณ EVC ที่ระยะตั้งวาล์วผิดปกติจะมีค่ากำลังช่วงความถี่สูงเพิ่มขึ้นและแยกออกเป็นกลุ่มอย่างชัดเจน

- การใช้กราฟคอนทัวร์ของผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วเพื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขการจำลองสามารถใช้แสดงแนวโน้มความผิดปกติของวาล์วไอเสียได้เฉพาะสัญญาณ EVC เท่านั้น กราฟคอนทัวร์ของสัญญาณ EVC ปกติจะมีค่าแอมพลิจูดช่วงความถี่ 1000 – 3000 Hz ต่ำกว่าสัญญาณ EVC ผิดปกติ และมีค่าแอมพลิจูดช่วงความถี่ 3000 – 6000 Hz สูงกว่าสัญญาณ EVC ผิดปกติ

การศึกษากระบวนการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยใช้สัญญาณการสันสะเทือนด้วยการวิเคราะห์ความถี่โดยใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว สามารถใช้วิเคราะห์กระบวนการการทำงานของเครื่องยนต์ได้ทั้งส่วนกระบวนการทางกลและกระบวนการของของไหล นอกจากนี้ผลการศึกษาครั้งนี้ยังได้นำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลครั้งที่ 30, 5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา [21]

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาการตรวจสอบการทำงานของเครื่องยนต์เบนซินด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนยังจำเป็นต้องพัฒนาต่อไปเพื่อยืนยันความถูกต้องของสัญญาณที่บันทึกได้และวิธีการที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณ โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและระบุแหล่งที่มาของสัญญาณการสั่นสะเทือน โดยการติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งใกล้กับอุปกรณ์ หรือกลไกอื่น ๆ ของเครื่องยนต์

5.2.2 การศึกษาเพิ่มเติมในรอบการทำงานของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้น เพื่อนำผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนไปเปรียบเทียบกับกราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์

5.2.3 การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์สัญญาณแบบอื่น ๆ เพื่อให้การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็วขึ้น

5.2.4 การประยุกต์ใช้หัววัดอื่น ๆ เช่น หัววัดอุณหภูมิ ไมโครโฟน เป็นต้น เพื่อพัฒนาระบบตรวจวัดให้มีความสามารถในการประเมินสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ได้ถูกต้องและแม่นยำขึ้น

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] บรรจบ อรชร และคณะ, “วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์,” [Online]. Available: <http://www.gamerth.com/kengbboy/บทเรียนที่-3/วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์/>. [Accessed 15 ตุลาคม 2559].
- [2] P. Ster, "What is the Difference between DOHC and SOHC?," [Online]. Available: <http://24tieng.com/data/xeco/winner-ex.html>. [Accessed April 25, 2017].
- [3] GT-R Media, "Why Set the Valve?," [Online]. Available: <http://www.gtrmaxx.com/>. [Accessed May 10, 2017].
- [4] V. Makmee, "Valve Timing Diagram," [Online]. Available: <https://vallop-automechanics.blogspot.com/2012/05/valve-timing-diagram.html>. [Accessed April 25, 2017].
- [5] บุญส่ง เหมวัฒน์ และคณะ, “ระบบฉีดเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์,” [Online]. Available: http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Electronic_Fuel_Injection_System/unit1-2-3.html. [Accessed 15 กันยายน 2559].
- [6] V. Makmee, "Gasoline Fuel Injection System," [Online]. Available: <https://vallop-automechanics.blogspot.com/2012/05/gasoline-fuel-injection-system.html>. [Accessed June 1, 2012].
- [7] Autoditex, "Mono Injector," [Online]. Available: <http://autoditex.com/page/mono-injector-54-1.html>. [Accessed April 24, 2017].
- [8] K. Shyam, "What is the Major Differences between Carburettor, MPFI and GDI Systems?," [Online]. Available: <https://www.quora.com/What-is-the-major-differences-between-Carburettor-MPFI-and-GDI-Systems>. [Accessed April 24, 2017].
- [9] Carbon Cleaning, "Gasoline Direct Injection," [Online]. Available: <https://www.carboncleaningusa.com/technical/gasoline-direct-injection>. [Accessed April 24, 2017].

- [10] สุวัฒน์ พิทักษ์สุรชัย และคณะ, “การตรวจสอบสภาพเครื่องจักรจากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยวิธีการแปลงฮิลเบิร์ต,” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, MENETT 17*, จังหวัดปราจีนบุรี, 15-17 ตุลาคม 2546, ไม่ปรากฏเลขหน้า.
- [11] วชิรวิทย์ สงสุวรรณ์ และ พรชัย นิเวศน์รังสรรค์, “การตรวจสอบพัดลมอัดอากาศด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณอนุสติกอิมิชั่น,” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, MENETT 26*, จังหวัดเชียงราย, 24-25 ตุลาคม 2555, ไม่ปรากฏเลขหน้า.
- [12] 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, no. 6, pp. 619-625, November-December 2010.
- [13] A. T. Alisaraei et al., "Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and petrodiesel fuel blends," *Fuel*, vol. 102, pp. 414-422, July 2012.
- [14] F. Wang and S. Duan, "Fault diagnosis of diesel engine using vibration signals," *International Conference on Intelligent Computing and Information Systems, ICICIS 2011*, Chongqing, China, January 8-9, 2011, pp. 285-290.
- [15] N. Baydar and A. Ball, "Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 17, no. 4, pp. 787-804, 2003.
- [16] F. Gu et al., "The condition monitoring of diesel engines using acoustic measurements, Part 1 : Acoustic characteristics of the engine and representation of the acoustic signals," *Acoustic Characteristics of the Engine and Representation of the Acoustic Signals, SAE 2000 World Congress, Session: Noise & Vibration*, Detroit, USA, March 6-9, 2000, pp. 51-57.
- [17] A. D. Ball et al., "The condition monitoring of diesel engines using acoustic measurements, Part 2 : Fault detection and diagnosis," *Acoustic Characteristics of the Engine and Representation of the Acoustic Signals, SAE 2000 World Congress, Session: Noise & Vibration*, Detroit, USA, March 6-9, 2000, pp. 58-64.

- [18] J. D. Gill et al., "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 2000*, Paris, France, May 24-26, 2000, pp. 281-286.
- [19] ทรงพล กลิ่นชะเอม และ พรชัย นิเวศน์รังสรรค์, "การตรวจสอบสถานะของคอมเพรสเซอร์ด้วยสัญญาณเสียงและสัญญาณการสั่นสะเทือน," *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, MENETT 21*, จังหวัดชลบุรี, 17-19 ตุลาคม 2550, หน้า 735-74.
- [20] พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ และ ชัชชัย ไชยชนะ, "การตรวจสอบสถานะของพัดลมอัดอากาศด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน," *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, MENETT 24*, จังหวัดอุบลราชธานี, 19-22 ตุลาคม 2553, หน้า 1-8.
- [21] จิรพงศ์ สุชาติพิทย์ และ พรชัย นิเวศน์รังสรรค์, "การตรวจสอบสถานะเครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4 จังหวะด้วยการวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณ," *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, MENETT 30*, จังหวัดสงขลา, 5-8 กรกฎาคม 2559, หน้า 612-618.
- [22] S. Sinha, "Camshaft How It Works," [Online]. Available: <http://www.technicar.com/>. [Accessed 24 April 2017].
- [23] S. Chomphan and T. Kingrattanaset, "An analysis of sound for fault engine," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, pp. 1,005-1,009, 2014.
- [24] M. Shuster et al., "Piston ring cylinder liner scuffing phenomenon studies using acoustic emission technique.," *Advances in Powertrain Tribology, SP-1548*, New Delhi, India, January 13-15, 2000, pp. 23-35.
- [25] Q. Wang and F. Chu, "Experimental determination of the rubbing location by means of acoustic emission and wavelet transform," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 248, no. 1, pp. 91-103, March 2001.
- [26] A. K. Frances et al., "A study of the variability of acoustic emission signals from a medium size marine diesel engine under service condition," *Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management Proceedings of the 16th International Congress, COMADEM 2003*, Vaxjo, Sweden, August 17-29, 2003, pp. 503-512.

- [27] R. M. Douglas et al., "On-line power estimation of large diesel engines using acoustic emission and instantaneous crankshaft angular velocity," *International Journal of Engine Research*, vol. 7, pp. 399-410, February 2006.
- [28] A. Moosavian et al., "Spark plug fault recognition based on sensor fusion and classifier combination using Dempster-Shafer evidence theory," *Applied Acoustics* 93, vol. 93, pp. 120-129, 2015.
- [29] W. J. Staszewski and G. R. Tomlinson, "Local tooth fault detection in gearboxes using a moving window procedure," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 11, no. 3, pp. 331-350, 1997.
- [30] Y. Zhang et al., "Research on the fuzzy and dynamic monitoring of the diesel engine operating conditions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, IMechE* 1997, London, U.K, December 3, 1997, pp. 421-426.
- [31] เจษฎา เตชัสหงส์ และ ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ, "การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของคู่เฟืองตรงที่มีการสึกหรอ," ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, MENETT 18*, จังหวัดขอนแก่น, 18-20 ตุลาคม 2547, ไม่ปรากฏเลขหน้า.
- [32] V. Hariharan and P. Srinivasan, "Vibration analysis of parallel misaligned shaft with ball bearing system," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 61-68, January-February 2011.
- [33] Y. Cheng et al., "Identification of combustion timing based on the vibration acceleration of diesel engines," *Journal of Automobile Engineering*, vol. 226, no. 11, pp. 1,495-1,506, June 2012.
- [34] A. Sharma et al., "Misfire detection in an IC engine using vibration signal and decision tree algorithms," *Measurement*, vol. 50, pp. 370-380, January 2014.
- [35] J. Flett and G. M. Bone, "Fault detection and diagnosis of diesel engine valve trains," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 72-73, pp. 316-327, November 2015.