

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของกระบวนการทำงานเครื่องยนต์เบนซิน
ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ

วิศิษฐ์ สองเมือง

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีการศึกษา 2560

VIBRATION SIGNAL ANALYSIS OF PETROL ENGINE OPERATION USING STATISTICAL
PARAMETERS

Wisit Songmuang

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)

วิชชฐ สองเมือง : การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของกระบวนการทำงาน
เครื่องยนต์เบนซินด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์, 54 หน้า

การศึกษานี้จะศึกษาการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4
จังหวะ ขนาดความจุ 1600 CC ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน เครื่องยนต์ถูกจำลองสภาวะการทำงาน
ของเครื่องยนต์แบบไม่มีภาระ ที่สภาวะปกติ สภาวะความผิดปกติของระยะห่างของวาล์วไอดีและไอดี
เสีย และสภาวะการทำงานที่ผิดปกติของหัวฉีดเช่น หัวฉีดไม่ทำงาน ค่าความต้านทานของคอยล์หัวฉีด
เพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม โดยหัววัดการสั่นสะเทือน 2 ตัวจะติดตั้งที่ตำแหน่งฝาสูบและรางหัวฉีด
ตามลำดับ สัญญาณการสั่นสะเทือน สัญญาณตำแหน่งจุดศูนย์ตายบนของกระบอกสูบที่ 1 และ
สัญญาณความเร็วรอบจะถูกบันทึกพร้อมกันขณะเครื่องยนต์ทำงานที่รอบประมาณ 850–2500 รอบ
ต่อนาที

ผลการทดลองพบว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถนำมาตรวจสอบกระบวนการ การ
ทำงานต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ได้ การแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาเป็นสัญญาณบนโดเมนมุมเพลลาข้อ
เหวี่ยงจะทำให้สามารถอธิบายกระบวนการต่าง ๆ ตามวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ได้ง่ายขึ้น
สัญญาณการสั่นสะเทือนยังสามารถใช้อธิบายรายละเอียดการทำงานของหัวฉีดที่ปกติและผิดปกติซึ่ง
ทำให้ทราบตำแหน่งการเปิดและปิดของวาล์ว และช่วงเวลาการทำงานของแต่ละหัวฉีด การวิเคราะห์
สัญญาณด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติสามารถใช้วิเคราะห์ค่าต่าง ๆ เช่น ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ ค่าเบี่ยงเบน
มาตรฐาน ค่าความเบ้ และค่าความโด่ง ค่าพารามิเตอร์แต่ละค่าไม่สามารถแยกสภาวะของหัวฉีดได้
ครบทุกเงื่อนไข การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่าเช่น ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์เทียบกับค่าความโด่ง
ทำให้สามารถแยกสภาวะการทำงานของหัวฉีดได้ชัดเจนกว่าการใช้พารามิเตอร์ทางสถิติเพียงค่าเดียว
การใช้กราฟคอนทัวร์ซึ่งเป็นกราฟ 3 มิติแสดงผลเงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ทำให้สามารถเห็นความ
ผิดปกติของกระบวนการที่จำลองได้ชัดเจนและง่ายขึ้น การศึกษาต่อไปยังจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการ
วิเคราะห์สัญญาณ และการจำลองสภาวะของเครื่องยนต์เพิ่มเติมเพื่อให้วิธีการตรวจสอบด้วยสัญญาณ
การสั่นสะเทือนถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

บัณฑิตวิทยาลัย
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

WISIT SONGMUANG : VIBRATION SIGNAL ANALYSIS OF PETROL ENGINE
OPERATION USING STATISTICAL PARAMETERS. ADVISOR : ASST. PROF. DR.
PORNCHE NIVESRANGSAN, 54 PP.

This study is to monitor conditions of a 4-stroke, 4-cylinder, petrol engine with capacity of 1600 cc based on vibration signals. Various engine conditions with no load were simulated such as normal, clearance intake and exhaust valve faults, and various injector faults with 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 850 - 2500 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 valve opening and closing 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. 3D Contour plots were used to enhance and easily identify the simulated conditions with faults. 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 based on vibration signals.

Graduate School
Field of Engineering of Technology
Academic Year 2017

Student's Signature.....

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนให้การช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.เสถียรพงศ์ หุยนันท์ ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.วัชรินทร์ หนูทอง และ ดร.สมบัติ ทำนา ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ณรงค์ อนันควานิช ที่ให้การอนุเคราะห์สนับสนุนการเรียน และให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราคม เน็ดน้อย ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา อีกทั้งยังแนะนำความรู้ต่างๆในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่อนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์ สถานที่ ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ให้การอนุเคราะห์ทุนการศึกษา

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอบคุณอาจารย์ เพื่อนๆ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามใน ณ ที่นี้ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดีจากทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

วิศิษฐ์ สองเมือง

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ	5
2.2 ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง.....	9
2.3 หลักการทำงานของหัวฉีดเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์.....	11
2.4 การตรวจสอบความเสียหายของเครื่องยนต์	12
2.4 เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณ	16
3 วิธีการดำเนินงาน.....	23
3.1 กระบวนการวิจัย	23
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	23
3.3 ขั้นตอนการทดลองงานวิจัย	27

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
4	ผลการวิจัย.....	32
	4.1 การวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา.....	32
	4.2 การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนการจำลองหัวฉีดผิดปกติ	34
	4.3 การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนการจำลองวาล์วผิดปกติ	42
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	47
	5.1 สรุปผลการวิจัย.....	47
	5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
	บรรณานุกรม.....	49
	ประวัติย่อผู้วิจัย	54

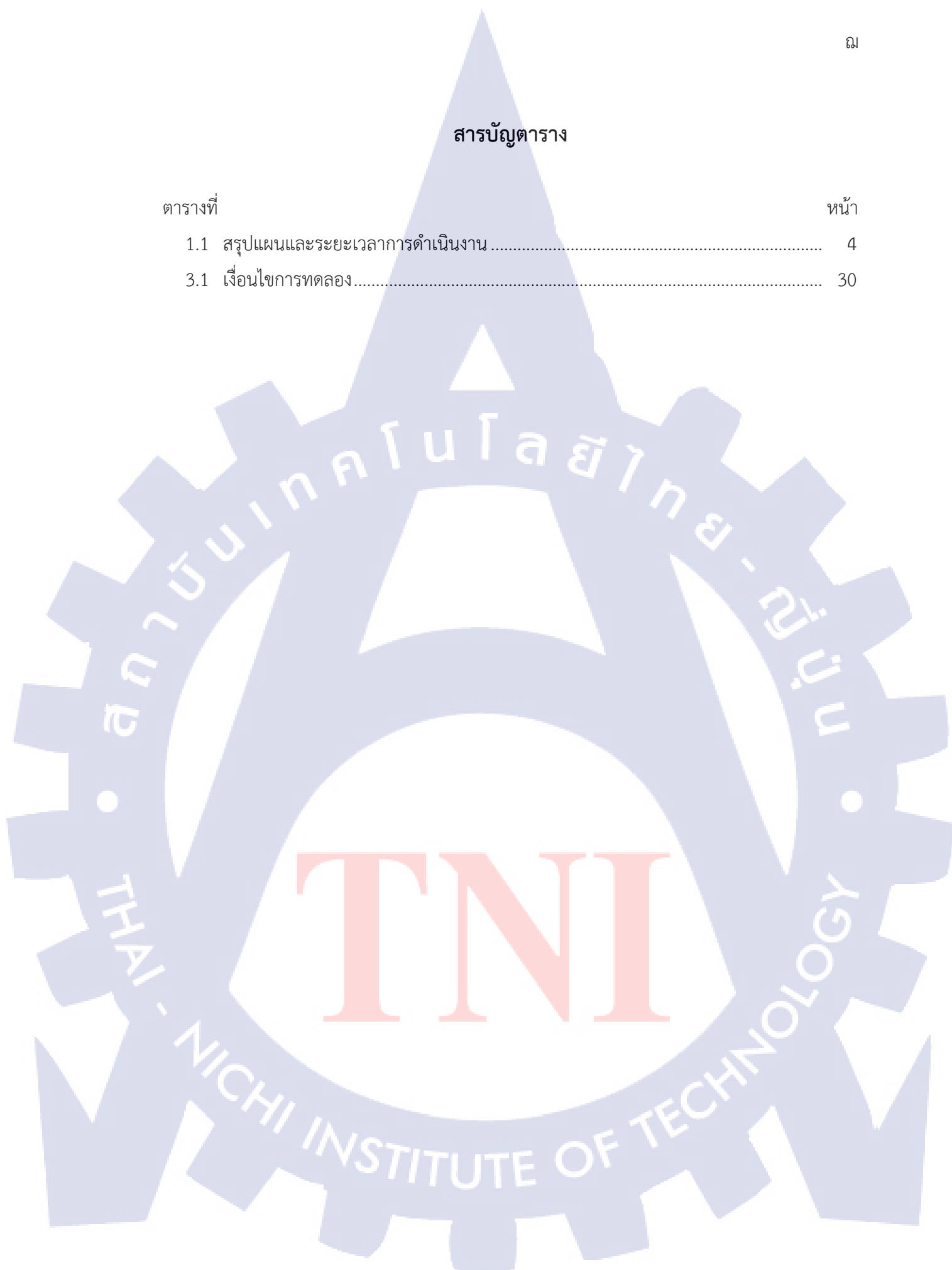


TNII

THAMMASARAKORN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สรุปแผนและระยะเวลาการดำเนินงาน	4
3.1 เงื่อนไขการทดลอง.....	30



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน.....	6
2.2	ระบบกลไกของวาล์ว.....	7
2.3	กลไกของวาล์วแบบ OHV	8
2.4	กลไกของวาล์วแบบ SOHC.....	9
2.5	กลไกของวาล์วแบบ DOHC	9
2.6	ระบบเชื้อเพลิง.....	11
2.7	ส่วนประกอบหัวฉีดเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์.....	12
2.8	ระบบตรวจวัดคลื่นด้วยคูลสติกอิมิชัน	15
2.9	ตัวอย่างหัววัดคูลสติกอิมิชัน.....	15
2.10	การแจกแจงความเบ้.....	18
2.11	การแจกแจงความโค้ง	19
2.12	ตัวอย่างสัญญาณบนโดเมนเวลา.....	20
2.13	ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ต	22
3.1	เครื่องยนต์ซูซูกิพร้อมไดนาโมมิเตอร์	23
3.2	หัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือน	24
3.3	อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Encorder)	24
3.4	ชุดปรับปรุงสัญญาณ	25
3.5	อุปกรณ์เก็บข้อมูล	26
3.6	คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม	26
3.7	ตำแหน่งติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนบนเครื่องยนต์ทดสอบ	27
3.8	ตำแหน่งติดตั้ง Encoder	28
3.9	การทดลองในสภาวะเครื่องยนต์ปกติ	28
3.10	การทดลองด้วยการจำลองระยะห่างวาล์วไอดีผิดปกติ.....	29
3.11	การทดลองด้วยการจำลองระยะห่างวาล์วไอเสียผิดปกติ	29
3.12	การทดลองด้วยการจำลองหัวฉีดผิดปกติ.....	30
3.13	แผนภาพการวัดสัญญาณและจัดเก็บข้อมูล.....	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาขณะเครื่องยนต์ทำงานปกติแบบไม่มี ภาระที่ความเร็วรอบประมาณ 850 rpm	33
4.2 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเฟลาข้อเหวี่ยงขณะเครื่องยนต์ทำงานปกติแบบไม่มี ภาระที่ความเร็วรอบประมาณ 850 rpm	33
4.3 สัญญาณการสั่นสะเทือนของหัวฉีดที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ.....	34
4.4 สัญญาณการสั่นสะเทือนของกลไกหัวฉีดที่เงื่อนไขต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบประมาณ 1500 รอบต่อนาที	35
4.5 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของหัวฉีดสูบที่ 1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะ ต่าง ๆ	36
4.6 ช่วงองศาการทำงานของหัวฉีดสูบที่ 1.....	36
4.7 กราฟเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่าของสัญญาณหัวฉีดสูบที่ 1 ที่เงื่อนไข ต่าง ๆ ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 1500 รอบต่อนาทีแบบไม่มีภาระ.....	38
4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความโด่งและค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยของสัญญาณหัวฉีดสูบที่ 1 ที่เงื่อนไข ต่าง ๆ แบบไม่มีภาระขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบต่าง ๆ.....	39
4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความโด่งและค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยของสัญญาณหัวฉีดสูบที่ 1 ที่เงื่อนไข ต่าง ๆ ภายใต้ภาระขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2500 รอบต่อนาที.....	40
4.10 กราฟเปรียบเทียบค่าความโด่งและค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยของสัญญาณหัวฉีดสูบที่ 1 ที่เงื่อนไข ต่าง ๆ แบบไม่มีภาระขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2500 รอบต่อนาที.....	40
4.11 กราฟคอนทัวร์ของค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณหัวฉีดที่สภาวะต่าง ๆ ขณะเครื่องยนต์ทำงาน ที่ 2500 รอบต่อนาที	41
4.12 ตำแหน่งองศาการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียของสูบที่ 1 ในสัญญาณสั่นสะเทือน	42
4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยและค่าความโด่งของสัญญาณการเปิดของ วาล์วไอดี (IVO) ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ	43
4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยและค่าความโด่งของสัญญาณการปิดของ วาล์วไอดี (IVC) ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ.....	44
4.15 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนการทำงานของวาล์วไอเสีย (EVO) ขณะเครื่องยนต์ ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ.....	45

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16	กราฟเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยและค่าความโค้งของสัญญาณการเปิดของวาล์วไอเสีย (EVO)ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ 46
4.17	กราฟเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยและค่าความโค้งของสัญญาณการปิดของวาล์วไอเสีย (EVC)ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ 46



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องยนต์เป็นส่วนหลักที่อยู่ในรถยนต์ เครื่องยนต์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างมากเพราะเป็นต้นกำลังของรถยนต์ เป็นเครื่องจักรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานทางกล เมื่อเชื้อเพลิงกับอากาศถูกผสมภายในกระบอกสูบจะทำให้เกิดการจุดระเบิดก่อให้เกิดพลังงานกลที่ส่งแรงการหมุนของเครื่องยนต์ผ่านชุดเกียร์และส่งไปหมุนขับเคลื่อนล้อรถ ทำให้รถยนต์เคลื่อนที่ไปได้ เครื่องยนต์ที่ใช้ในปัจจุบันมี 2 ชนิดคือ เครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล ความแตกต่างของเครื่องยนต์เบนซินและดีเซลคือระบบการจุดระเบิด เครื่องยนต์เบนซินจะใช้น้ำมันเบนซินผสมกับอากาศ และของผสมดังกล่าวจะถูกอัดให้มีความดันสูงขึ้น แล้วทำให้เกิดประกายไฟด้วยหัวเทียนจึงทำให้ของผสมเกิดการระเบิดขึ้น แต่เครื่องยนต์ดีเซลจะอัดอากาศภายในกระบอกสูบให้มีความดันสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น ต่อจากนั้นหัวฉีดจะฉีดน้ำมันดีเซลเข้าไปเป็นฝอยละอองทำให้เกิดการจุดระเบิดขึ้น

เครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลเมื่อผ่านการใช้งานจะทำให้ชิ้นส่วนเกิดความสึกหรอ หากไม่ตรวจสอบหรือบำรุงรักษาอาจจะทำให้เครื่องยนต์หรือเครื่องจักรเกิดความเสียหายหนักกว่าเดิม ความผิดปกติที่มักเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์คือ ระยะห่างของวาล์วที่ผิดปกติจากค่ามาตรฐานเนื่องจากการใช้งาน การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผิดปกติจากการทำงานของหัวฉีด การไม่เกิดการจุดระเบิดจากปัญหาในระบบจุดระเบิด การสึกหรอของชิ้นส่วนที่ขาดการหล่อลื่นเนื่องจากปัญหาในระบบหล่อลื่น เสียงที่เกิดจากการสึกหรอของแบริ่งปั้มน้ำเครื่องยนต์ เป็นต้น การตรวจสอบความผิดปกติข้างต้นบางครั้งการอ่านข้อมูลจากกล่องควบคุมจะไม่สามารถตรวจสอบความผิดปกติทางกลได้

การตรวจสอบสถานะของเครื่องจักรกลและชิ้นส่วนหมุนด้วยการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนได้มีการใช้ในการตรวจสอบเครื่องจักรกลหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ หลายประเภทเช่น เทอร์โบดีเซล ปั้มน้ำมัน เครื่องยนต์ คอมเพรสเซอร์ แบริ่ง เฟือง เป็นต้น สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้สามารถนำมาใช้วิเคราะห์กระบวนการหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องจักรกลหรือชิ้นส่วนต่างๆได้ เพื่อช่วยป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

การตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์ที่สามารถบ่งชี้ข้อมูลเกี่ยวกับวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์ได้อย่างชัดเจน เพราะการตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์จะช่วยป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้ ปัจจุบันการตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องยนต์ได้มีความพยายามพัฒนาอุปกรณ์การวัดต่างๆเช่น หัววัดการ

สัญญาณการสั่นสะเทือน (Accelerometer) หัววัดอคูสติกอิมิชัน (Acoustic Emission) และ ไมโครโฟน เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้ใช้ในการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจากเครื่องยนต์ เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปอธิบายการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องยนต์และระบุความผิดปกติทางกลของเครื่องยนต์ การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยหัววัดการสั่นสะเทือนเป็นอุปกรณ์ที่นักวิจัยนิยมนำมาใช้เนื่องจากมีราคาที่ไม่สูงมาก ติดตั้งง่ายและมีความสามารถในการวัดได้ดี

การตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องยนต์ด้วยการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนมีเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณที่นิยมใช้คือ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคบนโดเมนเวลา (Time domain analysis) ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณ เช่น การวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ (Statistical analysis) [1, 2, 3] เช่น ค่าเฉลี่ย ค่ารากกำลังสอง ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง เป็นต้น การวิเคราะห์สัญญาณด้วยเทคนิคบนโดเมนความถี่ (Frequency domain analysis) โดยการใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) [4, 5, 6] เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาและความถี่ (Time-frequency domain) [7, 8, 9] เช่น แปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (Short Time Fourier Transform, STFT) การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform, WT) [10, 11] การวิเคราะห์สัญญาณโดยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ (Statistical analysis) เป็นวิธีที่นักวิจัยหลายคนนิยมนำมาใช้และเป็นเทคนิคที่น่าสนใจในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน เพื่อให้สามารถประเมินความผิดปกติของเครื่องยนต์ได้ง่ายขึ้น

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบเครื่องยนต์ที่ใช้สัญญาณสั่นสะเทือนและใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติเช่น เรื่องการตรวจสอบสถานะความผิดปกติระยะห่างวาล์วของเครื่องยนต์เบนซินสี่จังหวะขนาดเล็ก [1] โดยใช้เครื่องยนต์ขนาดเล็ก 4 จังหวะสูบเดียว วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ด้วยหัววัดการสัญญาณการสั่นสะเทือน ใช้การจำลองระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสียที่ระยะห่างต่างๆ การศึกษานี้ได้วิเคราะห์สัญญาณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ค่าพลังงาน (Energy analysis) สัญญาณการสั่นสะเทือนจากฝาสูบถูกนำมาอธิบายการทำงานของเครื่องยนต์เช่น การทำงานของวาล์วไอดี ไอเสีย การจุดระเบิดและกระบวนการเผาไหม้ สัญญาณการสั่นสะเทือนถูกนำมาตรวจสอบความผิดปกติต่าง ๆ ในเครื่องยนต์เช่น ความผิดปกติของระยะห่างวาล์วกับกระดิ่งกดวาล์ว สัญญาณที่ได้มาในรูปแบบโดเมนเวลา ถูกแปลงเป็นรูปแบบของโดเมนมุมเพลาคือ (Crank angle domain) โดยเริ่มจากตำแหน่งศูนย์ตายบน ใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยโดเมนเวลา เพื่ออธิบายการทำงานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์และประเมินความผิดปกติของเครื่องยนต์ซึ่งทำให้เห็นสัญญาณที่แตกต่างกันและตำแหน่งการเปิด-ปิดของวาล์วที่เปลี่ยนไป การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณความผิดปกติที่ได้จากสัญญาณการสั่นสะเทือน ควรจะเปรียบเทียบกับสัญญาณอื่นๆเช่น สัญญาณความดัน เพื่อความถูกต้องและแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการตรวจสอบสถานะการทำงานของ

เครื่องยนต์เบนซินด้วยการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน โดยการจำลองความผิดปกติให้กับเครื่องยนต์ และใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการตรวจสอบสภาพเครื่องยนต์เบนซินด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน

1.2.2 เพื่อประยุกต์วิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติบน โดเมนมุมเพลาคือเชิง

1.3 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะเน้นการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อวิเคราะห์ความผิดปกติของเครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4 จังหวะ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.3.1 ตรวจสอบจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ดังนี้

- 850 รอบต่อนาที
- 1500 รอบต่อนาที
- 2000 รอบต่อนาที
- 2500 รอบต่อนาที

1.3.2 การตรวจสอบสภาวะทำงานของเครื่องยนต์ที่สภาวะปกติ

- ระยะตั้งลิ้นของวาล์วไอดี 0.15 มิลลิเมตร
- ระยะตั้งลิ้นของวาล์วไอเสีย 0.25 มิลลิเมตร
- ค่าความต้านทานหัวฉีด 12.7 โอห์ม

1.3.3 การจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ที่สภาวะผิดปกติ

- จำลองความผิดปกติของระยะตั้งลิ้นวาล์วไอดี 0.20 มิลลิเมตร
- จำลองความผิดปกติของระยะตั้งลิ้นวาล์วไอเสีย 0.30 มิลลิเมตร
- จำลองความผิดปกติที่หัวฉีดสูบที่ 4 ด้วยการให้หัวฉีดหยุดทำงาน
- จำลองความผิดปกติที่หัวฉีดสูบที่ 4 ด้วยการเพิ่มความต้านทานรวมเป็น 22.7 โอห์ม
- จำลองความผิดปกติที่หัวฉีดสูบที่ 4 ด้วยการเพิ่มความต้านทานรวมเป็น 32.7 โอห์ม

1.3.4 ใช้หัววัดการสัญญาณการสั่นสะเทือน (Accelerometer) อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Encoder) ชุดขยายสัญญาณ (Signal conditioning unit) อุปกรณ์เก็บข้อมูล ((Data acquisition device) และ คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม LabVIEW

1.3.5 การวิเคราะห์สัญญาณทั้งหมดจะใช้โปรแกรม MATLAB

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถตรวจวัดสัญญาณที่สภาวะการทำงานปกติและสภาวะการทำงานที่ผิดปกติของเครื่องยนต์ได้

1.4.2 สามารถวิเคราะห์ความผิดปกติของเครื่องยนต์จากสัญญาณการสั่นสะเทือนได้

1.4.3 เป็นแนวทางในการตรวจสอบสภาวะของเครื่องยนต์ในความผิดปกติอื่นๆหรือเครื่องยนต์ชนิดอื่นๆ

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 สรุปแผนและระยะเวลาการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปี 2559					ปี 2560	
	1-5	6-8	9	10	11-12	1-4	5
1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง							
2 ทบทวนวรรณกรรม							
3 ติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง							
4 ทำการทดลองและเก็บข้อมูล							
5 วิเคราะห์ข้อมูล							
6 สรุปผลการทดลอง							
7 นำเสนอผลงาน							

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ

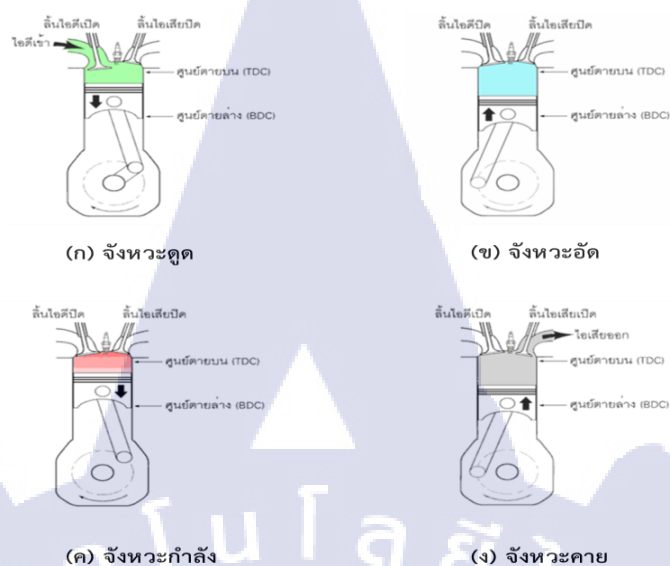
เครื่องยนต์เบนซินที่ในปัจจุบันเป็นเครื่องยนต์ประเภทเครื่องยนต์สันดาปภายใน ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในกระบอกสูบเป็นพลังงานกล เครื่องยนต์เป็นต้นกำเนิดพลังในการขับเคลื่อน การที่เครื่องยนต์จะทำงานได้ภายในเครื่องยนต์จะมีชิ้นส่วนต่างๆทำงานประสานกันเป็นจังหวะ ใช้การจุดประกายไฟด้วยหัวเทียนเพื่อให้เกิดการจุดระเบิดในกระบอกสูบ สร้างแรงดันเพื่อดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ส่งต่อกำลังผ่านก้านสูบไปถ่ายเทให้กับเพลาคอเหวี่ยง เพลาคอเหวี่ยงซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่ขึ้นลงจากแนวตั้งเป็นการเคลื่อนที่ในแนวเส้นรอบวง เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ไปมา จะไปดึงเพลาคอเหวี่ยงหมุนไปด้วยยิ่งเคลื่อนที่เร็วเท่าไรเพลาคอเหวี่ยงจะหมุนเร็วมากขึ้นเท่านั้น และจะส่งกำลังผ่านชุดเกียร์ เพลาลงไปหมุนขับเคลื่อนล้อรถ เพื่อให้รถยนต์เกิดการเคลื่อนที่ไปได้

2.1.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ

เครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ ในการทำงาน 1 วัฏจักรวัฏจักรประกอบด้วย 4 จังหวะคือ ดูดอัด ระเบิด และคาย การประจุไอดีและคายไอเสียมีกลไกการเปิด - ปิดลิ้นไอดีและลิ้นไอเสีย เครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะทำงาน 1 วัฏจักร เพลาคอเหวี่ยงจะหมุน 2 รอบและเพลาลูกเบี้ยวจะหมุน 1 รอบ การจุดระเบิดจะเกิดขึ้น 1 ครั้ง ตำแหน่งที่ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นสูงสุดภายในกระบอกสูบเรียกว่า จุดศูนย์ตายบน (Top Dead Center หรือ TDC) และตำแหน่งที่ลูกสูบเคลื่อนที่ลงต่ำสุดเรียกว่า จุดศูนย์ตายล่าง (Bottom Dead Center หรือ BDC) แต่ละจังหวะการทำงานมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ [12]

1 จังหวะดูด (Suction stroke) เป็นจังหวะที่ลิ้นไอดีเปิด ลิ้นไอเสียปิดดังรูปที่ 2.1(ก) ไอดี (อากาศผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิง) ถูกดูดจากการเคลื่อนที่ลงของลูกสูบจากจุดศูนย์ตายบน ลงมายังจุดศูนย์ตายล่าง (BDC) ทำให้เกิดสุญญากาศในกระบอกสูบ ดูดไอดีเข้ากระบอกสูบ

2 จังหวะอัด (Compression stroke) หลังจากจังหวะดูด ลิ้นไอดีจะถูกปิดดังรูปที่ 2.1(ข) ลิ้นไอเสียยังปิดอยู่ ลูกสูบจะเคลื่อนที่จากจุดศูนย์ตายล่าง ขึ้นสู่จุดศูนย์ตายบน ไอดีจะถูกอัดตัวให้มีปริมาตรลดลง ทำให้เกิดความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.1 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน [13]

3. จังหวะกำลัง (Power stroke) ก่อนที่ลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นถึงจุดศูนย์บน (TDC) ในจังหวะอัด หัวเทียนจะจุดประกายไฟ ดังรูปที่ 2.1(ค) ไอ้เมื่อถูกประกายไฟจะเกิดการลุกไหม้ขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดแรงดันทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ลงสู่จุดศูนย์ตายล่าง (BDC) เกิดกำลังงานไปขับเคลื่อนเพลาคือเหวี่ยง

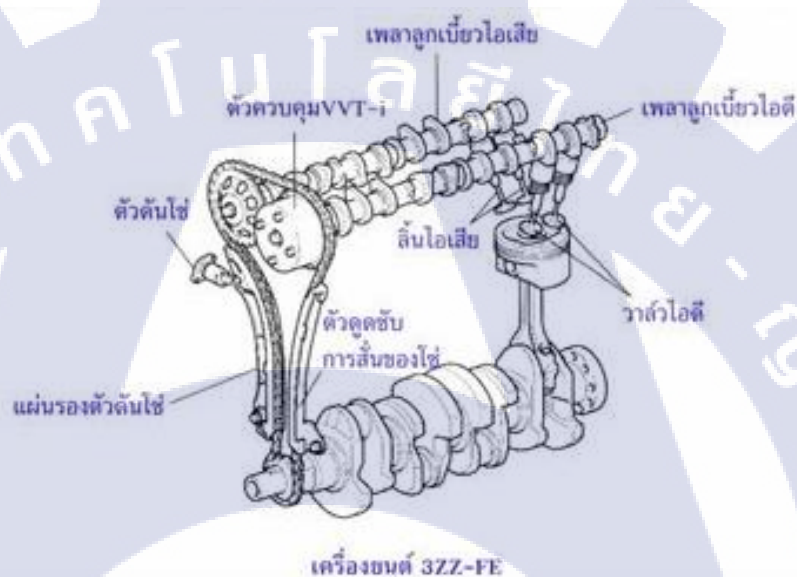
4. จังหวะคาย (Exhaust stroke) หลังจากจังหวะกำลัง ลิ้นไอเสียจะถูกเปิดด้วยกลไกของลิ้น ลูกสูบจะเคลื่อนที่จากจุดศูนย์ตายล่าง (BDC) ขึ้นสู่จุดศูนย์ตายบน (TDC) เพื่อดันแก๊สไอเสียที่ออกไปจากกระบอกสูบ ดังรูปที่ 2.1(ง) ลิ้นไอเสียจะปิดเมื่อลูกสูบอยู่ในตำแหน่งจุดศูนย์ตายบน (TDC) ลิ้นไอดีจะเริ่มเปิดเพื่อเริ่มจังหวะดูดอีกครั้ง เครื่องยนต์จะทำงานต่อเนื่องเป็นกลวัฏต่อไปเรื่อยๆจนกว่าจะตัดการจุดระเบิดหรือตัดการจ่ายน้ำมัน เครื่องยนต์จึงจะหยุดทำงาน

การที่เครื่องยนต์จะทำงานเป็นวัฏจักรได้ภายในเครื่องยนต์จะมีชิ้นส่วนต่าง ๆ ทำงานประสานกันเป็นจังหวะประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ฝาครอบวาล์ว ฝาสูบ เสื้อสูบ ลิ้นและกลไกของลิ้น ลูกสูบ ก้านสูบ เพลาคือเหวี่ยง ระบบไทมิ่ง ล้อช่วยแรง ชิ้นส่วนเคลื่อนที่ ที่เกิดการสึกหรอได้ง่ายที่สุดคือ ลิ้น เพราะเป็นชิ้นส่วนที่ต้องถูกระแทก เสียดสี ได้รับความร้อน โดยที่ได้รับการหล่อลื่นน้อยที่สุด

2.1.2 ลิ้นหรือวาล์ว

ลิ้นหรือวาล์ว (Valve) ทำหน้าเปิดให้ไอ้ไหลผ่านเข้ากระบอกสูบและเปิดให้ไอเสียออกจากกระบอกสูบตามจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ดังรูปที่ 2.3 เครื่องยนต์ส่วนใหญ่ใช้ลิ้นแบบดอกเห็ด

(Poppet valve) ซึ่งเปิดด้วยกลไกของลูกเบี้ยวและปิดด้วยแรงจากสปริง ล้วนทำจากเหล็กกล้า ด้านหนึ่งของลิ้นมีลักษณะเป็นหน้าแบนวงกลม ที่บริเวณรอบของหน้าแบนนี้จะเป็นจุดสัมผัสกับฝาสูบ (Cylinder head) ส่วนที่ลิ้นสัมผัสกับฝาสูบขณะปิดเรียกว่า “บ่าลิ้น” (Valve seat) ทำหน้าที่กันไม่ให้กำลังอัดที่อยู่ในกระบอกสูบรั่วออกมา ส่วนปลายด้านหนึ่งของวาล์วจะอยู่ใกล้กับกระเดื่องลิ้น (Rocker arm) วาล์วจะถูกกระเดื่องกดเพื่อควบคุมการเปิดและปิดหรือถ้าเป็นระบบเพลาลูกเบี้ยวเหนือสูบ (Overhead camshaft) ส่วนใหญ่จะไม่มีกระเดื่องวาล์ว ดังนั้นวาล์วจะถูกกดเพื่อควบคุมการเปิดและปิดจากเพลาลูกเบี้ยว (Camshaft) โดยตรง



รูปที่ 2.2 ระบบกลไกของวาล์ว [14]

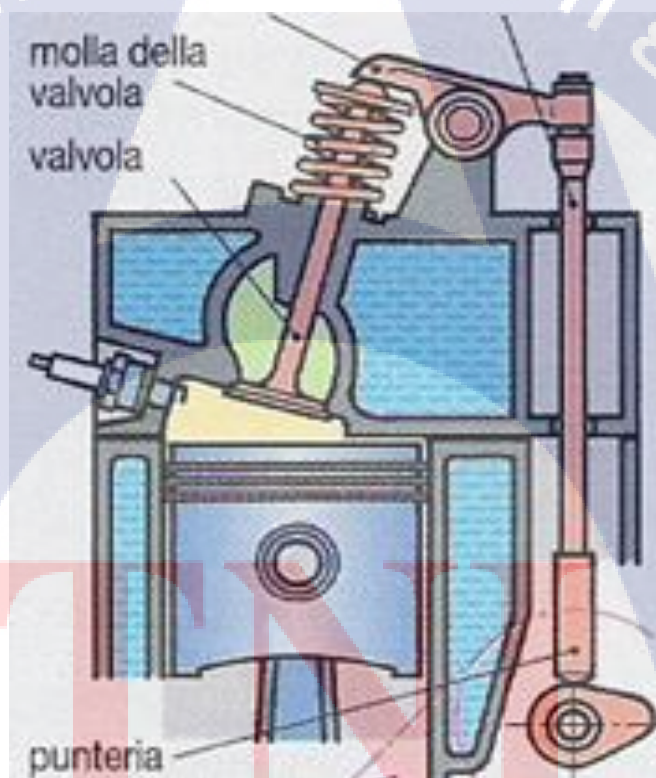
โดยทั่วไปเครื่องยนต์มีวาล์ว 2 ชนิดได้แก่ วาล์วไอดี (Intake valve) ซึ่งทำหน้าที่เปิดให้ไอดีไหลเข้ากระบอกสูบและวาล์วไอเสีย (Exhaust valve) ซึ่งเปิดให้ไอเสียไหลออกจากกระบอกสูบ โดยที่กลไกวาล์ว (Valve train) จะทำหน้าที่ควบคุมการเปิดและปิดของวาล์ว

2.1.3 การทำงานของกลไกวาล์ว

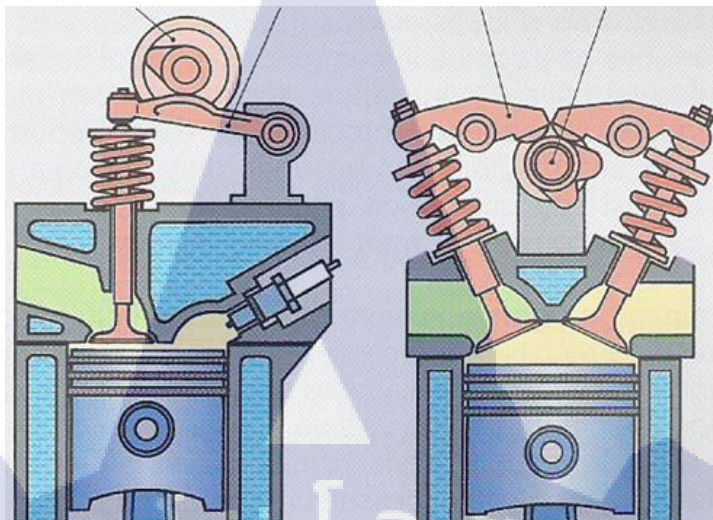
วาล์วจะทำงานได้ต้องอาศัยการส่งกำลังจากเพลาลูกเบี้ยวไปหมุนเพลาลูกเบี้ยว กลไกการเปิดและปิดวาล์วไอดีและไอเสียมี 3 แบบคือ แบบเฟืองไทมมิ่ง คือการใช้เฟืองขับเฟืองโดยตรง แบบโซ่ไทมมิ่งเป็นกลไกที่วาล์วสามารถจัดวางได้หลายวิธี คือ แบบวาล์วอยู่เหนือเพลาลูกเบี้ยว (Overhead valve, OHV) และแบบเพลาลูกเบี้ยวอยู่เหนือวาล์ว (Overhead camshaft, OHC) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- เครื่องยนต์แบบวาล์วอยู่เหนือเพลาลูกเบี้ยว ดังรูปที่ 2.4 เป็นเครื่องยนต์ที่มี เพลาลูกเบี้ยวอยู่ด้านล่างส่งแรงผ่านลูกกระทุ้ง ก้านกระทุ้ง และกระเดื่องกดวาล์วไปกดวาล์ว กลไกวาล์วแบบนี้มีผลทำให้การตอบสนองของการเปิดปิดวาล์วจะช้า

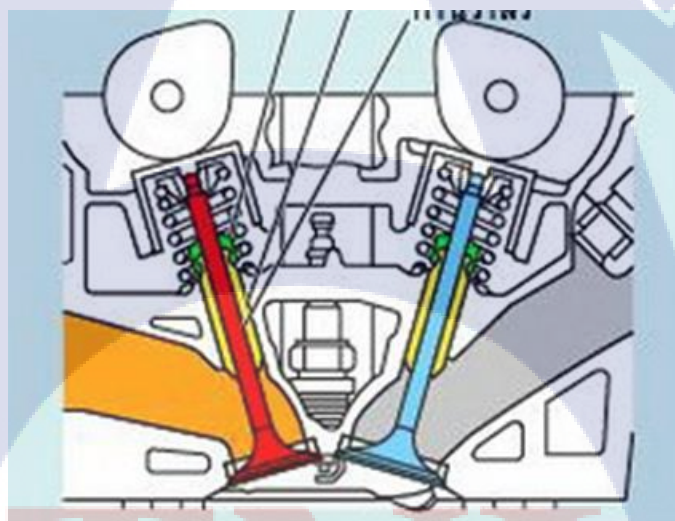
- เครื่องยนต์แบบเพลาลูกเบี้ยวอยู่เหนือวาล์ว เครื่องยนต์แบบนี้เพลาลูกเบี้ยวจะอยู่บนฝาสูบ ซึ่งลูกเบี้ยวสามารถส่งแรงกดวาล์วได้โดยตรงบนกระเดื่องวาล์วหรือโดยตรงบนลูกกระทุ้ง มีผลทำให้การตอบสนองของการเปิดปิดวาล์วรวดเร็วมากขึ้น เครื่องยนต์แบบเพลาลูกเบี้ยวอยู่เหนือวาล์ว ที่มีเพลาลูกเบี้ยวเพียงตัวเดียวดังรูปที่ 2.5 เรียกว่า Single-Over Head Camshaft ซึ่งเรียกย่อๆว่า SOHC แต่ถ้ามีเพลาลูกเบี้ยว 2 ตัวดังรูปที่ 2.6 เรียกว่า Double-Over Head Camshaft ซึ่งเรียกย่อๆว่า DOHC หรือเรียกว่าทวินแคมชาฟต์ (Twin camshaft) คือ เพลาลูกเบี้ยวจะแยกกันระหว่างวาล์วไอดีกับวาล์วไอเสีย [4]



รูปที่ 2.3 กลไกของวาล์วแบบ OHV [15]



รูปที่ 2.4 กลไกของวาล์วแบบ SOHC [15]



รูปที่ 2.5 กลไกของวาล์วแบบ DOHC [16]

2.2 ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง

2.2.1 ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์

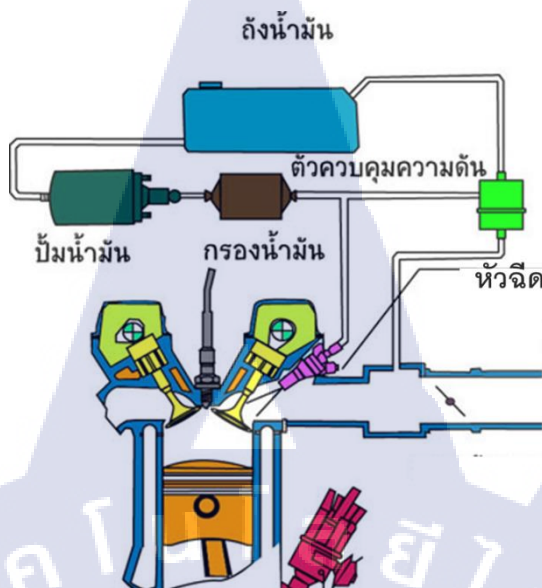
ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic fuel injection) หรือเรียกว่า ระบบ EFI เป็นระบบการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ดังรูปที่ 2.7 โดยใช้หัวฉีดที่มีการควบคุมการทำงานด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกส่งผ่านตัวกรองน้ำมัน ไปยังหัวฉีดที่อยู่บริเวณท่อไอดีของแต่ละสูบ เมื่อมีสัญญาณไฟฟ้าจาก ECU ส่งเข้าไปที่หัวฉีด น้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไปผสมกับอากาศในท่อไอดี แล้วถูกดูดเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ สำหรับปริมาณน้ำมันที่ถูก

ฉีดออกมาจะมากหรือน้อย จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเปิดของหัวฉีด กล่าวคือ ถ้ามีสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้าหัวฉีดนาน ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกฉีดออกมามาก ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในรถยนต์นั่งทั่ว ๆ ไป ในปัจจุบันจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบใหญ่ ๆ ด้วยกันโดยจะมีความแตกต่างตามวิธีการวัดปริมาณอากาศที่บรรจุเข้ากระบอกสูบ

ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์ แบบ D-Jetronic มีหลักการทำงานดังนี้ ขณะเครื่องยนต์มีความเร็วรอบต่ำ ลิ้นเร่งจะเปิดให้อากาศไหลผ่านเข้ากระบอกสูบน้อย ความดันของอากาศในห้องร่วมไอดีจะต่ำ (เป็นสุญญากาศมาก) ตัวตรวจจับสุญญากาศ (Vacuum sensor) จะส่งสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันอากาศในห้องร่วมไอดีขณะนั้น ป้อนเข้าคอมพิวเตอร์ให้กำหนดระยะเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงน้อย และในทางตรงกันข้าม หากลิ้นเร่งเปิดให้อากาศไหลผ่านเข้ากระบอกสู่มาก (ขณะเร่งเครื่องยนต์) ความดันของอากาศในห้องร่วมไอดีจะสูงขึ้น (เป็นสุญญากาศน้อย) ตัวตรวจจับสุญญากาศจะส่งสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้าคอมพิวเตอร์ให้กำหนดระยะเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้น

ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์ แบบ L-Jetronic มีหลักการทำงานดังนี้ เป็นระบบที่พัฒนามาจากระบบ EFI แบบ D-Jetronic ซึ่งจะมีการวัดปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบจากแรงดันในห้องร่วมไอดี แต่เนื่องจากปริมาตรกับแรงดันของอากาศมีสัดส่วนแปรผันไม่คงที่แน่นอน กล่าวคือ ปริมาตรของอากาศไม่แปรผันตรงกับแรงดัน ทำให้การวัดปริมาณอากาศจะได้ค่าที่แรงดันที่ไม่เที่ยงตรง จึงเป็นเหตุให้การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นขาดความเที่ยงตรงไปด้วย จากเหตุผลดังกล่าว ในระบบ EFI แบบ L จะทำการวัดปริมาณอากาศโดยใช้มาตรวัดการไหลของอากาศ (Air flow meter) เป็นตัวตรวจจับปริมาณอากาศที่ถูกดูดเข้ากระบอกสูบ แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้าคอมพิวเตอร์ เพื่อกำหนดระยะเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ระบบเชื้อเพลิงมีส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่างๆที่สำคัญคือ

- ถังน้ำมัน (Fuel tank)
- ปั๊มน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel pump)
- กรองน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel filter)
- ตัวควบคุมแรงดันเชื้อเพลิง (Fuel Pressure Regulator)
- ท่อทางน้ำมัน (Fuel pipe)
- หัวฉีด (Injector)



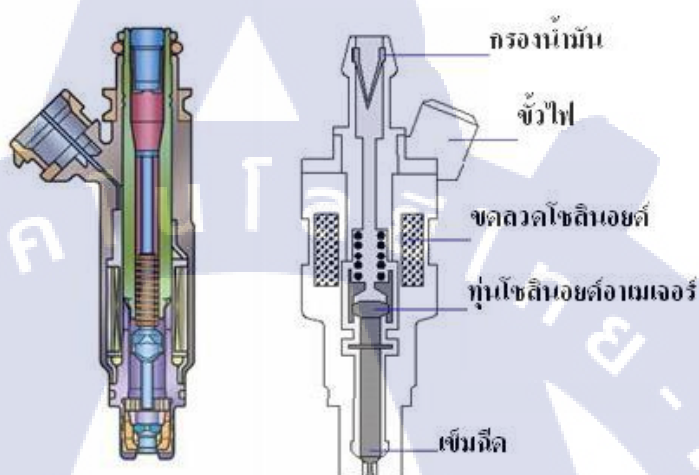
รูปที่ 2.6 ระบบฉีดเพลิง [17]

หัวฉีดเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเพราะเป็นตัวควบคุมการจ่ายปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสมให้กับเครื่องยนต์เพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้ตามความต้องการของผู้ขับขี่ เครื่องยนต์ที่ใช้ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง โดยทั่วไปจะมีหัวฉีดกระบอกสูบละ 1 ตัว (ยกเว้นเครื่องยนต์บางรุ่นที่มีการฉีดน้ำมันที่ท่อร่วมไอดี) และหัวฉีดจะทำการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงพร้อมกันทุกสูบ หรือมีการฉีดเป็นกลุ่ม หรือฉีดเรียงตามลำดับการจุดระเบิด หรือฉีดหลายรูปแบบผสมกัน ในเครื่องยนต์ที่ใช้หัวฉีดรุ่นแรก ๆ จะมีการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงพร้อมกันทุกสูบ ส่วนในเครื่องยนต์รุ่นใหม่ ๆ ในปัจจุบันจะมีการฉีดทุกรูปแบบตามที่บริษัทผู้ผลิตเครื่องยนต์ออกแบบ น้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดออกจากหัวฉีดแต่ละตัวจะมีปริมาณที่เท่ากันและมีความเหมาะสมกับปริมาณอากาศที่ถูกดูดเข้ากระบอกสูบ และสภาพการทำงานของเครื่องยนต์ในขณะนั้น โดยหัวฉีดจะถูกควบคุมการฉีดน้ำมันด้วยชุดควบคุมส่วนผสม (control unit) ซึ่งมีทั้งแบบกลไกแบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือแบบกลไกร่วมกับอิเล็กทรอนิกส์ [18]

2.3 หลักการทำงานของหัวฉีดเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์

น้ำมันจากท่อจ่ายจะไหลเข้าหัวฉีดโดยผ่านกรองละเอียดที่ช่องทางเข้า ผ่านลงไปยังเข็มหัวฉีดที่ปลายด้านล่างของหัวฉีดแสดงดังรูปที่ 2.8 ในตำแหน่งที่หัวฉีดยังไม่ทำงานเข็มหัวฉีดจะถูกสปริงดันให้แนบสนิทอยู่กับบัลันซ์ไม่ให้น้ำมันไหลออก เมื่อมีสัญญาณไฟฟ้าจากคอมพิวเตอร์ป้อนเข้าชุดลวดโซลินอยด์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ชุดลวด เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะดูดให้ตัวอาร์เมเจอร์ที่อยู่ตรงกลางยกตัวขึ้น เข็มหัวฉีดที่ติดกับตัวอาร์เมเจอร์ก็จะยกตัวขึ้นจากบัลันซ์ ทำให้น้ำมันซึ่งมีความดันประมาณ 2.5 บาร์ ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดในลักษณะของฝอยละออง สำหรับปริมาณ

น้ำมันที่ถูกฉีดออกมาจะมากหรือน้อยนั้น จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการป้อนสัญญาณไฟฟ้าเข้าขดลวดโซลินอยด์ของหัวฉีด ในการเปิดและปิดของเข็มหัวฉีดจะมีความไวสูงมาก ประมาณ 1-1.5 มิลลิวินาที เนื่องจากเข็มหัวฉีดมีระยะในการยกตัวน้อยมาก ประมาณ 0.1 mm ดังนั้นในการฉีดของหัวฉีดจึงมีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง [18]



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบหัวฉีดเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์ [19]

2.4 การตรวจสอบความเสียหายของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์เมื่อผ่านการใช้งานย่อมมีการสึกหรอเสียหาย หากเกิดความเสียหายย่อมเกิดผลเสียเช่น เกิดความกังวลใจ เสียเวลาในการเดินทาง เกิดการสึกหรอของชิ้นส่วน สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการซ่อมสูง จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบ ตรวจเช็ค หรือบำรุงรักษาตามระยะทางหรือระยะเวลา ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีเช่น ตรวจสอบด้วยสายตา การฟังเสียง การใช้เครื่องมือวัดต่างๆ การตรวจเช็ค หรือเปลี่ยนชิ้นส่วนตามคู่มือการตรวจซ่อมหรือคู่มือการบำรุงรักษา การตรวจสอบภายนอกสามารถทำได้ง่าย แต่การตรวจสอบภายในทำได้ลำบากจึงต้องมีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการตรวจสอบความเสียหายหรือความผิดปกติของเครื่องยนต์ ในปัจจุบันมีเครื่องมือในการตรวจสอบความผิดปกติคือ OBD (On-board Diagnostic) เป็นวิธีการแลกเปลี่ยนข้อมูลทางดิจิทัลระหว่าง ECU ของรถยนต์กับเครื่องสแกนข้อมูล เพื่อแสดงรหัสให้ผู้ที่ใช้เครื่องสแกนได้รู้ถึงปัญหาที่เกิดขึ้น แต่ OBD จะสามารถตรวจสอบความผิดปกติได้เฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้กับกล่อง ECU เท่านั้นเช่น เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งเพลาลูกเบี้ยว การทำงานของคอยล์จุดระเบิด ไม่สามารถตรวจสอบความผิดปกติทางกลได้เช่น ไม่สามารถตรวจสอบ

ระยะห่างวาล์ว หรือ ไม่สามารถตรวจสอบค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปของหัวฉีดได้ ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการในการตรวจสอบความผิดปกติทางกลของเครื่องยนต์เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

การตรวจสอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน เป็นวิธีการที่จะทำให้ทราบข้อมูลที่สามารถระบุกระบวนการหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องยนต์และสามารถตรวจสอบความผิดปกติของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ได้โดยไม่ต้องถอดชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ออกมาเพื่อทำการตรวจเช็ค จึงทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการตรวจหาความผิดปกติของเครื่องยนต์นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบได้หลายครั้งเพื่อเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้ใช้รถยนต์ สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถตรวจวัดได้จากอุปกรณ์หลายๆชนิดเช่น หัววัดความเร่ง หัววัดสัญญาณอคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission) และไมโครโฟน เพื่อตรวจวัดกระบวนการของเครื่องยนต์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และนำไปข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์ เทคนิคการตรวจสอบด้วยสัญญาณต่างๆ มีดังต่อไปนี้

2.4.1 หัววัดการสั่นสะเทือน

หัววัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) เป็นการวัดความเร่งโดยอาศัยหลักการเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) โดยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นเซรามิกประเภทหนึ่งที่มีสมบัติพิเศษกล่าวคือเมื่อได้รับแรงกลจะให้แรงดันไฟฟ้าที่เรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าเท่านั้น [20] ในงานวิจัยที่มีการใช้หัววัดความเร่งเพื่อวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนตัวอย่างเช่น Klinchaeam และ Nivesrangsra [1] ใช้การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนจากหัววัดความเร่งในการตรวจสอบเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะขนาดเล็ก ซึ่งสามารถตรวจสอบสภาพความผิดปกติต่างๆในเครื่องยนต์เช่นความผิดพลาดของระยะห่างในไอดีและวาล์วไอเสีย Wang และ Duan [21] ใช้หัววัดความเร่งวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้การแยกและการประเมินสภาพของสัญญาณการสั่นสะเทือน พบว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการแยกและการประเมินสภาพของเครื่องยนต์ดีเซลที่ทำงานผิดปกติ Jiaxin และคณะ [22] ใช้หัววัดความเร่งวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและใช้ไมโครโฟนในการวัดเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบเพื่อหาเทคนิคในการระบุแหล่งที่มาที่แน่นอนของเสียงและการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ Zhang และคณะ [7] ได้ใช้ศึกษากลไกการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์อากาศยาน การวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่สอดคล้องกับโรเตอร์ Chomphan [4] ได้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนของความผิดพลาดของเครื่องยนต์ด้วยเงื่อนไขความผิดพลาด 3 ลักษณะ สามารถเห็นความแตกต่างทั้งสามเงื่อนไขและในเครื่องยนต์ที่มีสภาพจะปกติ Vulli และคณะ [6] ใช้หัววัดความเร่งวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเปรียบเทียบกับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ตรวจจับการน็อคของเครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Ioannis

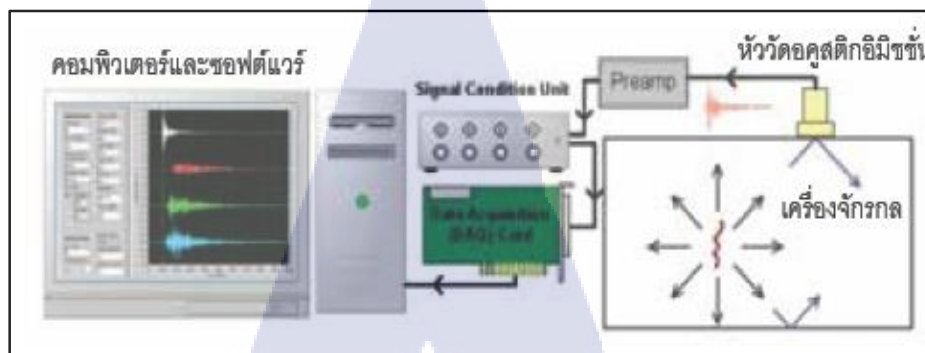
และคณะ [2] ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของเชื้อเพลิงต่างๆที่ใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการณ์การสั่นของเครื่องยนต์ Ashkan และคณะ [10] ใช้ในการศึกษาผลกระทบของการครูดของลูกสูบที่ผิดปกติเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ Ahmad และคณะ [3] ใช้ในการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซล Cheng และคณะ [9] ใช้วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในการตรวจสอบระยะเวลาการเผาไหม้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

2.4.2 ไมโครโฟน

ไมโครโฟน เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณคลื่นเสียง (Sound wave) หรือคลื่นอากาศจากแหล่งกำเนิดเสียงเช่น เสียงพูด เสียงเพลง เสียงดนตรี เป็นต้นให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยมีหลักการคือเมื่อคลื่นเสียงกระทบแผ่นสั่นหรือแผ่นไดอะแฟรม จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงส่งผ่านสายนำสัญญาณไปยังเครื่องรับสัญญาณ [23] ในงานวิจัยที่มีการใช้ไมโครโฟนตัวอย่างเช่น Jiaxin และคณะ [22] ใช้หาวัดความเร่งวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและใช้ไมโครโฟนในการวัดเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบเพื่อหาเทคนิคในการระบุแหล่งที่มาที่แน่นอนของเสียงและการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ Chomphan และ .Kingrattanaset [5] ศึกษาการวิเคราะห์เสียงเครื่องยนต์ปกติและเครื่องยนต์ที่ผิดปกติใน 3 เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

2.4.3 หัววัดสัญญาณอคูสติกอิมิชัน

อคูสติกอิมิชันเป็นคลื่นไม่เชิงเส้นและปรากฏการณ์การแผ่ขยายของคลื่นมีความซับซ้อนอย่างมากดังรูปที่ 2.9 อคูสติกอิมิชัน ได้ถูกนิยามไว้ใน ASTM1316-99a ดังนี้ “อคูสติกอิมิชัน คือปรากฏการณ์ของคลื่นยืดหยุ่นชั่วขณะที่เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงานอย่างฉับพลันจากแหล่งกำเนิดที่อยู่ภายในวัสดุ” [24] แหล่งกำเนิดของอคูสติกอิมิชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แหล่งกำเนิดพื้นฐานของวัสดุ เช่น การแตกร้าว การเสียรูปแบบพลาสติก และการเปลี่ยนสถานะ เช่น ความเสียหายจากความล้า การเปลี่ยนตำแหน่งการเคลื่อนที่ ส่วนแหล่งกำเนิดอีกประเภทหนึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเทียม คือ ปรากฏการณ์ที่ก่อให้เกิดแหล่งกำเนิดพื้นฐาน เช่น การร้าวไหลควาเวชัน การสึกหรอในเครื่องจักรกล และการเสียดสี เป็นต้น โดยทั่วไปพลังงานของแหล่งกำเนิดอคูสติกอิมิชันจะถูกแผ่ขยายออกไปทุกทิศทาง เมื่อแหล่งกำเนิดในวัสดุเกิดถูกกระตุ้นขึ้น คลื่นจะเกิดการสะท้อนขึ้น เมื่อคลื่นที่แผ่ขยายกระทบกับขอบเขตที่คลื่นชนิดนี้จะมีคุณสมบัติเหมือนคลื่นทั่วไปจะสามารถเกิดการสะท้อน การหักเห การแพร่กระจาย การแทรกสอด การถูกดูดกลืน การลดทอนพลังงาน เป็นต้น ระบบตรวจวัดสัญญาณอคูสติกอิมิชัน ประกอบด้วย หัววัดอคูสติกอิมิชัน (ดังรูปที่ 2.10) ชุดปรับปรุงสัญญาณ (pre-amplifier) อุปกรณ์แปลงสัญญาณ (data acquisition card) คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์



รูปที่ 2.8 ระบบตรวจวัดคลื่นด้วยคูลตึกอิมิชชั่น [24]



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างหัววัดคูลตึกอิมิชชั่น [24]

ตัวอย่างงานวิจัยที่นำหัววัดคูลตึกอิมิชชั่นไปใช้ เช่น Baydar และ Ball [11] ได้ใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณจากอะคูสติกในตรวจสอบเกียร์กระปุก Wu และคณะ [25] ใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณโดยปรับและแยกที่มาของสัญญาณคูลตึกอิมิชชั่น ซึ่งสามารถแยกสัญญาณรบกวนของกระบอกสูบที่อยู่ติดกัน Fog และคณะ [26] ใช้หัววัดคูลตึกอิมิชชั่นวัดสัญญาณคูลตึกอิมิชชั่นเพื่อหาการรั่วของวาล์วไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลของเรือเดินสมุทรขนาดใหญ่ ได้มีการเปรียบเทียบการวัดระหว่างการใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนกับคูลตึกอิมิชชั่นพบว่าการใช้คูลตึกมีความน่าเชื่อถือมาก Fog และคณะ [27] ใช้หัววัดคูลตึกอิมิชชั่นในการตรวจสอบสภาวะวาล์วไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในเรือเดินสมุทร ซึ่งผลการตรวจสอบสัญญาณที่ผ่านมามีประโยชน์ต่อการวัดอื่นๆ ซึ่งแสดงถึงความไวต่อเหตุการณ์ทางกลและทางของไหล

2.5 เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณ

เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณที่นิยมใช้คือ เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลา เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ และเทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและความถี่

2.5.1 เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลา

การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาโดยแกนตั้งเป็นค่าแอมพลิจูดและแกนนอนเป็นเวลา การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลามักนิยมวิเคราะห์ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเช่น ค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณเฉลี่ย (Absolute mean) ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ค่าความเบ้ (Skewness) ค่าความโด่ง(Kurtosis) ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้เป็นค่าการเบี่ยงเบนของข้อมูล [28] โดยค่าเบี่ยงเบนดังสมการที่ 2.1

$$Deviation = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 จะมีค่าเป็นศูนย์เสมอด้วยเหตุผลทางคณิตศาสตร์ที่มีปัญหาเรื่องทิศทางหรือเครื่องหมายบวก ลบ มาเกี่ยวข้องจึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการใช้เครื่องหมายสัมบูรณ์ (Absolute Value) หรือการยกกำลังสอง ดังสมการที่ 2.2

$$Absolute\ value, X_i = |x_i| \quad (2.2)$$

เพื่อให้ปริมาณความเบี่ยงเบนนี้มีคุณสมบัติเชิงเปรียบเทียบได้ จึงได้กำหนดเป็นความแปรผันต่อหน่วยของข้อมูล [28] ดังสมการที่ 2.3

$$Absolute\ mean = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2.3)$$

เพื่อให้ปริมาณความเบี่ยงเบนนี้มีคุณสมบัติเชิงเปรียบเทียบจึงได้กำหนดเป็นต่อหน่วยของข้อมูลด้วยการยกกำลังสองจะได้ค่าที่เรียกว่า ค่ารากกำลังสอง แต่อย่างไรก็ตามค่ารากกำลังสองนี้มีค่ามากกว่าความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อให้สามารถหาค่าความเบี่ยงเบนที่แท้จริงได้ด้วยการถอดรากที่สองของค่ารากกำลังสอง [28]ดังสมการที่ 2.4

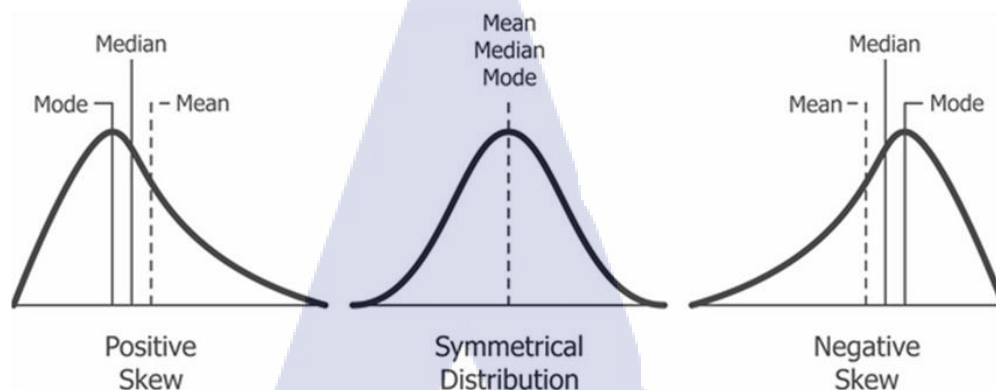
$$\text{Root mean square} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n}} \quad (2.4)$$

กรณีคิดผลรวมกำลังสองของความเบี่ยงเบนรอบค่าที่ควรจะเป็นของข้อมูลแล้วจะได้เป็นความแปรปรวน แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความแปรปรวนที่ได้ค่ามากกว่าความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อให้สามารถหาค่าความแปรปรวนที่แท้จริงได้ด้วยการถอดรากที่สองของค่าความแปรปรวนจะเรียกค่านี้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน [28] ดังสมการที่ 2.5

$$\text{Standard deviation} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ผ่านมาทั้งหมดข้อมูลที่ได้จะมีรูปแบบที่คงที่เสมอจึงต้องศึกษาถึงลักษณะสมบัติด้านรูปทรงรูปแบบของข้อมูลโดยประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ประการคือ ความเบ้(Skewness) และความโด่ง(Kurtosis)

ความเบ้(Skewness) คือ ความไม่สมมาตรในที่นี้หมายถึงการแจกแจงของตัวแปรสุ่มที่มีลักษณะไม่สมมาตรซึ่งแบ่งได้ 2 แบบได้แก่ การแจกแจงแบบเบ้ขวา(Positive Skewness หรือ Right-Skewness) และการแจกแจงแบบเบ้ซ้าย(Negative Skewness หรือ Left-Skewness) ในกรณีที่มีการแจกแจงของตัวแปรสุ่มเป็นการแจกแจงแบบเบ้ขวา ลักษณะของเส้นโค้งด้านขวามีหางยาวกว่าด้านซ้าย การแจกแจงแบบนี้ค่าฐานนิยมจะน้อยที่สุด ตามด้วยค่ามัธยฐาน และค่าเฉลี่ยจะเป็นค่าที่มากที่สุด สำหรับการแจกแจงแบบเบ้ซ้ายลักษณะของเส้นโค้งด้านซ้ายจะมีหางยาวกว่าด้านขวา การแจกแจงแบบนี้ค่าเฉลี่ยจะมีค่าน้อยที่สุดตามด้วยค่ามัธยฐาน และฐานนิยมจะเป็นค่าที่มากที่สุด [29] ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การแจกแจงความเบ้ [30]

แม้ความเบ้จะสามารถสังเกตได้ด้วยสายตา แต่โดยทั่วไปนิยมวัดขนาดความเบ้ในรูปของสัมประสิทธิ์ความเบ้ซึ่งมีอยู่หลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงการวัดสัมประสิทธิ์ความเบ้ที่รู้จักและนิยมใช้กันมากคือ วิธีโมเมนต์ การวัดความเบ้ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก และเป็นวิธีที่เหมาะสมมีสมบัติที่ดีหลายประการ เนื่องจากได้ใช้ค่าสังเกตทุกค่ามาคำนวณ จึงได้ค่าแน่นอนกว่าวิธีอื่นและการแจกแจงที่สมมาตรจะมีค่าความเบ้เป็น 0 ส่วนการแจกแจงที่มีลักษณะเบ้ขวา จะมีค่าความเบ้มากกว่า 0 และการแจกแจงที่มีลักษณะเบ้ซ้าย จะมีค่าความเบ้น้อยกว่า 0 สัมประสิทธิ์ความเบ้ [29] วิธีโมเมนต์มีสูตรดังนี้

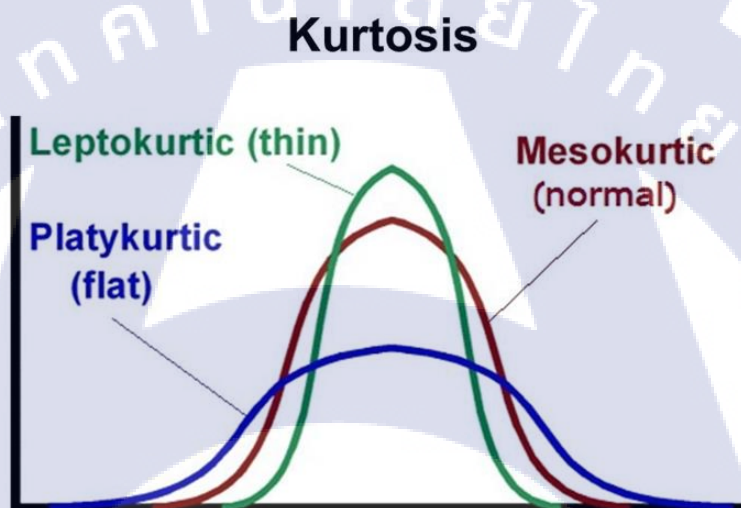
$$Skew = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{STD} \right)^3 \quad (2.6)$$

ความโด่ง(Kurtosis) คือ รูปร่างหรือลักษณะการแจกแจงของตัวแปรสุ่มที่เกี่ยวข้องกับขนาดความสูงของโค้งส่วนที่สูงที่สุดของการแจกแจง หรือบางครั้งจะหมายถึงความหนา (Thickness) ของปลายหางทั้ง 2 ข้าง ซึ่งมีลักษณะที่เบี่ยงเบนไปจากโค้งปกติ (Normal curve) แม้ว่าการตรวจสอบความโด่ง สามารถพิจารณาได้ด้วยสายตาว่าโค้งของการแจกแจงความถี่มีความโค้งมากหรือน้อยเพียงใด แต่วิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปคือ การวัดค่าความโด่งด้วยวิธีโมเมนต์ซึ่งเป็นวิธีที่ดีและเหมาะสม เพราะได้ใช้ค่าสังเกตทุกค่ามาคำนวณ จึงทำให้ค่าแน่นอนกว่าวิธีอื่น [29] ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$Kurt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{STD} \right)^4 \quad (2.7)$$

การแจกแจงที่สมมาตรจะมีค่าความโด่งเท่ากับ 0 ลักษณะความโด่งของโค้งการแจกแจงแบ่งออกได้ 3 ลักษณะคือ

1. ความโด่งแบบพลาติเคอร์ติค (Platykurtic) เป็นการแจกแจงที่มีความโด่งต่ำกว่าความโด่งของการแจกแจงปกติ โดยมีค่าความโด่งต่ำกว่า 0
2. ความโด่งแบบเมโซเคอร์ติค (Mesokurtic) เป็นการแจกแจงที่มีความโด่งเท่ากับความโด่งของการแจกแจงปกติ
3. ความโด่งแบบเลปโตเคอร์ติค (Leptokurtic) เป็นการแจกแจงที่มีความโด่งมากกว่าความโด่งของการแจกแจงปกติ โดยมีค่าความโด่งมากกว่า 0 [29] ดังรูปที่ 2.11

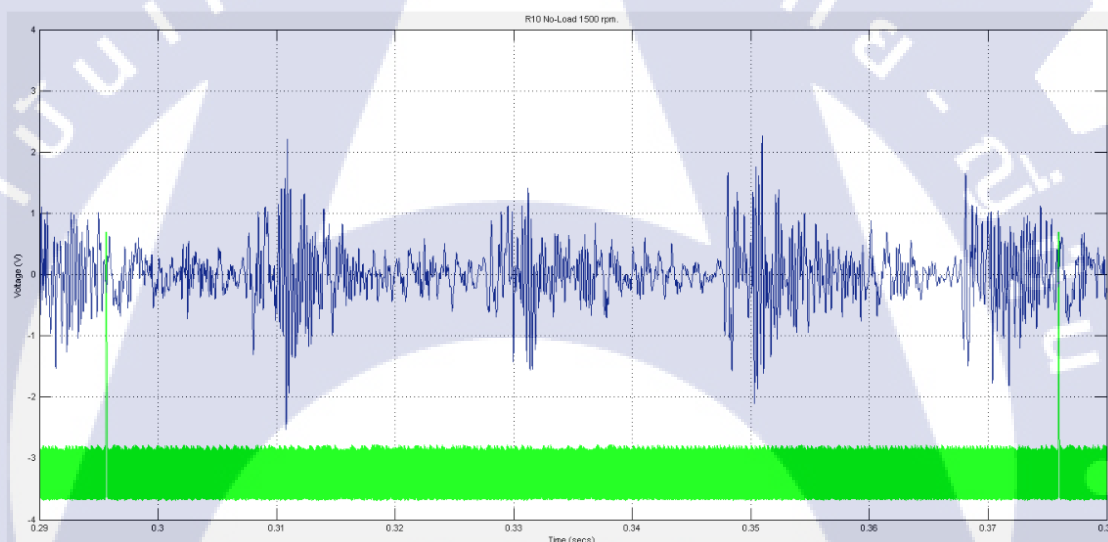


รูปที่ 2.11 การแจกแจงความโด่ง [31]

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาเช่น Klinchaeam และ Nivesrangan [1] ใช้เทคนิค Energy analysis ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในการตรวจสอบเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะขนาดเล็ก ซึ่งสามารถตรวจสอบสภาพความผิดปกติต่างๆในเครื่องยนต์เช่นความผิดปกติของระยะห่างในไอดีและวาล์วไอเสีย Loannis [2] และคณะ ใช้พารามิเตอร์ของสัญญาณเช่น ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่ารากกำลังสอง ในการวิเคราะห์ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการสั่นของเครื่องยนต์ พบว่าระดับการสั่นสะเทือน ขึ้นอยู่กับรายละเอียดของการระเบิดภายในห้องเผาไหม้และชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิง Ahmad และคณะ [3] วัดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซล ผลลัพธ์ที่สำคัญที่ได้จากการประมวลผลสัญญาณและการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าในความเร็วเครื่องยนต์ความถี่ที่โดดเด่น

เด่นเป็นไปตามจังหวะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ Justin และ Gary [32] ใช้ในการตรวจสอบและวินิจฉัยข้อบกพร่องระบบวาล์วของเครื่องยนต์ดีเซล ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของการตรวจสอบความผิดพลาดของระบบวาล์ว ทรงพลและวิทยา [33] วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติสองพารามิเตอร์สามารถทำนายและแยกประเภทสภาวะความผิดปกติของเฟืองตรงได้ชัดเจนกว่า

ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากเครื่องยนต์แสดงดังรูปที่ 2.10 โดยที่แกนตั้งเป็นแอมพลิจูดและแกนนอนเป็นเวลา สัญญาณการสั่นสะเทือนมีความซับซ้อนมากขึ้นอยู่กับกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ ซึ่งสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์บางครั้งจะทำการหาค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณก่อน แล้วจึงวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติต่างๆ



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างสัญญาณบนโดเมนเวลา

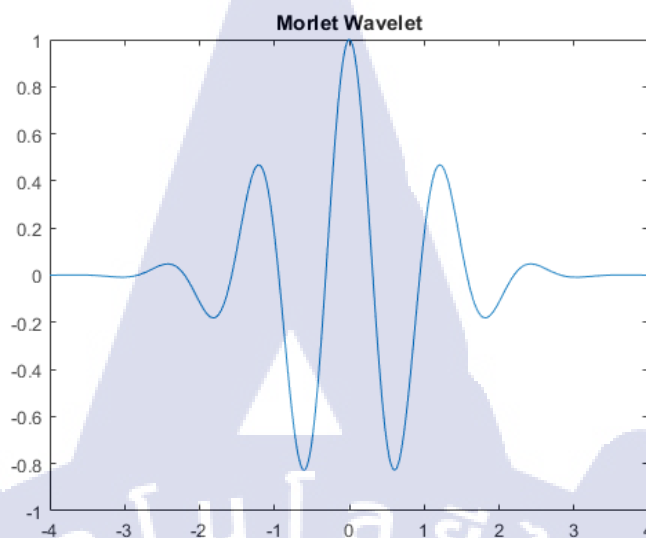
2.5.2 เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่

การตรวจสอบเครื่องจักรด้วยการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่มักนิยมใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) ซึ่งจะแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาให้เป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ที่มีแกนตั้งเป็นขนาดแอมพลิจูดและแกนนอนเป็นความถี่ งานวิจัยที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์บนความถี่เช่น Jiaxin และคณะ [22] ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบเพื่อหาเทคนิคในการระบุแหล่งที่มาที่แน่นอนของเสียงและการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์ Zhang และคณะ [7] ใช้การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณจากกลไกการ

สันสะเทือนของเครื่องยนต์อากาศยาน Chomphan [4] ได้วิเคราะห์การสันสะเทือนของความผิดพลาดของเครื่องยนต์ด้วยเงื่อนไขความผิดพลาด 3 ลักษณะ เห็นได้ชัดว่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสามารถเห็นความแตกต่างทั้งสามเงื่อนไขและในเครื่องยนต์ที่มีสภาพปะกติ Wu และคณะ [25] ใช้เทคนิคการวิเคราะห์บนความถี่เพื่อแยกที่มาของสัญญาณอคูสติกอิมิชัน ซึ่งสามารถแยกสัญญาณรบกวนของกระบอกสูบที่อยู่ติดกับกระบอกสูบที่ทำการตรวจสอบได้ Chomphan และ Kingrattanaset [5] ใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว สามารถแยกความแตกต่างที่สำคัญระหว่างเสียงเครื่องยนต์ปกติกับเครื่องยนต์ที่ผิดปกติ สามารถใช้แยกลักษณะเครื่องยนต์ที่ผิดปกติทั้งสามเงื่อนไขและเครื่องยนต์ที่มีสภาพปกติได้อย่างมีประสิทธิภาพ Abhishek และคณะ [6] วิเคราะห์สัญญาณจากเครื่องวัดความเร่งด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

2.5.3 เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและความถี่

เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ อีกวิธีการหนึ่งที่ใช้เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเวลาได้ คือการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) คณิตศาสตร์ที่ใช้สังเคราะห์และวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณที่ได้รับการพัฒนามาจากการแปลงฟูเรียร์โดยจะอธิบายโครงสร้างของสัญญาณที่เกิดจากการรวมตัวของสัญญาณเฉพาะ ซึ่งสัญญาณเฉพาะนั้นเป็นรูปคลื่นที่มีขนาดเล็กที่เรียกว่า “เวฟเลต” และแต่ละเวฟเลตจะมีโครงสร้างฟังก์ชันกำเนิดเดียวกันที่เรียกว่า “เวฟเลตแม่” (Mother wavelet) การแปลงเวฟเลตนั้นมีหลายรูปแบบ งานวิจัยที่มีการใช้เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและความถี่ เช่น Wang และ Duan [2] ใช้การแปลงเวฟเลตวิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เป็นไปได้และมีประสิทธิภาพในลักษณะแยกและการประเมินสภาพของความผิดพลาดของเครื่องยนต์ดีเซล Ashkan และคณะ [10] วิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือนในโดเมนเวลา โดเมนความถี่และโดเมนเวลา การแปลงเวฟเลต ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการขุดลูกสูบทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ลดลงอย่างมาก Cheng และคณะ [9] เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและความถี่ วิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือน ผลการตรวจสอบว่าเวลาในการเผาไหม้สามารถกำหนดได้จากสัญญาณการสันสะเทือนของฝาสูบ Baydar และ Ball [11] ได้ใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลตในตรวจสอบเกียร์กระปุก แสดงให้เห็นว่าประสบความสำเร็จในการตรวจสอบหลายๆความผิดปกติของเกียร์ได้ บุครินทร์และชาญณรงค์ [34] ศึกษาเปรียบเทียบการตรวจจับความผิดปกติของเครื่องยนต์ในวงจรไฟฟ้า โดยการใช้การแปลงเวฟเลตและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ต [35]

สรุป

เครื่องยนต์เป็นส่วนหลักที่เป็นต้นกำลังของรถยนต์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานทางกล มีทั้งเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล เครื่องยนต์เมื่อผ่านการใช้งานจะทำให้ชิ้นส่วนเกิดความสึกหรอหากไม่ตรวจสอบหรือบำรุงรักษาอาจจะทำให้เกิดความเสียหายหนักกว่าเดิม ความผิดปกติที่มักเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์คือ ระยะห่างของวาล์วที่ผิดปกติ การฉีดยาน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผิดปกติ การไม่เกิดการจุดระเบิด การสึกหรอของชิ้นส่วน ซึ่งการตรวจสอบจากกล่องควบคุมจะไม่สามารถตรวจสอบความผิดปกติทางกลได้ การตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นการตรวจสอบทางกล การตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์ที่สามารถบ่งชี้ข้อมูลเกี่ยวกับวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์ได้อย่างชัดเจน อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดเช่น หัววัดการสัญญาณการสั่นสะเทือน หัววัดคูสติกอิมิชัน และไมโครโฟน เป็นต้น เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปอธิบายการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องยนต์และระบุความผิดปกติทางกล การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยหัววัดการสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นที่นิยม เนื่องจากมีราคาที่ไม่สูงมาก มีความสามารถในการวัดได้ดี เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณที่นิยมใช้คือ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคบนโดเมนเวลาซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณ เช่น การวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ การวิเคราะห์สัญญาณด้วยเทคนิคบนโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาและความถี่เช่น แปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (STFT)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

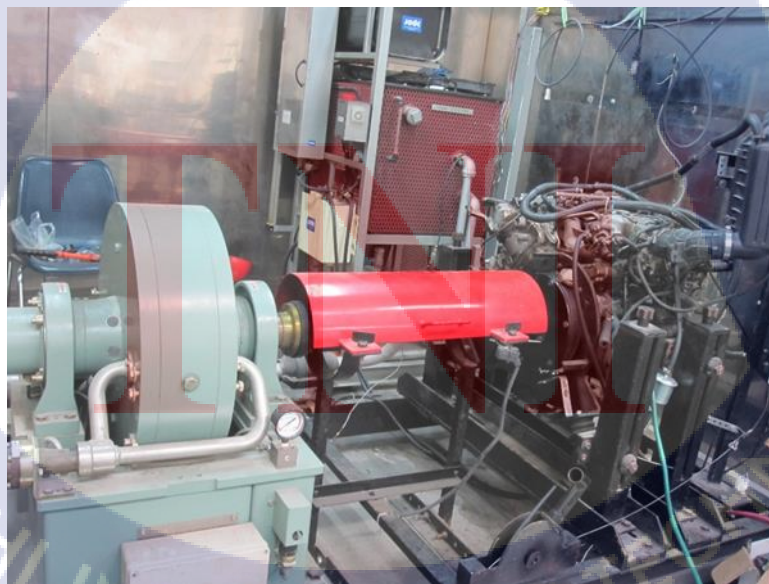
3.1 กระบวนการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ 4 จังหวะ ในการทดลอง ด้วยการจำลองสภาวะของเครื่องยนต์แบบต่างๆ เพื่อวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยหัววัดการสั่นสะเทือน 2 ตัว สัญญาณความเร็วรอบและตำแหน่งจุดศูนย์ตายบนจะวัดจากอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Encoder) ที่ติดตั้งที่เพลาลูกเบี้ยว และต่อเชื่อมกับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณและอุปกรณ์เก็บข้อมูล อุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกสั่งให้เก็บข้อมูลด้วยโปรแกรม LABVIEW และ ข้อมูลทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องยนต์เบนซิน

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์ยี่ห้อซูซูกิแบบ 4 สูบ 4 จังหวะ 16 วาล์ว ขนาดความจุ 1,600 ซีซี ดังรูปที่ 3.1 เป็นเครื่องยนต์ที่ติดตั้งอยู่บนแท่นพร้อมอุปกรณ์วัดแรงบิดแบบใช้การเหนี่ยวนำหรือเอ็ดดี้เคอร์เรนท์ไดนาโมมิเตอร์ ในห้องควบคุมมีจอแสดงการทำงานและแสดงผลของค่าที่วัดได้ประกอบด้วย วัดความเร็วรอบ วัดแรงบิด วัดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 3.1 เครื่องยนต์ซูซูกิพร้อมไดนาโมมิเตอร์

3.2.2 หัววัดการสั่นสะเทือน

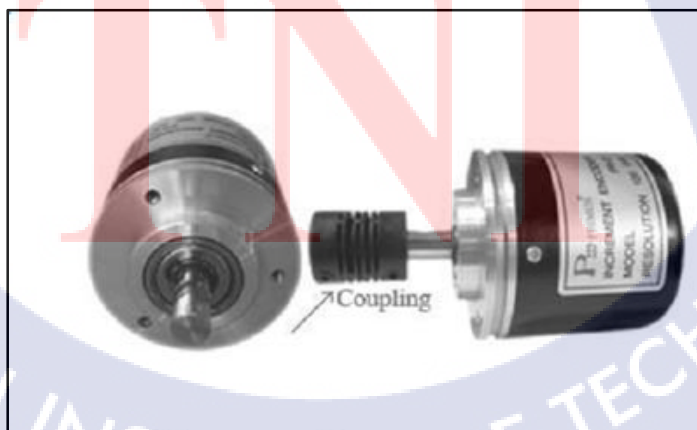
เป็นอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่งของการเคลื่อนที่ของวัตถุ โครงสร้างของอุปกรณ์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือน ภายในจะมีเพียโซอิเล็กทริก ที่ใช้ในการตรวจวัด ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน ยี่ห้อ IMI รุ่น 6031C01 ย่านความถี่ในการวัด 0.5-10000 Hz ช่วงในการวัด 104 mV/g และ 105 mV/g ตัวอย่างหัววัดการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

3.2.3 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ

Encoder เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบการหมุน ตรวจวัดความเร็วรอบ และตรวจวัดตำแหน่งจุดศูนย์ตายบน หลักการของ Encoder คือตรวจจับการหมุนแล้วส่งสัญญาณกลับในรูปแบบของพัลส์ (pulse) แล้วนำค่าพัลส์ไปหาค่าความเร็วรอบ งานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ยี่ห้อ PM รุ่น PR-01 ดังรูปที่ 3.3 สัญญาณเอาพุตที่ 1024 พัลส์ต่อรอบ และ 1 พัลส์ต่อรอบ



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Encoder)

3.2.4 ชุดปรับปรุงสัญญาณ (Signal conditioning unit)

ชุดปรับปรุงสัญญาณ (Signal conditioning unit) เป็นอุปกรณ์ที่ได้สร้างและพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ปรับปรุงสัญญาณที่ได้ให้มีความเหมาะสมและเพื่อให้อ่านสัญญาณได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างชุดปรับปรุงสัญญาณ ดังรูปที่ 3.4(ก) เป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาให้ใช้ร่วมกับเอ็นโค้ดเดอร์ ชุดปรับปรุงสัญญาณสำหรับหัววัดการสั่นเทือนแสดงดังรูปที่ 3.4(ข) ซึ่งเป็นชุดที่เอาไว้ต่อกับหัววัดการสั่นสะเทือนเพื่อจ่ายไฟฟ้าและเก็บข้อมูลของจุดที่ต้องการตรวจสอบพร้อมกัน 4 จุด ด้วยอัตราสุ่มสูงสุดที่ 51.2 kHz ต่อช่องสัญญาณ



(ก) ชุดปรับปรุงสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์



(ข) ชุดปรับปรุงสัญญาณการสั่นสะเทือน

รูปที่ 3.4 ชุดปรับปรุงสัญญาณ

3.2.5 อุปกรณ์เก็บข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ข้อมูลจะถูกเก็บด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data acquisition device) ยี่ห้อ National Instruments (NI) รุ่น NI cDAQ9191 ดังรูปที่ 3.4 เป็นกระบวนการของการวัดทางไฟฟ้าหรือทางกายภาพเช่น แรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ ความดันหรือเสียงด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ระบบ NI DAQ ประกอบด้วยเซ็นเซอร์ อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ อุปกรณ์เก็บข้อมูล และโปรแกรม การประมวลผลข้อมูล ผลผลิต การแสดงผล และสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์เก็บข้อมูล

3.2.6 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม

คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้เก็บข้อมูลและประมวลผล โดยผ่านโปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมสำหรับอ่านข้อมูลที่ได้จากระบบเก็บข้อมูล เนื่องจากโปรแกรม LABVIEW เป็นโปรแกรมที่สามารถใช้งานง่าย แล้วนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลแบบเมทริกซ์ซึ่งสามารถวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากได้ดี สามารถแสดงค่าเป็นตัวเลขหรือแสดงในรูปแบบกราฟ เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 3.6 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม

3.3 ขั้นตอนการทดลองงานวิจัย

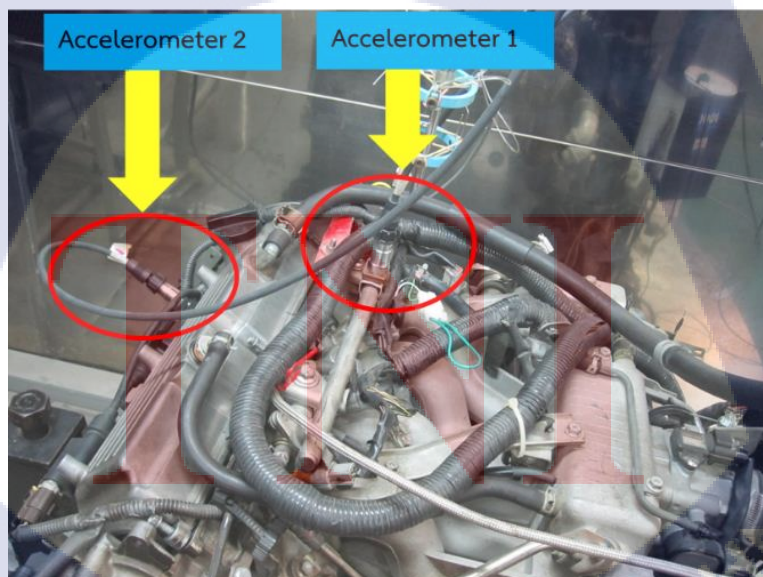
งานวิจัยนี้จะทดลองการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ในสภาวะที่ต่าง ๆ คือ สภาวะเครื่องยนต์ทำงานปกติ, สภาวะการจำลองเงื่อนไขให้เครื่องยนต์ทำงานผิดปกติโดยจำลองความผิดปกติระยะทางวาล์วไอดี วาล์วไอเสียและหัวฉีด โดยทำแต่ละเงื่อนไขตามลำดับดังขั้นตอนต่อไปนี้

3.3.1 เตรียมเครื่องยนต์

ทำการทำการเปลี่ยนของเหลวในเครื่องยนต์ใหม่ทั้งหมดคือเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ เปลี่ยนน้ำหล่อเย็นพร้อมทั้งเติมน้ำยาป้องกันสนิม เปลี่ยนหัวเทียน กรองน้ำมันเชื้อเพลิง กรองอากาศ ปรับตั้งวาล์วไอดีและไอเสียให้ได้ตามค่ากำหนดในคู่มือเครื่องยนต์ ตรวจสอบสายพาน ตรวจสอบความแน่นของโบลท์ต่างๆ อัดจาระบีเพลากลาง เพื่อให้เครื่องยนต์อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ที่สุด

3.3.2 ติดตั้งหัววัดและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

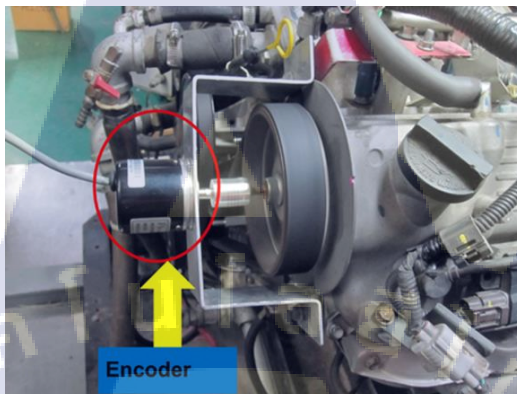
ติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือน โดยหัววัดการสั่นสะเทือนตัวแรกสำหรับวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของหัวฉีดติดตั้งอยู่ที่บริเวณรางหัวฉีดระหว่างหัวฉีดสูบที่ 1 กับ สูบที่ 2 ส่วนหัววัดการสั่นสะเทือนตัวที่สองสำหรับวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของวาล์วติดตั้งอยู่ที่บริเวณฝาสูบระหว่างสูบที่ 1 กับสูบที่ 2 ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนบนเครื่องยนต์ทดสอบ

3.3.3 ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ

อุปกรณ์วัดความเร็วรอบได้ทำการติดตั้งที่เพลาลูกเบี้ยวเพราะสามารถติดตั้งได้ง่ายกว่าการติดตั้งที่เพลาช้อเหวี่ยงดังรูปที่ 3.8 การหมุน 1 รอบของเพลาลูกเบี้ยวเท่ากับ 1 วัฏจักรของเครื่องยนต์



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งติดตั้ง Encoder

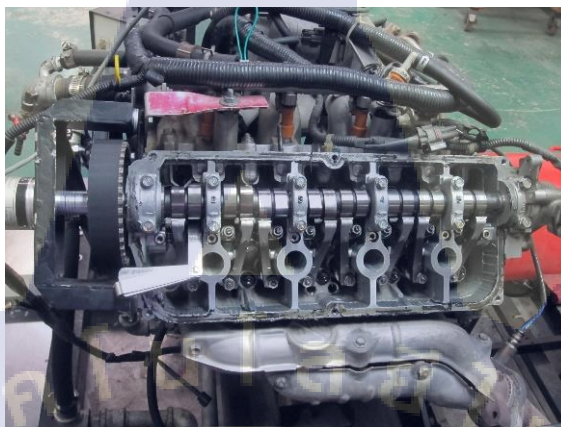
3.3.4 การทดลอง

เริ่มการทดลองด้วยการสตาร์ทเครื่องยนต์รอให้ถึงอุณหภูมิทำงานจึงเริ่มทำการวัดสัญญาณและเก็บข้อมูลโดยใช้ความถี่สุ่ม 100,000 เฮิรตซ์ บันทึกข้อมูล 50 ข้อมูล โดยสัญญาณจะถูกเก็บผ่านอุปกรณ์เก็บข้อมูล ด้วยโปรแกรม LabVIEW แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB เครื่องยนต์จะถูกจำลองด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น การทดลองที่เงื่อนไขเครื่องยนต์ทำงานปกติ ซึ่งกำหนดค่าต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ดังนี้ ระยะห่างของไอดีอยู่ที่ 0.15 มิลลิเมตร ระยะห่างของไอเสียอยู่ที่ 0.25 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การทดลองในสภาวะเครื่องยนต์ปกติ

การทดลองด้วยการจำลองระยะห่างวาล์วไอดีผิดปกติด้วยการปรับระยะห่างของวาล์วไอดีที่ 0.20 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.10 ส่วนวาล์วไอดีเสียและหัวฉีดอยู่ในค่าปกติ



รูปที่ 3.10 การทดลองด้วยการจำลองระยะห่างวาล์วไอดีผิดปกติ

การจำลองระยะห่างวาล์วไอดีเสียผิดปกติด้วยการปรับระยะห่างของวาล์วไอดีอยู่ที่ 0.30 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.11 ส่วนวาล์วไอดีและหัวฉีดอยู่ในค่าปกติ



รูป 3.11 การทดลองด้วยการจำลองระยะห่างวาล์วไอดีผิดปกติ

การทดลองด้วยการจำลองหัวฉีดผิดปกติด้วยการเพิ่มความต้านทานให้กับหัวฉีดจากเดิมมีค่าความต้านทาน 12.7 โอห์ม โดยเพิ่มให้มีค่าความต้านทาน 22.7 และ 32.7 โอห์มตามลำดับ การติดตั้งความต้านทานเพิ่มที่หัวฉีดแสดงดังรูปที่ 3.12 ส่วนระยะห่างของวาล์วไอดีและไอดีอยู่ในค่าปกติ

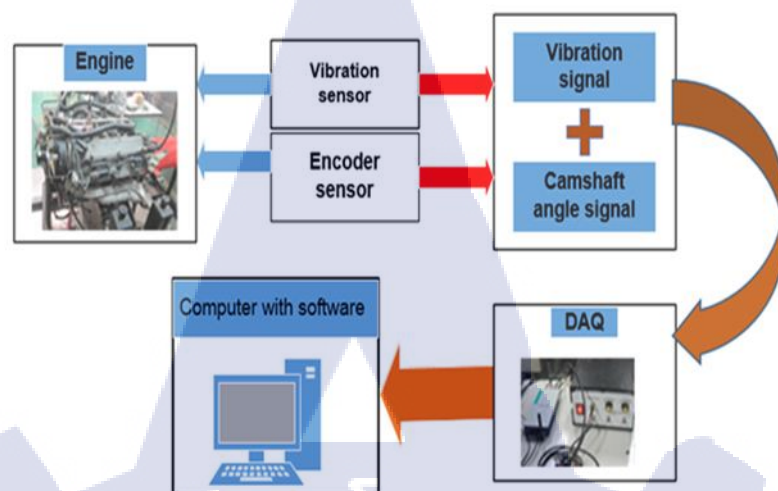
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลอง

การทดลอง	สถานะการจำลอง	ค่าของสถานะ	สัญญาณลักษณะที่ใช้แทน
หัวฉีดสูบที่ 1	ปกติ	12.7 โอห์ม	Normal
	เพิ่มความต้านทานขึ้น 10 โอห์ม	22.7 โอห์ม	INJ1R10
	เพิ่มความต้านทานขึ้น 20 โอห์ม	32.7 โอห์ม	INJ1R20
	ถอดปลั๊กหัวฉีด	-	Unplugged
วาล์วไอดี	ปกติ	0.15 มิลลิเมตร	Normal
	ปรับตั้งระยะห่าง	0.20 มิลลิเมตร	IV Fault
วาล์วไอเสีย	ปกติ	0.25 มิลลิเมตร	Normal
		0.30 มิลลิเมตร	EV Fault



รูปที่ 3.12 การทดลองด้วยการจำลองหัวฉีดผิดปกติ

ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.13 สัญญาณการสั่นสะเทือน และสัญญาณวัดรอบจะถูกบันทึกพร้อมกันขณะเครื่องยนต์ทำงานที่จำลองด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยอัตราสุ่มที่ 51200 Hz และมีข้อมูลเท่ากับ 100000 จุดต่อสัญญาณ สัญญาณทั้งหมดจะถูกบันทึกเป็นไฟล์ด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยเครื่องยนต์จะทำงานที่เงื่อนไขจำลองต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบประมาณ 850, 1500 และ 2500 รอบต่อนาที และทำงานแบบไม่มีภาระ และมีภาระที่ 10 และ 20 Nm ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 แผนภาพการวัดสัญญาณและจัดเก็บข้อมูล

บทที่ 4

ผลการวิจัย

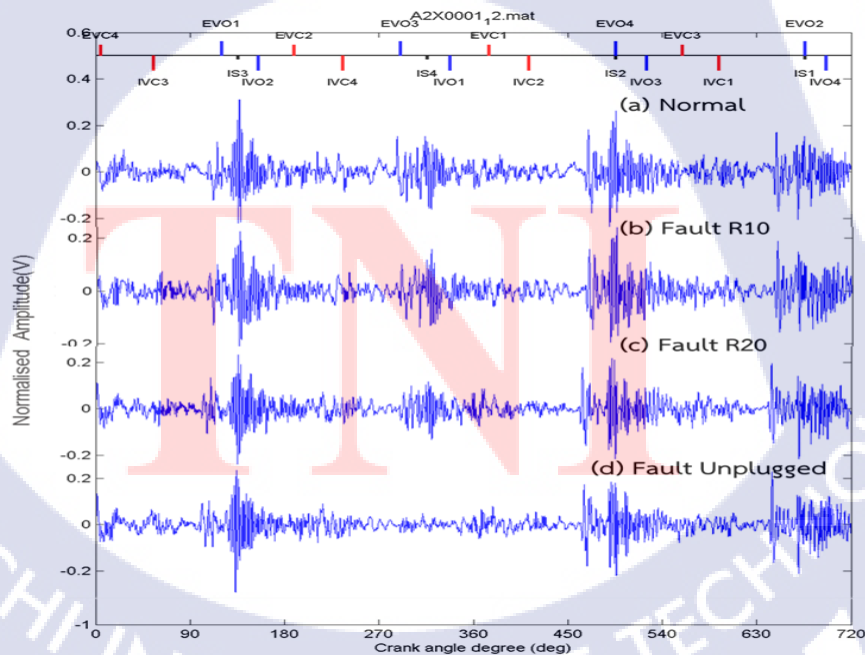
4.1 การวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จากเครื่องย่นจำลองขณะทำงานปกติแบบไม่มีภาระที่ความเร็วรอบประมาณ 850 รอบต่อนาทีในสภาวะปกติแสดงดังรูปที่ 4.1 เป็นสัญญาณที่มีแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดและแกนนอนเป็นเวลา ที่บันทึกจากเครื่องย่นที่ทำงานในช่วงหนึ่งวัฏจักร สัญญาณการทำงานของหัวฉีดที่บันทึกจากหัววัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งอยู่บนรางหัวฉีดแสดงดังรูปที่ 4.1(a) สัญญาณที่บันทึกจากหัววัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งบนฝาสูบที่อยู่ระหว่างกระบอกสูบ 1 และ 2 เป็นสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวาล์วและกระบวนการอื่น ๆ ของเครื่องย่นแสดงดังรูปที่ 4.1(b) และสัญญาณดังรูปที่ 4.1(c) เป็นสัญญาณแสดงตำแหน่งจุดศูนย์ตายบน (TDC) ของกระบอกสูบที่ 1 ในจังหวะกำลังซึ่งจะกำหนดให้เป็นตำแหน่ง 0° โดยสัญญาณที่บันทึกได้จะเกิดสัญญาณ 1 พลัสต่อ 1 วัฏจักรของเครื่องย่น ดังนั้นสัญญาณพลัส - พลัสจะหมายถึงเครื่องย่นหมุนไป 2 รอบ หรือ 1 วัฏจักร หรือเท่ากับ 720°

สัญญาณที่บันทึกได้ทั้งหมดจะอยู่ในโดเมนของเวลาทำให้การวิเคราะห์กระบวนการหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของเครื่องย่นค่อนข้างลำบาก การใช้เทคนิคการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาให้เป็นโดเมนมุมเพลอาซอเหวี่ยงจะทำให้การระบุกระบวนการทำงานต่าง ๆ ของเครื่องย่นในแต่ละกระบอกสูบทำได้ง่ายกว่า ตัวอย่างสัญญาณบนมุมเพลอาซอเหวี่ยงแสดงดังรูปที่ 4.2 เป็นสัญญาณที่มีแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดและแกนนอนเป็นองศาเพลอาซอเหวี่ยง กระบวนการการทำงานของวาล์วและกระบวนการอื่น ๆ ของแต่ละกระบอกสูบแสดงไว้ที่ส่วนบนส่วนของกราฟดังรูปที่ 4.2 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนการเปิดและปิดของวาล์วไอดีแทนด้วยสัญลักษณ์ IVO และ IVC สัญลักษณ์ที่ใช้แทนการเปิดและปิดของวาล์วไอเสียแทนด้วย EVO และ EVC สัญลักษณ์ IS แทนด้วยตำแหน่งการจุดระเบิดของหัวเทียน ส่วนตัวเลขท้ายสัญลักษณ์แทนด้วยกระบอกสูบ สัญญาณการทำงานของหัวฉีดที่บันทึกจากหัววัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งอยู่บนรางหัวฉีด ระหว่างหัวฉีดของกระบอกสูบที่ 1 และหัวฉีดของกระบอกสูบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.2(a) สัญญาณที่บันทึกได้แสดงถึงการทำงานของหัวฉีดสูบต่าง ๆ คือ หัวฉีดที่ 2-1-3-4 ตามลำดับ สัญญาณของหัวฉีดจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการเปิดและปิดของวาล์วหัวฉีด และกระบวนการฉีดน้ำมันที่เกิดขึ้น สัญญาณที่บันทึกได้จะมีแอมพลิจูดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของหัวฉีดโดยหัวฉีดที่อยู่ใกล้หัววัดจะมีขนาดแอมพลิจูดที่สูงกว่า สัญญาณที่บันทึกจากหัววัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งบนฝาสูบที่อยู่ระหว่างกระบอกสูบ 1 และ 2 เป็นสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำงานต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องย่น เช่น การเปิดปิดของวาล์วไอดี ไอเสีย การไหลเข้า

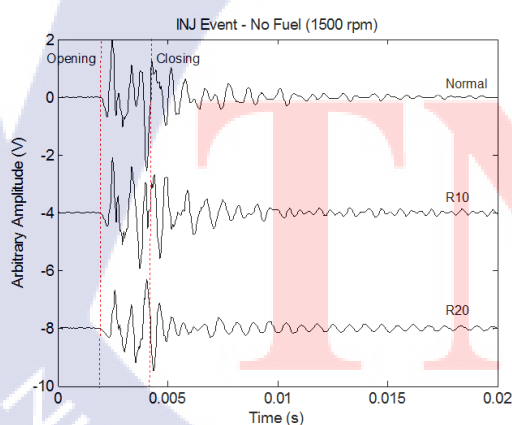
4.2 การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนการจำลองหัวฉีดผิดปกติ

สัญญาณการสั่นสะเทือนของการทำงานหัวฉีดที่เงื่อนไขต่างๆ เทียบกับมุมเพลาช้อเหวี่ยง แสดงดังรูปที่ 4.3 หัวฉีดที่กระบอกสูบ 2-1-3-4 จะเริ่มทำงานที่ประมาณ 100° , 280° , 460° และ 640° ตามลำดับ ที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ของหัวฉีดกระบอกสูบที่ 1 เช่น หัวฉีดปกติ หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม และหัวฉีดที่ไม่ทำงาน สัญญาณการทำงานของหัวฉีดทุกกระบอกสูบจะมีลักษณะคล้าย ๆ กัน แตกต่างกันเฉพาะขนาดแอมพลิจูดที่ต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัด สัญญาณจะมีขนาดแอมพลิจูดที่สูงเมื่ออยู่ใกล้กับหัววัด สัญญาณหัวฉีดทุกกระบอกสูบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงที่เกี่ยวข้องกับการเปิดและปิดของวาล์วซึ่งจะเกิดการกระแทกกระหว่างวาล์วและโครงสร้างภายในของหัวฉีดโดยจะปรากฏเป็นสัญญาณที่มีขนาดแอมพลิจูดค่อนข้างสูงและจะปรากฏสัญญาณที่มีแอมพลิจูดต่ำลงตามมา เมื่อวาล์วเปิดจะมีน้ำมันฉีดผ่านหัวฉีดไปยังท่อร่วมไอดีจะทำให้เกิดสัญญาณที่มีความถี่ที่สูงกว่าสัญญาณการเปิดและปิดของวาล์ว สัญญาณการทำงานของหัวฉีดของกระบอกสูบที่ 1 ที่สภาวะปกติดังรูปที่ 4.2(a) จะมีลักษณะของสัญญาณดังที่กล่าวข้างต้น หัวฉีดจะทำงานประมาณตำแหน่งที่ 280° - 360° ของมุมเพลาช้อเหวี่ยง แต่ถ้าหัวฉีดมีความผิดปกติเช่น หัวฉีดผิดปกติโดยมีความต้านทานของขดลวดเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์มจากสภาพปกติจะทำให้สัญญาณมีแอมพลิจูดลดลงดังรูปที่ 4.3(b) และ 4.3(c) ตามลำดับ ส่วนเงื่อนไขที่หัวฉีดไม่ทำงานพบว่าสัญญาณการทำงานของหัวฉีดจะไม่ปรากฏอยู่ในเหตุการณ์ดังรูปที่ 4.3(d)

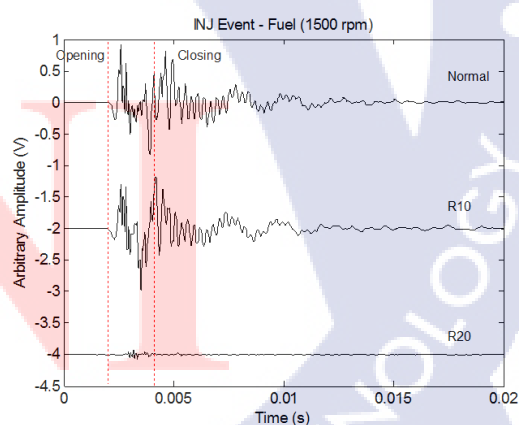


รูปที่ 4.3 สัญญาณการสั่นสะเทือนของหัวฉีดที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ

การศึกษากระบวนการทำงานของหัวฉีดที่ตรวจวัดได้จากสัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถทำให้เข้าใจโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การตรวจสอบสัญญาณการทำงานของกลไกในหัวฉีดที่ไม่มีการฉีดน้ำมัน และมีการฉีดน้ำมัน ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากหัวฉีดที่ทำงานเฉพาะกลไกภายในหัวฉีดโดยไม่มีการฉีดน้ำมันและมีการฉีดน้ำมันแสดงดังรูปที่ 4.4(a) และ 4.4(b) ตามลำดับ สัญญาณที่บันทึกได้เป็นการจำลองการทำงานของหัวฉีดเทียบกับหัวฉีดทำงานขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบประมาณ 1500 รอบต่อนาที และเป็นการจำลองเงื่อนไขที่หัวฉีดมีความต้านทานที่คอยล์เพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์มเช่นเดียวกับการจำลองชิ้นส่วนภายในของหัวฉีดที่มีส่วนทำให้เกิดการเคลื่อนที่เช่น คอยล์ วาล์วหัวฉีด สปริง เป็นต้น เหตุการณ์ที่ปรากฏในสัญญาณทั้งสองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่วาล์วเปิดและช่วงที่วาล์วปิด ช่วงการทำงานของวาล์วหัวฉีดที่เงื่อนไขจำลองจะเปิดค้างไว้ประมาณ 2 มิลลิวินาที กระบวนการเปิดและปิดวาล์วที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับ การกระแทกของวาล์วกับจตุรกรรรับซึ่งคาดว่าจะทำให้เกิดแอมพลิจูดที่สูงขึ้น เมื่อหัวฉีดมีการฉีดน้ำมันดังรูปที่ 4.4(b) จะพบสัญญาณความถี่สูงแทรกอยู่ในสัญญาณ นอกจากนี้เมื่อความต้านทานของคอยล์เพิ่มสูงขึ้นจะเห็นว่าแอมพลิจูดของสัญญาณลดต่ำลงทั้งกรณีที่ไม่ฉีดน้ำมันและฉีดน้ำมัน กรณีที่ความต้านทานคอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 20 โอห์มพบว่า สัญญาณที่บันทึกได้มีขนาดแอมพลิจูดค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ อาจเนื่องมาจากคอยล์อาจไม่มีแรงที่จะเอาชนะแรงสปริงจึงทำให้วาล์วยกตัวน้อยลงและปริมาณน้ำมันที่ถูกฉีดออกทางวาล์วหัวฉีดก็มีปริมาณน้อยส่งผลให้แอมพลิจูดมีขนาดต่ำ และบางครั้งถ้าแรงยกของคอยล์ไม่สามารถเอาชนะแรงสปริงจะทำให้สัญญาณที่บันทึกได้ไม่มีเหตุการณ์การทำงานของหัวฉีดเกิดขึ้น



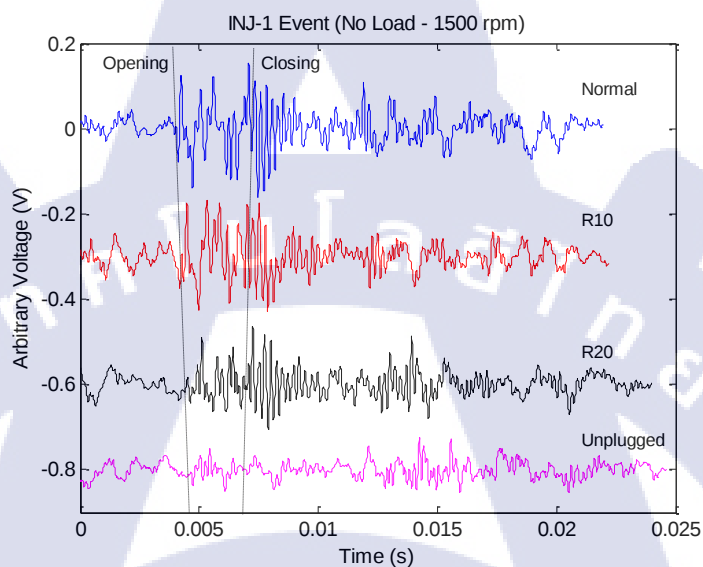
(a) หัวฉีดทำงานแบบไม่ฉีดน้ำมัน



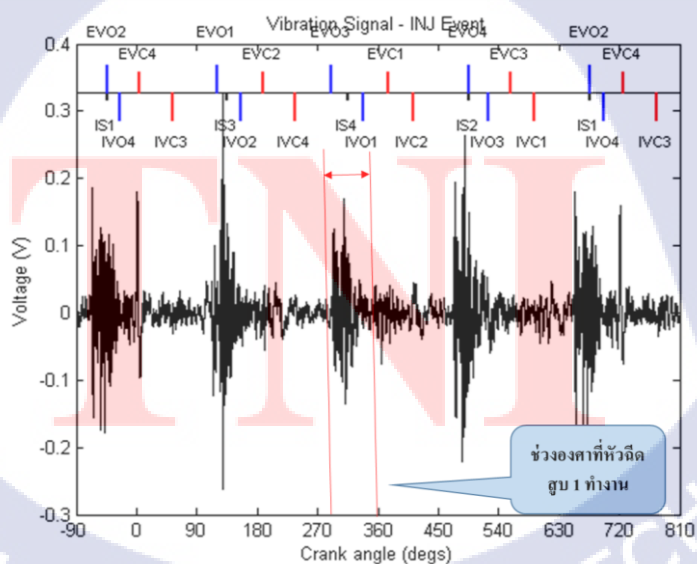
(b) หัวฉีดทำงานแบบฉีดน้ำมัน

รูปที่ 4.4 สัญญาณการสั่นสะเทือนของกลไกหัวฉีดที่เงื่อนไขต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบประมาณ 1500 รอบต่อนาที

สัญญาณการทำงานของหัวฉีดกระบอกสูบที่ 1 ที่เงื่อนไขปกติ ความต้านทานคอยล์หัวฉีดเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม และหัวฉีดไม่ทำงานแทนด้วยสัญลักษณ์ Normal, R10, R20 และ unplugged ดังรูปที่ 4.5 เส้นประแสดงถึงตำแหน่งโดยประมาณที่วาล์วเปิดและปิด เมื่อคอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้น วาล์วหัวฉีดจะเปิดช้าและปิดเร็วขึ้น และแอมพลิจูดจะมีขนาดต่ำลง



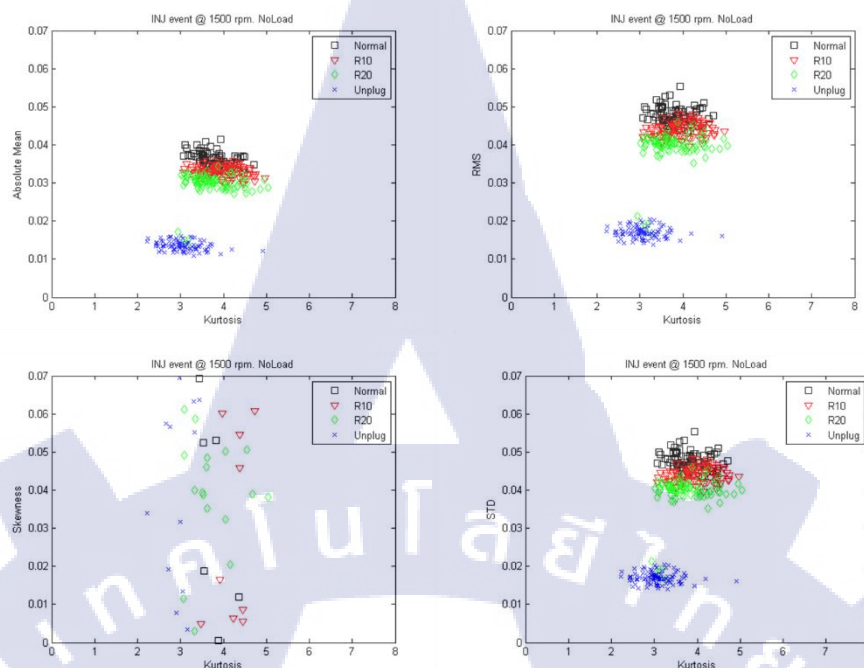
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างสัญญาณการสันสะเทือนของหัวฉีดสูบที่ 1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะต่าง ๆ



รูปที่ 4.6 ช่วงองศาการทำงานของหัวฉีดสูบที่ 1

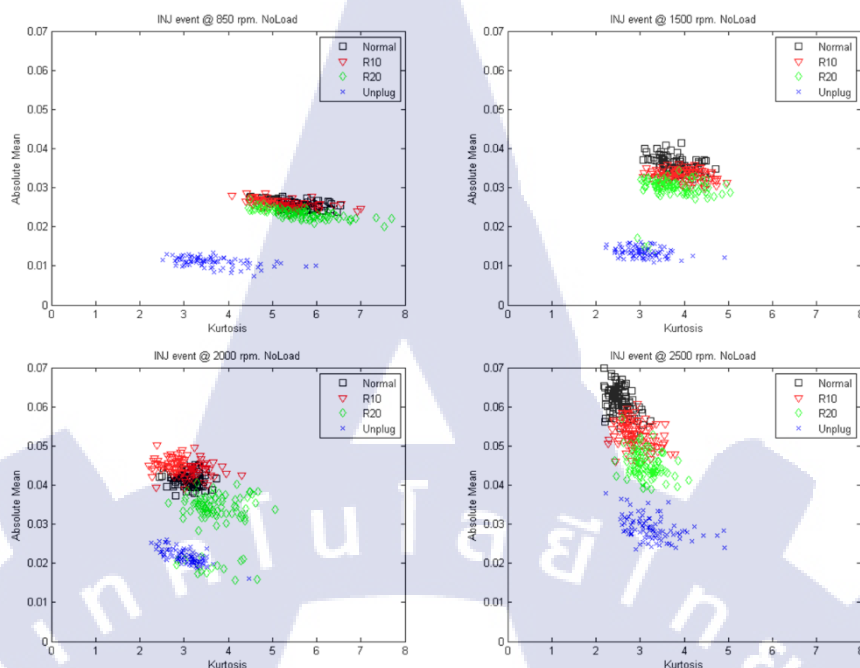
สัญญาณการสะท้อนสามารถใช้ตรวจสอบการทำงานของกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ได้แต่ผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการวิเคราะห์สัญญาณและการตรวจสอบเครื่องยนต์ การตรวจสอบสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางสถิติเช่น ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Absolute Mean) ค่าเฉลี่ยรากกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, STD) ค่าความเบ้ (Skewness) และค่าความโด่ง (Kurtosis) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณ การศึกษานี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้เปรียบเทียบสถานะของหัวฉีดสูบที่ 1 สัญญาณการสั่นสะเทือนการทำงานของหัวฉีดสูบที่ 1 ประมาณตำแหน่งมุมเพลาคือ 280° – 360° จำนวน 100 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์จะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติข้างต้นที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ เช่น หัวฉีดปกติ คอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม และหัวฉีดไม่ทำงาน แทนด้วยสัญลักษณ์ Normal, R10, R20 และ Unplug

การใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติค่าเดียวจะไม่สามารถทำนายเงื่อนไขการจำลองได้ชัดเจนนักเนื่องจากบางเงื่อนไขการจำลองจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งผลการศึกษานี้ก็สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่สรุปไว้ว่าการใช้ค่าพารามิเตอร์เดียวไม่สามารถทำนายเงื่อนไขการทำงานของเครื่องจักรกลได้อย่างชัดเจน [33] การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่าจะสามารถเห็นความแตกต่างของเงื่อนไขการจำลองชัดเจนขึ้น ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่เงื่อนไขการจำลองการทำงานของหัวฉีดสูบที่ 1 ขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ 1500 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์สถิติระหว่าง ค่าความโด่งและค่าสัมบูรณ์เฉลี่ย ค่ารากกำลังสอง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานยังไม่สามารถแยกเงื่อนไขการทดสอบได้ทุกกรณีดังรูปที่ 4.7 แต่สามารถแยกเงื่อนไขการจำลองออกเป็น 2 กลุ่มคือ เงื่อนไขหัวฉีดไม่ทำงาน และเงื่อนไขหัวฉีดปกติและคอยล์หัวฉีดผิดปกติ เป็นต้น การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ยกเว้นกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งและค่าความเบ้ที่ข้อมูลกระจายจะไม่สามารถใช้ได้



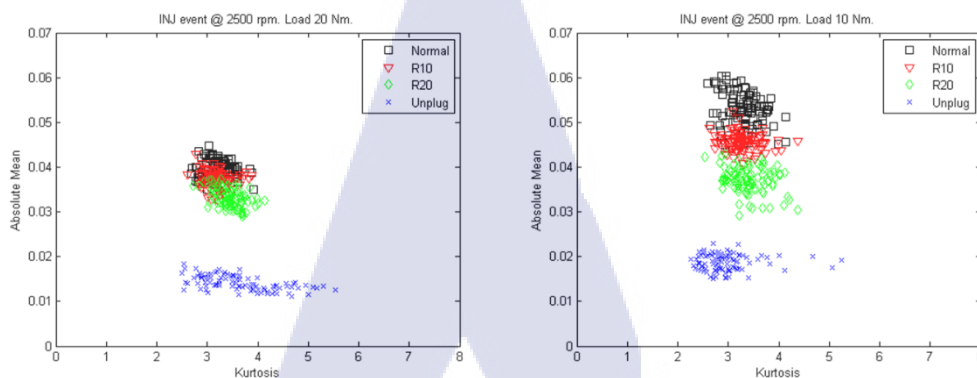
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่าของสัญญาณหัวฉีดสูบที่ 1 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 1500 รอบต่อนาทีแบบไม่มีภาระ

การศึกษานี้จะเลือกค่าค่าสัมบูรณ์เปรียบเทียบกับความโด่งเนื่องจากให้ผลการวิเคราะห์ เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบค่ารากกำลังสองหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความโด่ง การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางสถิติระหว่างค่าสัมบูรณ์และค่าความโด่งที่เงื่อนไขหัวฉีดสูบที่ 1 แบบต่าง ๆ ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบ 850, 1500, 2000 และ 2500 รอบต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบพบว่า เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ค่าความโด่งจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ยกเว้นที่ความเร็วรอบต่ำที่ 850 รอบต่อนาที เนื่องจากขณะเครื่องยนต์ทำงานที่รอบเดินเบา เครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระอาจจะมีการแกว่งตัวเพิ่มขึ้นและลดลงของความเร็วรอบของเครื่องยนต์จึงทำให้ค่าความโด่งเปลี่ยนแปลงมากกว่ากรณีอื่น ๆ ผลการเปรียบเทียบจะเห็นการแยกกลุ่มของเงื่อนไขการจำลองหัวฉีดได้ดีขึ้นที่ความเร็วรอบ 2000 และ 2500 รอบต่อนาที แต่จะมีบางส่วนของข้อมูลที่ทับซ้อนกันยกเว้นเงื่อนไขหัวฉีดไม่ทำงานจะแยกกลุ่มออกอย่างชัดเจน การศึกษานี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณหัวฉีดสูบที่ 1 ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที เพื่อวิเคราะห์การจำลองของหัวฉีดที่เงื่อนไขต่าง ๆ

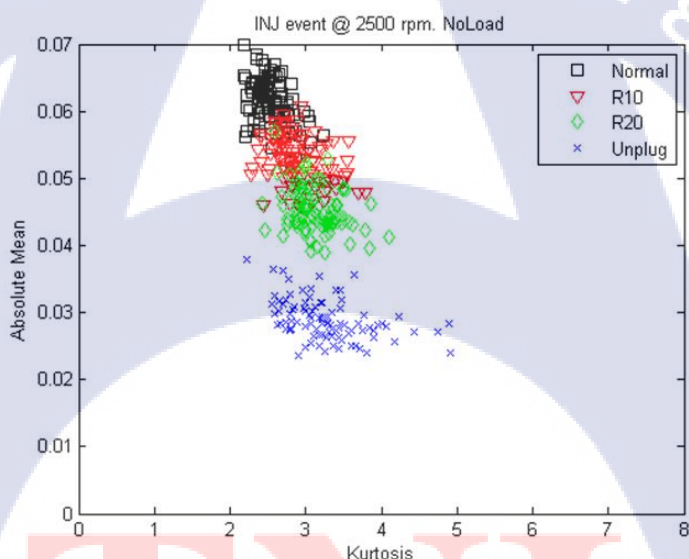


รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความโด่งและค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยของสัญญาณหัวฉีดสูบที่ 1 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ แบบไม่มีการชะเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

กราฟเปรียบเทียบค่าความโด่งและค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยของสัญญาณหัวฉีดเมื่อเครื่องยนต์ทำงานภายใต้ภาระที่ 10 และ 20 Nm แสดงดังรูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อภาระเพิ่มขึ้นค่าความโด่งจะมีค่าอยู่ที่ช่วงเดิม ส่วนค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยจะแกว่งตัวน้อยลง การทำงานของเครื่องยนต์ที่ภาระเพิ่มขึ้นจะทำให้ชิ้นส่วนเคลื่อนที่ต่าง ๆ สัมผัสกันแน่นขึ้นจึงทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณหัวฉีดเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก หากเปรียบเทียบกับผลที่เครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีการชะดังรูปที่ 4.8 และเครื่องยนต์ทำงานภายใต้ภาระที่ 10 Nm ข้อมูลจะแยกเป็นกลุ่มได้ชัดเจนกว่า



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความโด่งและค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยของสัญญาณหัวฉีดสูบที่ 1 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ภายใต้ภาระขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2500 รอบต่อนาที

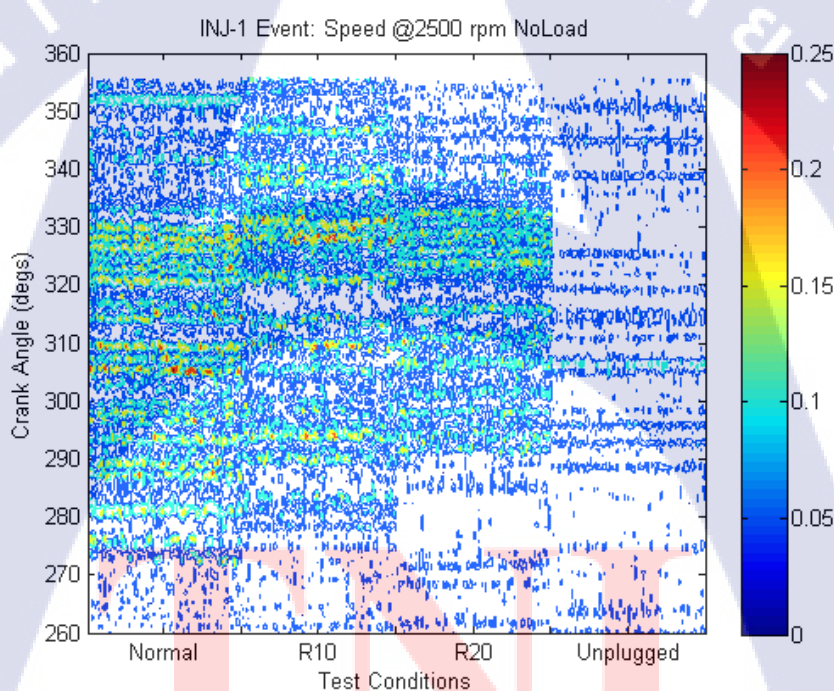


รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบค่าความโด่งและค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยของสัญญาณหัวฉีดสูบที่ 1 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ แบบไม่มีภาระขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2500 รอบต่อนาที

ผลการเปรียบเทียบค่าความโด่งและค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยของสัญญาณหัวฉีดสูบที่ 1 ที่เงื่อนไขหัวฉีดปกติ คอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม และหัวฉีดไม่ทำงาน ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2500 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทั้งสองสามารถแยกกลุ่มของข้อมูลออกเป็นกลุ่ม ๆ แต่ก็ยังมีบางส่วนของข้อมูลที่ซ้อนทับกัน เมื่อค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยลดลงตามความผิดปกติของหัวฉีดที่เพิ่มขึ้นซึ่งคาดว่าจะน่าจะเป็นผลมาจากความต้านทาน

คอยล์ที่เพิ่มขึ้นทำให้วาล์วมีการยกตัวน้อยกว่าปกติจึงส่งผลให้แอมพลิจูดมีค่าน้อยลงดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้า ส่วนค่าความโค้งจะมีค่าการกระจายในช่วง 2-5 ขึ้นอยู่เงื่อนไขการจำลอง

การแสดงผลละเอียดของสัญญาณการทำงานของหัวฉีดสูบที่ 1 ที่สามารถแสดงด้วยกราฟคอนทัวร์ซึ่งมีแกนตั้งเป็นมุมเพลาคือหัวฉีดสูบที่ 1 ทำงานคือ ช่วง $260^{\circ} - 280^{\circ}$ และแกนนอนเป็นเงื่อนไขการจำลองหัวฉีดคือ หัวฉีดปกติ คอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้น 10 และ 20 โอห์ม และหัวฉีดไม่ทำงาน แสดงด้วยสัญลักษณ์ Normal, R10, R20 และ Unplugged ซึ่งแต่ละเงื่อนไขจะแสดงผล 100 วิวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ หัวฉีดปกติจะเริ่มทำงานที่ประมาณตำแหน่งมุมเพลาคือหัวฉีดที่ 280° เมื่อความต้านทานคอยล์เพิ่มขึ้นจะพบว่าการเปิดของวาล์วหัวฉีดจะช้าลง และไม่เห็นสัญญาณเกิดขึ้นเมื่อหัวฉีดไม่ทำงาน นอกจากนี้รายละเอียดของสัญญาณของหัวฉีดปกติ และหัวฉีดผิดปกติเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน

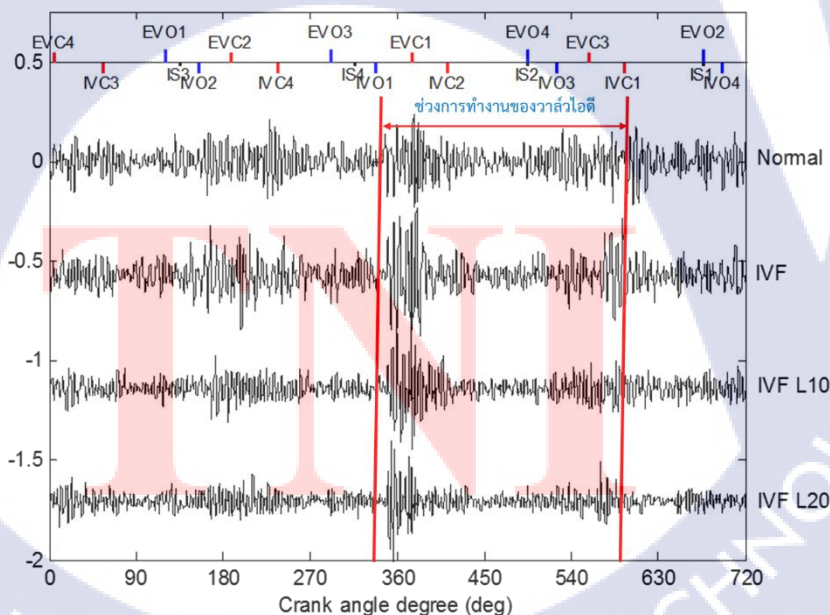


รูปที่ 4.11 กราฟคอนทัวร์ของค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณหัวฉีดที่สภาวะต่าง ๆ ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2500 รอบต่อนาที

4.3 การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนการจำลองวาล์วผิดปกติ

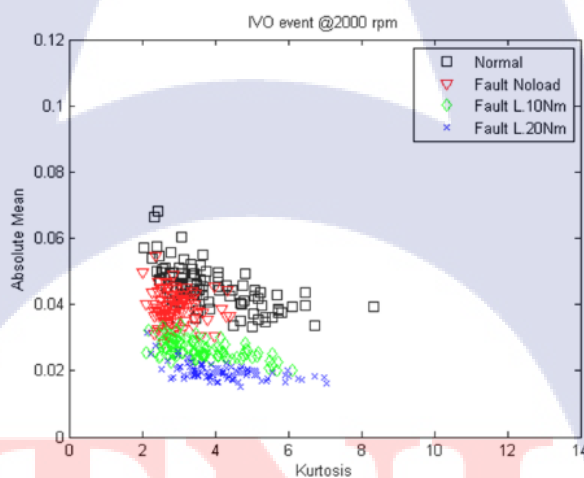
4.3.1 สัญญาณการสั่นสะเทือนจากการทำงานของวาล์วไอดีที่เงื่อนไขต่างๆ

ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ทำงานปกติและผิดปกติที่วาล์วไอดีเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ประมาณ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.12 การจำลองความผิดปกติของระยะตั้งวาล์วไอดี สภาวะปกติระยะตั้งวาล์วไอดีเท่ากับ 0.15 mm การจำลองความผิดปกติระยะตั้งวาล์วมีค่าเท่ากับ 0.20 mm การทำงานของวาล์วไอดีจะทำงานช่วงมุมเพลาคือห้วงประมาณ 320° - 615° หรือประมาณ 295° มุม สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกการทำงานของวาล์วไอดีที่เกิดขึ้นมีอยู่ 2 ช่วงคือช่วงการเปิดของวาล์วอยู่ช่วงองศาประมาณ 320° - 350° แทนด้วยสัญลักษณ์ IVO และช่วงการปิดของวาล์วอยู่ในช่วงองศาประมาณ 585° - 615° แทนด้วยสัญลักษณ์ IVC เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบจะมีวาล์วไอดี 2 วาล์วต่อสูบ และหมายเลข 1 แทนด้วยกระบอกสูบที่ 1 ดังนั้นการเกิดเหตุการณ์การเปิดและปิดของวาล์วทั้งสองอาจจะมีการเลื่อมซ้อนกันเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าระยะห่างของวาล์ว เงื่อนไขการจำลองดังรูปประกอบด้วย Normal, IVF, IVF L10, และ IVF L20 แทนเงื่อนไขเครื่องยนต์ปกติ วาล์วไอดีผิดปกติ วาล์วไอดีผิดปกติภายใต้ภาระ 10 Nm และ 20 Nm ตามลำดับ สัญญาณเหตุการณ์การเปิดและปิดของวาล์วไอดีจะเห็นไม่ชัดเจนนักทั้งนี้อาจเกิดจากการทำงานของกลไกอื่นร่วมด้วยจึงทำให้สัญญาณการเปิดและปิดของวาล์วไอดีไม่ชัดเจนนัก



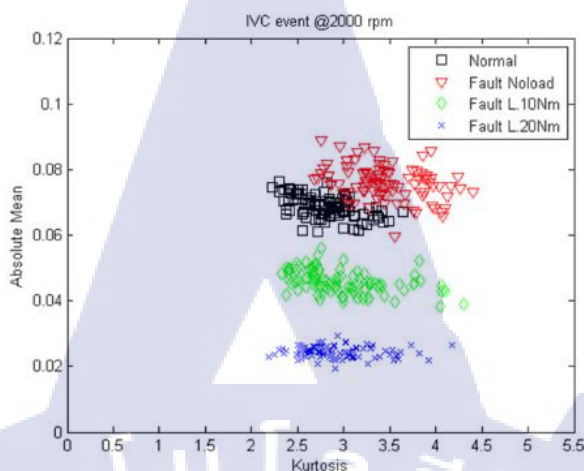
รูปที่ 4.12 ตำแหน่งองศาการทำงานของวาล์วไอดีและไอเสียของสูบที่ 1 ในสัญญาณสั่นสะเทือน

การใช้เทคนิคการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่าอาจทำให้การทำนายเงื่อนไขการจำลองได้ชัดเจนขึ้น สัญญาณเหตุการณ์การเปิดของวาล์วไอดีช่วงองศาประมาณ 320° - 350° และช่วงสัญญาณเหตุการณ์การปิดของวาล์วช่วงองศาประมาณ 585° - 615° ของสัญญาณการทำงานของวาล์วไอดีที่เครื่องยนต์ทำงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีจะถูกวิเคราะห์ด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติคือ ค่าสัมบูรณ์เฉลี่ย และค่าความโด่ง สัญญาณที่บันทึกได้ประมาณ 100 วิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์ที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ผลการเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยและค่าความโด่งของเหตุการณ์การเปิด (IVO) และปิด (IVC) ของวาล์วไอดีแสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ ค่าความโด่งของสัญญาณการเปิดของวาล์วดังรูปที่ 4.13 จะมีค่าประมาณ 2-8 ในทุกเงื่อนไขการจำลอง ยกเว้นกรณีวาล์วไอดีผิดปกติแบบไม่มีภาระจะมีค่าอยู่ประมาณ 2-5 ส่วนค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อวาล์วผิดปกติและมีภาระเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นแนวโน้มว่าข้อมูลมีการแยกตัวเป็นกลุ่ม แต่ยังมีทับซ้อนของข้อมูลบางส่วน



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยและค่าความโด่งของสัญญาณการเปิดของวาล์วไอดี (IVO) ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ

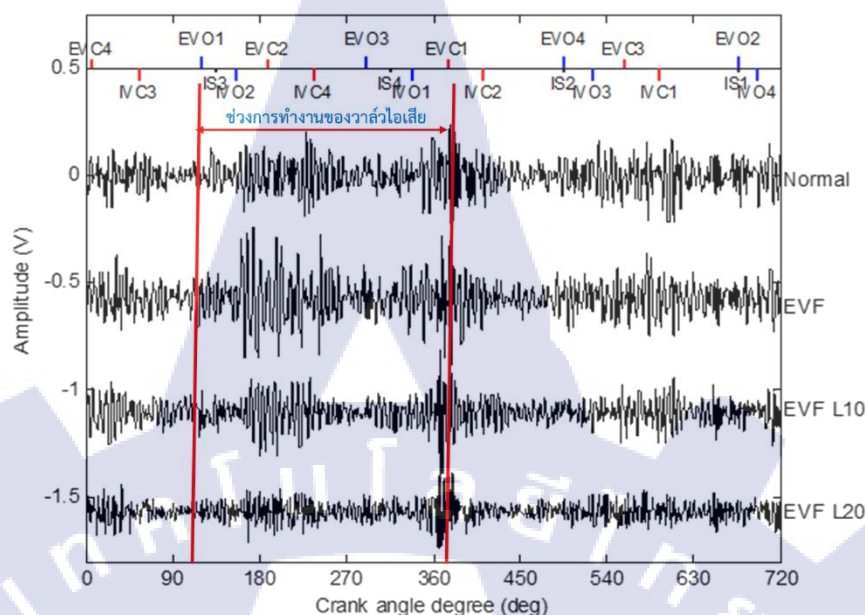
ค่าความโด่งของสัญญาณการปิดของวาล์วดังรูปที่ 4.14 จะมีค่าประมาณ 2-4.5 ในทุกเงื่อนไขการจำลอง ส่วนค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อวาล์วผิดปกติและมีภาระเพิ่มขึ้น ยกเว้นเงื่อนไขวาล์วไอดีผิดปกติแบบไม่มีภาระจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแยกตัวเป็นกลุ่มชัดเจน แต่ยังมีทับซ้อนของข้อมูลบางส่วนคือเงื่อนไขเครื่องยนต์ปกติและวาล์วไอดีเสียแบบไม่มีภาระ



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยและค่าความโด่งของสัญญาณการปิดของวาล์วไอดี (IVC) ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ

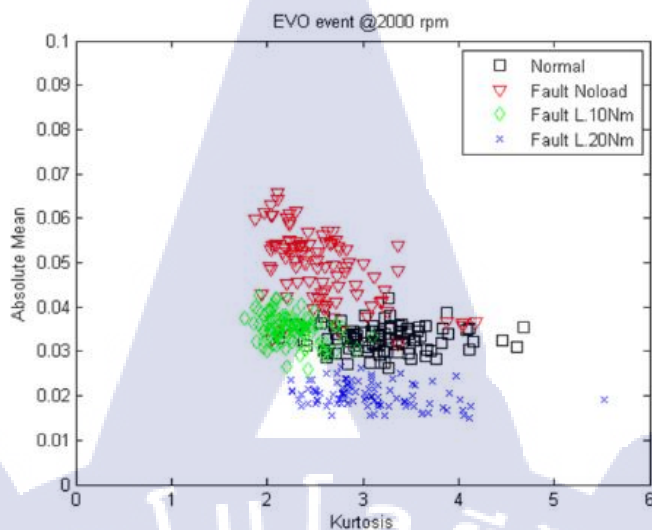
4.3.2 สัญญาณการสันสเทือนจากการทำงานของวาล์วไอดีที่เงื่อนไขต่าง ๆ

ตัวอย่างสัญญาณการสันสเทือนของเครื่องยนต์ทำงานปกติและผิดปกติที่วาล์วไอดีเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ประมาณ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.15 การจำลองความผิดปกติของระยะตั้งวาล์วไอดี สภาวะปกติระยะตั้งวาล์วไอดีเท่ากับ 0.20 mm การจำลองความผิดปกติระยะตั้งวาล์วมีค่าเท่ากับ 0.30 mm การทำงานของวาล์วดีสียจะทำงานช่วงมุมเพลาคือห้วงประมาณ 105° - 380° หรือประมาณ 275° มุม สัญญาณการสันสเทือนที่บันทึกการทำงานของวาล์วไอดีที่เกิดขึ้นมีอยู่ 2 ช่วงคือช่วงการเปิดของวาล์วอยู่ช่วงองศาประมาณ 105° - 135° แทนด้วยสัญลักษณ์ EVO และช่วงการปิดของวาล์วอยู่ในช่วงองศาประมาณ 350° - 380° แทนด้วยสัญลักษณ์ EVC เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบจะมีวาล์วไอดี 2 วาล์วต่อสูบ และหมายเลข 1 แทนด้วยกระบอกสูบที่ 1 ดังนั้นการเกิดเหตุการณ์การเปิดและปิดของวาล์วทั้งสองอาจจะมีการเลื่อมซ้อนกันเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การตั้งระยะห่างของวาล์ว เงื่อนไขการจำลองดังรูปประกอบด้วย Normal, EVF, EVF_L10, และ EVF_L20 แทนเงื่อนไขเครื่องยนต์ปกติ วาล์วไอดีผิดปกติ วาล์วไอดีผิดปกติ ภายใต้ภาระ 10 Nm และ 20 Nm ตามลำดับ สัญญาณเหตุการณ์การเปิดของวาล์วไอดีสูบที่ 1 (EVO1) จะเห็นไม่ชัดเจนนักทั้งนี้อาจเกิดจากการทำงานของกลไกอื่นร่วมด้วยจึงทำให้สัญญาณการเปิดวาล์วไอดีไม่ชัดเจนนัก ส่วนสัญญาณการปิดของวาล์วไอดีสูบที่ 1 (EVC1) จะมีแอมพลิจูดที่สูงกว่าแต่ก็ยังไม่สามารถระบุได้ชัดเจนนัก วาล์วไอดีของเครื่องยนต์ทดสอบมี 2 ตัวต่อสูบซึ่งจังหวะปิดอาจเกิดการเลื่อมซ้อนกันของเหตุการณ์ในสัญญาณได้ เนื่องจากการปรับระยะตั้งวาล์วที่อาจไม่เท่ากัน



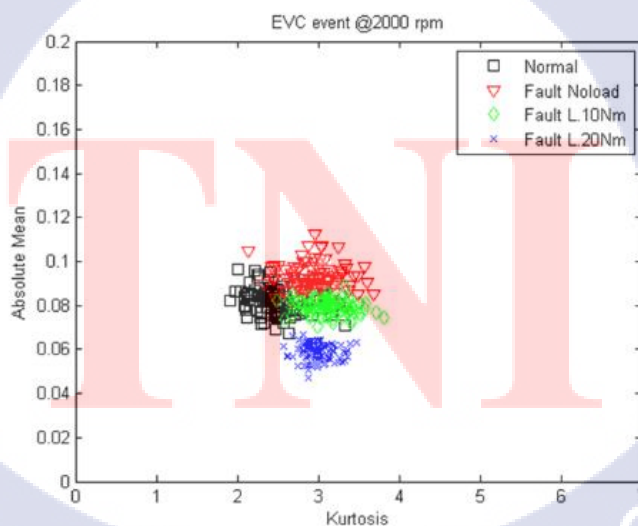
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างสัญญาณการสันสะเทือนการทำงานของวาล์วไอเสีย (EVO) ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ

การใช้เทคนิคการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่าของสัญญาณการเปิดของวาล์วไอเสียช่วงองศาหมุนเพลาคือช่วงประมาณ 105° - 135° และช่วงสัญญาณเหตุการณ์การปิดของวาล์วช่วงองศาประมาณ 350° - 380° ของสัญญาณการทำงานของวาล์วไอเสียที่เครื่องยนต์ทำงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีจะถูกระบุด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติคือ ค่าสัมบูรณ์เฉลี่ย และค่าความโด่ง สัญญาณที่บันทึกได้ประมาณ 100 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ผลการเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยและค่าความโด่งของเหตุการณ์การเปิด (EVO) และปิด (EVC) ของวาล์วไอเสียแสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.15 ตามลำดับ ค่าความโด่งของสัญญาณการเปิดของวาล์วดังรูปที่ 4.16 จะมีค่าประมาณ 1.5-5 ในทุกเงื่อนไขการจำลอง ยกเว้นกรณีวาล์วไอเสียเปิดผิดปกติภายใต้ภาระ 10 Nm จะมีค่าอยู่ประมาณ 1.5-3 ส่วนค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อวาล์วผิดปกติและมีภาระเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นแนวโน้มว่าข้อมูลมีการแยกตัวเป็นกลุ่ม แต่ยังมีการทับซ้อนของข้อมูลบางส่วน



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยและค่าความโด่งของสัญญาณการเปิดของวาล์วไอเสีย (EVO) ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง ๆ

ค่าความโด่งของสัญญาณการเปิดของวาล์วดังรูปที่ 4.17 จะมีค่าประมาณ 2-4.5 ในทุกเงื่อนไขการจำลอง ส่วนค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อวาล์วผิดปกติและมีการเพิ่มขึ้น ยกเว้นเงื่อนไขวาล์วไอเสียผิดปกติแบบไม่มีการเพิ่มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแยกตัวเป็นกลุ่มชัดเจน แต่ยังมีทับซ้อนของข้อมูลบางส่วนของเงื่อนไขการจำลอง



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยและค่าความโด่งของสัญญาณการเปิดของวาล์วไอเสีย (EVC) ขณะเครื่องยนต์ทำงานที่ 2000 รอบต่อนาทีที่เงื่อนไขต่าง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การตรวจสอบการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยสัญญาณการสันดาปเพื่อนบนโดเมนเวลาสามารถตรวจวัดกระบวนการทางกลและทางของไหลในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ได้ เช่น การเปิดปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย การทำงานของหัวฉีด เป็นต้น การศึกษานี้ได้ทำการตรวจสอบการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ 4 สูบ 16 วาล์ว 1600 cc ด้วยสัญญาณการสันดาปเพื่อนที่เงื่อนไขต่าง ๆ เช่น เครื่องยนต์ปกติ หัวฉีดสูบที่ 1 ผิดปกติด้วยการเพิ่มความต้านทานของคอยล์หัวฉีดอีก 10 และ 20 โอห์ม หัวฉีดสูบที่ 1 ไม่ทำงาน และวาล์วไอดีและไอเสียมีระยะตั้งวาล์วผิดปกติ เป็นต้น ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สัญญาณการสันดาปเพื่อนสามารถใช้วิเคราะห์กระบวนการการทำงานของเครื่องยนต์ได้แต่จะระบุเหตุการณ์ต่าง ๆ ไม่ชัดเจนนัก

5.1.2 การแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาเป็นสัญญาณบนมุมเพลาคือข้อได้เปรียบของการบันทึกสัญญาณรอบการหมุนของเพลาลูกเบี้ยวซึ่งให้สัญญาณ 1 พัลส์ต่อ 1 วัฏจักรของเครื่องยนต์ จะทำให้การระบุกระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ได้ง่ายและชัดเจนขึ้น

5.1.3 การตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติเพียงค่าเดียวจะสามารถทำนายได้บางเงื่อนไขการจำลองเท่านั้น

5.1.4 การตรวจสอบสถานะของเครื่องยนต์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติพร้อมกัน 2 ค่า เช่นค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์และค่าความโด่งจะสามารถแยกข้อมูลเป็นกลุ่ม ๆ ซึ่งทำให้ทำนายเงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ได้ง่ายขึ้น

5.1.5 การใช้กราฟคอนทัวร์ของค่าแอมพลิจูดสัมบูรณ์แสดงเงื่อนไขการจำลองความผิดปกติของหัวฉีด วาล์วไอดี และวาล์วไอเสียทำให้เห็นแนวโน้มความผิดปกติที่เกิดขึ้นในสัญญาณการสันดาปเพื่อนที่บันทึกได้ เช่น เมื่อคอยล์หัวฉีดมีความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้การทำงานของหัวฉีดเปลี่ยนไปคือ ระยะเวลาเปิดของวาล์วหัวฉีดจะช้าลงและระยะเวลาปิดของวาล์วเร็วขึ้น หรือ ความผิดปกติที่วาล์วไอดีและไอเสียเมื่อระยะตั้งวาล์วห่างเกินค่าปกติจะทำให้ระยะเวลาเปิดช้าลงและระยะเวลาปิดของวาล์วจะเร็วขึ้น เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจสอบเงื่อนไขการจำลองของเครื่องยนต์เบนซินที่สภาวะต่าง ๆ เงื่อนไขการจำลองที่ใช้ในการศึกษาอาจจะไม่ครอบคลุมการทำงานของเครื่องยนต์ทั้งหมด จึงจำเป็นที่จะต้องดำเนินการเพิ่มเติมต่อไปโดยมีรายละเอียดดังนี้

5.2.1 การพัฒนาและประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ที่นำเสนอนี้กับกระบวนการการทำงานของเครื่องยนต์อื่น ๆ ในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน ในสภาวะที่เครื่องยนต์ทำงานแบบมีและไม่มีภาระ และเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการที่นำเสนอ

5.2.2 การทดลองประยุกต์ใช้วิธีการทดลองและการวิเคราะห์นี้เพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลหรือเครื่องยนต์ชนิดอื่น ๆ ที่มีขนาดความจุอื่น ๆ

5.2.3 การทดลองประยุกต์ใช้วิธีการทดลองและการวิเคราะห์นี้เพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวหรือก๊าซธรรมชาติอัด

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] 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.
- [2] G. Ioannis et al., "Detection of fuel type on a spark ignition engine from engine vibration behaviour," *Applied Thermal Engineering*, vol. 54, pp. 171-175, February 2013.
- [3] A. Ahmad et al., "Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and petro diesel fuel blends," *Fuel*, vol. 102, pp. 414-422, July 2012.
- [4] S. Chomphan, "Vibration analysis of gasoline engine fault," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 10, no. 10, pp. 1,166-1,171, August 2013.
- [5] S. Chomphan and T. Kingrattanaset, "An analysis of sound for fault engine," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, pp. 1,005-1009, April 2014.
- [6] S. Abhishek et al., "Misfire detection in an IC engine using vibration signal and decision tree algorithms," *Measurement*, vol. 50, pp. 370-380, January 2014.
- [7] C. Zhang et al., "A feature extraction method for aircraft engine rotor vibration diagnosis," *Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, APISAT 2014*, Shanghai, China, September 24-26, 2014, pp. 1,576-1,581.
- [8] S. Vulli et al., "Time-frequency analysis of single-point engine-block vibration measurements for multiple excitation-event identification," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 321, pp. 1,129-1,143, November 2009.
- [9] Y. Cheng et al., "Identification of combustion timing based on the vibration acceleration of diesel engines," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 226, no. 11, pp. 1,495-1,506, June 2012.
- [10] M. Ashkan et al., "Piston scuffing fault and its identification in an IC engine by vibration," *Applied Acoustics Analysis*, vol. 102, pp. 40-48, January 2016.

- [11] N. Baydar and A. Ball, "Case study detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 17, no. 4, pp. 787-804, June 2003.
- [12] ประสานพงษ์ หาเรือนชัย, *งานเครื่องยนต์แก๊สโซลีน*, กรุงเทพฯ: se-de, 2548.
- [13] วัลลภ มากมี, "ช่วงยนต์," [Online]. Available: <https://vallop-automechanics.blogspot.com>. [Accessed 15 August 2016].
- [14] โตโยต้าพิธานพานิชย์, "Timing Belt," [Online]. Available: <http://phithan-toyota.com/th/>. [Accessed 15 March 2017].
- [15] Ralph-dte, "Automotive&Motorsport," [Online]. Available: <http://www.ralph-dte.net/distribuzione.html>. [Accessed 15 August 2016].
- [16] Gasthai, "อาการวาล์วเย็น," [Online]. Available: <http://www.gasthai.com/boardgas/>. [Accessed 15 March 2017].
- [17] อรรถกร เนืองไผ่, "Auutagrone," [Online]. Available: <http://auutagrone.blogspot.com/> [Accessed 15 August 2016].
- [18] นพดล เวชวิฐาน, *เครื่องยนต์หัวฉีดEFI*, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมไทย-ญี่ปุ่น, 2544.
- [19] นิรนาม, "Writer" [Online]. Available: <http://www.tpa.or.th/writer/>. [Accessed 10 ตุลาคม 2559].
- [20] พงศธร หุ่นทอง, "เพียโซอิเล็กทริก," [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/5503051611111pongsatornhun/prawati-swn-taw>. [Accessed 27 April 2017]
- [21] F. Wang and S. Duan, "Fault diagnosis of diesel engine using vibration signals," *International Conference on Internet Computing and Information Services*, ICICICS 2011, Hongkong, September 17-18, 2011, pp. 285-290.
- [22] X. Jiaxin et al., "Vibration and noise source identification methods for a diesel engine," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 181-189, September 2015.
- [23] Kruaksorn, "การทำงานของไมโครโฟน," [Online]. Available: http://www.kruaksorn.net/learning/index01_files/Page3505.htm. [Accessed 28 April 2017].

- [24] พรชัย นิเวศรังสรรค์, "การประยุกต์ใช้คูสติกอิมิชชันในงานอุตสาหกรรม," [Online]. Available: http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/TN217A_p63-66.pdf [Accessed 27 April 2017].
- [25] W. Wu et al., "Normalization and source separation of acoustic emission," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 64-65, pp. 479-497, April 2015.
- [26] T. L. Fog et al., "Exhaust valve leakage detection in large marine diesel engines" *International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, COMADEM 98, Tasmania, Australia, December 8-11, 1998, pp. 269-278.
- [27] T. L. Fog et al., "On condition monitoring of exhaust valve in marine diesel engines," *Neural Network for Signal processing*, NNSP 99 Wisconsin, USA, August 25, 1999, pp. 554-564.
- [28] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม1(ประมวลผลด้วย MINITAB), กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2545.
- [29] Mathworld, "WolframMathworld," [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/>. [Accessed 2 June 2017].
- [30] Safaribook, "Skewness," [Online]. Available: www.safaribooksonline.com. [Accessed 20 August 2016].
- [31] Deepa-enlighten, "Kurtosis," [Online]. Available: <https://www.de.sarupub.org/acceptatble-range-value-kurtosis> [Accessed 20 August 2016].
- [32] F. Justin and B. Gary, "Fault detection and diagnosis of diesel engine valve trains" *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 72-73, pp. 316-327, November 2016.
- [33] ทรงพล กลิ่นชะเอม และ วิทยา ยงเจริญ, "การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรงด้วยการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา," *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, ME-NETT 25*, จังหวัดกระบี่, 19-21 ตุลาคม 2554, ไม่ปรากฏเลขหน้า.

[34] บุศรินทร์ พันธุ์กระจับ และ ชาญณรงค์ บาลมงคล, “การศึกษาเปรียบเทียบการตรวจจับความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูงโดยใช้การแปลงเวฟเลตและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก,” *การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 7*, ECTI-CAED 2015, จังหวัดตรัง, 8–10 กรกฎาคม 2558, หน้า 602-605.

[35] Mathworks, "Morlet," [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/> [Accessed 29 April 2017].

