

การศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์

นายพรประเสริฐ พงษ์พานิช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF ENGINE VIBRATION

Mr. Pornpraseart Pongpanit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2007
Copyright of Chulalongkorn University

500057


หัวข้อวิทยานิพนธ์
โดย
สาขาวิชา
อาจารย์ที่ปรึกษา


การศึกษาการสิ้นสະเทือนของเครื่องยนต์
นายพรประเสริฐ พงษ์พานิช
วิศวกรรมเครื่องกล
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ

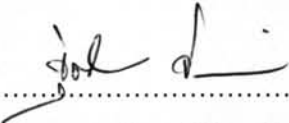
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุติมา จินตนาวัน)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทรเจริญ)

พรประเสริฐ พงษ์พานิช : การศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์. (A STUDY OF ENGINE VIBRATION) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.วิทยา ยงเจริญ, 130 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ 4 สูบแถวเรียง และเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษารูปแบบของการสั่นสะเทือนที่เป็นแบบวัตถุแข็งเกร็งเชิงเส้นของเครื่องยนต์ การสั่นของเครื่องยนต์เป็นรูปร่างการสั่นของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body mode) ที่ประกอบด้วยเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ใน 6 รูปแบบหรือ 6 ระดับขั้นเสรีนั้นคือการเคลื่อนที่เชิงเส้นใน 3 ทิศทางและการเคลื่อนที่เชิงมุมใน 3 แบบ ในความถี่ธรรมชาติของระบบคือ 2.32 Hz 2.34 Hz 7.67 Hz 7.70 Hz 14.67 Hz และ 17.14 Hz ในการศึกษาจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือการศึกษาเชิงทฤษฎีซึ่งเป็นการวิเคราะห์หิโมดัล และจากการทดลองโดยจะเป็นการทดสอบโครงสร้างจริง ที่สุดท้ายจะได้แบบจำลองต้นแบบสำหรับอธิบายการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์แบบจำลองเชิงเส้นดังกล่าวซึ่งแสดงในโดเมนความถี่คือ ฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ แบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปจำลองอัตราการส่งผ่านแรงจากเครื่องยนต์ไปฐานแท่นเครื่องได้และในการทดสอบโครงสร้างทางกล สามารถนำไปใช้ประมาณค่าแรงที่กระทำต่อฐานแท่นเครื่องโดยการวัดค่าการกระจัดและความเร็วที่เกิดขึ้นบนแท่นเครื่อง

ผลที่ได้จากการทดสอบและแนวทางเชิงทฤษฎีพบว่ามีความใกล้เคียงกันแม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนจากความถี่ต่ำทำให้ได้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อนไปบ้าง จากการศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ช่วยให้สามารถวิเคราะห์เพื่อจะทำความเข้าใจการสั่นสะเทือนและสามารถจำลองการตอบสนองจากการสมมุติแรงจากภายนอก จากแบบจำลองสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาในการออกแบบเครื่องยนต์

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4670702021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: MODAL TESTING / TRANSMISSIBILITY OF FORCES/
FREQUENCY RESPONSE FUNCTION
PORNPRASEART PONGPANIT: A STUDY OF ENGINE VIBRATION
THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.WITHAYA YOUNGCHARON, Ph.D.,
130 pp.

The objective of this thesis is to study of vibration in four cylinder in-line engine and presents a mathematical model of vibration engine with linear rigid body model. This model has six degrees of freedom or six rigid body modes, three translation modes and three rotational modes. The natural frequencies of the system is 2.32 Hz 2.34 Hz 7.67 Hz 7.70 Hz 14.67 Hz and 17.14 Hz The study process is separated to two sections, theoretical section is modal analysis and experimental section is a impact testing on real structure. Finally, the model maybe evaluated to explain the vibration engine. This model of linear system is in the frequency domain, called Frequency Response Functions (FRFs). The model of engine vibration can predict the force transmissibility from engine to engines base and the structural testing can estimate force from measurement of displacement and velocity at the engine base.

As the results, the estimated model can predict the response at satisfied level and experimental result comparison are nearly the same, although it has noise on low frequency range. A study of engine vibration can help analysis to understand and simulated the response to external force. The mathematic model can improve design of the engine.

Department Mechanical engineer

Student's signature.....

Pornprasert Pongpanit

Field of study Mechanical engineer

Advisor's signature.....

Withaya Youngcharon

Academic year 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนคำปรึกษาที่มีคุณค่ายิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และการทำงานในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิติมา จินตนาวัน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทรเจริญ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ ครูและช่างเทคนิค รวมถึงบุคลากรธุรการประจำภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยอำนวยความสะดวก ตลอดจนการทำวิจัย ตลอดจนเพื่อนๆ และน้องๆปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์การคำนวณทุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่รักยิ่งที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา และคุณค่าอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็น กตัญญูตราบุปาแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.1 การศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์.....	3
2.1.2 การสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ (Vibration in engine).....	4
2.1.3 คุณสมบัติของวัสดุแท่นเครื่อง.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2.1 ระบบรองรับแท่นเครื่องของรถยนต์ (Automotive vehicle engine .. mounting system)	7
2.2.2 การวิเคราะห์และทดสอบโมดัล (Modal analysis and testing).....	9
บทที่ 3 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ 6 ระดับขั้นเสรี.....	19
3.1 ข้อสมมติฐานของแบบจำลอง.....	19
3.1.1 ข้อสมมติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	19
3.1.2 สมมติฐาน (basic assumption) ของการวิเคราะห์และทดสอบโมดัล..	19

บทที่	หน้า
3.2 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ 6 ระดับขั้นเสรี.....	20
3.2.1 แบบจำลองทางกายภาพของระบบสั่นสะเทือน.....	20
3.2.2 การหาสมการบังคับ (Derivation of governing equation).....	24
3.3 การหาคุณสมบัติลักษณะทางพลศาสตร์ (The dynamic properties).....	37
ของระบบการสั่นสะเทือน	
3.3.1 การหาค่าคุณสมบัติของแท่นเครื่อง.....	37
3.3.2 การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมวลของวัสดุทดสอบจากการทดลอง.....	42
3.3.3 สรุปผลการหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์.....	45
(The dynamic properties) ของระบบการสั่นสะเทือน	
บทที่ 4 การทดสอบโมดัล (Modal testing) ในระบบการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์.....	51
4.1 วิธีการทดสอบและตั้งค่า.....	51
4.1.1 อุปกรณ์ในการทดสอบ (Measuring equipment).....	51
4.1.2 จุดติดตั้งการทดสอบ (The measurement point).....	53
4.1.3 วิธีการทดสอบ.....	55
4.2 การหาค่าตัวแปรโมดัล (Modal parameter estimation method)	57
4.3 การหาแรงที่กระทำบนจุดรองรับเครื่องยนต์.....	58
บทที่ 5 การวิเคราะห์ข้อมูลและการประเมินค่า.....	59
5.1 การสั่นสะเทือนแบบอิสระ.....	59
5.1.1 การคำนวณจากทฤษฎี.....	59
5.1.2 การทดสอบโมดัล.....	62
5.2 ผลการทดสอบโมดัลเพื่อพิจารณารูปปร่างการสั่น.....	63
5.2.1 การวิเคราะห์ระบบการสั่นสะเทือน (System analysis).....	62
5.3 การจำลองเพื่อหาค่าอัตราการส่งผ่านแรงของระบบรองรับเครื่องยนต์.....	71
5.4 แรงที่กระทำบนจุดรองรับเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	75
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	79
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	79

บทที่	หน้า
6.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	68
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์.....	84
ภาคผนวก ข กราฟแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติแท่นเครื่อง.....	116
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบโดยวิธี Impact excitation.....	120
ภาคผนวก ง การตรวจสอบโปรแกรมที่เขียนจากภาษา C++.....	126
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	

สารบัญตาราง

ญ

บทที่	หน้า
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเฉพาะของ Impact hammer.....	52
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเฉพาะของ Accelerometers Type 4508 B 001.....	53
ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติเชิงทฤษฎีของระบบ.....	60
ตารางที่ 5.2 ผลจากการทดสอบ.....	62
ตารางที่ 5.3 ผลเปรียบเทียบของค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณและ.....	63
การทดสอบโมดัล	
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบโดยวิธี Impact test ในการเคาะที่ตำแหน่ง 1.....	64
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบโดยวิธี Impact test ในการเคาะที่ตำแหน่ง 2.....	64
ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบโดยวิธี Impact test ในการเคาะที่ตำแหน่ง 3.....	64
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบโดยวิธี Impact test ในการเคาะที่ตำแหน่ง 3.....	64
ตารางที่ 5.8 ผลการคำนวณอัตราการส่งผ่านแรงจากแรงกระตุ้นที่มีความถี่ต่างๆ.....	74

บทที่	หน้า
รูปที่ 2.1 คุณสมบัติในอุดมคติของค่าความแข็งของระบบรองรับแทนเครื่อง.....	6
รูปที่ 2.2 Mechanical model ของระบบโดยใช้แผ่นยาง.....	6
รูปที่ 2.3 Dynamic Stiffness ของระบบติดตั้งโดยใช้แผ่นยาง.....	7
รูปที่ 2.4 การส่งผ่านจากวัตถุมายังฐานรองรับ.....	8
รูปที่ 2.5 Absolute transmissibility ที่ Frequency ratio ต่างๆ.....	9
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนเชิงทฤษฎีของการวิเคราะห์โหมดัล.....	10
รูปที่ 2.7 (ก) การทดสอบวิเคราะห์สัญญาณ.....	17
(ข) การทดสอบวิเคราะห์ระบบการสั่นสะเทือน	
รูปที่ 2.8 แบบจำลองระดับความเร็วการสั่นเท่ากับ 1 และการตอบสนองทางความถี่.....	16
รูปที่ 2.9 แบบจำลองแทนระบบทางกลจริง และการตอบสนองทางความถี่ของระบบ.....	18
รูปที่ 2.10 รูปแบบ ต่าง ๆ ของฟังก์ชันการตอบสนองความถี่.....	17
รูปที่ 2.11 โครงสร้างตัวอย่างสำหรับการทดสอบโหมดัลเพื่อวิเคราะห์ระบบ.....	18
รูปที่ 2.12 (ก) รูปร่างการสั่นของคานาที่ได้จากโหมดการสั่นความถี่ธรรมชาติ 10 Hz.....	18
(ข) รูปร่างการสั่นของคานาที่ได้จากโหมดการสั่นความถี่ธรรมชาติ 60 Hz	
(ค) รูปร่างการสั่นของคานาที่ได้จากโหมดการสั่นความถี่ธรรมชาติ 150 Hz	
รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางกลที่ทำการทดสอบ.....	20
รูปที่ 3.2 แบบจำลองโครงสร้างทางกลที่ทำการทดสอบ.....	20
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของการสั่นบนเครื่องยนต์.....	21
รูปที่ 3.4 แบบจำลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ 6 ระดับความเร็วในการสั่น.....	21
รูปที่ 3.5 แบบจำลองวัตถุแข็งเกร็งของตัวเครื่องยนต์ที่ศึกษา.....	22
รูปที่ 3.6 กรอบอ้างอิงเฉื่อยและแกนของเครื่องยนต์.....	25
รูปที่ 3.7 การเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์แบบ 6 ระดับขั้นเสรี.....	25
รูปที่ 3.8 แผนภาพลักษณะแรงที่กระทำบนแบบจำลองของเครื่องยนต์.....	26
รูปที่ 3.9 ยางแทนเครื่องที่ใช้การทดสอบ ก) แทนเครื่องที่ 1 ข) แทนเครื่องที่ 2.....	37
รูปที่ 3.10 แบบจำลองที่ใช้ในการหาคคุณสมบัติแทนเครื่อง.....	38
รูปที่ 3.11 ชุดติดตั้งสำหรับทดสอบ.....	39
รูปที่ 3.12 การติดตั้งตัวยังสัญญาณความเร่ง.....	39
รูปที่ 3.13 ผลการทดสอบยางแทนเครื่องที่ 1 ของ Acc1 ของการเคาะชุดทดสอบที่ค p.....	41

บทที่	หน้า
รูปที่ 3.14 แบบจำลองการทดสอบเพื่อหาค่าความเฉื่อยเชิงมวลแบบ Compound pendulum	42
รูปที่ 3.15 (ก) การหาค่าความเฉื่อยเชิงมวลรอบแกน Y.....	43
(ข) การหาค่าความเฉื่อยเชิงมวลรอบแกน X	
รูปที่ 3.16 แบบจำลองการทดสอบเพื่อหาค่าความเฉื่อยเชิงมวลแบบ Torsional pendulum..	44
รูปที่ 3.17 (ก) การแขวนของเครื่องยนต์.....	45
(ข) การแขวนบนวัสดุที่รู้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมวล	
รูปที่ 3.18 (ก) ภาพด้านหน้าชุดทดสอบ.....	46
รูปที่ 3.19 (ข) ภาพด้านข้างชุดทดสอบ.....	47
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดง Impact test flow diagram.....	51
รูปที่ 4.2 Impact hammer สำหรับการทดสอบของ ENDEVCO Model 2303.....	52
รูปที่ 4.3 Accelerometer ของ Brüel & Kjær.....	53
รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ความถี่แบบ FFT.....	54
รูปที่ 4.5 เครื่องวิเคราะห์ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ Model 3560D.....	54
รูปที่ 4.6 ตำแหน่งที่ควรติดตั้งของ Accelerometer บนเครื่องยนต์.....	55
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งติดตั้งของ Accelerometer บนเครื่องยนต์สำหรับทดสอบใหม่.....	55
รูปที่ 4.8 การทดสอบโมดัลโดยการใช้ Impact hammer.....	56
รูปที่ 4.9 การใช้ Impact hammer เคาะในตำแหน่งต่างๆบนเครื่องยนต์.....	56
รูปที่ 4.8 ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นเชิงทฤษฎีของเครื่องยนต์.....	61
(ก) อัตราส่วนรูปร่างการสั่นแบบเชิงเส้น	
(ข) อัตราส่วนรูปร่างการสั่นแบบเชิงมุม	
รูปที่ 5.2 ฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ของเครื่องยนต์จากการเคาะตำแหน่ง 2.....	66
รูปที่ 5.3 ฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ของเครื่องยนต์จากการเคาะตำแหน่ง 3.....	66
รูปที่ 5.4 ฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ของเครื่องยนต์จากการเคาะตำแหน่ง 4.....	67
รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองที่ Acc # 1และ2จากการเคาะตำแหน่งที่ 2.....	67
รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองที่ Acc # 5และ6จากการเคาะตำแหน่งที่ 3.....	68
รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองที่ Acc # 3และ4จากการเคาะตำแหน่งที่ 4.....	68
รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบจากการเคาะตำแหน่งที่ 3 (ก) Acc5 และ Acc6.....	68
(ข) Acc3 และ Acc4	

บทที่	หน้า
รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบจากการเคาะตำแหน่งที่ 2 ที่ Acc1 และ Acc2.....	70
รูปที่ 5.10 ลักษณะของแรงที่กระทำต่อจตุรรองรับ 1.....	71
ที่ทิศทางขนานกับแกนหลักของเครื่องยนต์ (ก) ในแกน X	
รูปที่ 5.10 . (ข) ในแกน Y (ค) ในแกน Z.....	72
รูปที่ 5.11 กราฟอัตราส่วนการส่งผ่านแรงกับความถี่ของแรงที่กระตุ้น.....	73
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ของแรงที่ส่งผ่านไปยังจตุรรองรับกับรอบการทำงานของเครื่องยนต์.....	75
รูปที่ 5.13 ลักษณะแรงที่กระทำบนเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบประมาณ 550 รอบต่อนาที.....	76
รูปที่ 5.14 ลักษณะแรงที่กระทำบนเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบประมาณ 700 รอบต่อนาที.....	76
รูปที่ 5.15 ลักษณะแรงที่กระทำบนเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบประมาณ 900 รอบต่อนาที....	76
รูปที่ 5.16 ลักษณะแรงที่กระทำบนเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบประมาณ 1050 รอบต่อนาที...	77
รูปที่ ก.1 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมาใช้แก้ปัญหา.....	84
รูปที่ ก.2 รูปแบบการใช้ Simulink ในการแก้ปัญหา.....	113
รูปที่ ก.3 กราฟ FRFs ของผลตอบสนอง Y ที่ถูกกระตุ้นโดยแกน Y.....	114
รูปที่ ก.4 กราฟ FRFs ของผลตอบสนอง Z ที่ถูกกระตุ้นโดยแกน Z.....	114
รูปที่ ก.6 กราฟ FRFs ของผลตอบสนอง Roll ที่ถูกกระตุ้นโดยรอบแกน M_x	115
รูปที่ ก.7 กราฟ FRFs ของผลตอบสนอง Pitch ที่ถูกกระตุ้นโดยรอบแกน M_y	105
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบแท่นเครื่องที่ 1 ที่ทดสอบโดยการเคาะขนานกับแกน p.....	116
ของแท่นเครื่อง	
รูปที่ ข.2 ผลการทดสอบแท่นเครื่องที่ 1 ที่ทดสอบโดยการเคาะขนานกับ แกน q.....	116
ของแท่นเครื่อง	
รูปที่ ข.3 ผลการทดสอบแท่นเครื่องที่ 1 ที่ทดสอบโดยการเคาะขนานกับ แกน r.....	117
ของแท่นเครื่อง	
รูปที่ ข.4 ผลการทดสอบแท่นเครื่องที่ 2 ที่ทดสอบโดยการเคาะขนานกับ แกน p.....	117
ของแท่นเครื่อง	
รูปที่ ข.5 ผลการทดสอบแท่นเครื่องที่ 2 ที่ทดสอบโดยการเคาะขนานกับ แกน q.....	117
ของแท่นเครื่อง	
รูปที่ ข.6 ผลการทดสอบแท่นเครื่องที่ 2 ที่ทดสอบโดยการเคาะขนานกับ แกน r.....	118
ของแท่นเครื่อง	
รูปที่ ข.7 ผลการทดสอบแท่นเครื่องที่ 3 ที่ทดสอบโดยการเคาะขนานกับ แกน p.....	118

บทที่	หน้า
ของแท่นเครื่อง	
รูปที่ ข.8 ผลการทดสอบแท่นเครื่องที่ 3 ที่ทดสอบโดยการเคาะขนานกับ แกน q.....	118
ของแท่นเครื่อง	
รูปที่ ข.9 ผลการทดสอบแท่นเครื่องที่ 3 ที่ทดสอบโดยการเคาะขนานกับ แกน r.....	119
ของแท่นเครื่อง	
รูปที่ ค.1 ค่า Magnitude จากการเคาะบนเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งที่ 1	
(ก) จุดวัด 1และ2.....	120
(ข) จุดวัด 3และ4.....	120
(ค) จุดวัด 5และ6.....	121
รูปที่ ค.2 ค่าจินตภาพจากการเคาะบนเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งที่ 1	
(ก) จุดวัดที่ 1และ2.....	121
(ข) จุดวัดที่ 3และ4.....	121
(ค) จุดวัดที่ 5และ6.....	122
รูปที่ ค.3 ค่า Magnitude จากการเคาะบนเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งที่ 2	
(ก) จุดวัดที่ 1และ2.....	122
(ข) จุดวัดที่ 3และ4.....	122
(ค) จุดวัดที่ 5และ6.....	123
รูปที่ ค.4 ค่าจินตภาพจากการเคาะบนเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งที่ 2	
(ก) จุดวัดที่ 1และ2.....	123
(ข) จุดวัดที่ 3และ4.....	123
(ค) จุดวัดที่ 5และ6.....	124
รูปที่ ค.5 ค่าจินตภาพจากการเคาะบนเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งที่ 2.....	124
รูปที่ ค.6 ค่าจินตภาพจากการเคาะบนเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งที่ 3.....	125
รูปที่ ค.7 ค่าจินตภาพจากการเคาะบนเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งที่ 4.....	125
รูปที่ ง.1 แผนผังแรงอิสระของปัญหา.....	126